



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**KEPLER.
ENTRE LAS ELIPSES Y LA MÚSICA DE LAS
ESFERAS. UN ANÁLISIS DE SUS OBRAS.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**F I S I C A
P R E S E N T A:**

ANA SOFÍA VIGNAU LORIA



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ ERNESTO MARQUINA FÁBREGA
CD. MX. 2023**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A mis padres, Silvia y Belisario, con especial cariño y admiración. Gracias por ser mi ejemplo a seguir y el mayor apoyo en cada paso de mi formación académica y de mi vida, gracias por siempre impulsarme a llegar más lejos y gracias por todo el amor incondicional que me dan. El mayor orgullo de mi vida es ser su hija.

A mis hermanos, María y Rodrigo, por llevarme y recogerme de la universidad, por aguantarme en las buenas y en las malas, y por ayudarme a abrir mis horizontes. No les digo suficiente, lo mucho que los quiero y los admiro.

A Pepe Marquina, por todos sus consejos y su paciencia infinita en este largo proceso, por llegar conmigo hasta el final, por enseñarme una nueva cara de la física y por ser una inspiración constante, en todos los aspectos de mi vida. Agradezco a la vida que tuve la fortuna de ser tu alumna y el orgullo de ser la última.

A mis todos mis amigos y compañeros, por siempre estar ahí y por hacer de mi tiempo en la facultad algo extraordinario, sin ustedes no hubiera sobrevivido. A Ana la discreta, Luisín, Abel, Maureen, Rodrigo Princess, Luis Medina, Pancho, Laura y especialmente a Luis Velázquez, sabes que sin ti nunca hubiera pasado laboratorio de electrónica. Sin duda fueron lo mejor de mi paso por la facultad.

A mis directoras, coordinadoras y amigos del Asunción, por ser siempre un gran apoyo e inspiración y porque gran parte de este tiempo estuvieron más preocupados y apurados por mi titulación, que yo misma. Gracias enseñarme todos los días y por compartir esta hermosa profesión con ustedes.

A todos mis alumnos, que aunque planear sus clases y calificar sus trabajos retrasó mucho la elaboración de este trabajo, me ayudaron a descubrir mi vocación, me enseñaron a disfrutar el momento y me recordaron lo hermoso que es aprender cosas nuevas. Gracias por siempre preocuparse por mi tesis.

Y a todos aquellos que participaron en mi formación académica y personal, y a los que lo siguen haciendo. Muchas gracias.

*Todo el conocimiento es hermoso y válido en sí mismo,
aunque sea inútil.*

Para Pepe Marquina

Índice

Introducción	4
1. Biografías	11
1.1 Infancia y primeros estudios	
1.2 Trabajo con Tycho Brahe y vida en Praga	
1.3 Últimos años	
2. <i>Mysterium Cosmographicum</i>	32
2.1 Prefacio, capítulos 1 y 2	
2.2 Capítulos del 3 al 10	
2.3 Capítulos del 11 al 19	
2.4 Capítulos del 20 al 23 y conclusión	
3. <i>Astronomia Nova</i>	55
3.1 Introducción	
3.2 Primera Parte	
3.3 Segunda Parte	
3.4 Tercera Parte	
3.5 Cuarta Parte	
3.6 Quinta Parte	
4. <i>Harmonices Mundi</i>	88
4.1 Libro I	
4.2 Libro II	
4.3 Libro III	
4.4 Libro IV	
4.5 Libro V	
Discusión	108
Referencias	116

Introducción

“In looking up, I look down.”¹

Todos los días uno puede ver al Sol salir por el este y meterse por el oeste. Sería fácil convencer a un niño pequeño de que efectivamente es el Sol el que se mueve, al final de cuentas es lo que vemos todos los días, y a menos de que te encuentres mal, nunca sentimos que la Tierra se mueve. De manera natural decimos que el Sol sale y se mete, indicando un movimiento. Es por esto que los primeros mapas celestes ponían a la Tierra como el centro del Universo y al Sol girando a su alrededor.

Al observar el movimiento de las estrellas, y específicamente de los planetas, el análisis se empieza a complicar. A diferencia del Sol y la Luna, que su recorrido es casi igual todos los días, de manera que se convierte en un movimiento predecible, los planetas no. Estos tienen el curioso fenómeno de la retrogradación, el cual es un avance en el sentido contrario a la dirección hacia la cual se movían días antes, lo cual provoca que se asemeje a una trayectoria tipo espiral.

A lo largo de la historia han sido muchas las personas que han estudiado el movimiento de las estrellas y de los planetas, desde la visión de la filosofía natural, la astrología o la astronomía, el cielo siempre ha sido una parte importante en la vida de los humanos. El trabajo que a continuación se presenta es un análisis, de los originales, de la parte más importante de las obras del científico Johannes Kepler (1571 – 1630), científico alemán que dedicó su vida a estudiar el cielo y a buscar entender los secretos y las armonías del cosmos.

El objetivo central de este trabajo es analizar, de los originales, la parte más importante de la obra de Kepler. La motivación para su elaboración surgió después de conocer un poco sobre la difícil vida del científico; para hacer un vínculo entre sus experiencias personales y sus trabajos científicos. Lamentablemente el canon actual Kepleriano reduce a este gran personaje a tres leyes planetarias, pero Kepler es mucho más de lo que nos dice la teoría, es por eso que el primer objetivo de esta obra es el análisis de las obras originales.

La vida de Kepler está llena de eventos desafortunados, de coincidencias providenciales y de historias recurrentes, de las cuales afortunadamente se tienen registros, muchos escritos por él mismo debido a la manía que tuvo de contar todos los detalles de su vida en cartas y horóscopos. Por su parte, sus obras científicas son únicas, porque además de tener sus hipótesis y demostraciones, Kepler también narra los procesos, errores y ocurrencias que lo llevaron a plantear sus ideas, de manera que al leer sus planteamientos científicos, uno también puede leer, e intentar entender, lo que pasaba por su mente.

¹ Johannes Kepler, *Astronomia Nova*, trad. William H. Donahue (Santa Fe: Green Lion Press, 2015), 15.

Durante la elaboración de este trabajo tuve la oportunidad de comenzar a laborar como docente de física en un colegio de ciencias y humanidades, experiencia que aunque no cambió este trabajo de investigación, sí expandió el objetivo. Dando clases me di cuenta de que, tristemente, gran parte de los alumnos de escolaridad básica y media superior tienen muy poco interés por la ciencia, y en especial por la física, esto debido a que durante su trayectoria escolar la materia siempre es presentada como una materia sistemática y metódica, en la cual uno tiene que seguir unos pasos y utilizar unas fórmulas para resolver problemas; además de la aversión que la mayoría de los alumnos tiene hacia las matemáticas. Esto hace que únicamente los alumnos que buscan un futuro en la ciencia o en la ingeniería, le vean una utilidad genuina a la materia.

Es por esto que durante la elaboración de este trabajo surgió un segundo objetivo complementario, con un enfoque más pedagógico más que físico, pero que se basa en que para cambiar la forma en que se estudia la física, y lograr captar el interés de más alumnos, es necesario mostrar una cara más humana de la ciencia, mostrar a los científicos como personas menos rígidas y más reales, para que tal vez así más jóvenes puedan ver a la ciencia como una posibilidad real en su vida, y que de paso les sea más fácil recordar las aportaciones que cada científico hizo. En este sentido, Kepler es un gran ejemplo para poder lograr ver una cara más humana de la ciencia; cómo se puede tener una vida complicada, y aun así poder dejar un legado en el mundo y en la ciencia.

Es curioso como en las ciencias sociales es muy común que cuando se estudia una teoría, también se presenta la vida del pensador que la desarrolló; en las ciencias naturales, esto no sucede tanto. Efectivamente saber la historia personal de un filósofo, sociólogo o psicólogo, le da más riqueza al pensamiento y puede afectar la forma en que éste se estudia. Y aunque en las ciencias como la biología, la química o la física, el saber la vida de un científico no cambia el argumento o la percepción de la teoría, no deja de ser algo valioso y digno de conocer.

La vida personal de Kepler no sólo es reflejada en el desarrollo de su trabajo y de sus obras, sino que también es el ejemplo perfecto de que no es totalmente necesario seguir el método científico para lograr hacer ciencia, o más bien, que hay muchos métodos para hacer ciencia.

Al leer las principales obras de Kepler, uno puede observar los diferentes procesos que utilizó para llegar a sus resultados, aunque a veces fueran incorrectos. En algunas ocasiones hace un profundo análisis de los datos antes de proponer una hipótesis, en otras va probando todos los datos hasta que uno se apegaba a la hipótesis que previamente había propuesto. Además de que Kepler tiene la capacidad de atacar el problema desde diferentes perspectivas y tiene la madurez de abandonar una perspectiva cuando esta ya no le funciona o no le es conveniente para su análisis; a veces su acercamiento es desde la geometría o la numerología, otras veces es desde la física, o hasta desde la metafísica, según le convenga.

Es por eso que, a pesar de que el objetivo principal de este trabajo es el análisis de sus obras científicas más importantes, también se busca hacer una comparación entre la vida personal y la

vida científica de Kepler, para reconocer cómo fue que una afectó a la otra, mostrar una cara más humana de la ciencia e impulsar a que cualquier persona puede hacer ciencia.

El primer hombre occidental del que se tiene registro que analizó los cielos es Aristóteles. Él dividió al Universo en dos esferas, una infra-lunar, donde se encuentra la Tierra y se permite el cambio, y otra supra-lunar donde existen otras 55 esferas que rotan, pero nada cambia en ellas (Bryant, 1920).

Más adelante vino Hipócrito creando el término 'ecuante' para referirse a un punto cerca de la Tierra, el cual es el verdadero centro de la órbita del Sol. De igual manera comienza a utilizar el 'deferente' y los 'epiciclos' para explicar los movimientos de los planetas (Bryant, 1920).

A pesar de estos personajes, el máximo expositor del sistema geocéntrico es Ptolomeo, que también utilizó el ecuante, el deferente y los epiciclos. Él y su escuela expandieron las observaciones hasta crear un mapa de todos los cuerpos celestes y sus movimientos: *el Almagesto* (Bryant, 1920).

Después de Ptolomeo, tuvieron que pasar muchos años para que llegara Nicolás Copérnico (1473 – 1543) con su idea de poner al Sol en el centro del Universo y de tomar a la Tierra como un planeta más que gira en torno a él. Con esta proposición comenzó un periodo de grandes descubrimientos científicos, al cual se va a conocer como la 'Revolución Copernicana'. Evidentemente esta hipótesis y el trabajo de Copérnico da para mucho análisis, pero eso no es el objetivo de este trabajo, de manera que no nos centraremos en eso (Balchin, 2014).

Precisamente el periodo de la 'Revolución Copernicana' también es la época de la aparición y el florecimiento de grandes personajes como Shakespeare en Inglaterra, Rembrandt en Holanda, Velázquez y Cervantes en España, Descartes en Francia y Schütz en Alemania. Europa estaba en medio de un auge cultural, el cual después fue reflejado en las ciencias, especialmente en la astronomía. Es justo en esta época que el mundo occidental vivió una serie de cambios, de revoluciones en todos los ámbitos: en el arte, la política, la arquitectura, se descubrieron nuevos territorios y culturas, y el intercambio de conocimiento fue muy enriquecedor (Baumgardt, 1951).

Ciertamente ningún modelo astronómico es perfecto, ni siquiera el actual, pero cada vez son más precisos. El modelo de Copérnico trajo mucha controversia y muchas dudas, algunas debido a que la mayoría de sus datos no eran correctos, pero eso no importó para que poco a poco se fuera enseñando en algunas universidades y transmitiendo a las nuevas generaciones. Al final, Copérnico abrió las puertas a una forma diferente de pensar (Bryant, 1920).

Después de que Copérnico planteara su modelo astronómico heliocentrista, la astronomía sufrió una separación entre los astrónomos que aceptaban este modelo y quienes seguían viendo a la Tierra como el centro del Universo. Aun así, la astronomía se seguía construyendo de la misma

manera: el astrónomo tomaba un modelo como base, y haciendo observaciones, cambiaba el número de epiciclos y deferentes, según su análisis.

Todo cambió con Tycho Brahe (1546 – 1601), no solo porque sus observaciones eran claramente superiores a las del resto de los astrónomos, sino porque su modelo, al combinar elementos geocentristas y heliocentristas, puso sobre la mesa la opción de que las observaciones pueden ser acomodadas para encajar con el modelo de tu preferencia, sin importar cuál es el verdadero.

Y así es como surge el personaje de nuestro interés: Johannes Kepler, espíritu libre, fiel seguidor de Copérnico, eventualmente aprendiz de Tycho y el hombre que fue capaz de refutar dos de los principios de la astronomía, considerados en todos los modelos: los círculos perfectos y la velocidad uniforme. Además Kepler deja de tratar a la astronomía como una ciencia puramente geométrica y deductiva donde se acomodan observaciones a modelos, y por primera vez busca encontrar las razones físicas a los modelos y a las observaciones (Koestler, 1985).

Como eran la mayor parte de los científicos de la época, Kepler también era un hombre muy religioso, es por eso de que a pesar de que sus ideas y enfoque cambiaron con el tiempo, algo que siempre se mantuvo constante fue su esfuerzo por entender a Dios. Y así fue como Kepler descubrió en la astronomía la clave para acercarse a Dios, y en a las matemáticas la herramienta para leer la mente del creador (Koestler, 1985).

Durante toda su vida, Kepler se enfocó en estudiar los cielos con el objetivo de entender por qué Dios creó al Universo de esa forma; a sus ojos el cosmos es demasiado perfecto, de manera que su estructura no podía ser una casualidad. Debía de haber una razón detrás del número de planetas, de las distancias entre ellos, sus distancias al Sol y sus periodos de rotación. Estos estudios los reflejó en tres grandes libros: *Mysterium Cosmographicum* (1596), *Astronomia Nova* (1609) y *Harmonices Mundi* (1619).

El trabajo a continuación está dividido en cuatro capítulos: el primero de ellos es diferente del resto ya que trata sobre la vida de Kepler, haciendo énfasis en la situación personal que lo rodeaba mientras escribía sus obras más importantes. En lo personal, creo que éste capítulo es el que tiene mayor peso en el trabajo porque sirve como base que sostiene a los demás capítulos.

El segundo capítulo es una descripción de su primera obra, el *Mysterium Cosmographicum*. Este es el libro en donde expone que la razón del número de planetas (que en esa época únicamente se sabía de la existencia de seis) y la distancia entre ellos es debido a los cinco sólidos regulares. Con esta idea como base, Kepler tenía la intención de construir todo un proyecto cosmológico, pero afortunadamente para la ciencia, y lamentablemente para Kepler, éste abandonó la idea cuando comenzó a trabajar para Tycho Brahe, aunque nunca la dejó del todo.

Varios años después vino *Astronomia Nova*, la obra más importante de Kepler para la ciencia y el enfoque del tercer capítulo de este trabajo en donde se hace una descripción de la obra. Este

libro, junto con *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Nicolás Copérnico y *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton, es considerado como uno de los libros más importantes de la 'Revolución Copernicana'. Cuando Kepler escribió este libro, nunca se imaginó que su libro *Astronomia Nova* iba a dar pie a una nueva forma de hacer astronomía.

Es en esta obra que Kepler deja de tratar a la astronomía como una ciencia geométrica y pasa a estudiarla como una ciencia física, siempre confiando en los datos de Tycho. Evidentemente esto no fue fácil, e irónicamente Kepler tuvo que usar a la geometría para encontrar las distancias reales entre los cuerpos celestes y separar a las observaciones del observador; es decir, quitar a la Tierra como punto de referencia y hacer independientes los datos, para así poder darles una explicación física y no geométrica.

“El objetivo de Kepler y que estuvo a punto de lograr, era juntar las tres [doctrinas] (la teoría física, el modelo geométrico y el aparato predictivo) en una única teoría integral: la interacción entre las fuerzas físicas y los poderes que producen la órbita elíptica, que, junto con la ‘segunda ley’ (las áreas barridas son proporcionales al tiempo), predicen la posición del planeta con una precisión perfecta. Debe de ser cierto, porque es perfecto.”²

En esta obra Kepler logra romper con los dos dogmas en los que se basaba la astronomía antigua, la astronomía Copernicana y todo lo que había aprendido de Tycho. Vaciando al centro del Universo, poniendo a la órbita de Marte en el mismo plano que la órbita de la Tierra y eliminando el movimiento circular uniforme, Kepler fue capaz de describir a la órbita de Marte con una sola elipse, y eventualmente colocar al Sol en uno de los focos, haciéndolo responsable del movimiento no uniforme de los planetas.

“Un día se ‘despertó de un sueño y vio una nueva luz’ cuando de repente se dio cuenta que los planetas no rotaban en círculos perfectos.”³

El último capítulo de éste trabajo es la descripción del *Harmonices Mundi*, la última gran obra de Kepler en donde por fin encuentra lo que estuvo buscando toda su vida: una relación entre los planetas, sus distancias al Sol y sus periodos. Además de esta armonía, en su búsqueda y análisis de los planetas Kepler también encuentra la música de las esferas y la satisfacción de, por fin, leer la mente del creador.

² Kepler, *Harmonices Mundi*, XXIII.

- “Kepler’s goal, which he very nearly attained, was to intertwine the three (the physical theory, the geometrical model and the predictive apparatus) into a single comprehensive theory: the interaction of physical forces and powers produces the elliptical orbit, which, together with the ‘second law’ (areas swept out are proportional to the time), predicts the planet’s position with perfect accuracy. It must be true, because it is perfect.”

³ Jon Balchin, *Quantum Leaps: 100 scientists who changed the world* (Londres: Arcturus Publishing Limited, 2014), 93.

- “One day he ‘awoke from sleep and saw a new light break’ as suddenly he realised that the planets did not rotate in perfect circles at all.”

Esta es la obra magna de Kepler, no necesariamente de la que más estuvo orgulloso, ni la más completa científicamente, pero es la obra donde logra juntar todas sus ideas geométricas, astrológicas, metafísicas y físicas. En un mismo libro podemos encontrar a los sólidos perfectos, la música de las esferas, la armonía de los planetas y la rigurosidad con la que se debe de hacer astronomía.

Los descubrimientos científicos de Kepler fueron fundamentales para que la astronomía siguiera avanzando, y aunque durante su vida nunca se le reconoció, en realidad el personaje de Kepler es mucho más que sus obras. Desde su nacimiento la vida siempre le puso varios obstáculos; siendo sietemesino su salud nunca fue la mejor, cuando todavía era un niño sus padres lo abandonaron, y a pesar de que quedó bajo el cuidado de sus abuelos, estos siempre lo rechazaron (Koestler, 1985).

Aun así, debido a su agudeza e inteligencia pudo destacar en la escuela, y gracias al sistema protestante, pudo llegar a la universidad donde estudió la carrera de teología, pero las vueltas de la vida lo llevaron a ser profesor de matemáticas en la escuela de Graz. Fue durante esta época que el joven Kepler, con ganas de comerse al mundo, escribe su obra del *Mysterium Cosmographicum* (Koestler, 1985).

Más adelante buscó comprobar su loca teoría con los mejores datos de la época y salió en búsqueda del gran astrónomo Danés y matemático del Imperio Romano de Rodolfo II, Tycho Brahe, la figura más importante en la vida científica de Kepler. A pesar de que su relación fue corta y tormentosa, Tycho fue fundamental para que Kepler adoptara el formalismo necesario para desarrollar las leyes planetarias.

Otras cosas que Kepler tomó de Tycho fueron el título de matemático imperial y los datos de 20 años de observaciones astronómicas hechas por Tycho. La época que estuvo en Praga fue la más fructífera de su vida, esto porque contaba con los datos y con una estabilidad económica que lamentablemente nunca más tuvo; es por eso que en esta época fue que Kepler escribió su gran obra de *Astronomia Nova* (Koestler, 1985).

Por último, es cuando su vida era una verdadera tormenta que Kepler tiene la grandeza de elevarse sobre las desgracias y escribir un libro titulado *Harmonices Mundi* (La Armonía del Mundo), mientras su vida era todo menos armónica. Es en esta obra de adultez donde Kepler junta todas sus visiones, todas sus personalidades y todas sus formas de trabajo para escribir un libro realmente.

Los aportes de Kepler fueron fundamentales para unir a la astronomía, o física celeste, con la física terrestre, además de que fueron la base para que Newton pudiera desarrollar la Ley de Gravitación Universal. De igual manera, las *Tabulae Rudolphinae* (1627) fueron utilizadas para calcular las posiciones de los planetas durante muchos años después de su publicación y de su muerte (Koestler, 1985).

Y a pesar de que Kepler no es tan reconocido o famoso como Copérnico o Galileo, fue él quien terminó probando y dando las evidencias matemáticas de que, efectivamente, la Tierra gira alrededor del Sol y no al revés. Después de Kepler hubo pocas teorías y modelos que explicaran el 'esqueleto del Universo', las dos más destacadas son la teoría de Gravitación Universal de Isaac Newton y la teoría de la Relatividad de Albert Einstein.

Es por eso que el trabajo de Kepler es tan trascendental en la ciencia, y específicamente en la física, porque él fue el científico que sentó las bases de la astronomía moderna, poco antes de que el telescopio se convirtiera en la herramienta que ayudaría a darle la razón al sistema heliocéntrico y por ende a Kepler.

Finalmente, se puede resumir a Kepler como una combinación perfecta entre la razón y la imaginación, un personaje poco popular y no tan estudiado, pero verdaderamente fascinante, que espero este trabajo ayude a conocerlo a más profundidad. Además de que logre dar una cara más humana a tres leyes planetarias, que lamentablemente hoy en día ya no son parte del programa de estudio de física en la secundaria, pero que en su momento lograron revolucionar a la astronomía.

1. Biografías

1.1 Infancia y primeros estudios (*Mysterium Cosmographicum*)

Johannes Kepler nació el 27 de diciembre de 1571 en la ciudad de Weil, Alemania. Desde muy pequeño se caracterizó por tener una mala salud, además de que al tener un nacimiento prematuro (sietemesino), su vida estuvo en riesgo los primeros años. De las enfermedades que padeció, la más trascendental fue la varicela que contrajo en 1576 y le dañó gravemente la vista, casi cobrando su vida. Durante el resto de su niñez y de su juventud también tuvo problemas de salud, además de que fue bastante hipocondriaco.

Toda su familia se caracterizó por sufrir muertes prematuras y un poco de locura. A los 5 años fue abandonado durante 2 años por sus padres, Heinrich y Katharina Kepler, de manera que él y sus hermanos fueron dejados a cargo de sus abuelos, los cuales no le tenían ningún cariño (*Bryant, 1920*).

Comenzó su escolaridad en 1577 en la escuela latina de Leonberg, pero poco después la tuvo que abandonar para trabajar con su padre, el cual regresó a casa después de dejar el ejército belga.

Después de la muerte de su padre, en 1584, su madre lo mandó a la escuela-convento de Adelberg en el monasterio de Maulbronn. Gracias al sistema de enseñanza Luterano y a su habilidad en la escuela, destacó desde muy joven y pudo seguir estudiando hasta ser aceptado en la Universidad de Tubinga en septiembre de 1589.

A pesar de que su enfoque en la universidad fue en filosofía y teología, desde pequeño destacó en matemáticas y siempre tuvo facilidad para la geometría; además de que después de observar el cometa de 1577 y el eclipse lunar de 1580, comenzó a mostrar un gran interés por la astronomía.

Debido a su difícil infancia, durante su época escolar tuvo muchos problemas para relacionarse con sus compañeros y con algunos de sus profesores. Aun así, se hizo gran amigo de sus maestros con quienes siempre mantuvo contacto, Matthias Hafenreffer y Michael Mästlin. Éste último, a pesar de que en su clase enseñaba el sistema geocéntrico de Ptolomeo, fue él quien le presentó a Kepler el sistema heliocéntrico de Copérnico (*Koestler, 1985*).

En 1594 la Universidad de Tubinga lo recomendó para ocupar el puesto de matemático en la Escuela de Graz, y a pesar de sus deseos por continuar ahí para después servir como teólogo, aceptó el puesto de profesor de matemáticas y astronomía en Graz, Austria.

Durante su primer año como profesor no tuvo mucho éxito, al grado que para su segundo año no tuvo ningún alumno. Sin embargo, parte de sus obligaciones como matemático de la escuela de Graz era hacer calendarios sobre los movimientos de los planetas y con ellos hacer predicciones

astrológicas; algunas de las cuales se cumplieron, por lo que cada vez fue más solicitado. Sin embargo, Kepler siempre vio a la astrología como la hermana menor de la astronomía.

Después de que en la universidad conoció las ideas de Copérnico y aceptó el modelo heliocéntrico como verdadero, Kepler quiso explicar el número de planetas, la distancia entre ellos y la fuerza que los mueve cada uno a su velocidad. El primer problema que trabajó fue intentar explicar el tamaño de las órbitas y la proporción entre ellas. Mientras daba clase, planteó que la proporción entre un círculo inscrito dentro de un triángulo equilátero y un círculo rodeado el mismo triángulo, es igual a la proporción entre las órbitas de Júpiter y de Saturno.

A partir de esto probó las relaciones entre todas las órbitas con otras figuras, pero muchas no eran congruentes y la cantidad posibles era muy alta, de manera que abandonó las figuras planas y pasó a los sólidos, específicamente a los cinco sólidos perfectos o sólidos Platónicos. Con este cambio Kepler no sólo encontró una figura para cada órbita, sino también encontró la justificación perfecta para el número de planetas; como solamente existen cinco sólidos perfectos solo pueden existir seis planetas. Además al poner al Sol en el centro del Universo, Kepler le da el poder de ser la causa de giro de los planetas; explicando así porque los planetas más lejanos giran más lento (*Brewster, 1841*).

Este modelo fue presentado en 1596 en el libro *Mysterium Cosmographicum*. Aunque la mayoría de las ideas planteadas no tienen validez científica y muchas de ellas Kepler mismo las refuta más adelante, en la segunda edición del libro, Kepler acepta que todos sus trabajos posteriores son inspirados en esta primera obra, además de que es de la que se siente más orgulloso.

Evidentemente el modelo presenta muchas fallas, por lo que Kepler tuvo que modificar los datos para poder ajustar las órbitas de los planetas dentro de los sólidos perfectos, además de que tomó a las órbitas con un volumen o grosor de error según lo necesitara. Otra trampa que hizo Kepler fue tomar sólo algunos de los datos, específicamente aquellos que correspondían con sus ideas. Aun así, hubo otros datos que ni forzando las medidas Kepler pudo hacer que su teoría fuera cierta, de manera que hizo lo que cualquier estudiante haría: culpó a la persona que tomó los datos, que en éste caso fue Copérnico, y en algunos casos Kepler tuvo razón.

Después de ésta 'genialidad', Kepler intentó encontrar la relación matemática entre el periodo de revolución y la distancia entre el Sol y los planetas. El tiempo que se tarda cada planeta en dar una vuelta era algo conocido desde la antigüedad, pero Kepler es el primero que busca dar una explicación: si la distancia entre el Sol y Saturno es el doble de la distancia entre el Sol y Júpiter, ¿por qué Saturno tarda más del doble que Júpiter en dar una vuelta al Sol? A pesar de que esta relación la descubre después, es al final de su primer libro que se lo cuestiona por primera vez (*Koestler, 1985*).

Desde el principio Kepler aceptó como verdadero el modelo heliocéntrico de Copérnico, por ser más simple y por poner al Sol en el centro como motor de los planetas. De igual manera siempre

sostuvo la idea de que Dios era un geómetra, por lo que el Universo debía de tener una geometría perfecta, además de que veía a las matemáticas como el lenguaje óptimo para explicar la mente del Creador. “Era demasiado cuerdo para ignorar la verdad, pero demasiado loco para valorarla.”⁴

El plan de Kepler de convertirse en teólogo para ‘servir a Dios’ cambió cuando descubrió que al estudiar astronomía y revelar ‘el esqueleto del Universo’ también estaba sirviendo a Dios. Y esto es justo lo que buscó con el *Mysterium Cosmographicum*, servir a Dios y alimentar el espíritu de los hombres con el conocimiento.

Aunque la obra no fue reconocida ni recibida por la comunidad astronómica de la manera que Kepler esperaba, ésta generó el impacto necesario en la gente necesaria, pues aunque actualmente no tiene ninguna validez científica, sí presenta la genialidad y versatilidad de Kepler. Curiosamente son los astrónomos viejos y ‘tradicionales’ los que aceptan en mayor medida las nuevas ideas de Kepler, mientras que los astrónomos jóvenes y ‘modernos’ no las toman mucho en cuenta, al momento de la publicación del libro (Bryant, 1920).

A pesar de su corta edad y su nula popularidad, orgulloso de su gran descubrimiento, Kepler envió su primer libro a varios de los astrónomos de la época; entre ellos a Tycho Brahe y Galileo Galilei. Siguiendo las costumbres de la época, después de recibirlo y de leer únicamente la introducción, Galileo le respondió a Kepler con una carta en donde agradece el libro y se alegra de su nueva amistad con un buscador de la verdad. “Me felicito en mi buena fortuna de encontrar un buen hombre como compañero de la búsqueda de la verdad.”⁵ Evidenciando que ambos eran seguidores de Copérnico, a pesar de que Galileo no había publicado nada al respecto.

La respuesta de Kepler es mucho más extensa que la carta original de Galileo y en ella invita al italiano a no tener miedo y a hablar públicamente de la verdad copernicana. Le pide su opinión sobre su libro y que realice unas mediciones sobre unas estrellas, ya que él no contaba con los recursos necesarios.

“Fue un doble placer para mí. Primero, a causa de que me he hecho amigo de usted, un italiano, y segundo debido al acuerdo en el que nos encontramos respecto a la Cosmografía Copernicana. [...] Créame, significa más para mí, la crítica aguda que viene de un hombre comprensivo, que los aplausos irreflexivos de las grandes masas.”⁶ “Ten buen ánimo Galileo, y muéstrate en público. [...]

⁴ Arthur Koestler, *Kepler*, trad. Domingo Santos (Barcelona: Salvat Editores, 1985), 38.

⁵ Carola Baumgardt, *Johannes Kepler: Life and Letters* (Nueva York: Philosophical Library, 1951), 38.

- “I congratulate myself on the good fortune of having found such a man as a companion in the exploration of truth.”

⁶ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 40.

- “It was double pleasure to me. First, because I become friends with you, the Italian, and second because of the agreement in which we find ourselves concerning Copernican Cosmography. [...] Believe me, the sharpest criticism of one single understanding man means much more to me than the thoughtless applause of the grate masses.”

Tan grande es el poder de la verdad.”⁷ “Ahora te quisiera pedir una observación; debido a que yo no poseo ningún instrumento, debo recurrir a otras personas.”⁸

Estos comentarios no fueron bien recibidos por Galileo los cuales tomó como una ofensa que aludía cobardía, por lo que cortó la comunicación por 12 años, dejando a Kepler esperando su “respuesta con una larga carta.”⁹ A pesar de que Galileo cortó toda correspondencia con Kepler y de que a Kepler le llegó el rumor de que Galileo enseñaba el *Mysterium Cosmographicum* como ideas propias (rumor que nunca se comprobó y que seguramente no es cierto), Kepler nunca sintió antipatía por Galileo.¹⁰

Por insistencia de sus amigos, Kepler se casó el 27 de abril de 1597 con Barbara Müller von Mühlegg, una mujer dos veces viuda a los 23 años, descrita por el mismo Kepler como “simple de entendimiento y gorda de cuerpo”.¹¹ Estuvieron 14 años casados y tuvieron un hijo y una hija.

A pesar de la Contrarreforma y algunos problemas personales, Kepler siguió con su entusiasmo en sus investigaciones como lo demuestra en una carta a Johann Georg Herwart von Hohenburg el 26 de marzo de 1598. “Yo creo que: como nosotros los astrónomos somos los sacerdotes de Dios con respecto al libro de la naturaleza, nosotros estamos obligados a pensar en alabanzas a Dios y no en glorificar nuestras capacidades.”¹²

Para septiembre de 1598 la persecución a los protestantes en Alemania era cada vez mayor por lo que Kepler tuvo que huir a Hungría por un mes dejando a su esposa e hijos en Graz. Debido a su posición en la escuela, Kepler pudo regresar con su familia, y a pesar de que le pidió ayuda a su antiguo maestro Mästlin para que le consiguiera trabajo en la Universidad de Tubinga, a principios de 1600, Kepler, junto con cientos de protestantes, tuvo que dejar Graz después de que la escuela cerrara y de que el archiduque Fernando de Habsburgo expulsara a la ‘herejía luterana’ de las provincias austriacas (*Baumgardt, 1951*).

Por su posición en la escuela, Kepler tuvo la opción de quedarse en Graz si renunciaba a su religión y se convertía al catolicismo, pero él nunca lo vio como una opción, Kepler siempre intentó mantenerse al margen de cualquier tipo de controversia política o religiosa. “En cuanto a los

⁷ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 41.

- “Be of good cheer Galileo, and appear in public. [...] So great is the power of the truth.”

⁸ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 42.

- “Now I want to ask you for an observation; as I possess no instruments I must turn to other people.”

⁹ Koestler, *Kepler*, 115.

¹⁰ Rumores comenzados por el filósofo amateur inglés, Edmund Bruce.

Koestler, *Kepler*, 115.

¹¹ Koestler, *Kepler*, 43.

¹² Baumgardt, *Johannes Kepler*, 44.

- “I think thus: as we astronomers are priests of the highest God in regard to the book of nature, we are bound to think of the praise of God and not the glory of our capacities.”

ángeles de la guarda no deseo entrar en ninguna controversia. [...] Tal vez algún día alguien ofrecerá una explicación natural y una referencia respecto a los ángeles de la guarda cuando ya no sea necesario.”¹³

Gracias a su amistad con Herwart y a su correspondencia con Tycho, Kepler recibió la invitación a trabajar con él en Benatek, cerca de Praga. Tycho, recién nombrado por el emperador Rodolfo II ‘Matemático de la Corte del Sacro Imperio Romano Germánico’, era el mejor astrónomo de la época. Así que, impulsado por la ambición de obtener los datos correctos para verificar su teoría, Kepler salió en busca del que algunos historiadores consideran el mejor astrónomo observacional pre telescópico de todos los tiempos.

1.2 Trabajo con Tycho Brahe y vida en Praga (*Astronomia Nova*)

Para poder entender la turbulenta relación entre Tycho y Kepler hay que saber un poco sobre la vida del primero.

Tycho Brahe nació el 14 de diciembre de 1546 dentro de una noble familia danesa. Fue criado por su adinerado tío como hijo único, de manera que desde la infancia contó con todas las oportunidades y comodidades. Su destino quedó marcado en 1560 cuando tuvo la oportunidad de observar un eclipse parcial de Sol y después en 1563 cuando observó una gran cercanía entre Júpiter y Saturno; ambos eventos fueron anunciados varios días antes y Tycho quedó más impresionado por la predicción que por los fenómenos mismos, a pesar de que la cercanía entre estos dos planetas se adelantó un mes según las tablas planetarias. El error en la predicción lo llevó a buscar la exactitud en la observación en los cuerpos celestes, de manera que desde muy temprana edad comenzó a estudiar por su cuenta y a construir sus propios instrumentos de medición y observación (*Bryant, 1920*).

En 1573 publicó su libro, *De Nova Stella*, donde describió minuciosamente sus observaciones y afirmó que el fenómeno observado el 11 de noviembre de 1572 fue una estrella nueva. Gracias a esto Tycho ganó fama internacional y la comunidad científica adoptó el nombre de ‘nova’ para las estrellas nuevas. En ese mismo año el rey Federico II de Dinamarca le dio la isla de Hveen (Ven) para construir el observatorio de Uraniborg. Durante 20 años Tycho y sus aprendices realizaron las observaciones de 777 estrellas, pero unos días después de la muerte del rey Federico II, Tycho tuvo que dejar Hveen. Finalmente en 1599 aceptó el patrocinaje del emperador de Praga. Rodolfo II le dio un gran salario y un castillo para fundar su observatorio en Benatek (*Koestler, 1985*).

A pesar de que Tycho propuso su propio modelo astronómico en donde aceptaba que los planetas giran alrededor del Sol, pero proponía que el Sol a su vez giraba alrededor de la Tierra, su fama no

¹³ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 58.

- “As to the guardian angels I do not wish to engage in any controversy. [...] Perhaps one day someone will offer a natural explanation and a reference to guardian angels will no longer be needed.”

se debe a su modelo, sino a la gran cantidad de observaciones que realizó, a la precisión de éstas y a que gracias a sus instrumentos de medición revolucionó la astronomía observacional.

Ya sea para aprender del mejor astrónomo de la época, para aprovecharse de él o para huir de la persecución de la contrarreforma, el 4 de febrero de 1600 Kepler llegó a Praga y se puso al servicio de Tycho Brahe. Curiosamente, Kepler salió en busca de Tycho antes de recibir la invitación formal. A pesar de que su colaboración fue breve, durante este tiempo Kepler aprendió a ser astrónomo. La relación entre Tycho y Kepler siempre fue complicada y estuvo marcada por discusiones y roces, ya que cada uno quería utilizar al otro para su propio beneficio. Tycho necesitaba un ayudante joven y capaz, y Kepler necesitaba los datos para comprobar su sistema planetario; lamentablemente Tycho veía a Kepler como un asistente y Kepler se veía como un igual de Tycho (*Charles Rivers Editors, 2018*).

En una carta a Herwart, Kepler le confiesa que su intención al trabajar con Tycho era obtener los datos correctos para así poder verificar sus ideas planteadas en el *Mysterium Cosmographicum*, pero después de su llegada a Benatek, Kepler se convirtió en el encargado de las observaciones de Marte y se vio frustrado porque Tycho mantenía el resto de los datos lejos de él.

Tycho Brahe murió en Praga el 24 de octubre de 1601, poniendo fin a 38 años de observaciones planetarias. Kepler llegó a la vida de Tycho 20 meses antes de que éste muriera y de esos 20 meses sólo estuvieron juntos 10, debido a los viajes que tuvo que realizar Kepler a Graz para arreglar sus propiedades y a las peleas que tuvieron (*Koestler, 1985*).

Después de la muerte de Tycho, Kepler fue nombrado matemático imperial por el emperador Rodolfo II. Nuevamente Herwart abogó por él y lo propuso como candidato para el puesto, curiosamente fue gracias a sus predicciones como astrólogo por lo que consiguió el trabajo.

Su nuevo puesto de trabajo le trajo un mejor salario el cual le dio una estabilidad económica que le permitió dedicarse casi por completo a su investigación, a pesar de que nunca se le pagó completo y de que su salario era mucho menor al de su antecesor. Sin embargo, la muerte de Tycho no sólo le dejó una mejor situación económica, sino que por fin obtuvo todos los datos que siempre le negaron (a pesar de que no los obtuvo con permiso).

A pesar de que formaba parte de la corte imperial y que su trabajo como matemático le trajo nuevas responsabilidades, como realizar calendarios y predicciones astrológicas para el emperador y otros hombres de la corte, a Kepler no le gustaban los eventos sociales, él prefería utilizar su tiempo trabajando en sus cálculos y observaciones. Lo único que le interesaba de las grandes figuras políticas era que lo financiaran para poder seguir trabajando.

Kepler creía en la astrología en el sentido que las estrellas pueden influir en la Tierra y en las personas, pero no creía que con ella se pudieran hacer predicciones. Esto lo deja claro en 1604 cuando aparece una estrella que para Kepler es un evento divino, y que sólo un profeta podría

entender el mensaje secreto de Dios con este evento. “Aunque las configuraciones en el nacimiento podrían dar indicios de las disposiciones de una persona, Kepler se opuso a la idea de que pudiera determinar su futuro.”¹⁴ Kepler argumentaba que los signos zodiacales fueron una construcción cultural, elegidos al azar, por lo cual no tienen ninguna validez, ni uso en la ciencia.

A pesar de que gran parte del trabajo de Kepler, y de que su principal fuente de ingresos en sus últimos años de vida fue escribir y hacer predicciones astrológicas, él no creía en ellas. Para Kepler las estrellas no podían predecir sucesos culturales o políticos, únicamente afectaban el clima y un poco el carácter humano, pero sólo la posición de los astros al momento del nacimiento. Lo más curioso de todo esto es que algunas de las predicciones políticas de Kepler sí se cumplieron.

El tiempo que Kepler estuvo en Praga como matemático imperial fue el período más productivo de su vida, durante estos años publicó muchos escritos. Uno de ellos fue *A Supplement to Vitellion*¹⁵, el cual fue publicado en 1604 y contiene las primeras teorías de la óptica. En esa época se creía que la refracción dependía del ángulo de incidencia, pero en éste libro Kepler explica que esto no podría ser cierto, ya que la refracción sería igual para todas las sustancias; él propone que la refracción depende también de la densidad del medio. Hoy gracias a la ley de Snell sabemos que la refracción depende del seno del ángulo de incidencia y del medio (*Bryant, 1920*).

Después de hacer un análisis del funcionamiento de una cámara oscura de Baptista Porta, en donde las imágenes se forman boca abajo, Kepler propuso que los ojos funcionan de la misma manera. También explicó las causas de la miopía y de la hipermetropía, y las razones por las cuales los lentes convexos y cóncavos ayudan a corregir estos defectos de los ojos (*Brewster, 1841*).

Su segundo libro de óptica fue hasta 1611 cuando publicó *Dioptrics*, en el cual profundiza sobre el paso de los rayos de la luz a través de los cuerpos transparentes convexos, cóncavos y esféricos. También explica el funcionamiento del telescopio y propone la construcción de uno con dos lentes convexos: lo que hoy conocemos como el telescopio refractor.

En 1609, Kepler publica su obra más importante: *Astronomia Nova*. Su trabajo en este libro comienza en 1601, después de obtener todos los datos de Tycho Brahe, y aunque por fin tuvo las observaciones de todos los planetas, Kepler se quedó obsesionado con Marte, de manera que su enfoque siguió estando en el planeta rojo. “Marte es una estrella que desafía la observación.”¹⁶

Su enfoque principal fue encontrar la órbita del planeta, ya que ningún modelo de Ptolomeo, Copérnico o Tycho podían explicar lo observado. Primero intentó seguir los pasos de Copérnico y poner al Sol en el centro de la órbita circular, pero los datos se salían demasiado del rango

¹⁴ Kepler, *Harmonices Mundi*, XXIII.

- “Although the birth configurations could thus give an indication of a person’s dispositions, Kepler opposed the idea that it could determine his future.”

¹⁵ Nombre completo: *Ad Vitellionem Paralipomena, quibus Atronomiae Pars Optica traditur*.

¹⁶ Koestler, *Kepler*, 80.

esperado, de manera que retomó la idea de Ptolomeo del ecuante. De esta manera, Kepler hizo los cálculos para tomar en cuenta la rotación de la Tierra y se dio cuenta que el planeta no se traslada alrededor del Sol con la misma velocidad; en ciertos momentos avanzaba más rápido y en otros más lento. Ya con estas adecuaciones pudo saber la posición exacta de Marte a lo largo de una revolución completa.

Volviendo a tomar al Sol como el centro del Universo y a la órbita como un círculo, Kepler buscó encontrar el radio de la órbita de Marte y llegó a formular una hipótesis bastante buena, pero ésta tenía un error de $8'$ lo cual fue inadmisible para Kepler, debido al gran respeto que le tenía a los datos de Tycho.

Después del último fracaso, Kepler buscó llegar a la órbita por un enfoque diferente. Debido a que únicamente se necesitan tres puntos para trazar un círculo, al tomar tres posiciones de Marte, Kepler pudo trazar una órbita circular; pero el problema fue que cada vez que tomaba tres posiciones diferentes obtenía órbitas circulares diferentes. Esto lo llevó a concluir que la órbita de Marte no podía ser circular, de manera que primero probó poner una órbita ovalada y después una en forma de huevo, pero no llegó a ningún lado.

Con las observaciones de Tycho, Kepler pudo calcular el ángulo formado entre la Tierra, el Sol y Marte, de manera que dejando a Marte fijo, pudo obtener la posición de la Tierra respecto al Sol, y dejando a la Tierra fija, pudo obtener la posición de Marte respecto al Sol. Con esto, Kepler descubrió que en los puntos más lejanos de la posición de Marte al centro de su órbita, había una diferencia de $+0.00429$ de radio, con respecto a una órbita circular de radio 1. A su vez, analizando todas las características posibles de la órbita, obtuvo que la secante del ángulo formado entre la posición más lejana de Marte, el Sol y el centro de la órbita era de 1.00429 ; ángulo en el cual la tangente es la excentricidad de la órbita.

Este resultado lo llevó a darse cuenta que debía existir una relación matemática entre el ángulo formado y la distancia al Sol, pero dada la inexistencia de la geometría analítica y su poco conocimiento de los trabajos de Apolonio, Kepler no pudo hacer el salto directo entre la ecuación que había encontrado y la ecuación de una elipse.

Durante 6 años Kepler estuvo trabajando con diferentes figuras y cálculos, realizó muchísimas operaciones, algunas de ellas con errores geométricos y aritméticos, pero al final pudo llegar a la conclusión de que la órbita de Marte es una elipse.

“¡Oh qué estúpido he sido!”¹⁷

Junto con la trayectoria elíptica de Marte, Kepler descubrió que el Sol no se encuentra en el centro de la órbita y que las velocidades de la Tierra y de Marte no son constantes; en el perihelio viajan

¹⁷ Koestler, *Kepler*, 94.

más rápido y en el afelio viajan más lento. Lo que Kepler descubrió fue que si se toma la posición del Sol y dos posiciones de la órbita de Marte, el área que se tiene, es proporcional al tiempo que le lleva recorrer a Marte la distancia entre las dos posiciones elegidas; es decir, Marte describe áreas iguales en tiempos iguales.

Astronomia Nova contiene las dos primeras leyes planetarias, aunque no de forma textual, tuvieron que pasar muchos años para que fueran reconocidas como tal. Actualmente estas leyes no tienen tanta importancia como la Ley de Gravitación Universal de Newton o como la Relatividad de Einstein; tristemente cuando Kepler las propuso, tampoco tuvieron popularidad. Sin embargo, la importancia de estas tres leyes es que “fueron las primeras Leyes Naturales en el sentido moderno: afirmaciones precisas y verificables acerca de las relaciones universales que gobiernan los fenómenos particulares, expresadas en términos matemáticos.”¹⁸

Definitivamente las primeras dos leyes planetarias fueron revolucionarias, aunque Kepler nunca estuvo completamente satisfecho con ellas; en parte porque rompían con la simetría que él tanto buscaba, recordando que él veía a Dios como el gran geómetra que todo lo hizo con una simetría perfecta y también porque él siempre quiso ir más lejos que Copérnico y dar una explicación al sistema heliocéntrico, para así no dejar duda de que éste era el modelo verdadero.

“En teología sólo es válido el peso de la Autoridad, pero en filosofía sólo cuenta el peso de la Razón.”¹⁹

Para explicar el movimiento perpetuo, no uniforme de los planetas, Kepler propuso que la luz del Sol ejercía una ‘fuerza magnética’ sobre los planetas, debido a una propiedad magnética intrínseca la cual es proporcional a la masa o tamaño del planeta; de manera que mientras más lejos se encuentran los planetas del Sol, menor es la fuerza y menor es la velocidad con la que se mueven. Más que utilizar un concepto de fuerza, como Newton, Kepler se acercó más al concepto de campo. Lo que eliminó completamente fueron las ideas de espíritus, motores, ángeles o cualquier otra cosa celestial que pudiera ayudar al movimiento de los planetas (*Koestler, 1985*).

Durante la realización de *Astronomia Nova*, el trabajo que realiza Kepler puede ser considerado como el de un ‘científico moderno’, ya que plantea una hipótesis y en base a los datos de las observaciones hace los cálculos necesarios para demostrar si su hipótesis es correcta o no; en contraposición a lo acostumbrado en la antigüedad cuando se planteaba una hipótesis y se buscaban los datos que se adaptaran a ella. Igual es importante destacar la confianza que tiene Kepler en que los datos de Tycho son correctos, ya que deshecha una buena hipótesis por un error de 8’. Aunque lamentablemente esto únicamente se puede decir de la forma de trabajo que siguió para escribir *Astronomia Nova* (*Charles Rivers Editors, 2018*).

¹⁸ Koestler, *Kepler*, 78.

¹⁹ Koestler, *Kepler*, 102.

Dentro del contexto de la Revolución Científica, Kepler es el primer científico que se preocupa por las causas físicas del cosmos; aunque tenía ideas contrarias sobre la inercia y la gravedad, y su explicación sobre las fuerzas es completamente errónea. Es por eso que su aportación para unir la astronomía y la física es fundamental. Gracias a Kepler el cielo se deja de analizar con modelos astronómicos y se pasa a analizar con fórmulas matemáticas. De igual manera, Kepler fue una pieza primordial para que la física celeste que comenzó Aristóteles, Newton la pudiera unir con la física terrestre que desarrolló Galileo, en una única física (Koestler, 1985).

Algo que distingue a Kepler de sus colegas Copérnico, Galileo y Newton, es que Kepler en sus libros no solo presenta sus resultados finales, sino que expone todo el proceso que lo llevó a tales resultados: los problemas que tuvo que resolver, las trampas que utilizó, los errores que cometió y las preocupaciones que lo motivaron; de manera que al leer los textos de Kepler uno es capaz de conocer su forma de pensar.

“Lo que me importa no es simplemente comunicar al lector lo que tengo que decir, sino por encima de todo, transmitirle las razones, subterfugios y afortunadas casualidades que me condujeron a mis descubrimientos.”²⁰

La importancia de estas leyes planetarias de Kepler es en que ninguna de las dos eran ‘evidentes’, sino todo lo contrario, ambas rompieron con los dogmas de la astronomía, del movimiento uniforme y de la forma circular. Parte de la grandeza y torpeza de Kepler, la cual es fundamental para sus descubrimientos, fue su habilidad para escoger ideas con las cuales trabajar, cuales desechar debido a errores pequeños o cuales le servían para ciertos casos, aunque él supiera que eran incorrectas.

Es importante mencionar que durante los años que Kepler trabajó en la *Astronomia Nova*, vivió en Praga con una estabilidad económica que solo tuvo en esos años. Sin embargo, además de escribir su libro, también tuvo que lidiar con las obligaciones de su nuevo cargo como matemático imperial: publicar sobre los eclipses, cometas y demás sucesos celestes, y escribir horóscopos y predicciones para las personas de la corte. Además en este periodo sufrió una enfermedad, que según él casi lo mata. De igual manera, en 1604 apareció una estrella nova en el cielo y un nuevo hijo en su vida, lo cual no fue de su completo agrado, como se lo hace saber a su amigo D. Fabricius: “Justo cuando estaba atareado buscando la cuadratura de mi óvalo, un huésped inoportuno entró a mi casa por una puerta secreta para molestarme.”²¹

Otra cosa que también tuvo a Kepler distraído durante la producción de *Astronomia Nova* fue el pleito con los familiares de Tycho sobre su herencia. Por ser descendientes, los familiares pedían la custodia de sus instrumentos y de sus mediciones, pero Kepler, por ser el sucesor del puesto de matemático imperial, también pidió la custodia. Lamentablemente el yerno ganó sus instrumentos y los mantuvo guardados, por lo que nunca se volvieron a utilizar. En cuanto a los datos, Kepler

²⁰ Koestler, *Kepler*, 79.

²¹ Koestler, *Kepler*, 92.

tuvo la precaución de tomarlos poco después de la muerte de Tycho y de asegurarse de que tuvieran uso. “Confieso que cuando Tycho murió, me aproveché rápidamente de la ausencia o falta de cautela de los herederos para tomar a mi cuidado las observaciones, o quizá para usurparlas.”²²

El pleito con el yerno de Tycho, Tengenagel, retrasó mucho la publicación del libro de Kepler, aunque al final aceptó su publicación con la condición de que llevara un prefacio escrito por él. En este breve texto, Tengenagel insulta la obra de Kepler y le da todo el crédito a Tycho, prometiendo la publicación de las tablas y las observaciones completas, hecho que nunca realizó.

En total, el proceso para escribir la *Astronomia Nova* fue de seis años, más otros cuatro para conseguir dinero para la imprenta y para conseguir el permiso de la familia de Tycho. Lamentablemente la recepción de la obra no fue la esperada, la mayoría de las críticas fueron negativas, negando la idea de trayectorias elípticas y de un movimiento con velocidad cambiante. Curiosamente los únicos que recibieron de buena manera las ideas innovadoras de Kepler fueron los ingleses (Koestler, 1985).

Después de la publicación de *Astronomia Nova* la vida de Kepler no fue fácil, a pesar de ser el matemático imperial, de su creciente fama y de su nueva posición social: los pagos de Kepler siempre llegaban tarde y el ambiente socio-político del país lo mantenían con una constante preocupación.

En marzo de 1610, Kepler recibió al filósofo Matthaues Wackher von Wackenfels el cual le comunicó la noticia de que el astrónomo italiano Galileo Galilei había observado cuatro nuevos cuerpos celestes con un instrumento holandés. Wackher pensaba que eran planetas de otro sistema y Kepler, para no contradecir sus ideas de los seis planetas por los cinco sólidos perfectos, decía que las observaciones de Galileo eran satélites de Marte, Júpiter o Saturno. Al final quien tuvo la razón fue Kepler: las observaciones de Galileo fueron de cuatro satélites de Júpiter.

La vida de Galileo fue una vida totalmente plena y llena de grandes eventos, pero lo que se tiene como el legado de la vida de Galileo es mucho más exagerado que su vida misma. “Galileo no inventó el telescopio, ni el microscopio, ni el termómetro, ni el reloj de péndulo. No descubrió las leyes de la inercia, ni el paralelogramo de fuerzas o movimientos, ni las manchas solares. No hizo ninguna contribución a la astronomía teórica; no arrojó pesos desde la torre de Pisa, no demostró la verdad del sistema copernicano. No fue torturado por la Inquisición, no languideció en sus mazmorras, no dijo ‘eppur si muove’²³ y no fue mártir de la ciencia.”²⁴ Sin embargo sí fundó la astronomía telescópica, sí fue detenido y juzgado por defender sus ideas, y sí desarrolló las bases de la cinemática que seguimos utilizando actualmente y que le da el estatus de uno de los científicos más grandes de la historia (Koestler, 1985).

²² Koestler, *Kepler*, 104.

²³ ‘y sin embargo se mueve’

²⁴ Koestler, *Kepler*, 110.

Aunque el objetivo de esta tesis no es crear una discusión sobre Galileo, sí es importante conocer algunos datos de él para poder entender su relación con Kepler. Galileo Galilei nació en Pisa en 1564 y murió en 1642 en Florencia. De 1592 a 1610 fue catedrático de matemáticas en la Universidad de Padua y durante esos 18 años hizo sus experimentos en relación a la dinámica moderna, aunque no los publicó hasta más adelante.

En septiembre de 1608, en Frankfurt, se presentó a la venta un telescopio, a principios de 1609 llegaron los primeros modelos holandeses a Italia y para agosto de ese mismo año Galileo ya había construido el suyo después de leer un manual sobre los modelos holandeses.

Fue hasta marzo de 1610 que Galileo publicó su primera obra científica; *Sidereus Nuncius* (el *Mensajero Sideral o el Mensaje Sideral*). En él publica todas sus observaciones con el telescopio, incluyendo unos dibujos sobre la Luna y su superficie, las observaciones de las estrellas y las del descubrimiento de cuatro nuevos cuerpos celestes. El libro de Galileo fue celebrado por algunos, acogido por el pueblo y muy criticado por varios intelectuales, en especial por los propios Italianos. La arrogancia intelectual de Galileo tampoco le ayudó a ser aceptado, pero la única persona que desde el principio lo apoyó y lo defendió hasta el final fue Kepler (*Koestler, 1985*).

Después de felicitar a Galileo con una carta; Kepler publicó un pequeño escrito, *Conversación con el Mensajero de las Estrellas*, en donde alaba a Galileo, sus descubrimientos los da como verdaderos y se pone a su disposición para ayudarlo. El hecho de que el matemático imperial le diera públicamente apoyo al libro de un erudito italiano fue de vital importancia para Galileo, de manera que reinicia la correspondencia con su amigo alemán, que había dejado años antes.

Las críticas a Kepler no tardaron en llegar, pero él responde a las críticas con otro escrito en donde invita a cada persona a creer en lo que quiera. “Nadie debe creer que debido a mi franco arreglo con Galileo, otros deben ser privados de la libertad de diferir de nosotros.”²⁵ Además de que le pide a Galileo un telescopio tan poderoso como el suyo para poder comprobar sus observaciones (recordando que Kepler estaba casi ciego). Galileo por miedo a perder el apoyo de Kepler, rápidamente responde su carta, pero nunca le envía ningún telescopio. “Riámonos de la estupidez de la gente mi querido Kepler.”²⁶

En agosto de 1610 Galileo publicó un anagrama con el resultado de su última observación, “SMAISMIRMILMEPOETALEUMIBUNENUGTTAURIAS”. Kepler deseoso de saber la respuesta lo resolvió como “Salve umbistineum geminatum Martia proles,” que se traduce como “Salve, ardientes gemelos, progenie de Marte”, es decir, Marte tiene dos lunas. Tres meses después Galileo publicó la respuesta correcta la cual decía “Altissimim planetam tergeminum observavi”,

²⁵ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 84.

- “None, however, should believe that by my frank agreement with Galileo others should be deprived of the liberty to differ from us.”

²⁶ Koestler, *Kepler*, 127.

“He observado el planeta más alto (Saturno) en triple forma”²⁷, es decir que Saturno tenía dos lunas muy cercanas a sus lados. El telescopio de Galileo no era lo suficientemente poderoso como para distinguir los anillos (Koestler, 1985).

Un mes más tarde, Galileo publicó otro anagrama “Haec immatura a me jam frustra legunturoy”, el cual Kepler resolvió como “Macula ruta in Jove est gyratur mathem, etc.”, lo cual se traduce como “hay una mancha roja en Júpiter que gira matemáticamente.” Nuevamente la respuesta fue diferente a lo que Galileo publicó, lo cual fue “Cynthiae figuras aemulatur amorum”, “La madre del amor (Venus) emula la forma de Cynthia (la Luna)”²⁸, es decir Galileo descubre que Venus tiene fases igual que la Luna. Lo más curioso de estos dos anagramas es que las respuestas de Kepler, aunque no son lo que había observado Galileo, son ciertas y más tarde se iban a comprobar.

A pesar de que Galileo nunca le prestó a Kepler uno de sus telescopios, entre agosto y septiembre de 1610 este último pudo utilizar uno que le prestó Ernest de Colonia, duque de Baviera. Con él por fin pudo observar las cuatro lunas de Júpiter y escribió un panfleto (*Informe de las observaciones de los cuatro satélites errantes de Júpiter*) que le llegó a Galileo pero nunca le escribió en agradecimiento. Durante los siguientes meses, Kepler le volvió a escribir a Galileo, pero él nunca le respondió.

Y así como 1610 fue uno de los mejores años en la vida de Kepler, 1611 fue uno de los peores. Primero el emperador Rodolfo II comenzó a tener problemas con su hermano Matías por lo que buscó consejos astrológicos en Kepler, a lo cual éste le respondió: “Uno debe de mantener a la astrología completamente fuera de la mente del Emperador.”²⁹ Después, la tragedia y la guerra alcanzaron a Kepler y su familia: a principios del año, su hijo más pequeño y el preferido, enferma y muere a los seis años de edad, poco después su esposa Bárbara también muere (Koestler, 1985).

Mientras, en el país se desató una guerra civil y una epidemia azotó Praga. Para 1612 el emperador Rodolfo II muere y aunque su hermano Matías de Habsburgo respeta el puesto de Kepler como el matemático imperial, éste tiene que salir de Praga y tomar refugio en Linz; marcando así el final de la época más fructífera y feliz de su vida.

Antes de abandonar Praga, Kepler buscó regresar a la Universidad de Württemberg, pero debido a su religión y a la persecución de los protestantes declararon: “es imposible para ellos considerarlo como un ‘hermano de Cristo’.”³⁰

²⁷ Koestler, *Kepler*, 128.

²⁸ Koestler, *Kepler*, 128.

²⁹ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 100.

- “One must keep astrology entirely from the Emperor’s mind.”

³⁰ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 101.

- “impossible for them to consider him as their ‘brother in Christ’.”

Parte de la grandeza de Kepler es el hecho de que a pesar de que gran parte de su vida estuvo huyendo de la guerra, que nunca le pagaron su salario completo y que tuvo muchas dificultades personales, pero nunca perdió el humor y las ganas de seguir adelante con las actividades que más le gustaban y en las que más creía. “Me considero y me comporto como si no fuera un servidor del Emperador, sino de toda la humanidad y de la posteridad.”³¹

1.3 Últimos años (*Harmonices Mundi*)

Lamentablemente la guerra de los 30 años cortó el trabajo de Kepler en Praga, y aunque el nuevo emperador Matías lo mantuvo como su matemático imperial, le redujo su carga de trabajo y su salario, por lo que tuvo que buscar otras fuentes de ingreso. Trabajó como profesor de la Universidad de Linz (Landschaftsschule), fue el encargado de hacer nuevos mapas de la Austria Alta, comenzó a escribir calendarios y predicciones astrológicas para grandes figuras políticas y gente con dinero, a pesar de que a Kepler no le gustaba porque lo distraía de su trabajo astronómico.

Desde el principio, la vida de Kepler en Linz se vio opacada en comparación a su vida en Praga. Poco después de su llegada, su excompañero de Tübingen y ministro de la ciudad, Daniel Hitzler, le negó la comunión. Este hecho le afectó mucho y lo llevó a un pleito que terminó hasta 1620 cuando Hitzler fue trasladado (*Baumgardt, 1951*).

Luego de quedar viudo, Kepler tomó un año y medio para elegir entre once candidatas, a la que llegaría a ser su segunda esposa. El proceso de selección que llevó a cabo, está detallado en una carta al Barón Peter Heinrich von Strahlendorf. Al igual que le pasó al descubrir la primera ley, Kepler tuvo mucha suerte, un poco de intervención divina y varios errores que al final se anularon, para en 1613 casarse con Susanna Reuttinger; una mujer humilde, pero de buena educación, que lo quiso y acompañó en sus últimos días. Él tenía 41 años y ella 24 cuando se casaron, tuvieron 7 hijos de los cuales sólo 5 sobrevivieron la infancia, y sumando a los 2 hijos de su primer matrimonio y a dos de sus sobrinos, Kepler tuvo que alimentar a 10 bocas, además de la suya.

La desgracia y la mala suerte de Kepler siguieron acumulándose cuando en 1615, la madre de Kepler fue acusada de brujería (en el invierno de ese año, en el pueblo donde ella vivía, fueron quemadas seis mujeres acusadas de ser brujas). La madre de Kepler tenía 69 años cuando fue acusada por varias personas de haber causado muertes, parálisis y otras desdichas. Para el 7 de agosto de 1620 fue arrestada y trasladada a la prisión de Leonberg para ser interrogada bajo la amenaza de tortura. Debido a esto Kepler viajó constantemente a Württemberg para defender a su madre de la tortura y de una posible ejecución. Finalmente, en octubre de 1621, gracias a las cartas de Kepler, a su influencia como matemático imperial, a la ayuda de su cuñado y a los rezos de su madre, ella fue liberada. Al final estuvo en prisión 14 meses, pero seis meses después de su liberación murió a los 75 años de edad (*Koestler, 1985*).

³¹ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 91.

- “I fancy myself and conduct myself as if I did not serve the Emperor, but the whole mankind and posterity.”

Kepler tuvo una primera oportunidad de dejar Austria en 1617 cuando lo invitaron a la Universidad de Bolonia. A pesar de que le ofrecieron una de las cátedras de matemáticas más prestigiosas de la época, Kepler rechazó la invitación debido a que se encontraba al servicio del Emperador y él era quien debía decidir, además de que como alemán no se imaginaba viviendo en Italia. Kepler tuvo la esperanza de que la oferta que recibió de Bolonia fuera presión para que el Imperio le pagara su salario completo, pero lamentablemente no fue así (*Baumgardt, 1951*).

A pesar de todos los problemas personales que Kepler estaba afrontando, en 1618 terminó su última gran obra de astronomía y la esperada secuela del *Mysterium Cosmographicum; Harmonices Mundi*. En este libro Kepler expone las armonías geométricas, aritméticas y musicales que hay en los planetas y en el Sol, especialmente la armonía entre las variaciones de las velocidades angulares vistas desde el Sol, y sigue con su búsqueda de la ‘fuerza magnética’ para poder explicar el movimiento de los planetas alrededor de su estrella.

El libro se divide en cinco partes: la primera trata sobre las proporciones en la geometría, la segunda sobre las congruencias entre las figuras planas y los sólidos regulares, la tercera sobre cómo la música se deriva de la geometría, la cuarta sobre la metafísica, la astrología y la psicología y por último, la quinta sobre la astronomía y la metafísica, específicamente sobre la armonía entre los cuerpos celestes. “La geometría es el único lenguaje que permite al hombre comprender el trabajo de la mente divina.”³²

Después del trabajo matemático y físico realizado en su libro de *Astronomia Nova*, Kepler regresa a sus razonamientos teológicos, metafísicos y filosóficos en *Harmonices Mundi*. Deja a un lado los sólidos perfectos, pero ahora utiliza siete armonías musicales para describir siete polinomios perfectos, siempre tomando a la esfera y al círculo como figuras perfectas. “Había rastreado hacia atrás las leyes de la música hasta la mente del Geómetra Supremo.”³³

Las relaciones que encontró fueron de proporciones matemáticas, que a su vez tienen relación musical, de manera que “los movimientos celestes no son más que una continua canción para varias voces; una música que [...] avanza hacia un final prediseñado, casi a seis voces, y de este modo deja señales en el inconmensurable fluir del tiempo.”³⁴ Curiosamente el interés musical de Kepler surgió después de leer un libro de música escrito por Vincenzo Galilei, el padre de Galileo.

Al final Kepler nunca pudo consolidar su hipótesis sobre el movimiento de los planetas, a la cual llamó la ‘filosofía magnética’; tuvo que venir la genialidad de Newton para explicar ese movimiento con la ley de gravitación universal. A pesar de que la idea de Kepler era una fuerza divina o metafísica, éste fue el primer intento de dar una explicación física al movimiento de los cuerpos celestes.

³² Koestler, *Kepler*, 139.

³³ Koestler, *Kepler*, 139.

³⁴ Koestler, *Kepler*, 140.

En general el libro no tiene mucho sentido, y no tendría ningún valor científico si en él no se encontrara la tercera ley de Kepler. A diferencia de las primeras dos leyes donde Kepler tenía los datos y buscó darles una explicación, la tercera ley es todo lo contrario. En su afán de encontrar armonías, buscó la relación entre las distancias al Sol y el tiempo que tardaban en dar una vuelta y al final, con prueba y error, concluye que “los cuadrados de los periodos de revolución de cualesquiera dos planetas dados, es proporcional a los cubos de sus distancias medias al Sol.”³⁵

A pesar de que en este tercer libro Kepler vuelve a ‘caer’ en ideas y explicaciones metafísicas, es importante destacar que Kepler siempre deja a Dios y a cualquier entidad divina fuera de cualquier argumento. Su principal recurso eran las matemáticas y cuando éstas no eran de ayuda, entonces recurría a la metafísica. Además, Kepler se preocupó mucho sobre las causas físicas de los movimientos de los planetas; antes de él existía una ruptura entre la física terrestre y la física celeste, ruptura establecida por Platón y Aristóteles.

Para Kepler, *Harmonices Mundi* fue su obra predilecta, el mayor de sus logros y la manera en que llegaría a la posteridad. Kepler siempre tuvo la obsesión de los cinco sólidos perfectos, y a pesar de que desvió su interés varias veces y de que aprendió a hacer ciencia verdadera, su pasión siempre fue leer la mente del creador y encontrar la armonía en el caos del Universo.

Uno de los temas más estudiados por los filósofos y científicos de la época de Kepler era el de las mareas, de manera que Kepler también contribuyó con varias hipótesis, dos de ellas destacadas. En *Astronomia Nova*, Kepler propone que las mareas son producidas porque los océanos son atraídos por la Luna, pero en *Harmonices Mundi* cambió completamente de idea y propone que la Tierra es como un ser vivo de manera que cambia a su parecer de día y de noche (*Brewster, 1841*).

Para esta época Kepler comenzó a enfrentar las consecuencias del problema causado por Galileo en contra de Copérnico y del sistema heliocéntrico; sus libros y sus ideas comenzaron a ser prohibidos en algunas partes de Europa, en especial en Italia. Kepler únicamente pedía que cada teólogo, filósofo y astrónomo decidiera por sí mismo en que quería creer, además argumentaba que su modelo de armonías era mejor que el modelo de Copérnico. “Los teólogos pueden decidir cuál de las dos hipótesis expuestas en el título del Libro V – la de Copérnico o la de Brahe – debe de ser considerada como válida (la vieja de Ptolomeo seguro está equivocada).”³⁶

En mayo de 1618 comenzó en Europa la Guerra de los Treinta Años y en ese mismo mes Kepler terminó de escribir *Harmonices Mundi*, el cual fue publicado un año más tarde. A pesar de los problemas que enfrentó en su vida privada, Kepler siguió publicando varias obras y escritos

³⁵ Koestler, *Kepler*, 141.

³⁶ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 136.

- “The theologians may decide which of the two hypotheses confronted in the title page of Book V – that of Copernicus or that of Brahe – should henceforth be regarded as valid (the old Ptolemaic is surely wrong).”

durante su época en Linz, los dos más notables son el *Epitome Astronomiae Copernicanae* y las *Tabulae Rudolphinae*.

A pesar de su nombre, el *Epitome* no es un resumen de la astronomía de Copérnico, es un resumen de la astronomía de Kepler escrita en un lenguaje más accesible con la esperanza de que el modelo Copernicano llegara a más personas. Lamentablemente la publicación del libro tuvo muchas complicaciones causadas principalmente por la prensa y otras instituciones que no querían seguir promocionando a Copérnico, por lo que poco después de ser publicado entró en el Índice de libros prohibidos por la Iglesia (*Baumgardt, 1951*).

Curiosamente, aunque esta obra es la más extensa de Kepler, lo más valioso que se encuentra en ella es que extiende sus dos primeras leyes a todos los planetas y satélites del sistema, ya que en un principio las había postulado únicamente para Marte. Fue publicado en siete partes; las primeras tres en Linz en 1618, la cuarta también en Linz pero en 1622 y la quinta, sexta y séptima en Frankfurt en 1622.

Durante sus años en Linz, a pesar de que seguía siendo el matemático imperial, Kepler nunca recibió su salario completo, por lo que la mayoría de sus publicaciones las tuvo que pagar con el dinero destinado para sus hijos.

En 1619 el emperador Matías murió y su sucesor Fernando II ratificó a Kepler como matemático imperial, prometiéndole pagar su sueldo completo y la deuda que se le debía, y apoyarlo en la publicación de las esperadas *Tabulae Rudolphinas*.

A pesar de las constantes quejas sobre su vida en Linz, en 1620 tuvo una nueva oportunidad de abandonar Austria cuando el embajador inglés de Venecia, Sir Henry Wotton, visitó a Kepler para invitarlo a vivir en Inglaterra. No se sabe con seguridad que fue lo que impulsó a Kepler a rechazar la oferta, pero una de las teorías que se tienen es que en esa época Inglaterra no era un país conocido por apoyar a las ciencias, además de que Kepler estaba en medio de la publicación de cuatro libros, y también porque no le gustaba la idea de vivir en una isla. “¿Debería de cruzar el océano ante la invitación de Wotton? ¿Yo un alemán, amante de la tierra firme, que teme el confinamiento de una isla, que presagia los peligros de vivir en una, y debo arrastrar conmigo a mi pequeña esposa y a mi rebaño de hijos?”³⁷

Lamentablemente para finales de 1620 la Guerra de los Treinta Años llegó a Linz y con ella la persecución a los protestantes. Durante los siguientes seis años, Kepler y su familia vivieron con miedo a ser deportados; únicamente protegidos por el título de Kepler. “Es un gran consuelo que

³⁷ Brewster, *The martyrs of science*, 219.

- “Shall I the cross the sea, wither Wotton invites me? I a German, a lover of firm land, who dread the confinement of an island, who presage its dangers, and must drag along with me my little wife and flock of children?”

no se nos quemé, sino que se nos permita vivir; si es que tiene algún sentido el permiso de vivir, para quien ha sido privado de los medios necesarios para mantenerse con vida.”³⁸

A pesar de los problemas personales y los problemas políticos que desataron la guerra, Kepler nunca perdió el espíritu de seguir luchando por la verdad. En 1621 publicó una segunda edición del *Mysterium Cosmographicum* a la cual le hace varias correcciones, pero de igual manera la recalcó como su obra más importante y significativa (Baumgardt, 1951).

Para 1622 el emperador Fernando II ordenó que se le pagaran a Kepler todas las deudas que le debía el imperio, para que por fin pudiera publicar las esperadas *Tabulae Rudolphinae*. Lamentablemente el pago no llegó debido a la guerra, la cual azotaba gran parte de Alemania y Europa. Pero aun así Kepler completó las tablas en 1624, aunque tuvieron que pasar 4 años para poder publicarlas (Brewster, 1841).

A finales de 1626, la vida en Linz se volvió un infierno para Kepler: en enero vendieron su biblioteca por tener libros prohibidos, en noviembre tuvo que mandar a su esposa e hijos a Regensburg y afortunadamente él se salvó de ser encarcelado por su posición.

Debido a que las tablas eran basadas en las observaciones de Tycho Brahe y era un trabajo para el imperio, Kepler buscó que fueran publicadas con el salario que el imperio le debía (6,299 florines). Viajó a Viena, Nuremberg, Memmingen y Kempten para conseguir 2,000 florines, perder un año y terminar financiando la impresión con su propio dinero. Primero buscó imprimirlas en Linz, pero la guerra no lo permitió, después fue a Ulm y finalmente a Tubinga donde en septiembre de 1627 estuvieron listas; lamentablemente los herederos de Tycho no permitieron su distribución (Koestler, 1985).

Al final, después de tres reimpressiones con diferentes prefacios de Kepler y de George de Brahe, en 1628 se publicaron las *Tabulae Rudolphinae*. Este escrito fue el mayor logro de Kepler en la astronomía práctica, indispensable para los astrónomos durante los siguientes 100 años. La primera y la tercera parte de la obra son, en su mayoría, logaritmos y otras herramientas para hacer cálculos astronómicos, la segunda parte son tablas sobre el Sol, la Luna y los planetas, y la cuarta parte es el catálogo de las estrellas determinadas por Tycho.

Con el paso de los años y la publicación de las tablas, la situación económica de Kepler empeoró notablemente, de manera que buscó irse de Linz poco después de publicar las esperadas *Tabulae Rudolphinae*. Para esto le pidió a todos sus conocidos y amigos que le ayudaran a encontrar una posición en Alemania, Italia, Francia, Bélgica o Inglaterra; ya sea en astronomía o astrología.

³⁸ Baumgardt, *Johannes Kepler*, 154.

- “It is a great comfort that we are not burned, but allowed to live, if there is any meaning in the permission to live for him who has been deprived of the necessary means of life.”

Para principios de 1628, Kepler tuvo que viajar nuevamente a Praga para presentar las tablas en la corte y aunque le pagaron parte del sueldo que le debían, la deuda todavía era de una suma importante. Durante su estancia en Praga, fue presionado para que se convirtiera al catolicismo, idea que siempre rechazó por ser una traición a sus ideales, a pesar de que el cambio le fuera a abrir varias oportunidades de trabajo (*Baumgardt, 1951*).

En mayo de 1628 el emperador le encargó a Albert Wallenstein, Duque de Żagań y gran aficionado a la astronomía, hacerse cargo del matemático imperial. Para finales de 1628, Kepler se mudó a Żagań, Polonia, recibió un ayudante, una prensa y el puesto de profesor de matemáticas de la Universidad de Rostoch. Aquí encontró un poco de tranquilidad y estabilidad económica, de manera que pudo llevar a su familia a vivir con él, aunque siguió viajando constantemente a Praga, Linz y otros lugares para arreglar varios asuntos (*Baumgardt, 1951*).

Tal fue la tranquilidad de Kepler en Żagań que se preocupó y se ocupó de casar a su hija Susanna Kepler con Jakob Bartsch, matemático y médico que trabajó con Kepler en Görlitz. La boda se realizó en marzo de 1630 en Strassburg, aunque lamentablemente Kepler y su esposa no pudieron asistir a la boda ya que pocos días después recibieron a otra hija, Anna Maria (*Baumgardt, 1951*).

Lamentablemente su nuevo puesto como profesor de matemáticas hizo que su salario como matemático imperial se volviera aún más irregular. Para mediados de 1629, la deuda del Emperador y de Wallenstein con Kepler era tan grande que Kepler veía cada vez más improbable que le fueran a pagar. Después de que la deuda alcanzara los 12,000 florines, Kepler decidió viajar a Praga para exigir su pago, aunque nunca llegó a su destino (*Baumgardt, 1951*).

Primero viajó a Leipzig para reclamarle a la asamblea alemana el dinero que le debían, pero el clima y el largo viaje lo debilitó lo suficiente para caer enfermo poco después de llegar a Ratisbona. El cansancio acumulado se convirtió en una grave enfermedad la cual le arrebató la vida el 15 de noviembre de 1630 a los 58 años de edad.

Cuatro días después de su muerte fue sepultado en el cementerio de St. Peter's afuera de la ciudad de Ratisbona. Sus amigos y familiares mandaron poner un poema escrito por el mismo Kepler para su lápida:

“Mensus eram coelos, nunc terrae metior umbras.
Mens coelestis erat, corporis umbra jacet.”

“Antes medí los cielos, ahora mediré las sombras de la tierra.
Aunque mi espíritu era del cielo, la sombra de mi cuerpo reposa aquí.”³⁹

³⁹ Max Caspar, *Kepler*, trad. C. Doris Hellman (Nueva York: Dover Publications, 1993), 359.

- “I used to measure the heavens, now I shall measure the shadows of the earth.
Although my soul was from heaven, the shadow of my body lies here.”

Lamentablemente cuatro años después de la muerte de Kepler, el cementerio fue destruido debido al paso de la guerra. Fue hasta 1808 que Karl Theodor von Dalberg, príncipe de Ratisbona, mandó hacer un monumento en el lugar donde se encontraba su tumba (*Baumgardt, 1951*).

"Así, unos años después de su muerte, el lugar de descanso de sus restos ya no era conocido. La tumba de Tycho Brahe está en la iglesia de Tyn en Praga, Galileo fue enterrado en la iglesia de la Santa Croce en Florencia, Newton descansa junto con los grandes en la Abadía de Westminster. La veneración por la genialidad fue lo que levantó estos merecidos monumentos. Pero no hay ninguna lápida en el lugar donde fue enterrado, el no menos talentoso, Kepler. Es como si el destino, que en vida no le dio paz, continuara persiguiéndolo aún después de la muerte."⁴⁰

Además de dejar una viuda, Kepler también dejó atrás dos hijos de su primer matrimonio y cinco hijos de su segundo matrimonio. Tristemente la deuda del imperio nunca se le pagó a su familia, por lo que Jakob Bartsch, el aprendiz y yerno de Kepler, comenzó la publicación del último escrito de Kepler, *Somnium seu Astronomia Lunari*;⁴¹ pero murió antes de poder terminar, de manera que fue Louis Kepler el que se encargó de publicar este libro en Frankfurt en el año de 1636 (*Bryant, 1920*).

El libro es considerado como el primer libro de ciencia ficción y trata sobre el viaje del muchacho Duracotus a la Luna. Tomando inspiración de su propia vida, Kepler incluye muchas de sus ideas científicas al relato, la más importante, su 'idea' de lo que más tarde Newton va a desarrollar como la teoría de gravitación universal y su suposición de la existencia de mareas en la Luna debido a la atracción con la Tierra. Algo único que tiene este libro es una descripción muy acertada del cielo lunar, es decir, de cómo se ven las estrellas desde la Luna. Nuevamente Kepler es capaz de trasladar su punto de referencia para describir las posiciones de las estrellas, recordando que anteriormente lo había hecho con Marte para descubrir la segunda ley.

Entre 1594 y 1630 Kepler publicó 33 trabajos diferentes, además dejó 22 manuscritos sin publicar, los cuales pasaron a su hijo Louis Kepler, después de la muerte de su padre. Para 1718 M. Gottlieb Hansch compró todas las obras y publicó las 7 que son la correspondencia epistolar en un solo volumen con el nombre de: *Epistole ad Joannem Keplerum, insertis ad easdem responsionibus Keplerianis, quidquid hactenus reperiri potuerunt, opus novum, et cum Jo. Kepleri vita*.⁴²

⁴⁰ Caspar, *Kepler*, 361.

- "Thus but a few years after his death, the resting place of his bones was no longer known. Tycho Brahe's grave is in the Tyn church in Prague, Galileo is buried in the venerable church of Sante Croce in Florence, Newton rests among the great dead in Westminster Abbey. Veneration for genius erected these worthy monuments. But no tombstone covers the place where the no less gifted Kepler was interred. It is as though the fate, which in life gave him no peace, continued to pursue him even after death."

⁴¹ El sueño de la astronomía lunar o el sueño de Kepler.

⁴² Brewster, *The martyrs of science*, 229.

Para 1733 el resto de los manuscritos de Kepler fueron vendidos en 4000 francos a M. De Murr para la Academia Imperial de Ciencias en San Petersburgo, lugar donde se encuentran actualmente. Algunos años después los científicos Euler, Lexell y Kraft fueron elegidos para revisar estos manuscritos y seleccionar aquellos que valía la pena publicar, pero al final ninguna publicación se llevó a cabo (*Brewster, 1841*).

“La suya fue una ovación sin pretensiones de un éxito, no fue un triunfo ostentoso de la ambición; y si un noble orgullo ocasionalmente me mezclaba con sus sentimientos, era el orgullo de ser elegido como el mensajero de la verdad física, no el de ser favorecido con un genio superior.”⁴³

⁴³ Brewster, *The martyrs of science*, 233.

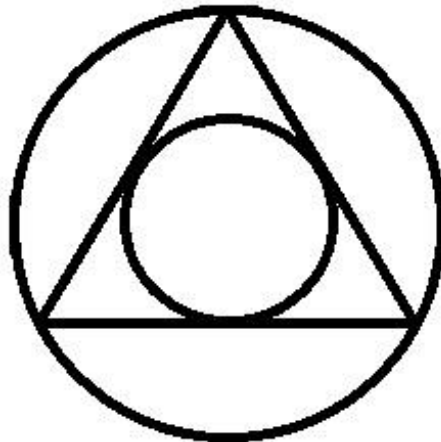
- “His was the unpretending ovation of success, not the ostentatious triumph of ambition; and if a noble pride did occasionally mingle itself with his feelings, it was pride of being the chosen messenger of physical truth, not that of being the favoured possessor of superior genius.”

2. *Mysterium Cosmographicum*

La historia de este libro comienza en la Universidad de Tubinga con el profesor de astronomía Michael Maestlin, quien en 1589 tuvo como alumno a Johannes Kepler. Gracias a sus enseñanzas, Kepler comenzó a interesarse en la astronomía, pero específicamente en la astronomía copernicana.

No se sabe con certeza qué tanto basaba sus clases Maestlin en el sistema copernicano, pero lo que sí es seguro es que lo presentaba en su curso como una 'herramienta' para realizar los cálculos de manera más sencilla. Fue de esta manera que el joven Kepler conoció, y quedó maravillado y convencido de que el Sol está en el centro del Universo.

Años más tarde, Kepler se convirtió en maestro de matemáticas en un colegio de Graz y fue ahí donde en el verano de 1595, mientras explicaba a unos alumnos los signos zodiacales, se dio cuenta de que la relación de dos círculos concéntricos con un triángulo inscrito entre ellos, era semejante a la relación entre las órbitas de Saturno y de Júpiter.



*Figura 1. Esquema de la relación entre las órbitas de Saturno y Júpiter según Kepler.*⁴⁴

Emocionado por tal descubrimiento, colocó diferentes figuras planas entre dos círculos concéntricos, pero después de probar con otros planetas y con otras figuras, se dio cuenta que las relaciones posibles creadas con las figuras planas eran demasiadas. Esto lo llevó a elevar la dimensión y acotar las figuras a los sólidos perfectos.

Con este cambio, Kepler no sólo encontró una figura asociada a cada órbita, sino que además encontró la justificación perfecta para el número de planetas: como sólo existen cinco sólidos platónicos, sólo puede haber seis planetas.

⁴⁴ Realización propia.

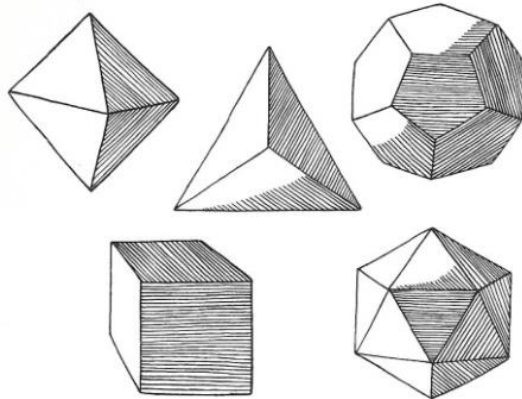


Figura 2. Los cinco sólidos platónicos.⁴⁵

A principios de 1596, Kepler regresó a Württemberg por seis meses, a pesar de que sólo tenía permiso de dos, y durante su estancia logró convencer al Duque de construir una ‘copa’ con la forma de su modelo propuesto. Al final el proyecto nunca se llevó a cabo, pero nos dejó un modelo de madera hecho por Kepler, y un bosquejo con los detalles de cómo veía al Universo.

El libro comienza a tener forma hasta otoño de 1596, pero se ve interrumpido por las correcciones de Maestlin y por el compromiso de Kepler con Bárbara Müller. Al final la boda se celebró en abril de 1597 y el libro fue publicado en marzo de ese mismo año.

En esa época, el precio de un libro era de 10 kreuzers, pero para que logaran publicar el libro, Kepler tuvo que comprar 200 copias por adelantado, de manera que envió algunas de ellas a todos los grandes astrónomos de la época pidiendo su opinión. Entre ellos resaltan Galileo Galilei, Tycho Brahe y Reimarus Ursus.

Kepler basa toda su investigación astronómica en tres preguntas:

1. ¿Por qué ese número de planetas?
2. ¿Por qué esas distancias entre ellos?
3. ¿Por qué se mueven a esas velocidades?

En este libro, el *Mysterium Cosmographicum*⁴⁶, Kepler responde (mal) a las dos primeras preguntas con su teoría de los sólidos perfectos: sólo puede haber seis planetas porque únicamente hay cinco sólidos perfectos y la distancia entre ellos está determinada por el sólido que se encuentra en medio. Desde la elaboración de este libro, Kepler busca responder la tercera pregunta analizando la relación entre las revoluciones de los planetas y las distancias con el Sol (datos que ya eran conocidos y que Kepler obtiene de Copérnico).

⁴⁵ Carl Sagan, *Cosmos*, trad. Miquel Muntaner i Pascual y María del Mar Moya Tasis (Barcelona: Editorial Planeta, 1982), 58.

⁴⁶ Nombre completo: *Prodromus Dissertationum Cosmographicarum continens Mysterium Cosmographicum de admirabili Proportione Orbium Coelestium deque Causis Coelorum numeri, magnitudinis, motuumque periodicorum genuinis et propriis, demonstratum per quinque regularia corpora Geometrica.*

Lamentable o afortunadamente, Kepler no llegó a esta relación en el *Mysterium*, pero sí lo hizo años después en el *Harmonices Mundi*; aun así, esta primera aproximación que propone es bastante acertada, y hay que reconocerle la idea de que la velocidad de traslación de un planeta depende de la distancia con el Sol; con esto Kepler rompe con el concepto aristotélico del ‘alma motriz’, de manera que el movimiento del planeta no depende únicamente de una propiedad intrínseca, sino que también depende de su distancia al Sol.

La publicación del libro no tuvo tanto éxito como Kepler esperaba. Pocos astrónomos demostraron un interés, ya que para poder entenderlo se necesitaban conocimientos matemáticos y estar al corriente de las disputas entre el copernicanismo y el ptolomeísmo. No creó controversia, ni en el ámbito astronómico, ni en el teológico; a la única persona a la cual le causó conflicto fue al mismo Kepler.

Es por eso que en 1621, 25 años después de la publicación original, Kepler publicó una segunda edición. En esa nueva obra, Kepler deja el texto original, pero le agrega 164 notas con correcciones e ideas adicionales; curiosamente estas juntas casi superan la longitud de la primera edición. A pesar de que cuando Kepler redactó la segunda edición ya había publicado dos de sus leyes y estaba muy cerca de la tercera, él siguió justificando la hipótesis planteada en el *Mysterium*.

El libro se puede dividir en cuatro partes:

1. Prefacio, y capítulos 1 y 2 – Es aquí donde viene la información más importante, la exposición del modelo de los sólidos perfectos y el verdadero desarrollo del contenido del libro.
2. Capítulos 3 al 10 – Son las justificaciones geométricas, metafísicas y astrológicas sobre el acomodo de los sólidos y su orden. Se estudian las propiedades de los sólidos perfectos, sus relaciones mutuas y su relación con la hipótesis formulada.
3. Capítulos 11 al 19 – Es el análisis de las propiedades que tienen los planetas a partir de su acomodo y a su posición entre los sólidos perfectos. De nueva cuenta son justificaciones geométricas y comparaciones de los resultados obtenidos con los datos de Copérnico y los resultados obtenidos con los datos ‘corregidos’ de Maestlin, y con las propiedades de los sólidos perfectos.
4. Capítulos 20 al 23 – Después de aceptar que el modelo presentado es verdadero, en estos capítulos se exponen las consecuencias de esto, haciendo una investigación de los movimientos de los planetas según sus distancias y fuerzas.

Además el libro cuenta con una epístola dedicatoria, una dedicatoria antigua y sus conclusiones.

Para facilitar el análisis, este trabajo también divide el libro en estas cuatro partes, presentando y analizando la información más relevante de cada una.

Esta primera obra de Kepler es especial, porque a pesar de que actualmente no tiene ninguna validez científica y en su momento de publicación tampoco tuvo mucha popularidad, Kepler

siempre la consideró su mayor logro. Además de que las hipótesis planteadas por Kepler son únicas en el sentido de que, a pesar de que en esa época los astrónomos buscaban darle sentido al cosmos con un modelo, Kepler tomó el modelo de Copérnico y lo que buscó fue darle una explicación física o geométrica. También en esta primera obra queda muy claro el razonamiento kepleriano, las trampas que utiliza, los pasos que se salta, la imaginación y creatividad única que tiene, y la inocencia y energía que siempre va a marcar su vida.

Después de la publicación de su libro, el pequeño pueblo de Graz le comenzó a quedar chico al genio y a sus ganas de seguir adelante. De igual manera la situación sociopolítica del lugar cada vez era más complicada, por lo que para finales del siglo, Kepler y su familia tuvieron que abandonar Graz. Para fortuna de la ciencia, el siguiente destino fue Praga para trabajar bajo el mando del gran astrónomo Tycho Brahe.

Epístola Dedicatoria

“Saludos, amigo lector.
Qué es el mundo, cuál es la causa y la razón de Dios al crear,
de dónde los números a Dios, y cuál la ley de tan gran masa,
por qué son seis los orbes, a cada orbe qué espacios lo separan, por qué tanto espacio entre Júpiter y Marte
no siendo los orbes primeros;
todo esto aquí Pitágoras te hará saber con las cinco figuras.
Con este ejemplo claramente enseñó que podemos renacer,
tras dos mil años de error
hasta la aparición de Copérnico,
nombre del mejor investigador del mundo.
Pero no aplaces tú por más tiempo
los frutos contenidos en estas envolturas.”⁴⁷

Para la segunda edición del libro, Kepler decide mantener la obra original intacta y agregar notas para completar y perfeccionar su libro. Esto es debido a que Kepler pensaba que la primera edición era tan valiosa que no se debía modificar, además de que “[...] como si un oráculo bajado del cielo hubiese sido dictado a mi pluma, así cada principal capítulo del pequeño tratado fue reconocido inmediatamente por quienes lo entendieron como completamente verdadero (como suelen serlo las obras manifiestas de Dios).”⁴⁸

De igual manera Kepler hace una nueva dedicatoria en donde nuevamente agradece a los nobles que lo apoyaron en la primera edición; agrega a sus nuevos protectores, a Tycho Brahe por sus enseñanzas y pide para que los políticos en guerra pongan a un lado sus diferencias y en lugar de pelear, se dediquen a la filosofía y a las matemáticas. También invita los lectores a ser testigos de sus demás obras con las cuales termina de perfeccionar a la astronomía.

⁴⁷ Johannes Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, trad. Eloy Rada García (Madrid: Alianza Editorial, 2013), 52.

⁴⁸ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 47.

Dedicatoria Antigua

Kepler comienza el libro agradeciendo a los nobles que apoyaron su obra y que la han esperado durante siete meses, alabando la genialidad de su libro y de cómo sus ideas son una ventana a la mente del Creador mismo.

Para Kepler esta obra era una necesidad humana, pero sabía que muchos no lo veían de esa manera y que la mayoría no la entendería. De cualquier manera, para él era una obligación utilizar todos sus sentidos y sus conocimientos para acercarse a Dios a través del conocimiento.

Notas:

Kepler acepta que este libro fue un escape de las obligaciones que tenía como matemático de la escuela de Graz, obligaciones que incluían dar clases y hacer calendarios con predicciones astronómicas; obligaciones que siempre las hizo por necesidad monetaria, nunca por gusto.

“Escribo (pronósticos) no para el vulgo, ni para los doctos (salvo para muy pocos), sino para nobles y prelados que se atribuyen algunos conocimientos de las cosas que ignoran... (pero sobre todo) por si esto les anima a mejorar un poco mi salario.”⁴⁹

Kepler también aprovecha las notas de la dedicatoria para explicar lo que fue de su vida después de la primera publicación; cómo fue que tuvo que salir de Graz y cómo fue que llegó a Praga para estar bajo las enseñanzas del gran Tycho Brahe, los conocimientos que adquirió con él, las obras que realizó después y cómo todo siempre estuvo impulsado por este libro.

2.1 Prefacio, capítulos 1 y 2

Estando en Graz, Kepler pudo profundizar más sobre el modelo heliocéntrico y comenzó a buscar una justificación física al modelo. Lo primero que Kepler buscó, lo que siempre le llamó la atención y a lo que dedicó gran parte de su investigación fue al “*Numerus, Quantitas et Motus Orbium*”⁵⁰; es decir al número, a la magnitud y al movimiento de los orbes celestes.

El primer intento de Kepler de encontrar una justificación al modelo heliocéntrico fue ver si los círculos de las órbitas de los planetas eran el doble, el triple, el cuádruple o si existía alguna relación matemática entre ellos; saber cuánto se apartaban uno de otro, según Copérnico.

El segundo intento fue todavía más arriesgado que el primero. Kepler colocó un planeta entre Júpiter y Marte, y otro entre Venus y Mercurio; planetas suficientemente pequeños que no eran visibles para el hombre, pero que su existencia podría ‘arreglar’ las proporciones entre las órbitas de los planetas. Lamentablemente, al final la relación entre Júpiter y el nuevo planeta seguía siendo

⁴⁹ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 223.

⁵⁰ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 66.

mayor a la de Júpiter y Saturno, además de que con este argumento no había nada que detuviera el número de planetas posibles. No había nada que justificara la existencia de sólo seis planetas, u ocho o de un número infinito.

El tercer intento de Kepler fue enfocado en las proporciones de las fuerzas que mueven a cada uno de los planetas, con un esquema que explicara la relación entre la distancia al Sol y la fuerza con la que se mueve el planeta.

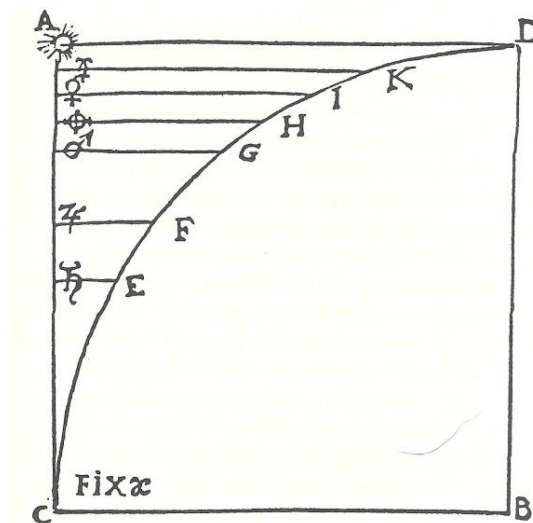


Figura 3. Esquema de la relación entre la distancia al Sol y la fuerza que siente cada planeta.⁵¹

Sobre la recta AC se encuentran los planetas a proporción según su distancia con el Sol (vértice A), y la fuerza va a ser la recta que cruza paralela a AD, según el planeta.

- Mercurio – K
- Venus – I
- Tierra – H
- Marte – G
- Júpiter – F
- Saturno – E

Por lo tanto, la fuerza del Sol (la línea tangente a AD) va a ser infinita y la fuerza del Sol sobre las estrellas va a ser cero, razón por la cual no se mueven.

Al final Kepler rechazó esta idea por falta de datos. El mismo Kepler expresa su fracaso, “a fuerza de trabajo y de infinita repetición de posiciones de arcos y senos, llegué a convencerme de que esta opinión era insostenible.”⁵²

⁵¹ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 68.

⁵² Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 68.

Al final la respuesta le llegó a Kepler por casualidad. El 9 de julio de 1595, mientras mostraba en clase los pasos de las grandes conjunciones de Saturno y Júpiter a través de los doce signos zodiacales y cómo cruzan de un signo a otro, fue formando un esquema con cuasi triángulos en donde al final quedó la figura 4.

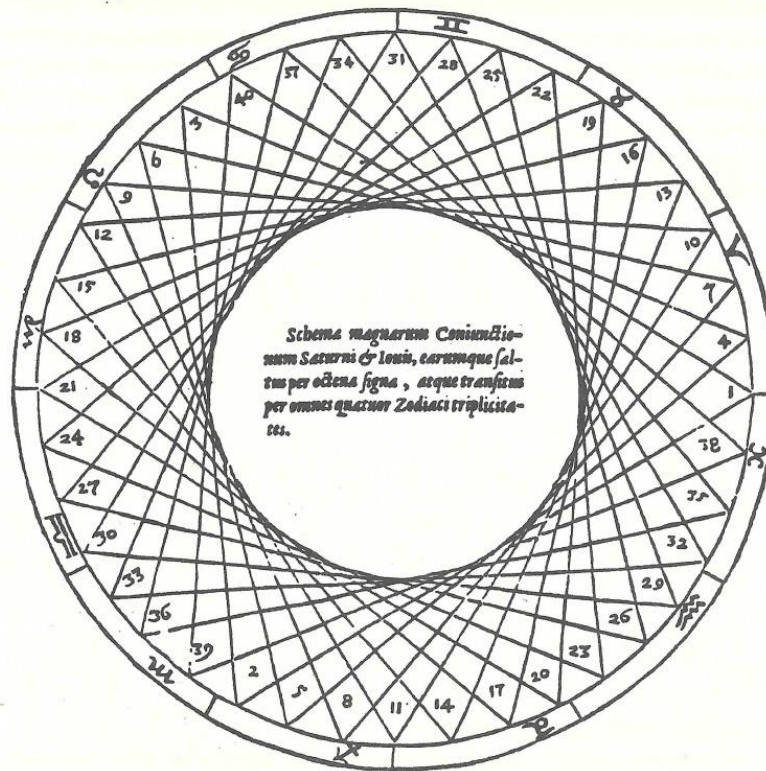


Figura 4. "Esquema de las grandes conjunciones de Saturno y Júpiter y sus saltos de ocho signos pasando por las cuatro triplicidades del zodiaco."⁵³

Inmediatamente se dio cuenta que la proporción de un círculo con otro parecía la que hay entre Júpiter y Saturno; además de que el triángulo es la primera figura plana, y Saturno y Júpiter son los primeros planetas. Lamentablemente para Kepler, el cuadrado ya no resultó para la proporción entre Marte y Júpiter, y a pesar de que siguió intentando con diferentes figuras y otras proporciones, las posibilidades eran demasiadas.

"Y de nuevo me preguntaba, por qué habrían de ser planas las figuras entre los orbes. Añadamos mejor cuerpos sólidos."⁵⁴ Y así fue como Kepler, recordando la existencia de únicamente cinco sólidos perfectos, llegó a la conclusión de que éstas debían de ser las figuras que rigieran la proporción entre los planetas; aún antes de hacer los cálculos exactos.

⁵³ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 69.

⁵⁴ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 70.

“La *Tierra* es el círculo que es medida de todo. Circunscribele un *dodecaedro*. El círculo que lo circunscribe será *Marte*. Circunscribe a *Marte* con un *tetraedro*, el círculo que lo comprenda a éste será *Júpiter*. Circunscribe a *Júpiter* con un *cubo*. El círculo que comprenda a éste será *Saturno*. Ahora inscribe en la *Tierra* un *icosaedro*. El círculo inscrito en este será *Venus*. Inscribe en *Venus* un *octaedro*. El círculo inscrito en él será *Mercurio*. (Y así es como) Tienes la razón del número de los planetas.”⁵⁵

TABVLA III. ORBIVM PLANETARVM DIMENSIONES ET DISTANTIAS PER QVINQVE
REGVLARIA CORPORA GEOMETRICA EXHIBENS.
ILLVSTRISS. PRINCIPI, AC DÑO. DÑO. FRIDERICO, DVCI WIR-
TENBERGICO, ET TECCIO, COMITI MONTIS BELGARVM, ETC. CONSECRATA.

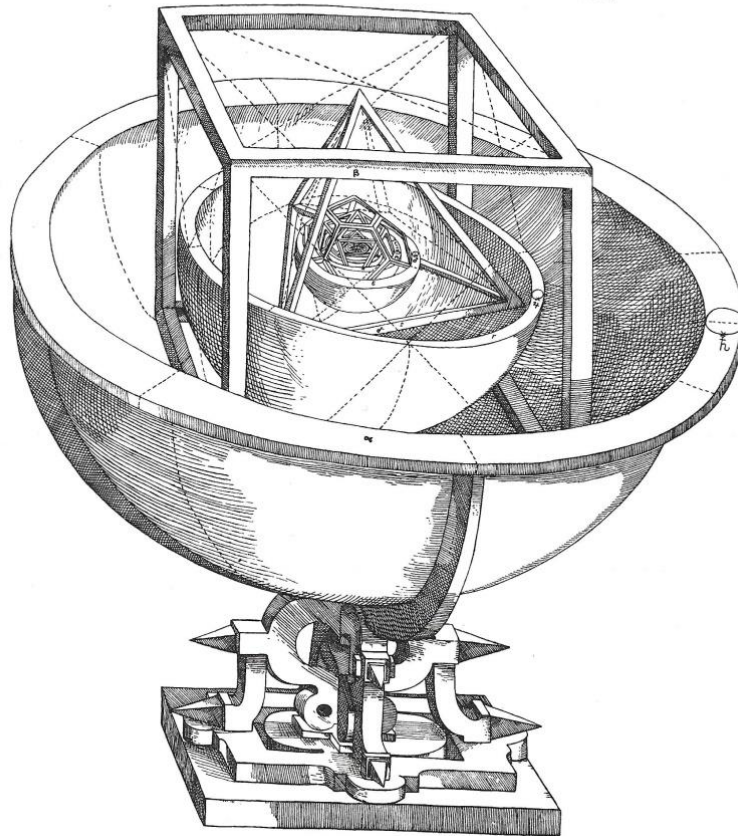


Figura 5. Copa en forma del modelo astronómico de Kepler.⁵⁶

Uno de los principales problemas que enfrentó Kepler en la publicación de la primera edición del libro es que las ideas de Copérnico, o no eran conocidas, no eran aceptadas, o no eran reconocidas públicamente (como le pasó con Galileo). Esto obligó a Kepler a tener que ‘justificar’ su elección del modelo copernicano sin desprestigiar totalmente el modelo ptolomeico, únicamente mostrando por qué el modelo heliocéntrico es superior al geocéntrico.

⁵⁵ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 70.

⁵⁶ Sagan, *Cosmos*, 58.

En el primer capítulo del libro Kepler no expone la idea principal de su obra, sino únicamente hace una comparación entre el modelo geocéntrico y el modelo heliocéntrico. Curiosamente el capítulo iba a ser más pro-Copérnico de lo que terminó siendo, fueron Mestlin y Hafnerreffer los que le recomendaron a Kepler que cambiara el tono del capítulo. Sin embargo esto no detuvo a Kepler de alabar a Copérnico y de criticar a Ptolomeo.

Kepler argumenta que si las observaciones son las mismas entre Ptolomeo y Copérnico y ninguno de los dos modelos tiene una hipótesis comprobable (ambos son creados a partir de fundamentos filosóficos), entonces las justificaciones también deben de tener el mismo valor. Sin embargo, la validez de cada sistema debe de ser en base a las predicciones que logran, argumento en donde Copérnico es un claro ganador. Además de que poner al Sol en el centro del Universo y a la Tierra móvil a su alrededor, le quita a la Tierra ese lugar de privilegio que antes tenía.

De igual manera, Kepler critica fuertemente al modelo de Ptolomeo por no poder explicar varios de los fenómenos que son fácilmente explicados con el modelo de Copérnico tales como el tiempo de las revoluciones, el tamaño de los epiciclos y la retrogradación de los planetas.

A partir de esto, Kepler da una breve explicación del modelo y de las hipótesis del heliocentrismo. Copérnico le adjudica cuatro movimientos a la Tierra: el primero es el que traslada a la Tierra alrededor del Sol como a los otros planetas, con este movimiento elimina 3 excéntricas y 3 epiciclos de los otros planetas.

El segundo movimiento es de la Tierra sobre un pequeño círculo que la encierra y que va de este a oeste (algo parecido a la rotación). Con este movimiento desaparece la novena esfera 'sin estrella' de los Alfonsinos y el movimiento de las deferentes del apogeo de Venus.

El tercer movimiento es el de los polos terrestres, actualmente este movimiento nosotros lo entendemos como la inclinación del eje de rotación de la Tierra, pero Copérnico incluye este movimiento para dejar el eje de rotación a 90° (en un ángulo recto respecto a la línea que une a la Tierra con el Sol). Este movimiento elimina unas irregularidades de los movimientos de otros planetas y también elimina el movimiento de la octava esfera.

Por último, el cuarto movimiento es el de rotación, que 24 horas y va de poniente a oriente.

“Y te ruego que examines el grabado y consideres que nuestra Tierra, [...] gira en una dirección o que todo el Universo lo hace en dirección contraria mediante diez movimientos distintos (porque diez son los orbes, cada uno distinto de otro) de increíble velocidad, y que todo esto no es para otra cosa para que ese punto, esa pequeña figura y ella sola inmóvil, porque fuera no hay nada.”⁵⁷

⁵⁷ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 84.

Para el segundo capítulo del libro, Kepler comienza con las bases geométricas de su modelo. Uno de los fundamentos es el hecho de que la esfera es la figura perfecta en la geometría volumétrica y de que el Universo está basado en ésta, ya que Dios la utilizó como molde para la construcción del mismo. De igual manera Kepler remarca el hecho de que el primer pensador que dijo que los cielos y el Universo estaban divididos en esferas fue Aristóteles.

Por otra parte, el número de figuras planas regulares que se pueden formar con líneas rectas es muy grande, mientras que el número de figuras sólidas que se pueden formar con líneas, y con planos equiláteros y equiángulos son únicamente cinco: el cubo, el tetraedro, el dodecaedro, el icosaedro y el octaedro. Estas figuras son conocidas como los sólidos euclidianos o los sólidos perfectos.

Kepler siempre presumió ser un profeta capaz de leer la mente del Creador, y es en el segundo capítulo donde más se puede ver este ímpetu de querer explicar todo lo que Dios hizo y por qué lo hizo. A su vez, casi al final del capítulo es donde expone la idea principal y la razón central de su libro: su esqueleto del cosmos.

Tomando como argumento que la mayor distancia entre planetas, según Copérnico, es entre Marte y Júpiter, entonces queda evidente que entre estos dos planetas debe de estar el sólido que produzca la mayor diferencia entre una esfera inscrita y una circunscrita: este sólido es el tetraedro. La siguiente mayor diferencia es entre Júpiter y Saturno, la cual es similar a la diferencia entre la esfera interior y la exterior de un cubo. De igual manera la diferencia entre Venus y Mercurio es casi igual a la diferencia que produce un octaedro.

Lo sólidos que crean una menor diferencia son el icosaedro y el dodecaedro, y los planetas con menor distancia son Venus con la Tierra, y la Tierra con Marte. Debido a que estas distancias son muy parecidas, Kepler no especifica en este momento cuál de los dos sólidos se encuentra entre qué planetas. “Por lo cual, si alguien me preguntase por qué sólo hay seis esferas móviles, respondería que porque no son precisas más que cinco proporciones que son el mismo número de cuerpos regulares en las matemáticas.”⁵⁸

Notas:

En estas notas Kepler se apoya más de sus ideas desarrolladas en *Astronomía Nova*, y a pesar de que habla sobre el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, y de que para el momento en que escribe la segunda edición ya había comprobado que las órbitas de los planetas son elípticas, nunca especifica que la órbita de la Tierra es elíptica.

De igual manera acepta que los cuatro movimientos que Copérnico le había establecido a la Tierra, y que él los da como evidencia en favor del heliocentrismo, en realidad son sólo dos: uno es el de la Tierra girando en torno a su propio centro y el otro es el de la Tierra girando alrededor del Sol

⁵⁸ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 99.

(rotación y traslación). Los otros dos movimientos los toma como perturbaciones de los primeros dos y como errores en los datos de las observaciones de Copérnico.

Las notas del segundo capítulo hablan de manera general sobre la construcción de los sólidos perfectos: explican por qué sólo existen cinco y cuáles son las características que los hacen únicos (Tabla 1). Si se inscribe una esfera dentro de cualquiera de los sólidos perfectos, entonces los centros de las caras serán tangentes a la superficie de la esfera. De igual manera, si se inscribe un sólido perfecto dentro de una esfera, entonces sus vértices tocarán la superficie de la esfera. Estas dos características de los sólidos perfectos, que Kepler enuncia como definiciones, son las bases para el desarrollo de su esqueleto del cosmos.

Tabla 1. Características de los cinco sólidos perfectos.⁵⁹

Sólido	Forma de las caras	Número de caras	Número de aristas	Número de vértices	Esfera inscrita
Cubo	Cuadrados	6	12	8	Media
Octaedro	Triángulos	8	12	6	Media
Dodecaedro	Pentágonos	12	30	20	Máxima
Icosaedro	Triángulos	20	30	12	Máxima
Tetraedro	Triángulos	4	6	4	Mínima

2.2 Capítulos del 3 al 10

En su afán de probar que su modelo o esqueleto del cosmos es verdadero, Kepler busca cualquier cosa para justificar el acomodo de los sólidos perfectos en ese orden. Esto lleva a Kepler a dividir en dos grupos a los sólidos: primarios (cubo, tetraedro y dodecaedro) y secundarios (octaedro e icosaedro).

Cada grupo de sólidos tiene sus características específicas, Kepler enlista 7 diferencias, pero las principales son:

- Los sólidos primarios se distinguen por la figura plana de sus caras y porque todos utilizan un vértice simple (entre tres planos).
- Los sólidos secundarios, por su parte, tienen caras triangulares y sus vértices tienen 4 ó 5 planos para generar un vértice sólido.

Para Kepler era fundamental darle un equilibrio al sistema Copernicano y a la posición que ocupa la Tierra dentro de éste; con tres planetas más lejanos que ella del Sol y dos más cercanos que ella a la estrella. De manera que, para balancear esto, Kepler toma al Sol como otro astro, así la Tierra queda entre grupos de tres cuerpos. Además de que con la clasificación previamente mencionada, al ser tres planetas los superiores a la Tierra y dos inferiores, los tres sólidos primarios deben de estar superiores a la Tierra y los dos sólidos secundarios, inferiores.

⁵⁹ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 101.

Para poder justificar el orden de los sólidos perfectos dentro del modelo heliocéntrico, Kepler atribuye ciertas características a las figuras.

La primera figura es el cubo, 'la figura más digna' después de la esfera. Esta dignidad es debido a que es la única generada por su base, además de que es la única que se puede partir en más cubos sin generar residuo; todos sus ángulos son rectos y es la más simple de todas las figuras sólidas rectilíneas. También según Kepler, el cubo es el sólido que más se parece al cuerpo humano, ya que ambos tienen seis direcciones (alto, bajo, delante, detrás, izquierda y derecha).

Después del cubo, la siguiente figura más digna o más importante, es el tetraedro. Es el único, además del cubo, que su figura plana es semejante a su figura sólida, además de que los otros sólidos perfectos utilizan el triángulo como base de sus figuras.

Algo que no menciona Kepler, y que en mi opinión es la mejor razón por la cual la pirámide es la segunda figura más digna, es que el tetraedro es el sólido perfecto con el menor número de caras. Curiosamente Kepler no considera y argumenta más cosas sobre los ángulos y las caras.

Sobre las otras figuras (dodecaedro, octaedro e icosaedro), Kepler no da explicaciones tan claras, ni evidencias que puedan justificar el orden, simplemente da por hecho que el dodecaedro se encuentra entre Marte y la Tierra, y de que no hay dudas acerca de esto, a diferencia del cubo y del tetraedro que les dedica todo un capítulo.

Es curioso que a pesar de que Kepler y Copérnico quitan a la Tierra del centro del Universo, todavía le dan el lugar privilegiado de contar los planetas empezando en la Tierra y no empezando desde el más cercano al Sol, como lo hacemos actualmente. Con esto en cuenta, Kepler lucha con el hecho de que el icosaedro (entre Venus y la Tierra) se encuentra antes del octaedro (entre Mercurio y Venus), pero al final justifica este orden con el hecho de que el octaedro se parece más al cubo y el icosaedro más al dodecaedro, por lo que los dos primeros deben de estar en las orillas del esqueleto. Así es como el cubo se gana su lugar privilegiado al ser el más cercano al mundo extraterrestre y el octaedro al ser el más cercano al Sol.

El capítulo 9, Kepler lo describe como: "Este capítulo no es más que un juego astrológico, y ni siquiera debe formar parte de la obra, [...], sin embargo compárelo lector con los argumentos de Ptolomeo [...] y verá que nuestras razones no resultan inferiores ellas, y acaso [son] mejores."⁶⁰

Lo importante de este capítulo es que, por primera vez Kepler le asigna un sólido a cada planeta; excepto a la Tierra. "Saturno tendrá al cubo, Júpiter a la pirámide, Marte al dodecaedro, el icosaedro a Venus y el octaedro a Mercurio. La Tierra, sin embargo, al no ser más que un límite no se compara con ninguno."⁶¹

⁶⁰ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 119.

⁶¹ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 116.

Por su parte, el capítulo 10 es una justificación que hoy en día no tendría ningún valor científico, pero que en la época de Kepler era muy válida. Nuevamente Kepler intenta justificar la razón por la cual elige a los sólidos perfectos como base de su modelo cosmológico, y esta vez lo hace siguiendo una tradición pitagórica-platónica en donde se busca mostrar 'la nobleza' de una figura o de un número "en la composición de los elementos y su transformación en otros por composición o separación."⁶²

En este caso, Kepler utiliza los números sagrados de la astronomía: 6, 12 y 60, con la excepción del 15 y del 10, y agregando el 8, (en la primera edición Kepler no se da cuenta de que el 8 no es un múltiplo del 60 y lo pone como un 'claro despiste', para la segunda edición lo justifica tomándolo como un submúltiplo de 120) y menciona todos los elementos de los sólidos perfectos (caras, vértices, bases, aristas, etc.) que encajan con cada submúltiplo.

2.3 Capítulos del 11 al 19

"En estos capítulos tendré a los físicos en contra debido a que deduje las propiedades naturales de los planetas de cosas inmateriales y de figuras matemáticas, y porque además ahora me voy a atrever a investigar los orígenes de los círculos a partir de puras intersecciones imaginarias. Sólo quiero decirles estas pocas cosas: que Dios Creador, al ser una inteligencia, y al hacer lo que quiere, nada le impide, a la hora de atribuir las fuerzas y de trazar los círculos, que tenga en cuenta tanto las cosas sin materia como las cosas de naturaleza imaginaria."⁶³

Como la nota lo dice, en estos capítulos Kepler se basa en justificaciones más metafísicas que físicas o geométricas. Lo primero que hace es describir la orientación de cada uno de los sólidos perfectos respecto a los otros, de manera que quedan ordenados y orientados para su conveniencia.

El zodiaco se divide en 12 partes y Kepler intenta dar una causa a esta división tomando de base la división del cosmos con los sólidos perfectos. Retomando la organización propuesta anteriormente, Kepler se da cuenta de que existe una relación entre elementos de los sólidos perfectos y el número 120: 10 veces 12. A partir de esta relación, Kepler pasa a exponer un ejemplo de esta relación (división) duodenaria: la relación de las notas musicales al tener una cuerda e irla dividiendo en fracciones racionales. "Así hablando con propiedad, en música sólo tenemos cinco consonancias, en acuerdo con los cinco sólidos perfectos. Y si buscas el mínimo común múltiplo de las siete divisiones: 6, 5, 4, 3, 8, 5, 2, de nuevo hallarás 120; [...] mientras el mínimo común múltiplo de las consonancias perfectas es 12 de nuevo."⁶⁴

⁶² Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 232.

⁶³ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 123.

⁶⁴ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 133.

Después de esta relación, Kepler inscribe las figuras planas de cada sólido en círculos, parte los círculos a cuerdas y toma a los vértices como puntos para dividir las cuerdas y así obtener diferentes notas musicales. Curiosamente, ésta hipótesis que parece buena, no la desarrolla más.

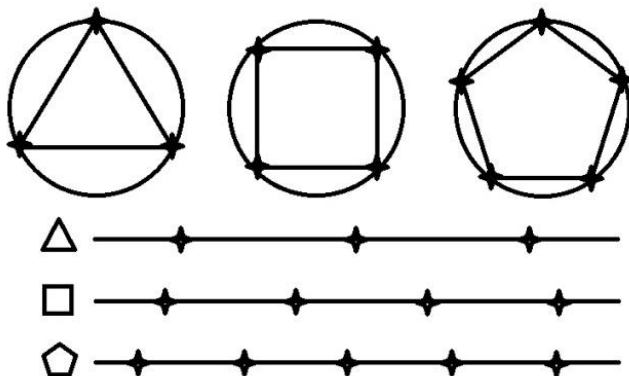


Figura 6. Cortes de los círculos según la figura que envuelven.⁶⁵

Más adelante Kepler busca demostrar, geométrica y numéricamente, su hipótesis central. Lo primero que hace es explicar que los orbes inscritos tocan los centros de la cara de cada una de las figuras y que los orbes circunscritos tocas los vértices de las figuras; de manera que los orbes inscritos, circunscritos y las figuras tienen el mismo centro.

Utilizando puras proposiciones de Euclides, Kepler es capaz de calcular la longitud de las aristas de todas las figuras en razón del radio de la esfera circunscrita. De esta manera, Kepler coloca un círculo circunscrito en las bases de cada sólido, por lo que se tiene un análisis donde GHL es la figura, I es el centro de la figura y O es el centro común del sólido y de las esferas. Lo primero que busca es encontrar HI para así poder obtener IO , pero para obtener HI , primero necesita hallar el lado de una figura, lo cual hace con las proposiciones de Euclides.

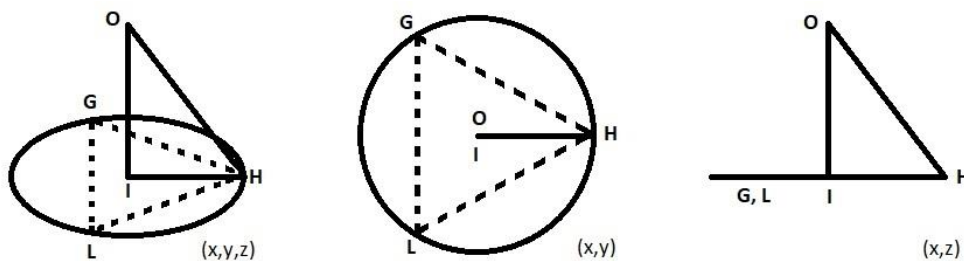


Figura 7. Ilustraciones del análisis anterior.⁶⁶

“Ahora continuaremos investigando los radios de los círculos circunscritos a la base a partir de las aristas ya conocidas; cosa que con la ayuda de los senos, [se] obtendrán muy fácilmente, [para] quien no considere que aquí se necesitan números absolutamente exactos.”⁶⁷

⁶⁵ Realización propia.

⁶⁶ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 149.

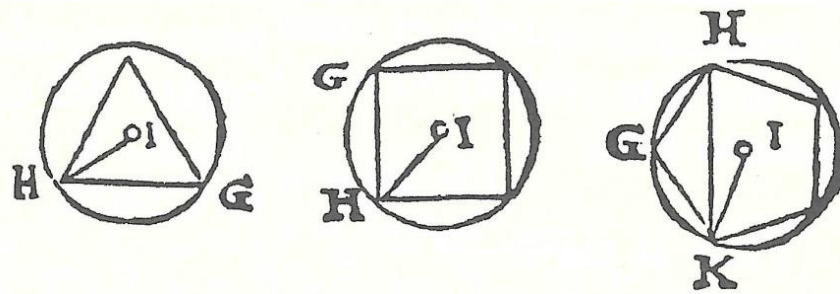


Figura 8. Ilustración de los radios de los círculos circunscritos en las bases.⁶⁸

De las figuras anteriores, teniendo los radios de los círculos circunscritos en las bases (HI) y la apotema o altura de las caras (HO), sacó el radio del orbe circunscrito (IO). Kepler intenta simplificar el análisis con más proposiciones y corolarios, y lo que obtiene se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Datos obtenidos tomando el radio del orbe circunscrito a la figura como 1000 unidades.⁶⁹

Figura en:	Arista base	Radio círculo	Radio esfera (orbe)
Cubo	1.155	816 ½	577
Pirámide	1.633	943	333
Dodecaedro	714	607	795
Icosaedro	1.051	607	795
Octaedro	1.414	816 ½	577*

*707 para la distancia mayor de Mercurio.

Es importante mencionar que tanto Ptolomeo como Copérnico aceptaban que los cursos de los astros son excéntricos, es decir no son círculos perfectos, de manera que al observar los planetas y medir las órbitas, existen distancias mínimas, medias y máximas. Esto hace que Kepler le asigne un grosor a las esferas de las órbitas de los planetas. Evidentemente este grosor va a variar según el planeta y es el que años más tarde, el mismo Kepler va a explicar con las órbitas elípticas.

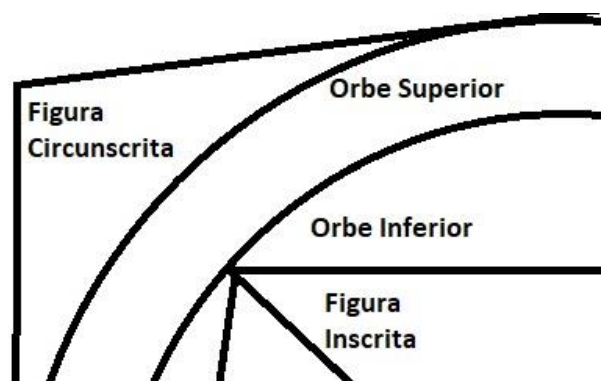


Figura 9. Corte mostrando los orbes y su relación con las figuras inscritas y circunscritas.⁷⁰

⁶⁷ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 150.

⁶⁸ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 150.

⁶⁹ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 152.

⁷⁰ Realización propia.

Kepler siempre se sintió muy orgulloso de ser el primero en estudiar las relaciones de los orbes, aunque también es capaz de reconocer que con el sistema Ptolemeico, no había necesidad de hacer dicho análisis (ni necesidad, ni medios).

Algo importante es que Kepler toma los datos de Copérnico como verdaderos y como la base de su investigación, datos que no son confiables. Comparando los datos obtenidos en el capítulo anterior y los de Copérnico, obtiene lo mostrado en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de datos de Copérnico y Kepler tomando el radio del orbe circunscrito a la figura como 1000 unidades.⁷¹

Planetas	Figura	Radio esfera	Copérnico
Saturno-Júpiter	Cubo	577	635
Júpiter-Marte	Pirámide	333	333
Marte-Tierra	Dodecaedro	795	757
Tierra-Venus	Icosaedro	795	794
Venus-Mercurio	Octaedro	577*	723

*707 para la distancia mayor de Mercurio.

“De lo cual puedes deducir con cuánta facilidad se hubiese advertido, y cuán grande diferencia sería la diferencia de los números, [que] si esto se abordase contra la propia naturaleza de los cielos, esto es, si el propio Dios en la creación no hubiese atendido a estas proporciones. Esto ciertamente no puede ser así por casualidad, que las proporciones de los cuerpos sean tan próximas a estos intervalos es el mismo que más arriba atribuí a los cuerpos con los mejores argumentos. Pues aunque 635 discrepa de 577 (cubo entre Saturno y Júpiter), sin embargo no hay ningún [sólido] al que esté más próximos que a éste.”⁷²

A pesar de la tabla anterior, Kepler acepta que las observaciones de Copérnico tenían algunos errores; afortunadamente, es el mismo Kepler quien da una explicación del error de los datos de Copérnico, y es que éste último hizo sus cálculos tomando a la Tierra como fija, sin considerar la excentricidad de su órbita, ni el hecho de que es una esfera sólida y no una superficie.

Para corregir estos errores, Kepler acude a su antiguo maestro Maestlin, quien le ayuda con los cálculos de las tablas y le corrige algunos errores, tanto matemáticos como de planteamiento. Lamentablemente Maestlin no es capaz de corregir todos los errores y curiosamente Kepler tampoco lo logra para la segunda edición, de manera que varios autores posteriores han hecho las correcciones necesarias.⁷³ Algunas se acercan más la hipótesis de Kepler, pero la mayoría de ellas lo alejan más de probar la validez de los sólidos perfectos.

⁷¹ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 156.

⁷² Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 156.

⁷³ E.J. Aiton, autor del cual se toman varias de las correcciones para las notas de esta edición.

Una de las mayores dificultades que tuvo Kepler para corregir los datos de Copérnico fue la Luna, específicamente si la tomaba en cuenta para realizar los cálculos o la ignoraba. Desde el principio, Kepler es honesto y acepta que tomará los datos que más se acerquen a su modelo, aunque esto signifique que su orbe tenga protuberancias en algunas partes.

De cualquier manera, la explicación que este libro le da a la existencia de la Luna es que el Creador decidió poner un cuerpo que girara en torno a la Tierra para recalcar la importancia de ésta dentro del resto de los planetas; que la Tierra fuera el centro de un pequeño sistema celeste. Evidentemente la noticia de Galileo en 1610 de que había descubierto más planetas fue difícil de aceptar para Kepler, pero reconoció que los cuerpos que había visto Galileo podían ser lunas de los otros planetas, salvando la idea central del *Mysterium*, aunque tuviera que tirar la hipótesis de la existencia de la Luna en torno a la Tierra debido a la preferencia de Dios.

Curiosamente Mercurio siempre fue el planeta más complicado del Sistema Solar. Desde la época de Copérnico siempre causó problemas al quererlo acomodar debido a que en las observaciones de algunos años parecía tener una órbita y en las de otros, otra. Sabemos que Mercurio fue el némesis de la ley de gravitación universal de Newton y que sólo la relatividad de Einstein lo pudo vencer, pero para Kepler, la dificultad con Mercurio vino al tratar de meterlo en el octaedro.

Al final Kepler arregla el problema tomando los valores medios de la órbita (valores que estaban mal porque Maestlin olvidó corregirlos), acomodando el octaedro de la manera que mejor le conviene, con los vértices como polos, y aun así no quedaba tan bien.

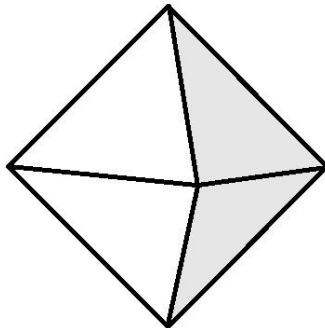


Figura 10. Orientación del octaedro dentro del modelo de Kepler.

Kepler siempre aceptó que las diferencias entre sus datos y los de Copérnico podrían parecer muy grandes para la astronomía (desde $-6'$ hasta $+2^{\circ}18'$), pero que estas diferencias no son tan grandes para otras disciplinas. Por esto, Kepler pasa todo un capítulo defendiendo sus resultados.

Su primer argumento es que la astronomía siempre ha estado en constante cambio y evolución, de manera que, así como Copérnico avanzó en el camino de la verdad con datos diferentes a los de Ptolomeo, así su modelo daba el siguiente paso y quedaba al lector escoger cual concuerda mejor con el cielo.

Su segundo argumento va en contra de las excentricidades de las órbitas de los planetas y la falta de argumentos para explicar su existencia. Con esto Kepler defiende el grosor que le pone a las órbitas en la construcción de su modelo, ya que las excentricidades caben dentro del grosor. “Si bien mis arcos (como estoy dispuesto a reconocer) no son absolutamente exactos y seguros, no obstante su defecto ha sido contagiado por las excentricidades.”⁷⁴

Su tercer argumento es que los datos de Copérnico son incorrectos, ya que al igual que el mismo Kepler, hace algunas modificaciones para que se ajusten mejor con su modelo. Curiosamente Kepler además de criticar la poca precisión de los datos de Copérnico, también lo alaba por crear una nueva astronomía aún con datos falsos e insuficientes.

Su cuarto argumento es que Copérnico toma las excentricidades propuestas por Ptolomeo las cuales son calculadas desde la Tierra. Kepler a su vez utiliza las excentricidades hechas por Maestlin calculadas desde el Sol, a partir de los datos de Copérnico.

Al final, Kepler se justifica con una carta de Rheticus en donde expone que tanto Copérnico como todos los astrónomos de la antigüedad modificaban los datos para acomodarlos a su doctrina, de manera que ninguno de los datos podían ser confiables.

“¿Qué opinas tú de Copérnico? [...] ¿Qué crees que no hubiera intentado, qué trabajos no habría hecho para reconciliar a los sólidos con sus esferas? [...] quisiera que nadie se pronunciase temerariamente contra mí, y que con ánimo tranquilo se acepte esta aplazamiento de la cuestión.”⁷⁵

De igual manera Kepler objeta que, a pesar de que sus datos son incorrectos o presentan un ‘grosor’ para acomodar a los sólidos entre cada uno de los planetas, en realidad el ‘error’ no es mayor a los presentados por los astrónomos Ptolemaicos o por el mismo Copérnico, especialmente los datos de Mercurio y de Venus. Esto es debido a que como casi siempre se encuentran bajo los rayos del Sol, estos provocan que las observaciones no sean tan claras; de manera que en realidad se pueden “acomodar según sus opiniones.”⁷⁶

Kepler propone a los astrónomos que si tienen algún problema que se lo guarden, ya que sus estudios también están llenos de errores. Antes de querer arreglar la órbita de Mercurio, primero deben arreglar la relación Tierra- Luna, entender los eclipses y demás fenómenos que se pueden observar; ya después podrán arreglar los otros planetas.

Kepler termina el capítulo con una carta de Maestlin en donde el maestro le explica las complicaciones que ha traído Mercurio para los todos los astrónomos: desde Ptolomeo, Copérnico, Rheticus y él mismo. Problemas que, sabemos, Einstein resolvió cuatro siglos después.

⁷⁴ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 177.

⁷⁵ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 182.

⁷⁶ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 186.

Notas:

La mayoría de las notas de estos capítulos son para justificar lo previamente escrito, otras son para arrepentirse totalmente de lo que escribió y otras son para explicar con más detalle lo que en un principio había escrito, apoyándose principalmente en su libro de *Harmonices Mundi*.

La primera nota del capítulo 11 comienza diciendo que “todo este capítulo, en cuanto al objetivo, pudo omitirse, pues carece de importancia.”⁷⁷ El resto de las notas son justificaciones del acomodo de los planetas en las posiciones y la alineación que propone durante el capítulo. Sin embargo, la última nota critica algunas de las posiciones de la primera edición, diciendo que son ilegítimas.

Algo importante a destacar de estas notas es que a pesar de que la segunda edición del *Mysterium* es publicada después de la primera edición de *Astronomia Nova*, Kepler regresa a los círculos como la figura de las órbitas de los planetas; “Pues siendo necesario el círculo para los movimientos de los planetas según la intención de Dios, lo rodeó una vez establecido según su intención con una esfera material y estrellada.”⁷⁸ También, al final de las notas, Kepler acepta que en realidad la orientación del zodiaco, a pesar de que depende de la orientación de los sólidos, no es importante para el modelo del cosmos.

Es hasta la segunda edición que Kepler aclara por qué para el caso de Mercurio, toma el dato de 707 en lugar de 577, donde 707 es el radio del círculo inscrito en el cuadrado del octaedro y 577 el radio de la esfera inscrita en el octaedro; esto para que la diferencia con los datos de Copérnico no sea tan grande. De igual manera Kepler renombra los puntos más cercanos y más lejanos de las órbitas con el Sol como afelio y perihelio, en lugar de apogeo y perigeo, como los había nombrado Copérnico.

Algo importante para el resto del libro, y el resto de sus obras, es que los datos y los cálculos de Kepler continuamente tienen errores, además de que en algunas ocasiones no da razones de porque realiza ciertos cálculos. Neugebauer lo describe perfectamente en la siguiente cita:

“Me gustaría dar [...] algunos ejemplos de los obstáculos más triviales que todo lector cuidadoso de las publicaciones de Kepler tuvo que encontrar prácticamente en cada página [...] el número de errores triviales de cálculo es enorme, los parámetros se cambian sin ninguna explicación, las referencias a las observaciones no son accesibles para nadie o a veces se citan de manera incompleta.”⁷⁹

⁷⁷ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 125.

⁷⁸ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 129.

⁷⁹ *Astronomy and History Selectes Essays*. (Nueva York: Springer-Verlag, 1983), 593.

- “I wish to give [...] some examples of those rather trivial obstacles which every careful reader of Kepler’s publications had to meet on practically every page [...] the number of trivial computing errors is enormous, parameters are changed without explanation, references to observations accessible to no one else are quoted sometimes in an incomplete form.”

En una de sus notas, Kepler critica su propia falta de formalidad al decir que ocuparía el grosor de la Luna dependiendo del ajuste con su hipótesis o no. Nuevamente utilizando sus resultados del *Harmonices* confirma que no se debe de tomar el grosor de la Luna, ni se debe de tomar a la Luna como un nudo o bulto; recordando que para la segunda edición, Galileo había descubierto las cuatro lunas de Júpiter y si ellas no afectan la órbita de su planeta, la Luna tampoco.

También acepta que su teoría de los sólidos perfectos no es, irónicamente, perfecta, sino que “las proporciones de las esferas han dejado en parte de depender de los cinco sólidos”⁸⁰, pasan a depender de la armonía de los cuerpos y de la geometría.

En estas notas, Kepler repite una idea que en su libro de *Astronomia Nova* ya había desarrollado a más detalle: “Puesto que toda materia tiende al reposo en el lugar que ocupa (a menos de que otro cuerpo vecino la atraiga hacia si con una fuerza magnética), de aquí se sigue, por tanto que la fuerza motora del Sol luce con esta inercia de la materia, [...], y de la proporción de una y otra fuerza surgirá al fin la aceleración y desaceleración del planeta.”⁸¹

Esta cita inmediatamente nos hace pensar en Newton, en sus leyes de movimiento y en su ley de gravitación universal, pero a pesar de que Kepler tiene una primera aproximación, es Newton el que realmente logra desarrollar completamente la idea de manera correcta.

Nuevamente Kepler en sus notas acepta que “la hipótesis de este capítulo es falsa; no obstante es muy grato el recuerdo de este epíquerema, [ya que] muestra por qué grados de ignorancia había de ascender a la ciencia y a la constitución de la astronomía.”⁸²

Más adelante, después de explicar que las excentricidades están dadas por las distancias de afelios y perihelios, Kepler acepta que “las causas de las excentricidades de cada uno de las planetas han sido develadas en *Harmonices Mundi*, [...] no sólo a partir de los cinco sólidos, sino sobre todo de las causas (las armonías) de las excentricidades.”⁸³

En sus notas, Kepler menciona a los trabajos de Tycho para explicar algunas de las discrepancias en los datos de Mercurio, recordando los meses que Kepler trabajó para Tycho, y resaltando la exactitud del danés. De igual manera, Kepler acepta que a pesar de que las variaciones de los datos de Mercurio son grandes, esto no implica un cambio en la forma o en los principios del movimiento, únicamente en la cantidad.

⁸⁰ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 167.

⁸¹ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 169.

⁸² Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 174.

⁸³ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 184.

2.4 Capítulos del 20 al 23 y conclusión

Para estos capítulos, Kepler ya no cree necesario dar más argumentos de por qué su teoría de los sólidos perfectos en el acomodo planetario propuesto por Copérnico es verdadera. De manera que, para el capítulo 20 decide explorar los resultados de su hipótesis tomando a los planetas en movimiento. Para esto lo primero que establece es dar a conocer la relación entre la velocidad del planeta y la distancia promedio con el Sol.

Desde la época de Aristóteles, el movimiento (la velocidad) de cada planeta es proporcional a su distancia, pero evidentemente el cambio del punto de referencia entre el modelo Aristotélico (geocéntrico) y el modelo Copernicano (heliocéntrico) hace que Mercurio y Venus no respeten ese argumento; mientras más pequeño el orbe, mayor es su velocidad.

De cualquier modo, Kepler hace su análisis tomando las distancias promedio a partir de los periodos de cada planeta según Copérnico y las distancias promedio de los cinco sólidos perfectos. Con algunos errores en los datos, y tomando un error de cálculo bastante grande, Kepler concluye que debido a que los cálculos obtenidos coinciden en gran medida, entonces su hipótesis debe de ser correcta.

Una vez establecida la veracidad de los sólidos perfectos, Kepler es el primer astrónomo en preguntar por qué se mueven los planetas; pregunta que va a responder más adelante con su tercera ley.

Para Kepler, la razón de por qué los planetas más alejados del Sol tienen un movimiento más lento es debido a que el responsable del movimiento de todos los planetas es el Sol, siendo éste el astro más importante: es el creador de la vida, la fuente eterna de luz, el motor de los planetas, el centro del Universo y la representación del Creador mismo.

Con esto en mente, el siguiente paso para Kepler fue establecer la proporción entre el periodo de los planetas y su distancia al Sol (tomando los datos de Copérnico). Es importante tomar en cuenta la proporción en que va disminuyendo la 'fuerza motriz', conforme va aumentando la distancia, lo cual al final queda como:

$$\frac{P_i + \frac{1}{2}(P_e - P_i)}{P_i} < \frac{P_e}{P_i}$$

Donde P_e es el periodo del planeta externo y P_i el periodo del planeta interno. Sin embargo esta relación nunca lo convenció del todo por tener que sumar la mitad de la diferencia de los periodos. "Acabas, querido lector, de aprender a conocer también lo imperfecto, por lo que disminuye mi temor a que abandones esta final y endeble aventura." ⁸⁴

⁸⁴ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 208.

Este capítulo 20 podría ser uno de los principales capítulos de la obra, pero por alguna extraña razón, Kepler decide dejar esta información para el final.

Por su parte, el penúltimo capítulo del libro lleva por nombre 'Por qué un planeta se mueve uniformemente en torno al centro del ecuante', y efectivamente todo el capítulo trata sobre una complicada explicación de Kepler sobre el funcionamiento del ecuante, lo cual se puede resolver con la figura 11:

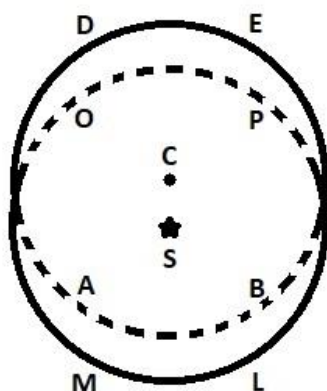


Figura 11. Esquema que muestra la órbita de un planeta y el movimiento que sigue, tomando un círculo (ABDE) con centro en C y otro círculo (MLOP) con centro en el Sol (S).⁸⁵

Si el centro de la órbita es C, el planeta se va a mover más rápido en la zona de ML que en la zona de DE, por estar más cerca del Sol (el cual es el centro del círculo MLOP). Esta explicación, evidentemente sólo funciona si uno está convencido de que el Sol es el motor de los planetas y de que mientras más cerca esté un cuerpo del él, más rápido se moverá.

Curiosamente esta idea se parece mucho a lo que es la base de lo que hoy conocemos como 'la segunda ley de Kepler', y aunque no menciona nada sobre las áreas recorridas, sí introduce la idea de una velocidad constante de los planetas.

Por su parte, el último capítulo de la obra es el 'postre después del festín'. En este capítulo Kepler propone dos problemas: cuándo los cielos fueron creados por Dios y cuándo van a acabar.

Según la tradición astronómica de la época, cada cierto periodo de tiempo el Sol, la Tierra y los demás astros regresaban a las posiciones en las que se encontraban al principio de los tiempos, marcando así un año Platónico. En este capítulo Kepler reacomoda la posición inicial de los planetas según el zodiaco, poniendo a todos los planetas superiores a 0° de Aries, a los planetas inferiores y al Sol a 0° de Libra, y a la Luna a 0° de Capricornio. Tomando esto en cuenta, y con los movimientos de los planetas según las proporciones de los sólidos perfectos, para Kepler nunca se va a poder regresar al aspecto de los cielos cuando estos fueron creados por Dios.

⁸⁵ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 209.

Notas:

En estas notas Kepler hace alusión en múltiples ocasiones, tanto a la *Astronomia Nova* como al *Epitome Astronomiae Copernicanae*, especialmente para explicar la proporción entre el periodo de los planetas y la distancia con el Sol: “esa relación es solamente la potencia 3/2.”⁸⁶

Una de las notas más valiosas que es si uno sustituye la palabra ‘alma’ por ‘fuerza’ en la oración ‘alma motriz’ “obtendrás el mismísimo principio sobre el que se haya construida la física celeste.”⁸⁷ Esta idea es notable porque antes de Newton, Kepler fue quien más se acercó al principio de gravedad (aunque con fundamentos erróneos). Es justo con esta idea que se marca la diferencia entre la teoría de Copérnico, con los avances que logra Kepler.

De igual manera en estas notas, Kepler se apoya en su libro V de *Harmonices*, libro en donde finalmente encuentra la relación entre los periodos de los planetas y sus distancias al Sol. Sin embargo nunca menciona explícitamente que la órbita no es circular.

Por último Kepler critica mucho sus ideas iniciales diciendo que en realidad es casi imposible saber con exactitud el aspecto del cielo al principio del mundo astronómico, pero que de igual manera, tomando en cuenta las armonías desarrolladas en *Harmonices*, los astros nunca regresarían a su punto de partida.

Conclusión

“Ahora, amigo lector, no olvides el fin de todo esto, que es el conocimiento, la admiración y veneración del Artífice Sapientísimo. Pues nada sirve haber regresado desde los ojos hasta la mente, desde la visión a la contemplación, desde el curso observable hasta el plan más profundo del Creador, si deseas quedarte en esto y no elevarte en un solo impulso y con toda la devoción del alma hacia el conocimiento, amor y culto del Creador.”⁸⁸

⁸⁶ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 197.

⁸⁷ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 196.

⁸⁸ Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 218.

3. Astronomia Nova

Para entender lo que impulsó a Kepler a escribir este libro es necesario recordar que en esa época algunos astrónomos buscaban establecer como verdadero uno de los dos modelos astronómicos planteados: el modelo geocéntrico, propuesto por Ptolomeo y aceptado por la Iglesia, o el modelo heliocéntrico, propuesto por Copérnico y aceptado por los jóvenes científicos. También estaba el modelo de Tycho Brahe, el cual no es ni geocéntrico ni heliocéntrico, ya que en este modelo los planetas giran alrededor del Sol y el Sol a su vez gira alrededor de la Tierra.

Lamentablemente tuvieron que pasar varios años para que los astrónomos dejaran de discutir sobre los modelos de Copérnico y Ptolomeo, y aceptaran a Kepler como el modelo verídico.

“Sus resultados [de Kepler], que barrieron con casi dos milenios de suposiciones imperfectas acerca de los movimientos planetarios, realmente fueron una nueva astronomía.”⁸⁹

El lugar en donde Kepler deja en claro su valía es en su segundo gran trabajo: *Astronomia Nova*. A diferencia de sus otras obras, este libro es lo más cercano que tiene Kepler a un libro formal de astronomía (principalmente porque sus hipótesis tienen demostraciones). Sin embargo Kepler sigue siendo el escritor y sigue teniendo relatos personales, ejemplos extraños y demostraciones que están mal y/o no sirven de nada. Curiosamente el mismo Kepler acepta sus errores, pero los deja para que el lector pueda aprender de ellos.

Para abordar este libro, Kepler descubre que el secreto de la nueva astronomía estaba en la órbita de Marte. El tiempo que trabajó para Tycho lo hizo analizando los datos de este planeta, lo cual le dio las herramientas necesarias para descubrir que ninguno de los modelos anteriores explicaba de manera correcta la trayectoria del planeta. Las observaciones de Tycho le permitieron encontrar el radio del círculo de la órbita, la línea que une el punto más lejano del Sol y el punto más cercano (perihelio y afelio), la posición del Sol, el centro de la órbita y el ‘punctum equans’⁹⁰.

Con estos datos fue tanteando para encontrar una hipótesis que los acomodara; le pidió ayuda a varios astrónomos y matemáticos, pero nadie le ayudó. Después de más de 70 tanteos y casi 5 años de trabajo, obtuvo una órbita que correspondía al radio registrado, con una línea que unía al afelio, perihelio y centro de la órbita, y que coincidía con las observaciones; lamentablemente la hipótesis que utiliza resulta ser falsa debido a que los cálculos tenían un error de 8', con respecto a los datos de Tycho.

⁸⁹ Kepler, *Astronomia Nova*, XIV.

- “His results [Kepler’s], which swept away nearly two millennia of imperfect assumptions about planetary motions, were truly the new astronomy.”

⁹⁰ Herramienta creada por Ptolomeo donde se tiene un punto cerca del centro de la órbita circular, donde el movimiento de un planeta parece uniforme.

Curiosamente la astronomía antigua y el Kepler que escribió el *Mysterium*, hubieran aceptado este error de 8', pero algo cambió en Kepler que lo hizo tirar toda su hipótesis por un error de esta magnitud. Pudo haber sido el respeto hacia los datos de Tycho, o la responsabilidad que tenía en su nueva posición, un crecimiento intelectual o simplemente que la teoría no lo convencía del todo; pero este acto fue lo que dio paso a las leyes, dejando atrás a las teorías astronómicas y sentando los cimientos para lo que vino después.

Este fracaso forzó a Kepler a comenzar de cero y para esto sugirió revisar la órbita terrestre pero desde una perspectiva única: Kepler tuvo la genialidad de estudiar la órbita de la Tierra como lo haría un astrónomo situado en Marte. Los resultados obtenidos rompieron con varias de las ideas preconcebidas de la época: la Tierra no se mueve de manera uniforme, acelera y desacelera según su posición y distancia con el Sol, y su órbita no es perfectamente circular.

Esto hizo que Kepler se enfocara en las causas físicas del movimiento planetario. Para él era evidente que existe una fuerza en el Sol y que eso es lo que hace que los planetas se muevan a su alrededor, por lo que eliminando el concepto de que el Sol se encuentra en el centro de la órbita y que en realidad se encuentra un poco corrido del centro, entonces la fuerza que siente el planeta va a ser mayor cuando esté cerca y menor cuando esté lejos del Sol.

Kepler toma al Sol como una escoba que va barriendo a los planetas, lo cual implica que el Sol debe de girar sobre su propio eje, hipótesis que se confirmó muchos años más tarde. Esta idea implica que todos los planetas giran igual, para eliminar este error Kepler introduce un concepto de 'pereza' o 'inercia' de los planetas para permanecer en su lugar (una resistencia a ser barrido). De manera que como la fuerza para barrer es emitida por el Sol, ésta va a ser menor conforme aumenta la distancia a él, por lo que al Sol 'le va a costar más trabajo' romper con la pereza de los planetas más lejanos y por ello avanzan más lento.

Con esta idea, tres errores de planteamiento y una errónea explicación de por qué dos de ellos se anulan, es un verdadero milagro que Kepler haya podido encontrar correctamente lo que ahora conocemos como segunda ley; incluso antes de la primera.

Puede parecer poco lógico que, sin tener una trayectoria descrita, se pueda encontrar la velocidad cuando ésta no es constante, pero Kepler no seguía la lógica y su razonamiento no seguía el mismo camino que el resto de los astrónomos de la época o que los científicos en la actualidad.

Después de un último intento de acoplar las observaciones de la órbita de Marte a un círculo, Kepler aceptó la conclusión de que "la órbita no es un círculo, sino una figura oval."⁹¹ Curiosamente la idea del óvalo siempre le molestó a Kepler, por lo que estuvo varios años rechazándola, intentó arreglarla con un movimiento provocado por el Sol sobre cada planeta o utilizando un huevo como órbita, pero al final nada sirvió.

⁹¹ Koestler, *Kepler*, 91.

La lucha de Kepler en contra del óvalo parece ser una broma, ya que un año antes de encontrar la elipse como la trayectoria de las órbitas, le escribe a Fabricius diciendo “si la forma fuera simplemente una elipse perfecta, todas las respuestas podrían encontrarse en los trabajos de Arquímedes y de Apolonio.”⁹² Pero por alguna extraña razón, Kepler no hacía el salto para ver a su óvalo como una elipse.

Al final fue por suerte que Kepler llegó a las elipses, al comparar los datos que tenía sobre la órbita de Marte con el círculo, la órbita tenía 0.00429 extra de radio en la parte más ancha. De igual manera al tomar el ángulo óptico⁹³, el valor máximo que llegó a obtener fue de 5° 18'. Con el 0.00429 tatuado en la mente, Kepler tropezó de pura casualidad con la secante del ángulo 5° 18', lo cual es 1.00429 y así fue como nació la primera ley planetaria (Koestler, 1985).

Otra explicación que dio Kepler en este libro, y que pocas veces se le reconoce el crédito, es que él fue el primero en dar una explicación correcta sobre las mareas, recordando que se deben a la interacción del mar con la Luna y el Sol. Curiosamente a pesar de tener en este momento las elipses, no es hasta el *Epítome* que coloca explícitamente al Sol en el foco de la elipse.

Debido a la presión que tenía Kepler para liberar las observaciones de Tycho, tuvo un par de borradores casi listos para publicar, donde no se encuentran las elipses. Y aunque terminó su libro en 1605, no lo pudo publicar hasta 1609 debido a que la familia de Tycho Brahe no le daba el permiso y al final únicamente aceptó con la condición de que su yerno pudiera escribir una introducción al libro.

Actualmente este libro es conocido como *Astronomia Nova*, pero Kepler siempre se refirió a él como *Commentariis de Martis*⁹⁴, lo cual tiene más que ver con el contenido del libro, pero hoy sabemos que esta obra realmente dio paso a una nueva manera de ver a la astronomía.

El libro se divide en cinco partes:

- 1) Primera parte: *Sobre la comparación de las hipótesis*. Va del capítulo 1 al capítulo 6 y se centra en el análisis de los tres sistemas del mundo (Ptolomeo, Copérnico y Brahe), sus diferencias, similitudes y las diferentes formas de estudiar a cada uno.
- 2) Segunda parte: *Sobre la primera desigualdad de la estrella de Marte, a imitación de los antiguos*. Va del capítulo 7 al capítulo 21 y es el estudio de Marte, tomando como base los datos de Tycho.
- 3) Tercera parte: *Investigación de la segunda desigualdad; aquella del movimiento del Sol o de la Tierra; o la clave para una astronomía más profunda, en donde gran parte de las causas del movimiento son físicas*. Abarca del capítulo 22 al capítulo 40 y, como lo dice su nombre, es el estudio de los movimientos planetarios; específicamente el movimiento del

⁹² Koestler, Kepler, 92.

⁹³ Es el ángulo formado entre el Sol, el centro de la órbita y un punto M sobre la órbita.

⁹⁴ Nombre completo: *Astronomia Nova αιτιολογητος Seu Physica Coelestis, tradita commentariis de Motibus stellae Martis, Ex observationibus G.V. Tychonis Brahe*.

Sol y de la Tierra como si fueran vistos desde Marte. Esto es algo totalmente nuevo en la astronomía ya que siempre se había estudiado el movimiento desde un punto fijo en el centro y Kepler lo que hace es transformar el análisis de las observaciones para cambiar el punto de referencia. Es aquí donde se encuentra la segunda ley.

- 4) Cuarta parte: *Investigación de la verdadera medida de la primera desigualdad a partir de las causas físicas y las ideas propias del autor*. Va del capítulo 41 al capítulo 60 y se enfoca en la forma de la órbita de Marte, nuevamente basándose en las observaciones de Tycho, para llegar a la conclusión de que la órbita es elíptica.
- 5) Quinta parte: *Sobre la latitud*. Abarca del capítulo 61 al capítulo 70 y sigue el estudio de la órbita de Marte, pero esta vez se enfoca en las latitudes, en lugar de las longitudes.

A pesar de que el libro contiene dos de las tres leyes planetarias, también tiene varios errores; no solo ideas o hipótesis erróneas, sino procesos y operaciones matemáticas incorrectas. Estos errores, la abundancia de datos y los ejemplos poco claros hacen que la lectura de esta obra sea muy compleja para los lectores comunes y también para los experimentados.

Pocos capítulos ilustran tan bien estos errores como el capítulo 55, en donde por inducción se demuestra que, así como el círculo planteado en el capítulo 44 es muy grande en comparación a la órbita real, el óvalo del capítulo 45 es muy angosto. Para llegar a esta conclusión Kepler compara los resultados de los capítulos 43, 51 y 54 con los de los capítulos 45, 46 y 49, y se da cuenta que estos últimos están mal; además, al comparar las ecuaciones concluye que lo planteado en los capítulos 45, 46, 47, 48, 49 y 50 está mal.

El propósito de este libro para Kepler no es explicar los movimientos celestes, ni llevar al lector a las conclusiones a partir de evidencias, simplemente es presentar sus descubrimientos al mundo. Para Kepler es importante no sólo mostrar sus conclusiones, sino también el proceso que lo llevó a ellas. “Los errores son importantes, [...] nos acercamos a (la) verdad equivocándonos primero.”⁹⁵

Para leer esta obra, el lector no sólo necesita ser capaz de seguir la rara manera de escribir de Kepler, sino que también necesita entender gran parte del vocabulario técnico que utiliza, porque aunque uno esté familiarizado con los términos utilizados en ese entonces, Kepler, al igual que gran parte de los científicos de la época, utiliza ciertos nombres para referirse a otros conceptos. De igual manera, sus cálculos no siempre son claros, y aunque a veces utiliza tablas matemáticas, no siempre están bien.

Es muy importante señalar que durante toda la obra, Kepler utiliza la palabra excentricidad para referirse a las órbitas y al sistema epiciclo-deferente de los planetas; y que en este análisis también se utiliza de esta misma manera. De forma estricta el deferente implica la existencia de un epiciclo, ya que el deferente es el recorrido circular que describe el centro del epiciclo, pero

⁹⁵ Kepler, *Astronomia Nova*, 41.

- “Mistakes are important, [...] we approach (the) truth by first being wrong.”

Kepler no siempre lo utiliza (y cuando los utiliza son imaginarios). Algo técnico a destacar sobre esta obra es que Kepler utiliza el calendario Juliano para sus fechas, debido a que el calendario Gregoriano no era utilizado por los países luteranos. Así que, sin más preámbulo, pasemos al análisis de la obra.

Dedicatoria

Kepler compara la búsqueda de la verdad con una guerra, donde los astrónomos son los guerreros y el conocimiento es la victoria. El primer paso que dio el Imperio para esta guerra fue armar a Tycho con las herramientas necesarias para atacar a las estrellas. Después de su muerte, Kepler continuó la batalla enfocando su ataque en Marte.

La cruzada no fue fácil, muchas veces las herramientas no estaban apuntando a los lugares adecuados o eran bloqueadas por el Sol o por la Luna; otras veces las nubes escondían al enemigo y lo ayudaban a huir. Pero con ayuda de la aritmética y de la geometría, Kepler logró que su enemigo (Marte) se rindiera y pidiera por su familia y por él para unirse a la armonía de la Tierra (según la mitología romana Saturno es su abuelo, Júpiter su padre, Venus su hermana y amante, y Mercurio su hermano).

Kepler le dedica esta guerra y gran victoria a su majestad, el emperador Rodolfo II y le pide que lo recompense por sus pérdidas y lo ayude (económicamente) a prepararse para su próxima batalla.

Epigramas

Después de la dedicatoria, Kepler continúa con una serie de poemas; unos hablan de su guerra contra Marte, tomando muchos aspectos mitológicos, pero los más largos y significativos hablan sobre Tycho, y aunque no todos son escritos por el mismo Kepler, sí se puede notar el respeto que Kepler le tenía a su maestro:

“Habiendo admirado tu audacia, oh Brahe, y tu gustosa labor,
Aunque preferiste no desviarte de la opinión recibida,
Dudando mucho sobre la tierra, y muchas cosas en los cielos:
A mí, sin embargo, te complació de tenerme entre tus discípulos,
Extendiendo tus noches frente a mí, y los secretos que has encontrado en tu búsqueda,
Durante grandes años, y para iluminar con una luz clara sobre tus grandes empresas.”⁹⁶

⁹⁶ Kepler, *Astronomia Nova*, 14.

- “Having admire your daring O Brahe, and your delightful labour,
Even though you preferred not to stray from received opinion,
Doubting much above earth, and many things in the heavens:
Me nonetheless you were pleased to number among your disciples,
Spreading your nights out before me, and secrets you’ve found in your searching,
Over long years, and to shine a clear light on your great undertakings.”

Prefacio

Como se mencionó anteriormente, este prefacio fue escrito por el yerno, y heredero de Tycho Brahe, que logró que se pospusiera la publicación de la obra durante varios años, recordando que Kepler robó las observaciones a la familia de Tycho poco después de su muerte, lo que inició un largo conflicto entre ellos.

Este pequeño escrito de Franz Gansneb Tegnagel von Campp, advierte al lector a no dejarse llevar por las libertades que toma Kepler, especialmente cuando va en contra de las ideas de Tycho. Tegnagle también recuerda al lector que todo el trabajo que Kepler hace en este libro es gracias a las observaciones de Brahe, aunque todas sus conclusiones son erróneas.

3.1. Introducción

La introducción que escribe Kepler sirve como un resumen de la obra completa y de las ideas que tenía acerca de la astronomía en general. Curiosamente parte del texto que se encuentra en esta introducción era parte de la introducción original del *Mysterium Cosmographicum*, pero los editores de la Universidad de Tübingen la cortaron para que el libro no fuera tan polémico. Para cuando Kepler escribe *Astronomia Nova*, su posición como el matemático imperial le dio la libertad de poner lo que quisiera en la introducción, y en todo el libro, sin miedo a la censura.

Kepler comienza quejándose de lo difícil que es escribir libros de matemáticas y especialmente libros de astronomía, si uno mantiene la secuencia de axiomas, proposiciones, demostraciones y conclusiones, entonces el libro se vuelve muy tedioso, y aunque uno no mantenga esta estructura formal, de todas maneras, seguir el desarrollo matemático puede llegar a ser complicado hasta para los expertos en el tema, y más cuando se tiene que comparar el texto con la explicación geométrica con el diagrama, como sucede en este libro y en la astronomía en general. Es por eso que Kepler aprovecha la introducción para ayudar al lector a seguir su obra, además de que agrega una tabla sinóptica con los temas generales de cada capítulo.

Además de esto, Kepler tranquiliza a la 'gente común' de que si tienen dificultades en seguir la parte matemática del libro, entonces se la pueden saltar confiando en que él, el matemático imperial, hace bien los cálculos. Por su parte, a los 'profesores de las ciencias físicas' les asegura que todos los detalles de los cálculos y procedimientos matemáticos están explicados para que, si no creen en los resultados, los puedan repetir ellos mismos.

Para poder entender su forma de trabajo, Kepler recuerda al lector que existen tres grandes modelos astronómicos para visualizar el Universo. El primero y más antiguo es el de Ptolomeo, el cual toma a la Tierra como el centro del Universo y tiene al resto de los cuerpos celestes girando a su alrededor mientras que ella se mantiene fija. El segundo, y el que Kepler acepta como verdadero, es el de Copérnico, el cual fija al Sol en el centro del Universo y tiene a los planetas, incluyendo a la Tierra, girando a su alrededor. Por último está el de Tycho Brahe, el cual tiene a los

cinco planetas girando alrededor del Sol y, a su vez, al Sol girando alrededor de la Tierra, mientras esta se mantiene fija en el centro.

Algo importante que Kepler señala desde el principio es que estos tres modelos tienen como base las mismas observaciones; sin embargo, la diferencia entre ellos va más allá del movimiento de la Tierra y de qué cuerpo se encuentra en el centro. Ptolomeo únicamente estudia las trayectorias de cada estrella de manera individual, Copérnico cree que todos los planetas se mueven por una misma causa, aunque se muevan de manera individual, y Tycho hace una combinación entre estas dos ideas. De manera que uno de los propósitos de esta obra es comprobar que la diferencia entre los modelos es únicamente geométrica, ya que todos los planetas se mueven alrededor del Sol por una sola causa y que ésta causa es física.

Desde la introducción, Kepler explica que se basó en las observaciones de Marte para escribir el libro ya que otro de sus propósitos era hacer una reforma en la astronomía, en especial en la trayectoria de Marte; esto después de que descubrió que existe un error de 4° entre las tablas prusianas y las observaciones de agosto de 1608.

Para cumplir con estos objetivos, Kepler estableció cuatro pasos a seguir:

- El primer paso que tomó Kepler para investigar las causas físicas del movimiento fue demostrar que los planos de las órbitas o excentricidades⁹⁷ de los seis planetas intersectan en el Sol y no en un punto cercano a él. Esto no quiere decir que el Sol se encuentra en el centro de las órbitas, pero sí que él es el punto en donde todas se unen.

- Con esto demostrado, el segundo paso fue estudiar las causas del movimiento independientemente del modelo a analizar. “Ya sea la Tierra o el Sol quien se mueva, ciertamente ya está demostrado que el cuerpo que se mueve, lo hace de manera no uniforme, es decir, más despacio cuando está lejos del cuerpo en reposo, y más rápido cuando se acerca a este cuerpo.”⁹⁸

Este análisis obliga a Kepler a decantarse por uno de los tres sistemas planetarios. Ptolomeo es el primero en ser descartado, ya que las trayectorias que describen los planetas son espirales específicos para cada planeta, de manera que la causa del movimiento no podría ser única; además de que no tiene tantos sustentos matemáticos. Entre Copérnico y Brahe, la decisión se complica un poco ya que ambos cuentan con las matemáticas como respaldo, y es aquí donde las causas físicas ayudan a determinar cuál de los dos sistemas es el verdadero.

⁹⁷ Recordando que Kepler utiliza la palabra excentricidad/excentricidades para referirse al sistema epiciclo-deferente de los planetas.

⁹⁸ Kepler, *Astronomia Nova*, 21.

- “For whether it is the Earth or the Sun that is moved, it has certainly been demonstrated that the body that is moved is moved in a non-uniformed manner, that is, slowly when it is father from the body at rest, and more swiftly when it has approached this body.”

¿Qué es lo que hace que los planetas se muevan? Para Kepler la respuesta a esta pregunta es el Sol, aunque no sabe con exactitud que característica o cualidad de él es la que provoca el movimiento, al ser el único cuerpo con luz propia, Kepler lo ve como una representación de Dios y es por eso que lo pone como el motor de los planetas. Entre el modelo de Copérnico y el de Tycho, el primero funciona mejor para comprobar las causas físicas, en ambos casos el Sol funciona como la fuente del movimiento de los planetas, pero en el caso de Tycho es únicamente para cinco planetas, es más fácil para el Sol mover a un planeta extra, que para la Tierra mover al Sol, arrastrando cinco planetas más.

Evidentemente tomar como base el sistema heliocéntrico trae como principal controversia el movimiento de la Tierra, de manera que una vez que Kepler establece que por causas físicas ésta se mueve, decide aprovechar la introducción para refutar las cinco principales objeciones en contra del movimiento de la Tierra.

1) Al movimiento de los cuerpos pesados:

Para este argumento, Kepler contradice la idea que se tenía en ese momento sobre la gravedad y crea una nueva, bastante cercana a la teoría que años después desarrolló Newton, pero con una aproximación totalmente distinta.

En ese entonces se creía que la gravedad era una atracción al centro del Universo, como un remolino jalando todo lo existente al centro, por eso es que la Tierra debía de estar en el centro, para mantener a los mares y todas las cosas que se encuentran sobre la tierra, pegada a ella. Kepler rompe con esta idea y dice que la gravedad es una atracción entre todos los cuerpos que va del centro de un cuerpo al centro de otro cuerpo, y es por eso que los planetas son esféricos. Esto se parece mucho a la teoría de gravitación de Newton, pero la principal diferencia es que Kepler la describe como a una característica magnética.

“La gravedad es una disposición corporal mutua entre los cuerpos para unirse o juntarse; así, la Tierra atrae una piedra mucho más de lo que la piedra atrae a la Tierra. (La facultad magnética pertenece a este orden de las cosas).”⁹⁹

Para Kepler esta gravedad o ‘poder de atracción’¹⁰⁰ es responsable de mantener a los ríos, lagos y mares sobre la Tierra. Kepler le otorga a la Luna el ‘poder’ de provocar las mareas y corrientes debido a que la atracción de la Luna llega hasta la Tierra y es suficiente para hacer pequeños cambios en la superficie, llamando a los mares. Esto hace evidente que el poder de la Tierra sea suficientemente fuerte para mantener todo lo que se encuentra en la superficie pegado a ella y

⁹⁹ Kepler, *Astronomia Nova*, 24.

- “Gravity is a mutual corporeal disposition among kindred bodies to unite or join together; thus, the Earth attracts a stone much more than the stone seeks the Earth. (The magnetic faculty belongs to this order of things).”

¹⁰⁰ Kepler utiliza la palabra ‘poder’ pocas veces, pero en este trabajo de tesis se repite para no utilizar la palabra ‘fuerza’ y no confundir con la fuerza gravitacional de Newton.

para atraer cualquier proyectil lanzando verticalmente. Sin embargo para Kepler, este poder va a depender del volumen y de la densidad, por lo que los cuerpos más livianos o menos densos, como las nubes o el humo, son menos atraídos por la Tierra y se quedan flotando.

“Si la Luna y la Tierra no estuvieran retenidas cada una en su propio circuito por una fuerza animada o por algo equivalente, la Tierra ascendería hacia la Luna [...], y la Luna descendería hacia la Tierra.”¹⁰¹

2) A la rapidez del movimiento de la Tierra:

Para este argumento, Kepler únicamente nos refiere a su libro *De Stella Nova*, específicamente los capítulos 15 y 16, ya que es ahí donde desarrolla a profundidad esta objeción.

3) A la inmensidad de los cielos:

Nuevamente nos refiere a *De Stella Nova* donde explica que el cielo está perfectamente delimitado, y que si la Tierra no se moviera, entonces los cielos estarían mal proporcionados y serían antinaturales.

4) A diferir con las Sagradas Escrituras y a su autoridad:

La respuesta de Kepler a este argumento fue muy famosa y repetida en los años posteriores, a tal grado que esta parte de la introducción fue más famosa que sus tres leyes, y fue lo único que se tradujo al inglés antes del siglo XIX; además de que este argumento se tradujo a varios idiomas y fue muy reproducida como apoyo al sistema heliocéntrico.

La idea principal que Kepler quiere comunicar es que las Sagradas Escrituras están escritas en el lenguaje común, de manera que se basan en la percepción y no en la realidad, para que todo el mundo las pueda entender y se puedan sentir identificados.

Para explicar lo que ‘realmente’ sucedió en el milagro de Josué, Kepler dice que lo que Josué pide al exclamarle al Sol que se detenga, es que éste se quedara en medio del cielo según la percepción de las personas en la Tierra. Una persona común no entendería que en realidad fue la Tierra la que se detuvo, cuando lo que realmente se observa es que el Sol es el que se detiene en medio del cielo. De manera que Josué en realidad lo que pide es que la luz y los rayos del Sol se detengan y se queden en la Tierra, no necesariamente que el astro se detuviera. Además de que Dios, al ser todopoderoso, interpretó perfectamente las palabras de Josué para detener a la Tierra y que pareciera que lo que se detuvo fue el Sol, cumpliendo así con su milagro.

¹⁰¹ *Selections from Kepler's Astronomia Nova: A Science Classic Module for Humanities Studies*, trad. William H. Donahue (Santa Fe: Green Lion Press, 2008), 13.

- “If the Moon and the Earth were not each hold back in its own circuit by an animate force or something else equivalent to it, the Earth would ascend towards the Moon [...], and the Moon would descend towards the Earth.”

“Ahora bien, Dios fácilmente entendió a lo que se referían las palabras de Josué, y lo demostró deteniendo el movimiento de la Tierra, para que el Sol pudiera parecerle que se detenía. Porque la esencia de la petición de Josué se reduce a esto, que a él le pareciera así, cualquiera que sea la realidad.”¹⁰²

Para Kepler, las escrituras deben ser interpretadas y no tomadas literalmente. “Si alguien acepta fácilmente esto, ¿por qué no puede aceptar también que en otros pasajes se cita lo contrario al movimiento de la Tierra, también debemos apartar la vista de la física hacia los objetivos de las Escrituras?”¹⁰³ Además si las Sagradas Escrituras fueran totalmente verdaderas, entonces en el cuarto día del Génesis también debería de mencionarse la creación de los planetas junto con el Sol y la Luna, ya que para Kepler los cinco planetas son parte esencial del esqueleto del cosmos.

“La cuarta parte comienza con el versículo 20 y celebra el trabajo del cuarto día, el Sol y la Luna, [...]: es claro que no está siendo astrónomo en esta parte. Si lo fuera, no dejaría de mencionar a los cinco planetas, ya que no hay movimiento más admirable, hermoso y no hay mejor testimonio de la sabiduría del Creador, para quienes toman nota de aquello.”¹⁰⁴

A pesar de todo esto, para Kepler es importante señalar que aunque la astronomía algunas veces va en contra de lo que dicen las Sagradas Escrituras, esto no quiere decir que vayan en contra de Dios. Al contrario, para Kepler los astrónomos son personas que adoran tanto a Dios, que reconocen su sabiduría y buscan entender su visión de cuando creó el Universo, de manera que ellos nunca irían en contra del Creador.

“Pero a quien sea demasiado estúpido para entender la ciencia astronómica, o demasiado débil para creer en Copérnico sin afectar su fe, yo le recomendaría que, habiendo descartado los estudios astronómicos y habiendo condenado todas las opiniones filosóficas que quiera, se ocupe de sus propios asuntos y que se lleve a sí mismo a su casa para rascar su propio parche tierra, abandonando su indagación sobre el mundo.”¹⁰⁵

¹⁰² Kepler, *Astronomia Nova*, 30.

- “Now God easily understood from Joshua’s words what he meant, and proved it by stopping the motion of the Earth, so that the Sun might appear to him to stop. For the gist of Joshua’s petition comes to this, that it might appear so to him, whatever the reality might meanwhile be.”

¹⁰³ Kepler, *Astronomia Nova*, 31.

- “If anyone easily accepts this, why can he not also accept that in other passages usually cites in opposition to the earth’s motion we should likewise turn our eyes from physics to aims of scripture?”

¹⁰⁴ Kepler, *Astronomia Nova*, 32.

- “The fourth part begins with verse 20 and celebrates the work of the fourth day, the Sun and the Moon, [...]: it is clear that he is not playing the part of an astronomer here. If he were, he would not fail to mention the five planets, than whose motion nothing is more admirable, nothing more beautiful and nothing better witness to the Creator’s wisdom, for those who take note of it.”

¹⁰⁵ Kepler, *Astronomia Nova*, 33. “Advice for idiots.”

5) A diferir con las autoridades del Santísimo:

Después de refutar los argumentos de las Sagradas Escrituras, Kepler va en contra de los que hoy serían los teólogos, sacerdotes y demás hombres instituidos en la Iglesia. El argumento principal de Kepler es que mientras ellos son la autoridad en teología, la autoridad en la filosofía es la razón. Además de que señala por nombre a varios teólogos que se han equivocado en cosas científicas como la forma de la Tierra o su tamaño. En este argumento, Kepler expresa lo que la mayoría de nosotros pensamos en la actualidad: las cuestiones teológicas no deberían de mezclarse con las cuestiones científicas.

- Regresando con los pasos para encontrar las causas físicas del movimiento, el tercer paso que tomó Kepler fue demostrar que la excentricidad de Marte está dividida a la mitad a la altura del ecuante, recordando que el segundo paso fue comprobar esto mismo, pero para la Tierra; de manera que una vez comprobado esto, por inducción, se puede extender a todos los planetas.

Con esto, y tomando en cuenta que no existen órbitas sólidas (como lo demostró Tycho Brahe en su análisis de la trayectoria del cometa), Kepler llega a la conclusión de que el Sol es la fuente del poder que mueve a los planetas, la cual es de la misma naturaleza que la luz. Esto implica que el Sol se encuentra en un lugar fijo, pero que gira su propio eje barriendo a los planetas a su alrededor. Esta hipótesis explica porque los planetas se mueven a velocidades distintas: mientras más cerca estén del Sol, más rápido será su movimiento.

- Ya conociendo la fuente física del movimiento, el cuarto paso fue demostrar que Marte describe una trayectoria oval alrededor del Sol. Después de múltiples cálculos y análisis de las observaciones de Tycho, Kepler llegó a la conclusión de que las órbitas de los planetas no son círculos sino elipses. “Por pruebas muy laboriosas y por cálculos de una gran cantidad de observaciones, he descubierto que el curso de un planeta en el cielo no es un círculo, sino una trayectoria ovalada, perfectamente elíptica.”¹⁰⁶

Y así es como Kepler termina su introducción, afirmando que seguro habrá muchos que a pesar de todas las hipótesis, todos los datos y todas las demostraciones, no van a creer lo escrito, pero que él deja las pruebas para que lleguen a sus propias conclusiones.

- “But whoever is too stupid to understand astronomical science, or too weak to believe Copernicus without affecting his faith, I [would] advise him that, having dismissed astronomical studies and having damned whatever philosophical opinions he pleases, he mind his own business and betake himself home to scratch in his own dirt patch, abandoning this wandering about the world.”

¹⁰⁶ Kepler, *Astronomia Nova*, 35.

- “By most laborious proofs and by computations on a very large number of observations, I discovered that the course of a planet in the heavens is not a circle, but an oval path, perfectly elliptical.”

3.2. Primera Parte

La primera parte del libro se concentra en explicar las características, similitudes y diferencias de los tres sistemas planetarios que se aceptaban en ese momento, y cómo es que los astrónomos trabajaban con base en cada uno. El principal motor de esta primera parte es el hecho de que estos tres modelos planetarios se basan en el movimiento o posición media del Sol mientras que Kepler propone que éstos se deberían de basar en el movimiento o posición aparente, para poder obtener las causas físicas del movimiento.

En el primer capítulo Kepler escribe sobre el movimiento de los cuerpos celestes, específicamente de cómo se ve dicho movimiento desde la Tierra. Kepler explica que hay algunas estrellas que pareciera que hacen un recorrido perfectamente circular en 24 horas, aparecen en el punto H y regresan al punto J. Curiosamente, el Sol no regresa al mismo punto en esas 24 horas, éste se desplaza un poco, comienza en el punto A y termina en el punto E (ver figura 12). La Luna por su parte hace algo parecido pero su desplazamiento es aún mayor, comienza en el punto F y termina en el punto G.

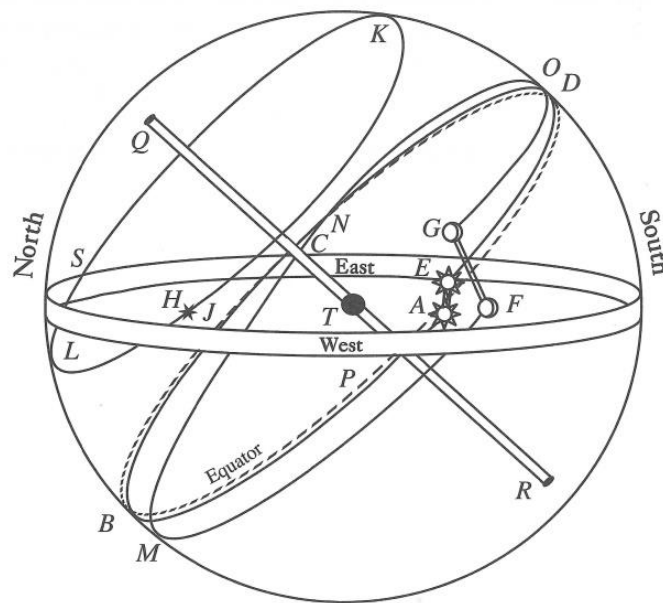


Figura 12. Movimiento aparente de varios cuerpos celestes vistos desde la Tierra de acuerdo con Kepler.¹⁰⁷

Estas observaciones y el análisis de la figura 12, implica que si la Tierra estuviera inmóvil, la órbita del Sol y de la Luna serían espirales, lo cual rompe con el esquema de los círculos perfectos. Kepler entonces se pregunta, ¿por qué existen algunas estrellas que sí tienen órbitas circulares alrededor de la Tierra, pero las dos estrellas más importantes no la tienen?

¹⁰⁷ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 30.

Por otra parte, después de analizar los patrones aparentes de los tres planetas superiores y tomando a la Tierra como un punto fijo en el espacio, Kepler se da cuenta de que éstos tienen un retroceso cuando el Sol se encuentra en el signo zodiacal opuesto al del planeta. Sin importar en qué signo se encuentren, esto siempre sucede a los planetas superiores (Saturno, Júpiter y Marte).

En la figura 13 se puede ver con líneas punteadas la circunferencia B, donde dentro deberían de encontrarse los caminos trazados por el Sol, Mercurio, Venus y la Luna; ya que estos se encuentran por debajo de la Tierra, si esta estuviera fija. De igual manera esta ilustración explica que durante los 16 años en que se hizo el diagrama, Marte dio 8 espirales. Este análisis puede parecer muy elemental, pero antes de Kepler, nunca se había hecho, las órbitas eran presentadas como combinaciones de círculos alrededor de la Tierra (o del Sol), pero nunca nadie había considerado representar el camino real que recorren los planetas, o en este caso, Marte.

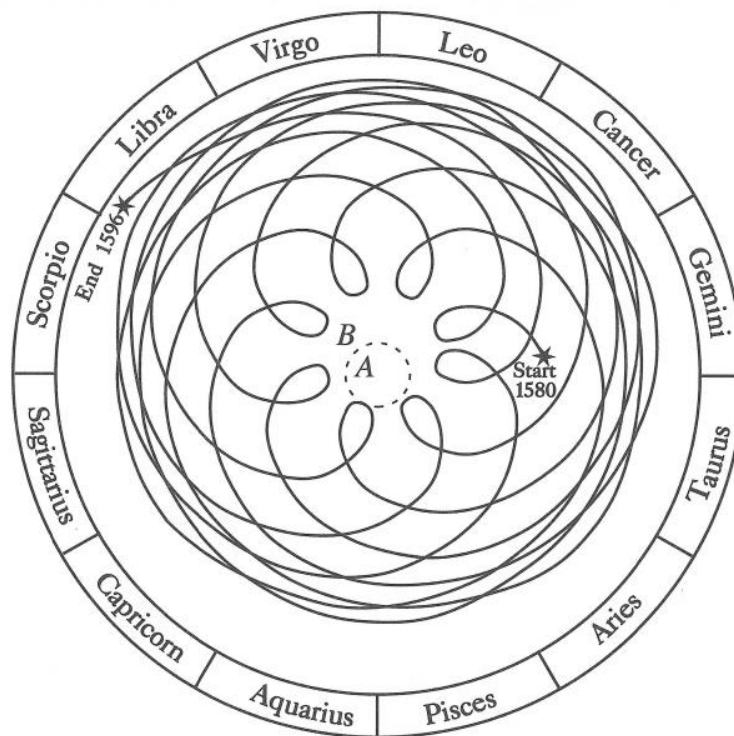


Figura 13. Ilustración de la trayectoria de Marte vista desde la Tierra.¹⁰⁸

A pesar de que este diagrama ayudó mucho a Kepler para impulsar el modelo heliocentrista, también hizo que surgieran algunas dudas acerca de éste. ¿Por qué las espirales de los planetas no son iguales? ¿Por qué algunos retrocesos tardan más que otros? ¿Por qué cambia el brillo del planeta? ¿Por qué las distancias y las proporciones varían de espiral a espiral?

¹⁰⁸ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 34.

Para Kepler estas preguntas se dan debido a dos desigualdades que se mezclan en una sola: la primera desigualdad es el cambio aparente de la velocidad de un planeta y la segunda es el cambio aparente de dirección del mismo planeta. Una se corrige cuando el planeta regresa al mismo signo zodiacal y la otra cuando el Sol regresa a la posición inicial.

Para conocer las causas físicas de estas desigualdades primero tienen que ser separadas para así poderlas estudiar de manera individual. Lamentablemente, los planetas no pueden ser estudiados desde la Tierra, mientras se encuentran detrás del Sol, de manera que únicamente se pueden estudiar cuando están opuestos a él. Esto trae a Kepler a considerar la posición media y la posición aparente del Sol, ya que él también sufre de la primera desigualdad.¹⁰⁹

Durante estos primeros capítulos Kepler hace pequeñas modificaciones a los tres modelos para analizar los cambios geométricos y físicos que sus nuevas hipótesis implican, además de cómo estos cambios afectan a las desigualdades. Por ejemplo, en el modelo de Ptolomeo, en lugar de tomar una excentricidad sencilla, Kepler toma un ecuante con el doble de excentricidad y para el modelo de Copérnico cambia de una excentricidad con un ecuante a un círculo concéntrico con dos epiciclos y después a un solo epiciclo. Todo esto, analizando siempre las consecuencias que surgen de tomar el movimiento aparente, en lugar del movimiento medio del Sol.

En los capítulos 2 y 4, Kepler prueba que las mismas observaciones pueden dar diferentes esquemas para un mismo modelo. En los capítulos 3 y 5 analiza los cambios que traen a la primera desigualdad los nuevos esquemas propuestos; por lo que en el sexto capítulo se analizan los cambios que se producen en la segunda desigualdad al tomar el movimiento aparente del Sol en lugar del movimiento medio, en cada modelo. Para esto es importante recordar que la primera desigualdad surge de tomar el movimiento medio.

En esta obra Kepler se enfoca en encontrar las causas físicas de los movimientos, por lo que uno de sus argumentos en contra de Ptolomeo es que, con su sistema geocéntrico, no queda claro qué es lo que impulsa a los cuerpos celestes a moverse, y menos a que se muevan en epiciclos.

Además de cuestionar qué es lo que impulsa a moverse a los planetas, Kepler también se pregunta si la trayectoria que siguen los planetas es así porque está puesta sobre el éter o es determinada por lo mismo que impulsa a los planetas a moverse. Para su fortuna, pocos años antes Tycho ya había eliminado la idea de las órbitas sólidas o definidas en el éter, de manera que Kepler concluye que la causa del movimiento también debe de ser la razón de su trayectoria. Sin embargo considerar esto hace que surja un gran problema: si todos los movimientos naturales y perpetuos (provenientes de Dios) son rectilíneos ¿Cómo es que los planetas se mueven en movimientos circulares? Para Kepler el círculo es tan perfecto que necesariamente necesita de una guía o mínimo algo fijo en el centro que lo vaya guiando en su trayectoria.

¹⁰⁹ La posición aparente del Sol es el lugar que en el que es percibido desde la Tierra debido al cambio aparente en la velocidad, y la posición media del Sol es el punto que ocuparía si no ocurriera este cambio aparente de velocidad. (Tomando a la Tierra como un punto fijo y al Sol en movimiento).

3.3. Segunda Parte

Kepler inicia la segunda parte dedicando un capítulo entero a por qué decidió enfocarse en Marte y en el movimiento aparente del Sol. Curiosamente este capítulo es muy parecido al enfoque que maneja en el *Mysterium Cosmographicum*, ya que principalmente habla de él mismo.

Kepler nos relata cómo fue que Dios, el destino o una serie de coincidencias hicieron posible que él pudiera llegar a escribir esta gran obra. Como ya se mencionó en el primer capítulo de este trabajo, Kepler estudió en la Universidad de Tübingen para ser teólogo, pero la presión de sus maestros lo llevó a Graz para ser profesor de matemáticas. Humildemente, Kepler reconoce que aunque tenía suficiente inteligencia para no tener dificultades con las materias de matemáticas y astronomía durante sus años como estudiante, éstas nunca le llamaron la atención, las tomó porque eran obligatorias; lo que realmente quería Kepler era entender a Dios.

Por lo que se ha presentado en este trabajo, sabemos que después de su llegada a Graz, Kepler se dio cuenta de que la astronomía era una buena manera de saber lo que pensó Dios durante la creación y escribió su obra del *Mysterium Cosmographicum*. Después de unos años tuvo que abandonar la ciudad y tomar refugio en Praga como ayudante de Tycho Brahe. Parte de los motivos de Kepler para trabajar con Tycho era poder comparar los datos de las observaciones del danés con las hipótesis planteadas en su obra. Desafortunadamente para Kepler, Tycho era muy reservado con sus datos, de manera que no le dio ningún acceso a sus observaciones pasadas; pero afortunadamente para la ciencia, lo puso a trabajar en las nuevas observaciones de Marte.

Para Kepler el hecho de que sus profesores lo hayan presionado para tomar el puesto en Graz, que Tycho Brahe estuviera buscando ayudantes al mismo tiempo que él estuviera buscando trabajo y que de los cinco planetas le hubieran encargado estudiar a Marte, son señales divinas de que su trabajo es verdadero y de que es un claro reflejo de la mente de Dios.

En los capítulos 8 al 21, Kepler se dedica a explicar por qué una órbita con ecuante y epiciclos nunca se podría adecuar a las observaciones de Marte. Con los datos de Tycho sobre Marte, Kepler explica, y crea una tabla con posiciones obtenidas considerando su hipótesis acerca de la primera desigualdad, para así compararla con las observaciones. Con esto explica cómo calcular la posición verdadera en lugar de la posición aparente, refutando los métodos antiguos de medición.

Antes de calcular la posición real del Sol, Kepler analiza los paralajes de Marte, tanto con las observaciones de Tycho como con unas observaciones propias, y demuestra que el nodo descendente y el nodo ascendente están opuestos en la eclíptica.¹¹⁰ Además compara las posiciones del afelio y de los nodos de Marte con las observaciones de Ptolomeo y Brahe.

¹¹⁰ El nodo ascendente es el punto donde el objeto cruza el plano de referencia moviéndose desde el hemisferio sur al hemisferio norte celeste, y el nodo descendente es el punto donde el objeto cruza el plano de referencia moviéndose desde el hemisferio norte al hemisferio sur celeste.

Analizando la inclinación del plano de la órbita de Marte en los tres modelos planetarios, Kepler comprueba que la inclinación se mantiene constante y lo extiende a todos los planetas, no solo a Marte. Refutando la idea antigua de que los planos de las órbitas tienen.

Finalmente presenta una tabla con posiciones de Marte, tomando el movimiento aparente del Sol, una trayectoria circular y con un punto del cual el planeta recorre ángulos iguales en tiempos iguales. Así Kepler calcula la posición del Sol, del centro de la trayectoria, la distancia que los separa, y la razón de la excentricidad y el radio del círculo.

Con estas nuevas posiciones de Marte, Kepler comprueba que al tomar el movimiento aparente del Sol, los cálculos son mucho más precisos que al tomar el movimiento medio, pero también demuestra que todos los modelos presentan errores al tomar el movimiento aparente del Sol.

Hasta este momento, tomando los tres modelos planetarios, la primera desigualdad viene de tomar el movimiento medio del Sol en lugar de tomar el movimiento aparente. Pero tomar el movimiento aparente también trae algunas consecuencias como distancias falsas, de manera que para continuar con el trabajo, se tiene que encontrar una nueva forma de analizar los cielos. Kepler concluye la segunda parte advirtiendo que el resto del libro se va a enfocar en las causas físicas, no en la geometría, y que no va a partir de ninguna hipótesis antigua.

3.4. Tercera Parte

Después de que Kepler se da cuenta de que la astronomía necesita una nueva perspectiva, esta parte se centra en volver a hacer el análisis de las desigualdades de los planetas, pero esta vez con un nuevo método enfocándose en la segunda desigualdad, en lugar de la primera.

Muy al principio de la tercera parte, Kepler ataca uno de los problemas que más le habían molestado acerca del modelo de Copérnico: por qué la Tierra es el único planeta que tiene una órbita perfectamente circular. Para resolver esto Kepler tuvo que dejar a un lado ciertos prejuicios que tenía sobre Copérnico y otros astrónomos, y descubrir que desde Hiparco hasta Tycho Brahe, todos los astrónomos habían utilizado la posición aparente del Sol para medir la posición angular y la distancia real entre el Sol y la Tierra. Aunque esto podría servir para la posición angular, no es necesariamente cierto para las distancias reales.

Con esto, Kepler hace algo único: tomando las observaciones de Marte y del Sol vistos desde la Tierra, triangula los datos para obtener la posición de la Tierra y del Sol como si fueran vistos desde Marte, y éste fuera un punto fijo en el Universo.

Tomando el periodo como 686 días, 23 horas y 31 minutos, el análisis de Kepler fue encontrar diferentes posiciones de Marte que se reflejen en el mismo lugar sidereal desde la Tierra. De manera que, utilizando la ley de senos puede encontrar las distancias entre el centro de la órbita de la Tierra y la posición real de la Tierra en diferentes puntos. Por lo tanto, si todas las distancias

son iguales, entonces efectivamente la órbita de la Tierra es circular y el punto que Copérnico y Brahe utilizan como el centro de la órbita de la Tierra, es verdadero. Pero si las distancias varían, entonces la órbita de la Tierra no es un círculo, como se puede ver en la figura 14. Donde k es Marte, el círculo dg con centro en a es la órbita de la Tierra propuesta por Copérnico, pero Kepler establece con este análisis que en realidad la Tierra se mueve sobre el círculo fhck con centro en b.

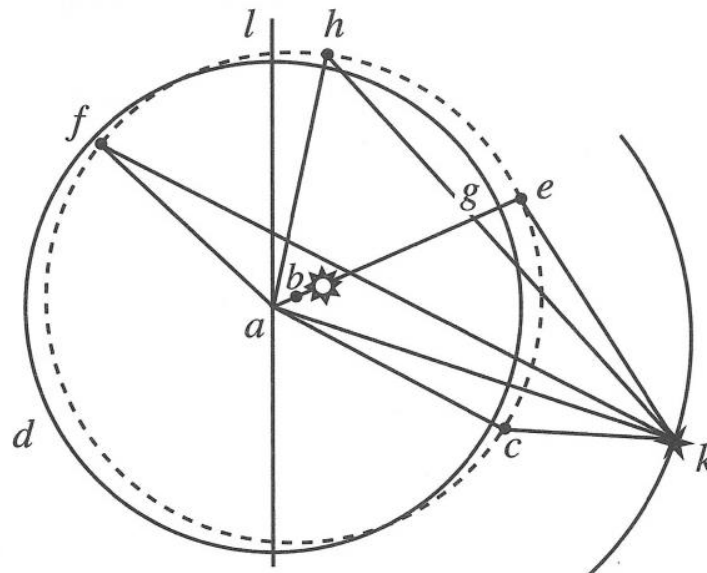


Figura 14. Esquema usado para obtener las posiciones reales de la Tierra respecto a la posición de Marte.¹¹¹

Con estas nuevas posiciones, Kepler calcula unas nuevas distancias entre la Tierra y el Sol en el afelio y comprueba que son prácticamente iguales a las distancias que antes había calculado Tycho Brahe, demostrando que el método de Kepler es igual de efectivo que el de Brahe. Esto le permite obtener la forma de la órbita de la Tierra y calcular la proporción de la excentricidad con respecto al radio de la órbita, recordando que Kepler calculó las distancias con los datos de Marte, deduciendo dónde estarían la Tierra y el Sol si se observaran desde el planeta rojo.

Tabla 4. Distancias obtenidas por Kepler utilizando la figura 14 y la ley de senos.¹¹²

Distancias	Unidades
af	66,774
ah	67,467
ae	67,794
ac	67,478

Una vez comprobada la validez de su nuevo método, Kepler utiliza diferentes observaciones de Marte para demostrar que la Tierra no tiene una órbita perfectamente circular, sino que tiene una excentricidad y un ecuante, al igual que los otros planetas.

¹¹¹ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 48.

¹¹² *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 50.

Una vez demostrado esto, Kepler busca probar que los planetas se mueven más rápido en el perihelio y más lento en el afelio. Para esta demostración Kepler se basa en la hipótesis de Ptolomeo sobre la bisectriz ¹¹³ de la excentricidad, donde la distancia entre el centro y la Tierra (o el Sol para Copérnico) es la misma que la distancia entre el centro y el ecuante.

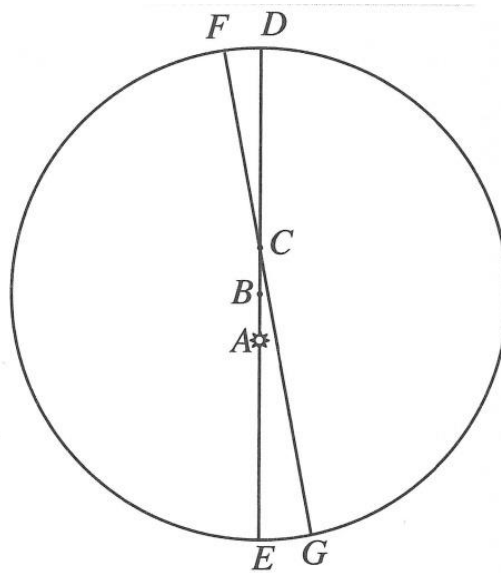


Figura 15. Esquema propuesto por Ptolomeo, y retomado por Kepler, para obtener la bisectriz de la excentricidad. ¹¹⁴

Por lo tanto, si se tiene el círculo FDGE con centro en B, donde C es el ecuante y A es la posición del Sol (o de la Tierra para Ptolomeo), y se hace una línea recta entre DE, pasando por CBA, donde D es el afelio y E el perihelio, entonces con la hipótesis de Ptolomeo $AB=BC$. De igual manera, si a esta excentricidad le hago otra recta FG pasando por C, donde F es un punto muy cercano al afelio y G un punto muy cercano al perihelio, entonces los triángulos FCD y ECG son semejantes.

Si estos ángulos son suficientemente pequeños entonces se puede tomar $CD=CF$ y $CE=CG$, de manera que DF es a GE como CD es a CE, pero como $AB=BC$, entonces $AE=CD$ y $AD=CE$, por lo tanto DF es a GE como AE es a AD.

“Los arcos recorridos en tiempos iguales son inversamente proporcionales a sus distancias con el Sol.” ¹¹⁵ Lo que implica que la velocidad debe aumentar o disminuir de manera casi directamente proporcional a la distancia con el Sol. Esto quiere decir, que la velocidad de un planeta va a aumentar en el perihelio y va a disminuir en el afelio.

¹¹³ Semirrecta que divide a un ángulo en dos partes iguales.

¹¹⁴ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 53.

¹¹⁵ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 53.

- “Arcs traversed in equal times are inversely proportional to their distances from the Sun.”

Los axiomas de la filosofía natural dictan que este fenómeno se debe analizar de tres maneras: o el cambio de la distancia entre los planetas y el centro produce el cambio de la velocidad, o el cambio en la velocidad produce el cambio en la distancia entre los planetas y el centro, o existe otro fenómeno que produce estos dos cambios.

Es importante destacar que el planeta no sufre ningún cambio físico durante el movimiento, es decir, no cambia de forma o de masa al cambiar su velocidad. Kepler nos recuerda que Tycho ya había descubierto que los planetas no tienen un riel o una órbita sólida para moverse y evidentemente no tiene alas o algo por el estilo para navegar por el éter. Esto nos lleva a que la causa del cambio de velocidad sea el cambio de la distancia entre el planeta y el Sol, es decir, no existe un tercer fenómeno que pueda ser la causa de todos los cambios.

“Ahora bien, si la distancia entre el centro del mundo y el cuerpo del planeta gobierna su lentitud, y su cercanía gobierna su aceleración, entonces necesariamente la fuente de la fuerza motriz debe de estar en el supuesto centro del mundo.”¹¹⁶

Mientras más lejos está el planeta del centro, más lento se mueve, y lo contrario, mientras más cerca está el planeta, más rápido se mueve. Esta conclusión hace que para Kepler sea evidente que el poder para mover a los planetas proviene del centro del Universo.

Para Kepler, siendo un fiel seguidor de Copérnico, es evidente que el Sol es lo que se encuentra en el centro del Universo y que éste no se mueve, aunque nunca presenta evidencias concretas que apoyen esta idea sobre el modelo de Tycho Brahe (donde los planetas giran alrededor del Sol y el Sol gira alrededor de la Tierra). Sin embargo, Kepler justifica su elección evidenciando que tiene más sentido que un astro de gran tamaño, como el Sol, sea el que mueve a todos los planetas y que la Tierra sólo tiene el poder para mover a la Luna. También señala que si el Sol es capaz de iluminar todo el Universo, entonces debe de ser capaz de moverlo; además de que la luz llega de una manera más concentrada a los planetas más cercanos que a los planetas más lejanos, y es por eso que se mueven más rápido.

Este argumento respecto a la luz no lo hace en sentido de que la luz sea el motor de los planetas, más bien de que la luz es el vehículo del poder que hace que los planetas se muevan; aunque sí señala que este poder, al igual que la luz, es inmaterial, no se pierde ni se dispersa a través del éter, viaja en línea recta y también proviene del Sol.

Con estas características, Kepler concluye que si este poder ‘viaja’ en línea recta, entonces para que los planetas puedan tener un movimiento circular, la fuente del poder (el Sol) debe de girar,

¹¹⁶ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 56.

- “So now, if the distance of the centre of the world from the body of a planet governs its slowness, and approach governs its speeding up, it is necessary consequence that source of motive power is at the supposed centre of the world.”

además de que la rotación del Sol controlaría la velocidad de traslación de los planetas. El planteamiento de esta hipótesis es realmente impresionante ya que surge a partir del análisis de las posibles causas físicas del movimiento de los planetas, recordando que este libro es publicado un año antes de que Galileo apuntara su telescopio al cielo para, años después, comprobar que efectivamente el Sol gira sobre su propio eje.

Tomando en cuenta los periodos de traslación de cada planeta (Saturno 30 años, Júpiter 12 años, Marte 23 meses, Tierra 12 meses, Venus 8 ½ meses y Mercurio 3 meses), y las distancias entre cada planeta y el Sol, Kepler calcula que el Sol tiene un periodo de rotación de 72 horas. Tomando el sistema Tierra-Luna como respaldo, Kepler basa sus cálculos, en el hecho de que la Tierra completa una rotación cada 24 horas y supone que ésta hace que la Luna gire a su alrededor cada 30 días.

Además de esto, Kepler también señala que este poder, a pesar de que se extiende por todo el espacio sin importar el paso del tiempo, únicamente interactúa con la materia que tiene la capacidad de moverse, de manera que la naturaleza misma de los planetas también influye en la velocidad de su movimiento, es decir, no depende únicamente de la distancia que lo separa con el Sol. Con esta idea, Kepler busca profundizar sobre el tipo de poder que mueve a los planetas: sabe que surge del Sol, que es muy parecido a la luz, que es inmaterial y que viaja en línea recta, pero aun así es particular de cada planeta.

Ya convencido del hecho de que el Sol es la fuente del poder que mueve a los planetas y que éste gira sobre su propio eje, Kepler establece que la naturaleza de este poder debe de ser magnética: ambos poderes de atracción aumentan conforme se reduce la distancia, y para cuando escribe esta obra, ya se había demostrado que la Tierra también tiene propiedades magnéticas.

Algo importante que Kepler también señala es que este poder surge en el centro del Sol, y no en la superficie (a diferencia de la luz), de manera que reacciona con el centro de los planetas y no con la superficie. Además de que no es una característica particular del Sol, sino que cada planeta 'administra' su propio movimiento.

El penúltimo capítulo comienza con la enumeración de las seis proposiciones que hasta ese momento Kepler había utilizado y demostrado:

1. Un planeta se quedará en reposo de manera natural.
2. Un planeta se mueve de un lugar a otro debido a un poder proveniente del Sol.
3. Si la distancia entre el planeta y el Sol fuera constante, la trayectoria sería circular.
4. Si el planeta se encuentra al doble de la distancia del Sol, entonces el periodo de traslación también será el doble.
5. Un planeta no tiene el poder de moverse por sí solo.
6. El cambio de la distancia entre el Sol y un planeta es debido a un poder intrínseco del planeta.

Con estas proposiciones Kepler buscó encontrar las leyes que le permitieran saber la figura geométrica de la órbita de los planetas, tomando como base que la órbita de Marte es un círculo y está dirigida por una mente.

Kepler comienza planteando la hipótesis de que el poder de los planetas los hace girar en un epiciclo y el poder del Sol hace girar al epiciclo. Rápidamente descarta esta idea debido a que únicamente podría ser cierta si hubiera algo, además del Sol, que pudiera hacer girar al planeta en un círculo. Igual explica que el planeta únicamente podría tener una órbita circular si su propio poder fuera recíproco al diámetro del epiciclo, aunque nuevamente esto tampoco es posible debido a que las medidas de los arcos y de los tiempos no coinciden con la hipótesis.

También propone que el planeta sigue un epiciclo imaginario el cual es formado por el propio poder del planeta, pero nuevamente rechaza esta idea porque no tiene ninguna base física; si el planeta puede decidir su propia trayectoria, entonces no tendría sentido medir, graficar y construir un modelo porque en cualquier momento el planeta podría cambiar de trayectoria, (además de que no hay suficientes argumentos para respaldar esta hipótesis).

Al final Kepler utiliza todo un capítulo para demostrar que la órbita de los planetas no es necesariamente circular y no está gobernada por una mente.

Después de tantos intentos fallidos, Kepler llega a la conclusión de que, para saber la verdadera trayectoria, primero es necesario conocer las verdaderas distancias entre el planeta y el Sol, pero para conocer las verdaderas distancias primero se tiene que saber cuánto cambia el tamaño del Sol visto desde cada planeta. Lamentablemente el único planeta en donde se podía hacer ese experimento es la Tierra, además de que los ojos humanos no tienen la capacidad de notar dichos cambios (recordando que esto es antes del telescopio) y menos de medirlos.

Finalmente Kepler deja a un lado la forma de la trayectoria de los planetas y pasa a demostrar que el cambio de la velocidad depende de su cercanía o lejanía con el Sol. Para esta demostración Kepler compara la suma de las distancias de cada planeta con el Sol y el periodo del planeta para ver si hay alguna relación entre ellos.

Algo importante a señalar para esta demostración, y para la mayoría de las demostraciones anteriores, es que a pesar de que al principio de la tercera parte Kepler demuestra que la órbita de la Tierra no es circular, la sigue tomando como un círculo perfecto ya que la excentricidad es muy pequeña y no afecta sus resultados.

Lo primero que hace Kepler es dividir la órbita en 360 partes, de manera que cada una de éstas tenga la misma longitud, y conociendo la distancia de la primera parte se pueden conocer las distancias todas. Luego iguala el periodo de 365 días y 6 horas, con 360 grados para asignar un grado a cada parte. Después de esto es que Kepler se da cuenta de que éste método no serviría porque es muy complicado conocer las distancias de cada parte, además de que este

procedimiento consiste en tomar puntos infinitos sobre la órbita y unirlos con el centro para obtener una infinidad de distancias las cuales se encuentran dentro de un área, como se puede ver en la figura 16. Al analizar lo que estaba intentando hacer Kepler, uno se puede dar cuenta de que en realidad esto no tiene sentido porque lo que él hace es comparar una suma de distancias con un área, lo cual no es correcto.

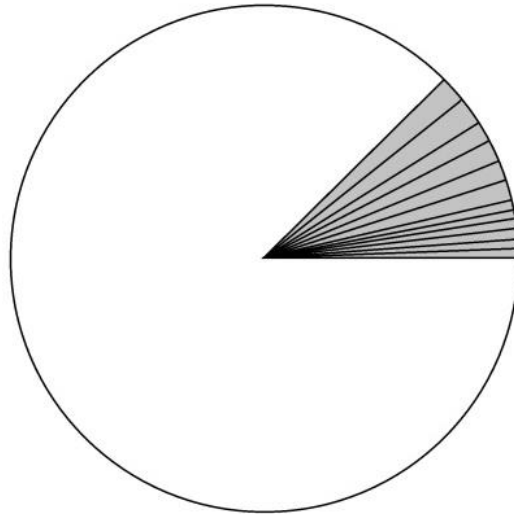


Figura 16. Representación del análisis que intenta hacer Kepler para obtener el área del círculo.¹¹⁷

Para su siguiente intento Kepler utiliza el diagrama de la figura 17, donde el Sol se encuentra en el punto A y el punto B, es el centro de la órbita.

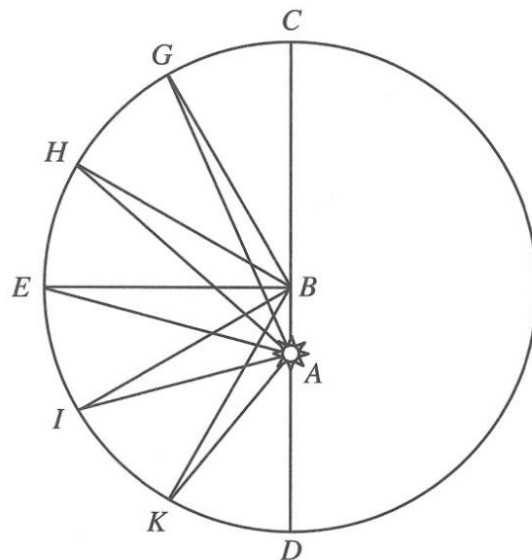


Figura 17. Esquema utilizado para el análisis de la segunda ley de Kepler.¹¹⁸

¹¹⁷ Realización propia.

¹¹⁸ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 81.

Kepler inicia dividiendo en partes iguales el semicírculo CD y uniendo cada uno de estos nuevos puntos con A y con B, de manera que la mayor distancia que se obtiene es AC y la menor es AD. Como B es el centro de la órbita, entonces las distancias entre este punto y los nuevos puntos que dividen el semicírculo van a ser iguales, y de igual manera los triángulos con vértice en B van a ser todos iguales.¹¹⁹

Para poder realizar estas igualdades, Kepler supone que si divide el arco CG en una infinidad de puntos, entonces todos los segmentos entre estos puntos y B van a estar dentro del área de la figura CBG. Ampliando esta idea, se puede decir que todos los segmentos entre B y el semicírculo CD, están contenidos en el área CDE, pero aquí también están contenidos todos los segmentos entre A y los puntos sobre el semicírculo CD, el cual se recorre en la mitad del periodo.

Así es como Kepler concluye que si se toma una infinidad de puntos en el arco CG y cada uno de ellos se unen con el punto A, entonces los segmentos de recta resultantes, van a estar contenidos en el área CAG. Pero esta área a su vez corresponde a la anomalía media¹²⁰ (la cual es proporcional al tiempo), lo cual implica que el área CAG corresponde al tiempo que se tarda el planeta en ir de C a G.

“Por lo tanto, [...], como el área CDE es a la mitad del periodo, que hemos proclamado ser 180°, entonces también son las áreas CEG y CAH, a los tiempos transcurridos en CG y CH. Así el área CAG se convierte en la medida del tiempo o en la anomalía media correspondiente al arco de la excéntrica CG, ya que la anomalía media mide el tiempo.”¹²¹

Esto es lo que hoy llamamos la segunda ley de Kepler.

A pesar de la simplicidad de la segunda ley, en realidad el salto que realizó Kepler para llegar a ella fue erróneo, ya que no se puede igualar un área a la suma infinita de líneas continuas. Kepler ya sabía que estaba cometiendo este error y explica que tomar la órbita como circular también es un error, “pero esos dos errores – es como un milagro – se anulan entre sí de la forma más precisa, como probaré más adelante.”¹²²

¹¹⁹ BC=BG=BH=BE=BI=BK=BD, por lo tanto, CBG=GBH=HBE=EBI=IBK=KBD

¹²⁰ Medida angular relacionada con el afelio, la cual se mide alrededor del ecuante y es proporcional al tiempo.

¹²¹ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 82.

- “Therefore, [...], as the area CDE is to half the periodic time, which we have proclaimed to be 180°, so are the areas CAG, CAH to the elapsed times on CG and CH. Thus the area CAG becomes a measure of the time or mean anomaly corresponding to the arc of the eccentric CG, since the mean anomaly measures the time.”

¹²² Koestler, *Kepler*, 90.

En realidad Kepler no comete dos errores, comete tres:

1. Tomar que la velocidad de los planetas varía en relación inversa con su distancia al Sol.
2. Utilizar órbitas circulares.
3. Utilizar la suma de los vectores de los radios excéntricos igual al área.

En la búsqueda de la verdad Kepler olvidó por un momento que las órbitas no eran circulares y dividió la órbita en 360 partes, de manera que “la suma de todas las distancias entre dos grados (en un ángulo), era una medida del tiempo que el planeta necesitaba para llegar.”¹²³ El procedimiento que siguió para probar su hipótesis fue complicado, pero retomando a Arquímedes, Kepler llegó a la conclusión de que el área barrida por la línea que conecta el planeta con el Sol (AS-BS), es la medida del tiempo requerido para que el planeta avance de A a B. En otras palabras, la línea barrerá áreas iguales en tiempos iguales, descubriendo así la segunda ley.

3.5. Cuarta Parte

Esta cuarta parte en su mayoría son los intentos fallidos de Kepler por encontrar las ecuaciones que rigen la trayectoria y el movimiento de los planetas, especialmente de Marte. A pesar de esto, es en esta sección en donde se encuentran las muy buscadas órbitas elípticas.

El primer intento que hace Kepler para obtener las ecuaciones que modelan el movimiento de Marte fue asumir que la órbita del planeta es circular. Tomando tres puntos de la órbita del planeta, Kepler utiliza una demostración geométrica para obtener una posición del apogeo, de la excentricidad y un valor del radio; todos terminan siendo falsos.

Después de este fracaso inicial, Kepler utiliza un método distinto para obtener dos puntos cerca del afelio, basándose en cinco observaciones, y dos puntos cerca del perihelio, basándose en tres observaciones diferentes. Con estos nuevos puntos corrige la latitud de Marte, encuentra la verdadera excentricidad, y la proporción entre la órbita de Marte y la órbita de la Tierra. Además de que demuestra que Marte también se mueve más rápido en el perihelio y más lento en el afelio, como se demostró anteriormente para la Tierra.

Asumiendo que las órbitas de los planetas son círculos perfectos y que el incremento del tiempo en arcos iguales es proporcional a las distancias entre los arcos y el Sol, Kepler obtiene unas ecuaciones que no corresponden a las observaciones. Estos resultados llevan a Kepler a replantear sus hipótesis y a concluir que mínimo, una de sus tres suposiciones debe de ser falsa.

Después del fracaso, Kepler vuelve a utilizar el método de triangulación aunque esta vez lo utiliza para calcular las distancias reales entre los puntos h, k, q y el Sol (punto a) y poderlas comparar con las distancias que tendría Marte si su órbita fuera circular, como se observa en la figura 18. Al final los resultados que obtiene son mostrados en la tabla 5.

¹²³ Koestler, *Kepler*, 89.

Tabla 5. Comparación de las distancias de Marte y el Sol, entre los datos reales y los datos si la órbita fuera circular.¹²⁴

	ak	ah	aq
Distancias si la órbita fuera circular	166,605	163,883	148,539
Distancias reales	166,255	163,100	147,750
Diferencia	350	783	789

Estos resultados indican que, aunque la diferencia en ak es pequeña, las diferencias de ah y aq son demasiado grandes para ser ignoradas o tomarlas como un error de procedimiento. Al final Kepler concluye que “la órbita del planeta no es un círculo, sino que se acerca gradualmente por ambos lados y vuelve nuevamente a la distancia del círculo en el perigeo. Están acostumbrados a llamar a la forma de este tipo de recorrido ‘oval’.”¹²⁵

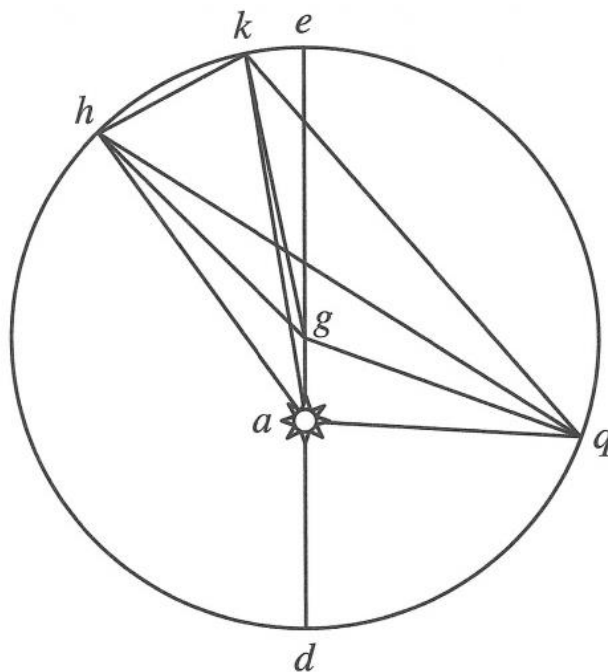


Figura 18. Esquema utilizado para demostrar que la órbita no es un círculo.¹²⁶

Destrozado por esta conclusión, Kepler busca encontrar una justificación física para la ausencia de la figura perfecta del círculo. Basándose en las hipótesis propuestas al final de la tercera parte, Kepler plantea que el Sol emana un poder de atracción a los planetas, el cual es proporcional a la distancia que los separa, pero que a su vez los planetas tienen un poder inherente que al combinarse con el poder del Sol, deforman la órbita del planeta. Además de que, analizando las observaciones, Kepler concluye que el planeta se mueve más rápido mientras más cerca esté del

¹²⁴ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 85.

¹²⁵ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 86.

- “The orbit of the planet is not a circle, but comes in gradually on both sides and returns again to the circle's distance at perigee. They are accustomed to call the shape of this sort of path ‘oval’.”

¹²⁶ *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 84.

Sol. Actualmente sabemos que eso es cierto y que es debido a la gravedad, a la conservación del momento angular y varios otros fenómenos, pero la explicación de Kepler es un poco más complicada.

Según Kepler, este cambio en la velocidad se debe a que existe un poder que mueve a los planetas, el cual administra las distancias y hace que los planetas tengan una órbita circular, pero al superponerse con el poder del Sol en algunas partes de la órbita, hace que el planeta cambie de velocidad. Dicho de otra manera, mientras el poder del Sol no influye en el poder del planeta, éste cumple con la ley de recorrer distancias iguales en tiempos iguales, pero cuando el poder del Sol interactúa con el poder del planeta, el planeta es forzado a bajar su velocidad.

Basándose en esta hipótesis, Kepler sigue su investigación por encontrar la verdadera forma de la trayectoria. Primero transforma el sistema de epiciclos a una excentricidad, y con cuatro diferentes métodos, intenta calcular el verdadero camino del planeta. Al final, sus cuatro métodos fallan y Kepler concluye que la línea del planeta es un óvalo y no una elipse. “Está demostrado que la línea así creada es verdaderamente ovalada, no elíptica.”¹²⁷

Kepler plantea que si el planeta describiera una elipse perfecta, el área de esa elipse sería menor al área de un círculo descrito por una órbita excéntrica. Por lo tanto, utilizando un extraño método para calcular las áreas, Kepler llega a unas ecuaciones incorrectas, pero esto no lo detiene para volver a intentar con otros métodos geométricos, pero esta vez tomando las circunferencias en lugar de las áreas; lamentablemente vuelve a llegar a conclusiones equivocadas. Después intenta utilizar las distancias para encontrar las ecuaciones de la órbita, pero vuelve a fallar, por lo que decide olvidar este enfoque y concentrarse en tres incógnitas: el tiempo, el arco recorrido, y el ángulo entre el arco y el Sol.

Su procedimiento consiste en dividir estas tres incógnitas en 360 partes iguales y con seis diferentes métodos intenta encontrar las ecuaciones de la trayectoria de Marte. Al final dos dan resultados absurdos, otros dos dan como resultados un círculo y los otros dos, al calcular las distancias, dan un óvalo. Todos estos fracasos llevan a Kepler a aceptar que en realidad la hipótesis en la que se basó para estos procedimientos, en donde la combinación del poder de atracción del Sol y el de los planetas deforman la órbita, es falsa; además de que también son incorrectos los datos que utiliza.

Para remediar esto, Kepler toma las observaciones de Tycho sobre Marte y las distancias entre el Sol y la Tierra, recordando que las calcula en la segunda parte del libro, y vuelve a calcular las distancias ente el Sol y Marte en varios puntos, especialmente cerca del afelio. Con estos resultados, Kepler concluye que no hay ningún punto en la órbita que tenga la misma distancia

¹²⁷ Kepler, *Astronomia Nova*, 56.

- “It is demonstrated that the line thus created is truly oval, not elliptical.”

que el afelio, y no hay distancia mayor que ésta. De manera que las apoápsides¹²⁸ de todos los planetas son entre el afelio y la posición real del Sol. Después del éxito del afelio, Kepler busca las distancias entre el Sol y Marte en el punto opuesto, el perihelio y con eso calcula la proporción de la excentricidad de la órbita.

Después de estos cálculos, Kepler concluye que la órbita de Marte excede al círculo por 429 unidades, tomando el radio como 100,000 unidades. De igual manera, demuestra que el valor más grande que llega a tener el ángulo óptico¹²⁹ es de $5^{\circ} 18'$ y más adelante se encuentra, por pura casualidad, que la secante de $5^{\circ} 18'$ es 1.00429.

Para que este enunciado tenga un poco de sentido es necesario recordar la definición geométrica de la secante, la cual se puede observar en la figura 19.

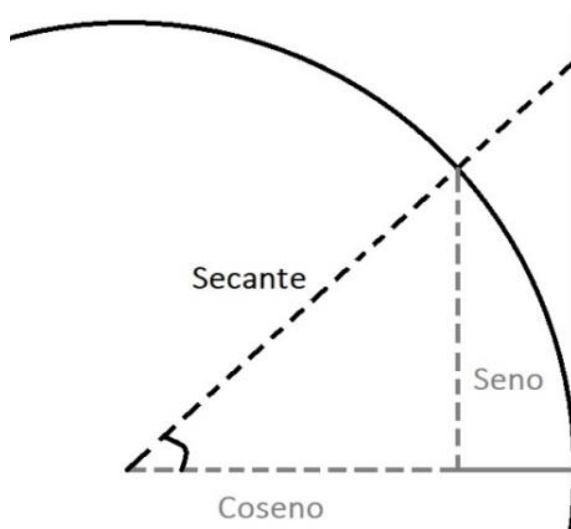


Figura 19. Representación gráfica de la secante de un ángulo sobre un círculo.¹³⁰

Entonces si la secante del ángulo óptico ($5^{\circ} 18'$) es 1.00429, pero el radio del círculo es 1, entonces el 'excedente' entre el círculo y la secante, a la altura del ángulo óptico, es 0.00429.

“Por casualidad di con la secante del ángulo $5^{\circ} 18'$, que es la medida máxima del ángulo óptico. Y cuando vi que era 100,429, fue como despertara de un sueño para ver una nueva luz, y empezar a ver la razón.”¹³¹

¹²⁸ Punto que marca la mayor distancia de una órbita a su centro de atracción.

¹²⁹ El ángulo óptico es el ángulo formado entre el Sol, el centro de la órbita y un punto M sobre la órbita.

¹³⁰ Realización propia.

¹³¹ Kepler, *Astronomia Nova*, 407.

- “Quite by chance I hit upon the secant of the angle $5^{\circ} 18'$, which is the measure of the greatest optical equation. And when I saw that it was 100,429, it was as if I were awoken from sleep to see a new light, and began to reason thus.”

Este resultado hace que la órbita de Marte pueda ser estudiada con un epiciclo imaginario, como se observa en la figura 20.

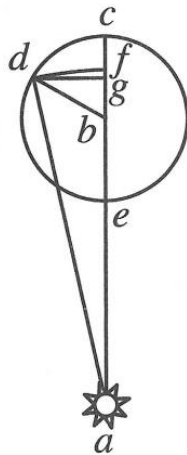


Figura 20. Esquema simplificado del epiciclo propuesto por Kepler para estudiar la órbita de Marte.¹³²

Aunque el círculo cde es un epiciclo imaginario, el ángulo dab alcanza su valor máximo de $5^{\circ} 18'$ y la distancia fg es de 429 unidades, cuando ab alcanza las 100,000 unidades. De igual manera, el arco cd coincide con la órbita real del planeta cuando se encuentra en el afelio y en el perihelio.

Kepler busca darle una explicación física a todas estas coincidencias por medio de un extraño ejemplo que incluye un río circular y un bote con un marinero. Al final concluye que estas coincidencias son debido al poder magnético del Sol el cual interactúa con los planetas debido a que ellos también tienen su propio poder magnético.¹³³

Al igual que los imanes, los planetas tienen dos polos, uno de ellos busca acercarse al Sol mientras que el otro busca alejarse. Para Kepler esta propiedad es lo que explica la precesión de la Tierra y el hecho de que ésta se acerque al Sol en el perihelio y se aleje en el afelio, lo cual sabemos que causa las diferentes estaciones del año junto con la inclinación del eje de rotación terrestre.

Ya con la proporción correcta de la reciprocidad planetaria, Kepler propone que la órbita de Marte puede ser tomada como un círculo no perfecto. Es importante destacar que esta hipótesis surge de un error en el procedimiento para obtener las ecuaciones, pero que las distancias utilizadas sí son las correctas (a diferencia de antes, que tanto las ecuaciones como las distancias estaban mal).

Finalmente en el capítulo 59, con la figura 21, Kepler demuestra en 11 proposiciones que la órbita del planeta es una elipse. Esta hipótesis es correcta para las ecuaciones, las distancias, las áreas, los arcos y concuerda con las causas físicas propuestas en la tercera parte del libro.

¹³² *Selections from Kepler's Astronomia Nova*, 89.

¹³³ Para esta época, William Gilbert ya había probado que la Tierra funciona como un imán gigante, de manera que si la Tierra no es más especial que ningún otro planeta, entonces todos los planetas deberían de tener esta misma propiedad.

“Demostración de que cuando Marte se mueve alternativamente sobre el diámetro de un epiciclo, su órbita se convierte en una elipse perfecta: y el área del círculo mide la suma de la distancia de los puntos de la circunferencia de la elipse.”¹³⁴

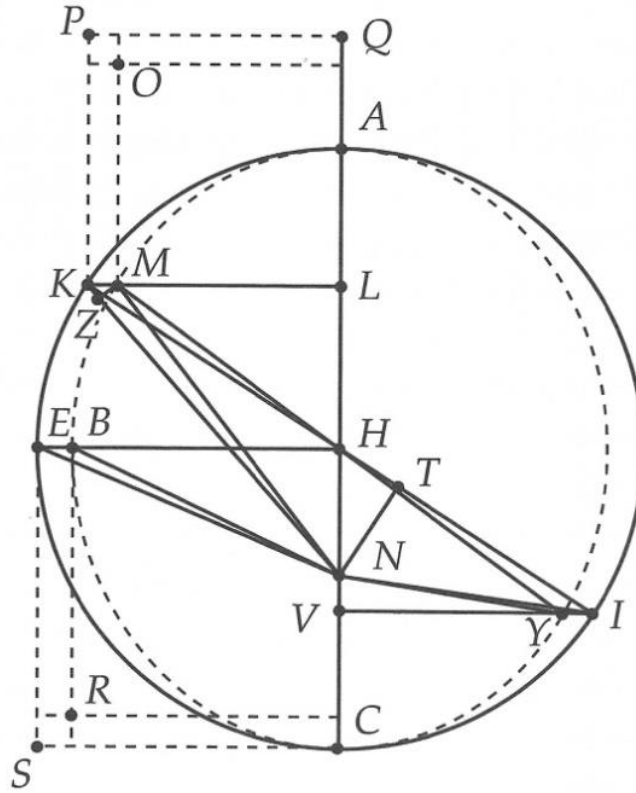


Figura 21. Esquema utilizado por Kepler en las 11 proposiciones en donde se tiene una elipse (línea punteada) dentro de un círculo, para demostrar que la órbita de Marte es una elipse.¹³⁵

Es importante destacar que estas proposiciones las plantea Kepler, pero que las resuelve con ayuda de los trabajos de Apolonio, Arquímedes y Euclides.

1° Proposición – BH es a HE como ML es a LK.

2° Proposición – El área ABC es a AEC como BH es a HE.

3° Proposición – El área AMN es a AKN como ML es a LK.

¹³⁴ Kepler, *Astronomia Nova*, 431.

- “Demonstration that when Mars reciprocates on the diameter of an epicycle, its orbit becomes a perfect ellipse: and that the area of the circle measures the sum of the distance of points on the circumference of the ellipse.”

¹³⁵ Kepler, *Astronomia Nova*, 432.

4° Proposición – Si se divide el círculo en arcos iguales, los arcos de la elipse no van a ser iguales, como se observa en la figura 22.

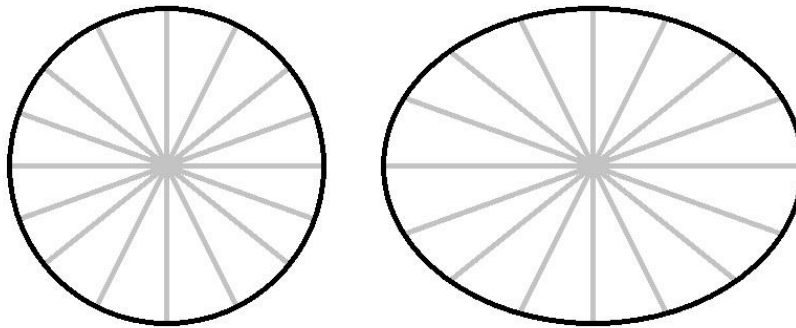


Figura 22. Un círculo dividido en arcos iguales da longitudes de arco iguales, una elipse dividida en arcos iguales da longitudes de arco diferentes.¹³⁶

5° Proposición – La circunferencia de la elipse es aproximadamente la media aritmética del círculo interno y del círculo externo, como se observa en la figura 23.

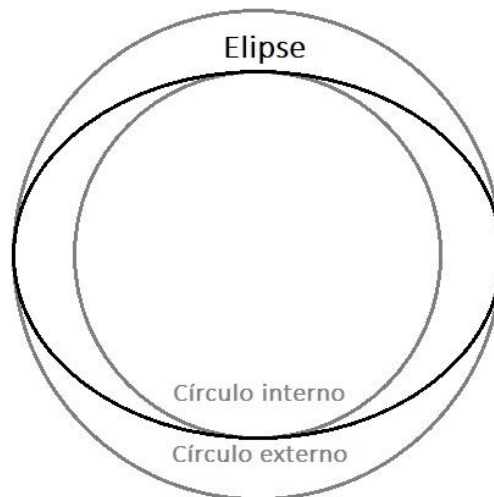


Figura 23. Representación gráfica dramatizada de la 5° proposición.¹³⁷

6° Proposición – Con la figura 21 se tiene que OL es a LP como RH es a HS porque ML es a LK como BH es a HE, y por lo tanto, PL es a HS como KOQ es a CRE.

7° Proposición – El cuadrado del segmento HN es igual a ERC. Esto quiere decir que el cuadrado de la excentricidad es igual a la diferencia de cuadrados de los dos semiejes. Esto es lo más cercano que llega Kepler a definir el foco de la elipse.

¹³⁶ Realización propia.

¹³⁷ Realización propia.

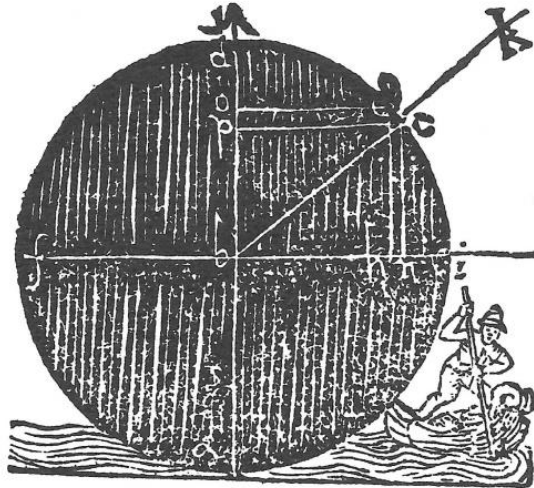


Figura 25. "Xilografía de Kepler del cuerpo magnético del planeta (p. 414, capítulo 57), que muestra al barquero y su remo tirando al planeta." ¹⁴⁰

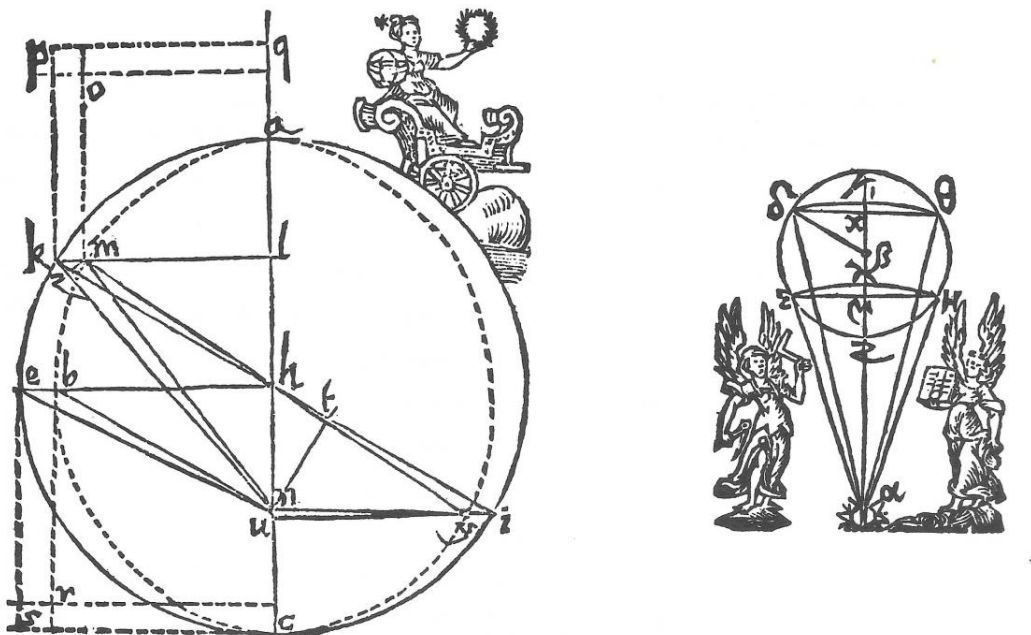


Figura 26. "Xilografías de Kepler para los diagramas de la proposición 11 [...], Urania en su carreta triunfal llegando a coronar a Kepler con una corona de laurel por su conquista sobre el Dios de la guerra; también, los dos ángeles, uno con las herramientas de un carpintero y el otro con lo que podrían ser los planos del Universo." ¹⁴¹

¹⁴⁰ Kepler, *Astronomia Nova*, 437.

- "Kepler's woodcut of the planet's magnetic body (p. 414, chapter 57), showing the boatman and his oar pulling the planet along."

¹⁴¹ Kepler, *Astronomia Nova*, 437.

- "Kepler's woodcuts for the diagrams in Protheorem 11 [...], Urania in her triumphal chariot coming to crown Kepler with a laurel wreath for his conquest of the war God; also, the two angels, one with carpenter's tools and the other bearing what may be blueprint from the Universe."

Las últimas tres proposiciones se basan en la novena y son un intento de arreglar lo que hoy conocemos como la segunda ley, pero que a Kepler mismo nunca lo convenció del todo.

Ya con las elipses, Kepler utiliza un método, que él considera 'físico', para encontrar las ecuaciones de la trayectoria. Lamentablemente, se tiene una carta donde el mismo Kepler acepta que, en gran parte del último capítulo de este cuarto libro, se equivocó en su análisis. Sin embargo encontramos lo más cercano a una definición de la primera y segunda ley: "Se supuso que el planeta se acercaba al Sol y se alejaba de él a lo largo de un diámetro dirigido al Sol, formando así una órbita elíptica y, además, se supuso que el tiempo que pasaba en cada punto de la órbita era proporcional a la distancia entre el punto y el Sol."¹⁴²

3.6. Quinta Parte

Curiosamente la quinta y última parte de este revolucionario libro es la menos relevante, ya que para este punto, lo que hoy conocemos como la primera y la segunda ley ya están expuestas. En base a esto, Kepler ahora busca probar que sus hipótesis demostradas en las longitudes también son válidas para las latitudes.

Para esto, comienza buscando la inclinación de los planos y la posición de los dos nodos de Marte con nuevas observaciones y con las distancias verdaderas. Más adelante demuestra que la proporción de la latitud aparente de la inclinación del plano en cualquier punto, es inversa a la proporción de la distancia entre el Sol y el planeta.

Con esto encuentra el valor máximo de las latitudes en la oposición y en la conjunción, obtiene las posiciones y los valores de la latitud fuera de los puntos cuando los planetas están alineados (Tierra-Sol-Marte) y demuestra que las excentricidades tienen como origen el centro del Sol; esto debido a la posición de los nodos y de la inclinación de los planos. También propone una teoría para el cambio de la latitud de las estrellas fijas a partir de las causas físicas y de la elíptica media, y concluye que la inclinación del plano de Marte y de la elíptica no se mantienen igual a lo largo de toda una traslación.

De lo más rescatable de esta quinta parte es que Kepler analiza a detalle las observaciones y las teorías que se tenían previamente sobre Marte: desde la falta de uniformidad en la precesión de los equinoccios, las esferas sólidas de Aristóteles, el apogeo de Hiparco de Nicea, las posiciones de las estrellas fijas de Ptolomeo, y muchas otras.

¹⁴² Kepler, *Astronomia Nova*, 444.

- "The planet was assumed to approach the sun and recede from it along a diameter directed towards the sun, thus making an elliptical orbit, and further, it was assumed to speed time at each individual point in proportion to the distance of the point from the sun."

4. Harmonices Mundi

Actualmente Kepler es conocido por las tres leyes planetarias que llevan su nombre, pero el motor que siempre lo impulsó a seguir con su trabajo, no era llegar a la modelación matemática de los cielos, sino buscar las armonías que se encuentran en ellos.

Gracias a cartas escritas a Maestlin, Edmund Bruce y a Herwart von Hohenburg, sabemos que después de la publicación del *Mysterium Cosmographicum*, en el verano de 1599, Kepler quería profundizar más en la estructura del universo y en las causas de los periodos de los planetas. Lamentablemente la muerte de su hija menor y la amenaza de la Contrarreforma, obligaron a Kepler a abandonar Graz y tomar refugio con Tycho Brahe en Praga. A partir de 1600, año en que se encontró con el danés, el interés de Kepler cambió y se enfocó en encontrar la órbita de Marte, pero después de la *Astronomia Nova* Kepler regresó su atención a las armonías, y a las pocas semanas de descubrir la órbita elíptica de Marte, Kepler le escribe a Christopher Heydon diciendo que tiene la “esperanza de que Dios lo libere de la astronomía para volver a poner su atención en sus trabajos con armonías”.¹⁴³

Para 1612 la situación política lo obligó a abandonar Praga e instalarse en Linz. Ahí Kepler dividió su tiempo entre la redacción de las *Tablas Rudolfinas* y la obra presentada en este capítulo. Después de la muerte de su hija Katharina el 9 de febrero de 1618, Kepler nuevamente buscó refugio en las armonías, de manera que el 15 de mayo de ese mismo año, Kepler se encuentra, casi sin querer, con lo que hoy conocemos como ‘la tercera Ley de Kepler’. Para el 27 de mayo de 1618 la obra estaba completa, aunque aún tuvo que pasar un año para poder ser publicada.

Tuvieron que pasar 20 años, para que Kepler por fin pudiera publicar su obra *Harmonices Mundi*. Esta obra surge como una continuación del *Mysterium*, en el sentido de que Kepler, una vez más, busca explicar la estructura del universo especulando qué estaba pensando Dios cuando lo creó y si lo hizo con base en algo. A diferencia de la *Astronomia Nova* donde Kepler hace cálculos con los datos y analiza sus resultados para crear algo nuevo, en este libro por fin logra completar sus ideas y englobarlas en un único modelo astronómico donde lo que gobierna son las armonías.

Después de obtener los datos de Tycho, Kepler pudo afirmar que su hipótesis de colocar a los cinco sólidos perfectos entre los seis planetas no se ajustaba; sin embargo, Kepler mantuvo su hipótesis como un borrador del esquema del Universo. La idea de los cinco sólidos le parecía tan buena que nunca pudo abandonarla por completo y simplemente la modificaba para que fuera compatible.

¹⁴³ Johannes Kepler, *Harmonices Mundi*, trad. E.J. Aiton, A.M. Duncan y J.V. Field (Filadelfia: American Philosophical Society, 1997), XX.

- “hope that God would release him from astronomy so that he could turn his attention again to work on harmony.”

“Por fin, digo, he traído a la luz el descubrimiento, y he comprendido verdaderamente más allá de lo que jamás podría haber esperado: que toda la naturaleza de la armonía, en toda su extensión, con todas sus partes, tal como se expone en el Libro III, ha de descubrirse en los movimientos celestes.”¹⁴⁴

A pesar de su obsesión por las armonías, fue hasta 1607 que Kepler por fin leyó el *Harmonics* de Ptolomeo, y aunque muchas de sus ideas son las mismas, pero aplicadas a diferentes sistemas, la gran diferencia es que Kepler basó su teoría en la geometría y no en la aritmética, como Ptolomeo.

No es secreto que Kepler siempre criticó el trabajo de Ptolomeo y que en sus primeros escritos lo menospreciaba, pero para esta obra Kepler acepta que gran parte de su inspiración llegó gracias a él. Fue después de que Kepler leyó el *Harmonics* de Ptolomeo que reconoció la genialidad que había en sus ideas, aunque estuvieran puestas sobre el modelo equivocado, las cuales, según Kepler, surgen de las carencias que había en la astronomía de su época y que es por eso que Dios mismo le dio a Kepler la vitalidad, la inteligencia, las oportunidades y la vida misma para lograr lo que Ptolomeo no pudo hacer 1500 años antes: leer la mente del Creador.

El objetivo de Kepler con este libro es crear una teoría que englobe a la matemática, geometría, música, astrología y astronomía; todo conectado por medio de las armonías. Las ideas que Kepler logra plasmar en este libro pueden parecer totalmente innovadoras, pero la realidad es que muchas de ellas tienen su origen en Pitágoras, Platón, Ptolomeo y hasta a Vincenzo Galilei. El mérito de Kepler es juntar estas ideas y darles un enfoque astronómico basado en las armonías.

Después de terminar esta obra, pero antes de publicarla, Kepler comenzó a trabajar en el *Epitome Astronomiae Copernicanae*, el cual es la compilación de toda su obra, y es donde unifica la primera y segunda ley, que había descubierto únicamente en Marte, para todos los planetas. En el verano de 1619 la primera parte de su libro *Epitome Astronomiae Copernicanae* entró al Índice de libros prohibidos de la Iglesia Católica, lo cual provocó que Kepler tuviera miedo sobre la recepción y circulación del *Harmonices*.

Kepler presenta este libro como su obra maestra en donde por fin logra realizar lo que se propuso hacer cuando era joven: leer la mente del Creador, pero este libro es poco reconocido y no crea el impacto esperado por Kepler. Por fortuna para él, la existencia de la tercera ley en medio de sus páginas hace que este libro sea rescatado por la ciencia actual.

Esta falta de apoyo puede ser por varias razones: para ese momento ya se estaba buscando hacer astronomía más formal (irónicamente es él quien comienza con *Astronomia Nova*), de manera que su enfoque metafísico no atrapó a los nuevos astrónomos. A pesar de que seguía siendo el

¹⁴⁴ Kepler, *Harmonices Mundi*, 389.

- “At last, I say, I have brought that discovery into the light, and have most truly grasped beyond what I could ever have hoped: that the whole nature of harmony, to its full extent, with all its parts, as expounded in Book III, is to be discovered among the celestial motions.”

matemático imperial, su reputación no era la misma que cuando vivía en Praga. Además de que el método de escritura de Kepler nunca fue sencillo de seguir. Aun así, aquí se hará un análisis de su obra, centrándonos en la parte astronómica, que es lo que hoy en día sigue vigente.

A pesar de que la idea de esta obra nació como continuación del *Mysterium* de 1597 y tuvo que esperar hasta 1619 para ser publicada, el libro mantiene casi la misma estructura que 22 años antes había planteado Kepler; una obra dividida en 5 libros.

- El Libro I es geométrico; sobre el origen y la construcción de las figuras regulares que establecen las proporciones armónicas.
- El Libro II es arquitectónico, es decir, viene de la geometría de las figuras, sus congruencias y las relaciones entre ellas.
- El Libro III es específicamente armónico; sobre el origen de las armonías en las proporciones de las figuras, en la naturaleza y especialmente en la música.
- El Libro IV es metafísico, psicológico y astrológico; sobre la esencia de las armonías, los tipos y, especialmente, sobre aquellas del cielo que afectan a la Tierra y a la naturaleza.
- El Libro V es astronómico y metafísico; sobre las armonías de los cuerpos celestes, sus movimientos y el origen de sus excentricidades a partir de estas proporciones armónicas.

Además de los cinco libros, la obra cuenta con un resumen y un apéndice, el cual es una comparación entre el libro III de esta obra y el libro *Harmonics* de Ptolomeo.

El análisis que se hace en el capítulo de este trabajo y que se presenta a continuación, es de la obra completa; sin embargo, debido a que únicamente el libro V es relevante para la física actual, el análisis de esta parte es mucho más profundo y a detalle que el resto de la obra.

Dedicatoria

La primera peculiaridad de esta obra la encontramos en la dedicatoria, ya que Kepler no se la dedica a su protector, el emperador Matías, sino al Rey de Inglaterra, Jacobo I; a quien ya le había dedicado su libro *De stella nova* en 1606. Según Kepler las razones de esta dedicatoria son que esta obra debía ser leída en todo el mundo, no solo en el Imperio Astro-Húngaro, además de que llevaba mucho tiempo sin recibir su salario como matemático imperial.

En la dedicatoria, Kepler reconoce el papel de Jacobo como líder de la Iglesia Anglicana y resalta la unión que logró hacer entre el reino de Escocia y el reino de Inglaterra tras las muertes de su madre María I de Escocia y su tía Isabel I de Inglaterra. En palabras del propio Kepler: “a partir de la combinación de dos provincias tu creaste un Reino y una armonía.”¹⁴⁵

¹⁴⁵ Kepler, *Harmonices Mundi*, 4.

- "from the combination of both provinces you produced one Kingdome and one harmony."

Resumen

En los libros I y II, Kepler expone los fundamentos geométricos que va a utilizar a lo largo de la obra; por ejemplo, la congruencia y la perfección de las diferentes figuras geométricas, siendo las figuras más perfectas los cinco sólidos platónicos y la estrella polyhedra. Justamente este profundo análisis geométrico, en especial del libro X de los Elementos de Euclides, en su época fue más popular que el argumento central de la obra y algunos de sus descubrimientos relevantes hasta nuestros días.

En el libro III, Kepler deja a un lado la geometría para centrarse en las notas musicales que se crean al dividir una cuerda y las armonías que se producen. Así como le hizo con las figuras geométricas, Kepler califica a las notas musicales según su perfección armónica. El principal argumento de la obra, se encuentra en los primeros dos capítulos.

Para el libro IV, Kepler se enfoca en estudiar las armonías en la naturaleza, y en el libro V en la creación misma. Para estos análisis, Kepler divide a las armonías en dos tipos: armonías sensibles y armonías puras. La armonía sensible, como dice su nombre, requiere de dos partes sensibles, ya sean dos notas musicales o dos rayos de luz, que se comparan y se ordenan según su cantidad. Por su parte, la armonía pura es la armonía que nace de una categoría matemática y es innata al espíritu. Con estas dos herramientas, Kepler analiza las armonías que surgen en la astrología.

Así es como se llega al libro V, en el cual estudia las armonías celestiales basándose en los polígonos regulares que se encuentran entre los planetas y en las armonías básicas, como lo propone en el *Mysterium Cosmographicum*. Este análisis lleva a Kepler a reconocer que el modelo que había planteado en el *Mysterium* en realidad era mucho más complejo y que algunos de los datos que había utilizado previamente, estaban mal.

De esta manera y muy a su estilo, Kepler comienza a buscar armonías en todos los datos que tenía sobre los planetas: los periodos, las distancias al Sol en el perihelio, las distancias al Sol en el afelio, el promedio de las distancias, etc. Después de fracasar en todo, el siguiente paso fue buscar armonías en los movimientos reales, pero lamentablemente también falla, hasta que por fin encuentra una armonía en las velocidades angulares en el afelio y en el perihelio.

Curiosamente Kepler encuentra no solo un tipo de armonía, sino dos: entre las velocidades angulares en el afelio y perihelio de un mismo planeta y entre las velocidades con los planetas vecinos, específicamente la velocidad angular en el perihelio con el planeta superior, y la velocidad angular en el afelio con el planeta inferior. A estas velocidades Kepler les asigna una nota musical, y tomando la velocidad más lenta, la de Saturno en el afelio, como la nota G, construye las demás, utilizando únicamente los afelios y perihelios de cada planeta.

En esta búsqueda de armonías entre los planetas, Kepler concluye que los cuerpos celestes se encontraron en una misma armonía en un sólo momento, en la creación. “[Kepler] declara que las

armonías universales de los seis planetas, especialmente en los extremos de sus movimientos, y la representación de las dos escalas, no pueden ser accidentales.”¹⁴⁶

En el último capítulo, del último libro, Kepler utiliza 48 proposiciones y axiomas, y dos apéndices, para demostrar, a priori, porque las armonías de los planetas están ligadas a los sólidos regulares, para así crear el modelo cosmológico perfecto. Y así es como Kepler termina su gran obra en donde, según él, logra revelar la mente del Creador.

4.1 Libro I. Sobre la construcción de las figuras regulares

Se suele pensar que Kepler fue el primero en darle uso a los cinco sólidos regulares, pero en realidad, casi desde su descubrimiento fueron asociados con otras cosas. Sabemos que Kepler los utilizó para explicar las distancias entre los planetas y la existencia de únicamente seis de ellos, pero antes de esto, los cinco sólidos perfectos ya eran utilizados.

Kepler ve a la geometría como un arte y como algo necesario para vivir, es por eso que en la introducción a este libro, Kepler ataca fuertemente a aquellos matemáticos que critican a Euclides y que no le ven uso a los cinco sólidos platónicos en la naturaleza, entre ellos: Petrus Ramusm Lazarus Schöner y hasta a Willebrord Snel van Royen (descubridor de la ley de Snell).

“Pero yo trato con esos tipos [los cinco sólidos perfectos] no con números, no con álgebra, sino con procesos mentales de razonamiento, porque por supuesto que no los necesito para hacer cuentas de mercancías, sino para explicar las casusas de las cosas.”¹⁴⁷

El objetivo de este libro es encontrar las causas de las armonías que se crean al dividir un círculo en partes iguales, creando a su vez figuras regulares planas. Para lograr esto, Kepler parte del libro X de los *Elementos* de Euclides y de las figuras mismas. Curiosamente, en este primer libro Kepler sigue el estilo de escribir con definiciones, proposiciones y demostraciones, sin embargo advierte al lector que no siempre es muy claro, ya que su intención no es atraer a los geómetras, sino a los filósofos. De igual manera deja el consejo de que si el lector no tiene los conocimientos matemáticos necesarios, se salte hasta la proposición XXX, y de ahí hasta el último libro.

“Ahora procedamos al negocio, con el favor de Dios.”¹⁴⁸

¹⁴⁶ Kepler, *Harmonices Mundi*, XXXV.

- “[Kepler] declares that the universal harmonies of all six planets, especially in the extremities of their motions, and the representation of the two scales, cannot be accidental.”

¹⁴⁷ Kepler, *Harmonices Mundi*, 13.

- “But I deal with those kinds [the five solids] not with numbers, not by algebra, but by mental processes of reasoning, because of course I do not need them in order to draw up accounts of merchandise, but to explain the causes of things.”

¹⁴⁸ Kepler, *Harmonices Mundi*, 15.

- “Now let us proceed to business, with God’s help.”

4.2 Libro II. Sobre la congruencia de las figuras armónicas

A lo largo del libro I, Kepler estudia las propiedades que tienen las figuras regulares según su construcción. En este libro II, Kepler estudia las propiedades que surgen en los poliedros creados a partir de las figuras regulares planas: las propiedades que heredan y las nuevas propiedades que surgen a partir de su congruencia. Básicamente el libro I se basa en las figuras regulares planas, mientras que el libro II se basa en las figuras regulares sólidas.

Para lograr esto Kepler comienza con varias definiciones de congruencia: según sus ángulos, lados, caras, etc. Y en base a esto, por medio de proposiciones, inicia su construcción de poliedros.

De los cinco libros que comprende el *Harmonices Mundi*, este es el libro más corto. Sigue con la misma estructura del libro I, con definiciones, axiomas y proposiciones, pero algo peculiar de este libro es que tiene muchos diagramas y dibujos de poliedros.

Para los Pitagóricos los cinco sólidos representaban a los cinco elementos, mientras que para Aristóteles, los cinco sólidos regulares eran simplemente los cinco planetas.

A pesar de que hace un análisis completo de muchas figuras, Kepler les da un lugar importante a los cinco sólidos platónicos, nombrándolos como 'las figuras del mundo' y al igual que los pitagóricos, les asocia un elemento a cada una de ellas, como se observa en la figura 27:

- Octaedro – Aire
- Tetraedro – Fuego
- Icosaedro – Agua
- Cubo – Tierra
- Dodecaedro – Cielo

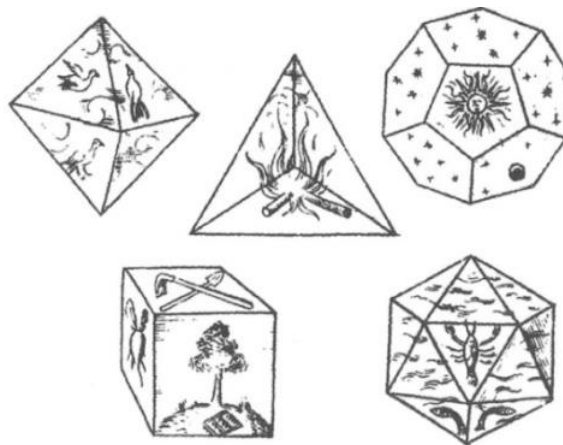


Figura 27. Ilustración de los cinco sólidos platónicos con su elemento correspondiente.¹⁴⁹

¹⁴⁹ Kepler, *Harmonices Mundi*, 111.

Al final Kepler logra construir 12 polígonos que cumplen con todas sus normas de congruencia:

1. Trigón
2. Tetrágono
3. Pentágono
4. Hexágono
5. Octágono
6. Decágono
7. Dodecágono
8. Icoságono
9. Pentágono estrella
10. Octágono estrella
11. Decágono estrella
12. Dodecágono estrella ¹⁵⁰

Es importante destacar que este libro II, junto con el libro V, fueron los más estudiados después de la muerte de Kepler, debido a estas construcciones geométricas que son realmente innovadoras.

4.3 Libro III. Sobre el origen de las proporciones armónicas, y sobre la naturaleza y las diferencias de aquellas cosas que se relacionan con la melodía

Es este libro Kepler analiza las proposiciones geométricas que describe en los libros I y II para determinar su origen, y así estudiar la relación que tienen con las proposiciones del mundo natural, y en especial con las proposiciones de la música. Para lograr esto, Kepler utiliza la creación de las notas según la división de una cuerda y toma a las armonías matemáticas como melodías.

Es importante recordar que durante su vida Kepler estudió música como parte del programa obligatorio de la universidad, pero que por su cuenta profundizó mucho en el tema estudiando libros de armonía y de teoría musical.

“Mostrando como la mente humana, agudizando el juicio de lo que escuchamos, por su instinto natural imita al Creador mostrando gusto y aprobación por las mismas proporciones en las notas que le han agradado a Dios en el ajuste de los movimientos celestes.” ¹⁵¹

Algo mágico de Kepler es que trata a la música como algo natural que el hombre descubre e intenta imitar. Para Kepler la música ha estado presente desde la creación y lo va a estar hasta el apocalipsis. Sin embargo, el hombre nunca ha podido descubrir el origen de las melodías.

Kepler escribe que Pitágoras fue el primero en estudiar las armonías musicales cuando notó que los martillos grandes provocaban sonidos graves y los martillos pequeños provocaban sonidos agudos. De esta manera, encontró una relación entre el tamaño y las notas, llevando esta idea a las cuerdas y su longitud. Más adelante, los mismos Pitagóricos descubrieron que las armonías

¹⁵⁰ Kepler, *Harmonices Mundi*, 124.

¹⁵¹ Kepler, *Harmonices Mundi*, 129.

- “Showing how the human mind, sharpening our judgement of what we hear, by its natural instinct imitates the Creator by showing delight and approval for the same proportions in notes which have pleased God in the adjustment of the celestial motions.”

perfectas eran aquellas que provenían de las cuerdas cuya longitud seguían las proporciones aritméticas múltiples.

Siguiendo estos análisis de los Pitagóricos sobre la creación de las armonías musicales, Kepler construye el siguiente *Tetraktys*.¹⁵²

1
2 3
4 6 9
8 12 18 27

“Filosofía pitagórica sobre el poder de los números.”¹⁵³

Después de elogiar a los Pitagóricos por sus construcciones numéricas, Kepler los critica por basarse en éstas, en lugar de basarse en el sonido. Curiosamente esta crítica es incorrecta, ya que en realidad eran los Platónicos los que se basaban en las matemáticas en lugar de en la música. El mismo Platón criticó a los Pitagóricos por: “preferir a sus oídos que a sus mentes.”¹⁵⁴ Fue hasta el libro de *Harmonics* de Ptolomeo que se empezaron a hacer armonías y melodías según el tono y no sólo según la proporción matemática. Sin embargo, el trabajo de Ptolomeo no estuvo completo, y es por eso que cae en Kepler la responsabilidad de completar el análisis sobre el origen de las armonías musicales, tomando en cuenta las proporciones matemáticas y geométricas, y las melodías que se crean.

“Porque no es sólo en los sonidos y en las melodías humanas que [las armonías] dan su encanto, sino también en otras cosas que no tienen sonidos, como lo veremos en el cuarto y en el quinto libro [de esta obra].”¹⁵⁵

Este libro III es el más largo de toda la obra y se divide en 16 capítulos, pero únicamente los primeros dos capítulos están organizados con definiciones, axiomas, colorarios y proposiciones, todos los demás están escritos de manera normal. De igual manera, todo el libro está lleno de pentagramas, notas e intervalos musicales.

¹⁵² El tetraktys es un símbolo místico muy significativo para los pitagóricos por lo cual hay toda una teoría para poder construirlo. El tetraktys original de los pitagóricos simplemente son los 10 puntos los cuales pueden ser rellenados con cualquier secuencia de números, el presentado en este trabajo es el construido por Kepler tomando como base la construcción de las armonías musicales con según las divisiones de una cuerda.

¹⁵³ Kepler, *Harmonices Mundi*, 132.

- “Pythagorean philosophy on the power of numbers.”

¹⁵⁴ Kepler, *Harmonices Mundi*, Nota 30 de la página 137.

- “preferring their ears to their minds.”

¹⁵⁵ Kepler, *Harmonices Mundi*, 140.

- “For it is not only in sounds and in human melody that they [harmonies] yield their charm, but also in other things which are soundless, as we shall hear in the fourth and fifth books.”

4.4 Libro IV. Sobre las configuraciones armónicas de los rayos estelares sobre la Tierra, y sus efectos en los eventos de los cielos y otros fenómenos naturales

En los primeros tres libros, Kepler construye armonías a partir de la geometría, de manera que ya teniéndolas estudiadas, se puedan aplicar. Según Kepler, las armonías pueden ser creadas por tres factores: primero Dios, luego la Naturaleza y por último el Humano. Sin embargo, el análisis que hace en esta obra, lo hace siguiendo el orden contrario: primero estudia las armonías creadas por el Humano, luego por los efectos de la Naturaleza y por último en la creación de Dios; cada uno de éstos en una parte de la obra (libro III, libro IV y libro V, respectivamente).

Por lo tanto, este libro IV, tiene un enfoque más metafísico con la intención de revelar las armonías en la naturaleza y en los movimientos de los astros. A diferencia de los trabajos sobre la armonía celeste de otros filósofos, Kepler únicamente se enfoca en estudiar qué son 'las armonías de los rayos celestes', cuántos son y con qué principios geométricos están formados. A esto se refiere al estudio del aspecto de la luz proveniente de los astros celestes. De manera que este libro vuelve a tener un enfoque geométrico y no musical, a diferencia del anterior.

4.5 Libro V. Sobre la más perfecta armonía de los movimientos celestes

'Y sobre el origen de las excentricidades, semidiámetros y sobre los periodos según las hipótesis de Copérnico y Tycho Brahe, excluyendo a Ptolomeo de los modelos astronómicos correctos que se enseñaban en esa época.'¹⁵⁶

Este libro V consta de un poema, 10 capítulos y un apéndice dividido en 3 partes. Al ser la parte central de la obra y la más relevante para la ciencia actual, el análisis que se realizó en este trabajo sobre este libro será el más completo y será capítulo por capítulo.

Poema

Comienza describiendo este libro como la culminación de la gran obra de Kepler que empezó 22 años antes con la teoría de los sólidos perfectos entre las órbitas de los planetas, esto lo llevó a estudiar bajo el gran astrónomo Tycho Brahe, lo hizo matemático imperial de dos diferentes emperadores, y al final todo fue gracias a la inspiración de Dios Creador.

Kepler también acepta que parte de la inspiración para esta gran obra fue dada por el mismísimo Ptolomeo y su libro de *Harmonics*, el cual, aunque no contaba con el modelo astronómico correcto, tiene unas grandes ideas que Kepler rescata y las lleva a la astronomía moderna.

¹⁵⁶ Nombre completo del libro V del *Harmonices Mundi*.

“Me complace en permitirme el furor sagrado, y asaltar insolentemente a los mortales con la franca confesión de haber hurtado los cálices áureos de los egipcios, para construir con ellos el tabernáculo de mi Dios lejos de los confines de Egipto. Si me lo pasáis por alto, me alegraré; si os inflama la ira, lo soportaré. Aquí lanzo los dados, escribo el libro, que lo lean los presentes o los venideros, nada importa; espere a sus lectores cien años, si Dios mismo se ha prestado a esperar seis mil a quien le contemplara.”¹⁵⁷

Kepler nos comparte que con este libro por fin llegó a leer la mente del Creador, aunque Dios mismo no lo sepa.

Capítulo 1. De las cinco figuras sólidas regulares

Comienza el capítulo con un recordatorio de lo visto en el libro II, donde describe las armonías en la geometría. Luego recuerda el orden y la clasificación de los sólidos platónicos:

- | | | | |
|---------------|---------------------|--------------|-----------------------|
| 1. Cubo | } Figuras primarias | 5. Icosaedro | } Figuras secundarias |
| 2. Tetraedro | | 6. Octaedro | |
| 3. Dodecaedro | | | |

Después de esto, Kepler pasa a asignarles géneros a las figuras para así lograr matrimonios entre ellas. El cubo y el dodecaedro son masculinos, el icosaedro y el octaedro son femeninos, y el tetraedro es hermafrodita, de manera que se da un matrimonio entre el cubo y el octaedro, donde el tetraedro es el encargado de mediar la relación entre ellos.

Además de asignarles género a las figuras, Kepler toma al tetraedro como un tercio del cubo y al octaedro como la mitad del tetraedro, de manera que el octaedro queda como un sexto del cubo; esto hace que se consideren sus proporciones racionales, a diferencia de las del dodecaedro las cuales son irracionales, pero divinas.

Capítulo 2. Del parentesco de las proporciones armónicas con las cinco figuras regulares

Existen relaciones entre las proporciones armónicas y los cinco sólidos perfectos:

1. Analizando las figuras de las caras de los sólidos (triángulos, cuadrados y pentágonos) y los ángulos sólidos.
2. Analizando los cortes que se le pueden hacer a los sólidos y las construcciones de sus lados.
3. Analizando diferentes propiedades geométricas de los sólidos como sus aristas, ángulos, caras y la comparación entre ellos mismos.
4. Analizando los radios de las esferas inscritas y circunstancias en cada sólido.

¹⁵⁷ Johannes Kepler, *Las Armonías del Mundo*, trad. José Luis Arántegui Tamayo (Ciudad de México: Crítica, 2019), 562.

Capítulo 3. Suma de doctrina astronómica, necesaria a la contemplación de las armonías celestes

El título del capítulo promete un resumen de la doctrina de la astronomía para poder encontrar las armonías entre los cuerpos celestes; sin embargo, Kepler rechaza hablar sobre el modelo de Ptolomeo y se centra en los modelos de Copérnico y Tycho Brahe, los cuales comparten las armonías propuestas por Kepler.

A pesar de que Kepler toma al modelo de Copérnico sobre el de Tycho, sabe que muchos intelectuales no lo hacen, pero su principal objetivo no es poner un modelo por encima del otro, sino dar a conocer su teoría de las armonías y explicar cómo funciona en ambos modelos

Algo importante a destacar es que, a pesar de que para este momento Kepler ya sabía (o por lo menos ya había descubierto) que las órbitas de los planetas son elípticas, él vuelve a tomar el círculo como trayectoria. Cada planeta se traslada alrededor del Sol cambiando su distancia, de manera que se pueden tomar tres círculos como órbitas: uno en del afelio, otro a la distancia del perihelio y otro como un promedio entre los dos, como se observa en la figura 28.

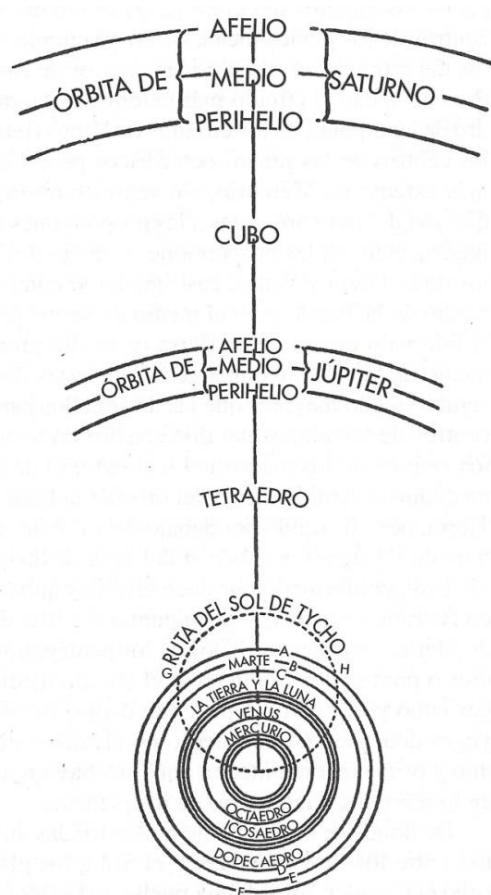


Figura 28. Diagrama ilustrativo de las órbitas de cada planeta con su sólido correspondiente.¹⁵⁸

¹⁵⁸ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 569.

Con estas órbitas circulares, Kepler vuelve a plantear la idea de que las distancias entre cada planeta están dadas por los cinco sólidos perfectos. Sin embargo, Kepler acepta que con los nuevos datos de Tycho Brahe, la hipótesis de los sólidos perfectos no puede ser aceptada como él la había planteado 22 años antes. “Sin que no obstante sea lisa y llanamente igual, como antaño fui tan osado de prometer de la Astronomía finalmente perfeccionada.”¹⁵⁹ Con los nuevos datos, el cubo y el octaedro son demasiado chicos, el dodecaedro y el icosaedro demasiado grandes y únicamente el tetraedro queda bien.

Curiosamente, después de aceptar que su hipótesis es incorrecta, Kepler le recuerda al lector que en *Astronomía Nova* demostró que la velocidad de los planetas no es constante debido a que el Sol es la fuente del movimiento y a que los planetas giran a su alrededor en elipses. “Ahora bien, demostrado está también [...], ser elíptica la órbita del planeta, y estar el Sol, fuente del movimiento, en el otro foco de esa elipse, resulta que el planeta, despachado un cuadrante de todo el circuito desde su afelio, mantiene un intervalo desde el Sol hasta él exactamente medio entre el máximo, en el afelio, y el mínimo, en el perihelio.”¹⁶⁰

Por fin Kepler continúa con el trabajo que empezó 22 años antes en el *Mysterium*, pero ahora teniendo como herramienta principal los datos correctos de las observaciones de Tycho Brahe, de manera que por fin logra establecer una relación numérica entre el periodo de un planeta y su distancia al Sol. En palabras de Kepler, el 8 de marzo de 1618 concibió mentalmente la idea, pero no la comprobó hasta el 15 de mayo donde dice:

“Más es cosa certísima y en todo exacta que la proporción que existe entre los tiempos periódicos de dos planetas cuales quiera sea precisamente la proporción sesquiáltera [de la potencia 2/3] ente las distancias medias, esto es, entre los orbes mismos; atendiendo también no obstante, a que la media aritmética de ambos diámetros en sendas órbitas elípticas sea algo menos que el más largo ente ambos.”¹⁶¹

Esto es lo que hoy conocemos como la tercera ley de Kepler, donde:

$$T^2 \propto a^3$$

Aunque hoy en día se traduce como:

$$\frac{T^2}{a^3} = c$$

Donde ‘T’ es el periodo y ‘a’ es el semieje mayor.

¹⁵⁹ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 570.

¹⁶⁰ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 571.

¹⁶¹ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 573.

Capítulo 4. En qué cosas tocantes al movimiento de los planetas hallándose expresadas por el creador las proporciones armónicas, y de qué modo

El capítulo cuatro trata sobre las armonías que se pueden encontrar en los movimientos de los planetas. La primera parte del capítulo es el análisis de los periodos de los planetas, la descomposición de éstos y la búsqueda de armonías, todo para concluir que “No se desprende de aquí, por tanto, haber querido Dios Creador introducir proporciones armónicas entre estas demoras sumadas en los tiempos periódicos.”¹⁶²

Siguiendo con su análisis, Kepler decide tomar el periodo de la Tierra como 1, de manera que el periodo de Saturno es 30, el de Júpiter 12 y el de Marte menos de 2; además de que el periodo de la Tierra es 1.5 veces más grande que el de Venus y poco más de 4 veces más grande que el de Mercurio. Pero estas proporciones no tienen ningún tipo de armonía.

Viendo que no hay armonías entre los periodos o sus partes, Kepler pasa a analizar las órbitas de los planetas. Curiosamente, Kepler hace este análisis usando los afelios y los perihelios de cada planeta, primero estudiando la relación que hay entre estos dos puntos en cada planeta, y luego la relación entre esos dos puntos entre los planetas. Es justo en la convergencia y la divergencia de las relaciones entre los planetas, donde Kepler comienza a ver un poco de armonía.¹⁶³

Sin embargo Kepler resalta que estas armonías no tienen que ver con la proporción del movimiento de los planetas, de manera que el acomodo de los sólidos perfectos, queda mejor.

“y en efecto, si sopesamos la cosa sensatamente con mejor diligencia, es harto inverosímil haber procurado armonía el Creador Sapientísimo especialmente a esas jornadas planetarias. Pues si son armónicas las proporciones de sus jornadas, serán todas las restantes que los planetas tengan, coaccionadas por su jornada y atadas a ella, de suerte que no hay otro lugar en que procurar armonías si así placiere.”¹⁶⁴

Después de algunas luchas, Kepler acepta que no puede haber armonías entre los movimientos de los planetas porque esto implicaría que habría armonías en otros aspectos de los planetas. Esta conclusión solo deja espacio a que las armonías sean de la luz o del sonido, de manera que en lugar de tomar las posiciones reales de los planetas, pasa a analizar las posiciones aparentes. Por lo tanto, lo que se va a analizar van a ser los ángulos y los arcos vistos desde el Sol, no necesariamente las distancias. Nuevamente se analizan las relaciones ente el afelio y el perihelio de cada planeta y entre los planetas.

¹⁶² Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 577.

¹⁶³ Convergencia – Es entre el afelio del planeta superior con el perihelio del planeta inferior.
Divergencia – Es entre el perihelio del planeta superior con el afelio del planeta inferior.

¹⁶⁴ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 583.

Es en estos datos donde Kepler por fin encuentra las dichas armonías, tanto en el análisis individual, como en el análisis de las convergencias y las divergencias de los planetas, como se puede observar en la tabla 6.

*Tabla 6. Tabla de datos con los movimientos aparentes de cada planeta y sus armonías.*¹⁶⁵
Armonías por parejas Movimientos aparentes diarios Armonías propias de cada uno

Diverg.	Converg.						
$a/d = 1/3$	$b/c = 1/2$	Saturno	en afelio	1'46"	a	1'48" : 2'15" = 4 : 5, tercera mayor	
			en perihelio	2'15"	b		
$c/f = 1/8$	$d/e = 5/24$	Júpiter	en afelio	4'30"	c	4'35" : 5'30" = 5 : 6, tercera menor	
			en perihelio	5'30"	d		
$e/h = 5/12$	$f/g = 2/3$	Marte	en afelio	26'14"	e	25'21" : 38'1" = 2 : 3, de Quinta	
			en perihelio	38'1"	f		
$g/k = 3/5$	$h/i = 5/8$	Tierra	en afelio	57'3"	g	57'28" : 61'18" = 15 : 16, semitono	
			en perihelio	61'18"	h		
$i/m = 1/4$	$k/l = 3/5$	Venus	en afelio	94'50"	i	94'50" : 98'47" = 24 : 25, diesis	
			en perihelio	97'37"	k		
		Mercurio	en afelio	164' 0"	l	164'0" : 394'0" = 5 : 12, octava con tercera menor	
			en perihelio	384'0"	m		

Con esto, Kepler concluye sus análisis sobre la visión y la posición de los planetas o su 'análisis sobre la luz', de manera que en los siguientes capítulos analiza la armonía que produce 'el sonido' de los planetas.

Capítulo 5. Cómo están expresadas en las proporciones de los movimiento planetarios las notas de la escala musical, o lugares del sistema, y los modos de armonía, mayor y menor

Para este capítulo, Kepler utiliza algunas de las cosas vistas en el libro III, recordando que este libro trata sobre las armonías que se encuentran en la música. El principal elemento que rescata Kepler de su tercer libro y que utiliza en este capítulo es la relación numérica que tienen las notas musicales, de manera que se pueden asociar notas musicales a los movimientos de los planetas según sus velocidades.

Siendo Saturno en el afelio el movimiento más lento del sistema, se le asigna la nota Sol (G). A la Tierra en el afelio le asigna la misma nota pero 5 octavas más alta, y en base a esto se construyen las notas musicales para cada planeta, según sus velocidades en el afelio y en el perihelio.

Es importante notar que las escalas musicales y la escritura de la música han cambiado desde tiempos de Kepler, de manera que no se puede reproducir exactamente igual. Dependiendo de la

¹⁶⁵ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 584.

escala musical y de la nota inicial que se tome, se pueden crear diferentes melodías, pero al final Kepler se queda con las notas representadas en la figura 29.

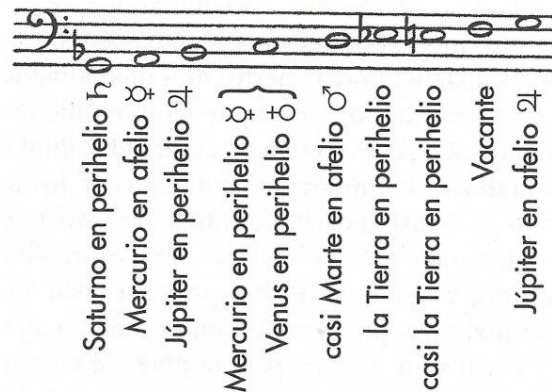
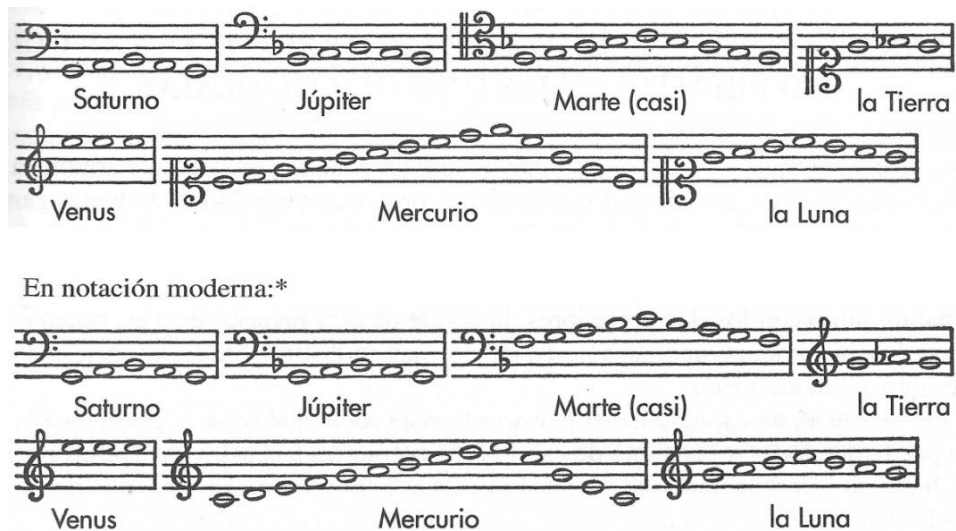


Figura 29. Notas musicales asignadas por Kepler a las diferentes posiciones de algunos planetas. ¹⁶⁶

Capítulo 6. Cómo se hallan expresados cada uno de los tonos o modos musicales en los movimientos planetarios

A partir de las notas propuestas en el capítulo anterior, Kepler le asigna una melodía a cada planeta dependiendo de su movimiento, entonces si Saturno en el afelio tiene la nota de Sol (G), Júpiter va a tener Si (B), Marte Fa sostenido (F#), la Tierra Sol (G), Venus Mi (E) y Mercurio La (A). La traslación de los planetas alrededor del Sol provoca que cada planeta siga una serie de notas para así crear una melodía cósmica, la cual se puede ver en la figura 30.



* Seguimos la transcripción de E. C. Jr.

Figura 30. Pentagrama con las melodías de cada planeta según Kepler. Se pueden apreciar las notas como las escribió Kepler y con la notación moderna. ¹⁶⁷

¹⁶⁶ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 591.

Del análisis de cada pentagrama se puede observar que Marte es el planeta con mayor cambio simétrico, lo cual se puede asociar a que es el planeta con la órbita más elíptica. De manera similar, Venus mantiene las mismas tres notas durante toda su traslación lo cual indica que es el planeta con la órbita más circular. Por su parte, las notas de Mercurio reflejan lo irregular que es su órbita, es la única escala musical que no es simétrica.

Kepler también nos indica que debido a que la Tierra va tocando Mi, Fa, Mi ¹⁶⁸, estamos condenados a vivir en miseria, hambre y miseria (*Miseriam et FAmen*).

Las notas de cada planeta que podemos observar en el pentagrama, según la notación moderna, son:

- Saturno – Sol, La, Si, La, Sol
- Júpiter – Sol, La, Si bemol, La, Sol
- Marte – Fa, Sol, La, Si, Do, Si, La, Sol, Fa
- Tierra – Sol, La bemol, Sol
- Venus – Mi, Mi, Mi
- Mercurio – Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si, Do, Re, Mi, Do, Sol, Mi, Do
- Luna – Sol, La, Si, Do, Si, La, Sol

Capítulo 7. Cómo pueden existir contrapuntos o armonías universales de todos los planetas, diferentes cada uno de los demás

Ya con las partituras de cada planeta, Kepler pasa a exponer la melodía que juntos crean al estar moviéndose alrededor del Sol. Evidentemente el orden de las notas musicales no sólo depende del sonido que producen, sino también de las relaciones astrológicas que hay entre los planetas, es decir, los matrimonios y esas ideas raras que tenía Kepler.

De esta manera, el movimiento de los planetas alrededor del Sol crea una sinfonía, un coro de seis voces que aunque vayan a distintos ritmos, con tonos y con notas diferentes, crean una música celestial digna de Dios, pero inaudible para el humano.

No queda claro si para Kepler las velocidades de los planetas dependen de la música que crean o si la música celestial es así por el movimiento de los planetas, el clásico qué fue primero: la música o las velocidades. Otro elemento importante a señalar es que todos los movimientos son analizados desde el Sol, no desde el centro de las órbitas, tomando éstas como elípticas.

¹⁶⁷ Kepler, *The Harmonies of the World*, 63.

¹⁶⁸ Estas notas musicales son en el sistema hexacordo, el cual es una escala de seis sonidos adaptada de un antiguo sistema de tetracordios, pero se añadió un tono al principio y otro al final, obteniéndose así una sexta mayor.

Capítulo 8. Háyanse expresados en los planetas los cuatro contrapuntos naturales de las voces: soprano, contralto, tenor y bajo

En este capítulo Kepler divide a los planetas en sopranos, altos, tenores y bajos. Basándose en el capítulo 16 del libro III: Saturno y Júpiter son los bajos, Marte es un tenor, la Tierra y Venus son las altas y Mercurio es la soprano.

Capítulo 9. Demostración de que para obtener tal disposición armónica debieron constituirse esas precisas excentricidades que cualquiera de los planetas tienen por sí, y no otras

Para Kepler el hecho de que se puedan encontrar armonías en el movimiento de los planetas, especialmente en los puntos extremos de las órbitas (afelio y perihelio) no puede ser una coincidencia.

Este capítulo consta de 49 proposiciones y axiomas para explicar el origen de las órbitas de los planetas según el movimiento, tomando en cuenta la armonía musical expuesta en los capítulos anteriores y los cinco sólidos perfectos que se encuentran entre las órbitas de los planetas. Para esto, parte de dos axiomas fundamentales:

Axioma 1 – Todas las armonías fueron construidas a partir de los movimientos extremos de los planetas (afelio y perihelio).

Axioma 2 – Las distancias entre las seis esferas planetarias están dadas, hasta cierto punto, por los cinco sólidos perfectos.

Y así sigue Kepler, con axiomas y proposiciones, intentando respaldar sus teorías, aunque muchas de ellas no tienen validez científica.

A los primeros 17 puntos de este capítulo, Kepler los toma como ‘las razones previas’, que básicamente son axiomas y proposiciones para poder acomodar a los cinco sólidos platónicos entre las órbitas de los planetas. Algo que llama la atención es que en algunas proposiciones Kepler utiliza lo que hoy conocemos como la tercera ley, aunque él la utiliza para poder acomodar a los sólidos regulares entre las órbitas de los planetas.

Las siguientes 32 razones son ‘las posteriores’, las cuales nuevamente son axiomas y proposiciones para establecer de mejor manera las armonías y las notas musicales de cada planeta. Algo que llama la atención es que, en medio de las demostraciones, Kepler deja claro que la única y verdadera causa de todas las armonías es Dios creador que no dejó nada al azar. A continuación se presentan algunas de las proposiciones más significativas:

Proposición 22 – Los movimientos de los planetas tienen designados una nota musical, dadas según las velocidades en los extremos de su movimiento.

Proposición 28 – La proporción entre los extremos de los movimientos de la Tierra es 14:15 y de Venus es 35:36 aproximadamente, es por esto que estos dos planetas tienen las excentricidades más pequeñas; actualmente sabemos que son los planetas que tienen las órbitas menos elípticas, de los seis planetas que se conocían en la época de Kepler.

Proposición 30 – El movimiento de Mercurio tiene la proporción más grande de todos los planetas; es decir, de los seis planetas analizados, Mercurio tiene la órbita elíptica con mayor excentricidad.

Sabemos que el movimiento de Saturno en el afelio es el más lento de todos los movimientos planetarios y que el movimiento de Mercurio en el perihelio es el más rápido, pero lo que Kepler descubre es que el movimiento de Saturno en el afelio es armónico con el movimiento de la Tierra en el afelio y que el movimiento de Mercurio en el perihelio es armónico con el movimiento de la Tierra en el perihelio.

Algo notable es que Kepler, tanto en este libro como en el *Mysterium*, intenta poner a la Tierra en un lugar privilegiado, respetando de alguna manera la tradición Ptoloméica y Aristotélica. Pero en *Astronomia Nova*, Kepler ignora por completo a la Tierra y centra su investigación en Marte, despojando a nuestro planeta de ese favoritismo que le había dado.

Proposición 48 – “No fue la inscripción de las figuras sólidas regulares entre los orbes planetarios cosa de mera libertad; en cuanto a magnitudes mínimas, estorbaban las armonías establecidas entre movimientos extremos.”¹⁶⁹

Esta última proposición es la demostración del modelo de Kepler de los sólidos perfectos.

Partiendo de los datos de Tycho y las proporciones que construyó a lo largo de todo el libro, Kepler hace las operaciones y los movimientos necesarios (manipulando un poco los datos) para que las órbitas de los planetas pudieran quedar inscritas y circunscritas en los cinco sólidos perfectos. Al final, a pesar de sus alteraciones, los datos no dan de manera exacta, hay algunos sólidos que no llegan a las órbitas y hay otros que se pasan, pero aun así Kepler defiende su teoría diciendo que fue propuesta por Dios mismo, e invita al lector a plantear una mejor idea que cumpla con los datos y con las armonías propuestas en este libro.

En este noveno capítulo, Kepler vuelve a contar cómo fue que llegó a su teoría de los sólidos perfectos y dice: “Venido a las cinco sólidas, se hacían patentes aquí el número de cuerpos y una magnitud de los intervalos bastante cercana a la verdad; como para que apelara yo, respecto a las discrepancias restantes, a la perfección de la astronomía. Se perfeccionó en estos veinte años; y hete aquí que los intervalos aún discrepaban de las figuras sólidas.”¹⁷⁰

¹⁶⁹ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 630.

¹⁷⁰ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 635.

Kepler toma a los sólidos perfectos como el cuerpo de su modelo astronómico y a las armonías como los detalles que le dan forma y lo embellecen.

Termina el capítulo 9 con una oración en donde le agradece a Dios que le haya dado la oportunidad de terminar su obra en donde, utilizando todos sus conocimientos y herramientas, logra plasmar la mente del Creador, para así darle gloria al Señor.

Capítulo 10. Epílogo acerca del sol, a modo de conjeturas fertilísimas

Este último capítulo y epílogo comienza recordándonos que el Sol se encuentra en el centro del universo inmóvil, pero rotando sobre su propio eje, y que los planetas giran a su alrededor debido a un poder que sale de él. Así es como la luz y el calor salen del Sol y llegan al resto de los cuerpos celestes, de manera que los cuerpos celestes producen armonías que al final regresan al Sol.

De igual manera, Kepler vuelve a hablar sobre los seis planetas y los cuerpos celestes que los acompañan: Júpiter con sus 4 lunas, Saturno con 2 y la Tierra con 1. Recordando que para este momento Galileo ya había publicado sus descubrimientos sobre los satélites de Júpiter y los anillos de Saturno (que originalmente pensaban que eran satélites).

Más adelante Kepler habla de los himnos escritos por los antiguos filósofos griegos para sus Dioses paganos, y explica cómo Dios y su hijo Jesucristo son los únicos Dioses que se pueden considerar como verdaderos.

Hacia el final del capítulo, Kepler empieza a mencionar las cosas que hacen única a la Tierra y que la diferencian del resto de los planetas, señalando que la existencia de vida en la Tierra no es una de esas cosas, ya que no se podía afirmar que no hubiera vida en otros planetas. “¿ese consumiría aquí en el globo de la Tierra todo arte, que no pudiera ya, y toda bondad, que no quisiera ya engalanar también los demás globos con las criaturas convenientes?”¹⁷¹

Además la existencia de los satélites de Júpiter y Saturno debían significar algo, si no, por qué estaban. En palabras de Kepler: “¿A qué sería bueno ceñir a Júpiter cuatro lunas, dos a Saturno, como ciñe nuestro domicilio esta nuestra única Luna?”¹⁷²

El apéndice del libro V es la comparación entre el libro *Harmonics* de Ptolomeo y las ideas propuestas en el *Hamonices* de Kepler; porque a pesar de que Kepler reconoce el trabajo de Ptolomeo, también es muy claro en señalar los errores de su obra, sin importar el modelo cosmológico con el que trabajó y en el que está basado. Es por eso que Kepler le dedica casi todo el apéndice en señalar las ideas en las que está de acuerdo, en las que no, y en las que sus ideas y las de Ptolomeo, son completamente diferentes.

¹⁷¹ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 641.

¹⁷² Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 641.

Kepler también cuenta que debido a que la copia que consiguió de la obra de Ptolomeo estaba incompleta y en griego, él se tuvo que dar a la tarea de traducirla al latín y de terminarla con sus interpretaciones de lo que Ptolomeo quiso explicar. Evidentemente esto le ayudó mucho a entender y profundizar en las ideas de Ptolomeo, aunque también nos hace pensar que las interpretó como quería y le convenía.

Por último, Kepler termina su gran obra agradeciendo y alabando a Dios Creador, que lo iluminó para tener la capacidad de entender lo que Él quiso manifestar cuando puso en marcha el Universo y sus armonías.

“Grande es nuestro señor, y grande su virtud, y sin cuento su sabiduría: alabar cielos, alabar Sol, Luna y plantas, usar cualquier sentido para percibirle, cualquier lengua para declarar al Creador vuestro; alabar armonías celestes, alabar vosotros jueces de las armonías manifiestas: y alaba tú, alma mía, al Señor Creador tuyo, mientras yo fuere: pues de Él, por Él y en Él son cuantas cosas son, ‘las de los sentidos y las del entendimiento’, así las que ignoramos por completo, como las que sabemos parte mínima de aquellas, porque hay más allá. Alabanza a Él, honor y gloria por los siglos de los siglos. Amén.”¹⁷³

¹⁷³ Kepler, *Las Armonías del Mundo*, 642.

Discusión

“No preguntamos cuál es el propósito por el que cantan los pájaros, pues el canto es su placer ya que fueron creados para cantar. Del mismo modo, no debemos preguntar por qué la mente humana se preocupa por saber los secretos de los cielos. La diversidad de los fenómenos naturales es tan grande y los tesoros escondidos en los cielos tan ricos precisamente para que a la mente humana nunca le falte alimento fresco”. ¹⁷⁴

Kepler no es el gran científico que casi muere por defender su obra como Galileo, ni es el famoso científico que es reconocido y alabado por su obra como Newton. La vida de Kepler está llena de eventos afortunados, y desafortunados, que lo moldaron para lograr romper con los prejuicios astronómicos que estaban grabados en la mente de los astrónomos desde el siglo V a.C.

Como se mencionó en la introducción, el objetivo secundario de este trabajo es mostrar una cara más humana de la ciencia, acercar a los científicos para que dejen de ser personas inalcanzables y se pueda ver uno reflejado en sus aventuras y vidas comunes. Actualmente pensamos que sólo personas extraordinarias pueden llegar a hacer ciencia, pero en realidad uno puede tener una vida ordinaria y aun así lograr resultados asombrosos.

De todos los científicos de la Revolución Copernicana, Kepler me parece el personaje más humano, y gracias a su necesidad de tener que escribir y compartir todo, también es uno de los personajes que más facilitan el estudio de su vida. Es por eso que se utilizó a él como base para mostrar cómo es que la vida personal afecta su vida científica.

La primera gran obra de Kepler es el *Mysterium Cosmographicum*, un libro lleno de errores, con ideas muy locas y sin ningún sustento científico, pero así era Kepler durante esa época. Era un joven lleno de energía y nuevas ideas, en medio de una inestabilidad política y personal, con muchas ganas de revolucionar el pensamiento. Pero todavía no era un científico, todavía no aprendía la importancia de la precisión de los datos y de los cálculos, todavía no aprendía a hacer ciencia.

A pesar de que la hipótesis del esqueleto del cosmos, que Kepler plantea en el *Mysterium Cosmographicum*, es científicamente inservible y totalmente falsa, estéticamente uno no puede

¹⁷⁴ Charles River Editors. *Johannes Kepler* (Estados Unidos: Charles River Editors, 2018), III.

- “We do not ask for what useful purpose the birds do sing, for song is their pleasure since they were created for singing. Similarly, we ought not to ask why the human mind troubles to fathom the secrets of the heavens. The diversity of the phenomena of nature is so great and the treasures hidden in the heavens so rich precisely in order that the human mind shall never be lacking in fresh nourishment”.

dejar de apreciar lo llamativo de la idea y respetar la creatividad. Imaginar que Dios todo poderoso, creador del Universo, únicamente tenía cinco figuras geométricas en su poder y que esa fue la razón por la cual solamente existen seis planetas y que éstos están distribuidos de esa manera específica (en ese orden y a esas distancias), es verdaderamente divino. Parte de mí entiende perfectamente por qué Kepler nunca abandonó por completo esta idea y por qué siempre peleó para que fuera cierta. Pero lamentablemente, la razón y la divinidad no estuvieron en sincronía.

Después del *Mysterium Cosmographicum*, tuvieron que pasar muchos años para que llegara *Astronomia Nova*, sin duda la obra científicamente más importante y rescatable de Kepler. A pesar de que es un libro muy confuso y complicado de leer, con muchos errores e hipótesis falsas; contiene dos de sus tres leyes planetarias. Recordando que esta obra nace después de que Kepler pasó un tiempo bajo la tutela del gran astrónomo Tycho Brahe, que le enseñó la importancia de la formalidad y de la exactitud en la astronomía. Además, este libro nos da una única oportunidad de conocer el camino de la creación que llevó a Kepler a sus descubrimientos.

La época en que Kepler escribió esta obra es la más estable, económica y personalmente, estabilidad que se ve reflejada en el libro, no necesariamente en su estructura, pero sí en la seriedad con la que trabaja los datos y en el desarrollo del pensamiento que se ve a lo largo de toda la obra.

Es por eso que es evidente que el Kepler que escribe *Astronomia Nova* no es el mismo que escribe el *Mysterium Cosmographicum*. Ya no es el joven que busca cambiar y revolucionar al mundo, es un adulto que ya sabe hacer astronomía y que acepta sus limitaciones, tan es así que basa todas sus demostraciones en los datos de otro. El Kepler de *Astronomia Nova* es un Kepler comprometido, que tiene la gran virtud de seguir siendo lo suficientemente excéntrico como para proponer hipótesis que rompen con la astronomía tradicional, pero es lo suficientemente responsable como para abandonarlas cuando éstas no concuerdan con los datos. El Kepler que escribe el *Mysterium Cosmographicum* es un geómetra, el Kepler que escribe la *Astronomia Nova* es un físico.

Kepler analizó los datos de Tycho de todas las maneras posibles y al final lo que obtuvo fue la trayectoria elíptica de la órbita de Marte, pero su libro va mucho más allá de las elipses. *Astronomia Nova* logra hacer lo que se propone en el título, es decir, una nueva astronomía, y enseñarle a los futuros físicos cómo es que se debe de hacer el análisis de los cielos. Además de que en el prólogo de esta obra, Kepler presenta la primera idea de lo que podría ser una ley de gravitación, aunque de ninguna manera se le puede considerar a él como el padre de la fuerza gravitacional.

Curiosamente, por sus aportaciones a la ciencia, Kepler muchas veces es considerado como uno de los astrónomos observacionales más importantes de la historia, pero en realidad Kepler realizó muy pocas observaciones en su vida debido a que su visión era muy mala. "Para las observaciones,

su visión era mala, y para operaciones mecánicas, su mano era torpe.”¹⁷⁵ Como vimos a lo largo de este trabajo, la mayor parte de los descubrimientos de Kepler se basan en las observaciones realizadas por su mentor Tycho Brahe, las cuales Kepler tomó después de la muerte del danés (Brewster, 1841).

Además de obtener los datos de las observaciones, durante el poco tiempo que Kepler trabajó para Tycho, algo cambió en Kepler que cuando por fin obtuvo los datos astronómicos, no los utilizó para comprobar su hipótesis de los sólidos perfectos, razón por la cual buscó al danés, sino que los usó para continuar con el trabajo que le asignaron a su llegada a Praga: analizar las observaciones de Marte. Por eso es que es destacable que, a pesar de que con Tycho, Kepler aprendió a ser astrónomo, no dejó su imaginación e intuición en el proceso.

Algunos investigadores piensan que la idea que motivó a Kepler a lo largo de *Astronomia Nova* fue descubrir la trayectoria que siguen los planetas alrededor del Sol, pero personalmente no creo que esto sea totalmente cierto. Analizando el desarrollo del libro, pareciera que Kepler descubrió la trayectoria casi sin querer. Puede ser que haya empezado su investigación con este propósito, pero al final su motivación principal fue conocer la verdad, cualquiera que fuese sobre todos los aspectos de los planetas, no sólo de sus trayectorias.

Por último tenemos *Harmonices Mundi*, la última gran obra de Kepler; obra que a mi parecer demuestra su verdadera grandeza. Kepler escribió este libro durante lo que fue la época más complicada de su vida, después de tener que abandonar Praga debido a la guerra, de enviudar, del juicio de su madre por brujería y de la muerte de ésta seis meses después, y de tener que sobrevivir con un salario muy reducido. A pesar de todo, Kepler fue capaz de elevarse por encima de esto para poder escribir un libro que se basa en la armonía que existe en el Universo. Kepler fue capaz de ver armonías en medio de la tempestad y de compartirlas con el mundo cuando éste le dio la espalda.

Este libro es planteado como la continuación del *Mysterium Cosmographicum*, pero a diferencia de éste, el *Harmonices Mundi* es un libro mucho más completo, con más estructura y con un poco más de rigurosidad; además de que, estéticamente, el contenido del *Harmonices* es mucho más bello que el del *Mysterium*. De igual manera, a pesar de que la base sigue siendo el modelo cosmológico de los sólidos perfectos, para esta obra Kepler busca, y respeta, el sustento en los datos de Tycho. Es por eso que a diferencia de su primera obra, ésta sí es estudiada por los astrónomos.

Es en el *Harmonices* donde Kepler junta todas sus personalidades, profesiones y enfoques para crear su obra más completa, aunque no la mejor, ni la más influyente. Científicamente, lo más rescatable del libro, es que en medio de sus páginas podemos encontrar lo que hoy conocemos

¹⁷⁵ Brewster, *The martyrs of science*, 236.

- “For observations his sight was dull, and for mechanical operations his hand was awkward.”

como la Tercera Ley de Kepler. La única ley que sale de la búsqueda insaciable de Kepler de querer encontrar alguna relación entre los planetas, sus distancias, sus velocidades o sus tiempos.

Por otra parte, Kepler dedica dos quintas partes del libro a retomar y reafirmar su hipótesis del esqueleto del cosmos con los sólidos perfectos, aunque acepta que éste es más una guía y no algo concreto, debido a que los cálculos no concuerdan con los datos.

Es increíble que después de todo lo que hizo Kepler, después de todo lo que aprendió con Tycho, después de escribir *Astronomia Nova*, después de todo lo que descubrió, hubiera seguido empeñado en su hipótesis de los cinco sólidos perfectos.

Personalmente, lo que más rescato del libro es que en esta gran obra Kepler trabaja sobre una concepción del Universo que fue pensada muchos años antes que él. En el siglo IV a.C. el gran filósofo y matemático Pitágoras planteó la idea de la música de las esferas, en la cual los planetas y el Sol giran alrededor de la Tierra (recordando que el modelo de esa época era el geocéntrico) creando una melodía; una música que no se puede escuchar con los oídos, sino que se escucha con la mente (*Balchin, 2014*).

Aunque muchas veces no es tan reconocido, ni se le da el valor que en realidad tuvo, Kepler es el científico que por fin resuelve la pregunta que dio pie a lo que conocemos como la 'Revolución Copernicana', ¿Qué sistema cosmológico es mejor, el geocentrista de Ptolomeo o el heliocentrista de Copérnico?, y la respuesta correcta es: las elipses de Kepler. Lamentablemente lo descabellado y complejo de sus obras, los temas metafísicos que generalmente incluye en ellas y su horrible forma de escribir, en donde deja sus errores, hacen que se pierda mucho del valor científico que tienen y que sus descubrimientos no fueran tomados en cuenta si no hasta muchos años después.

En las páginas del *Harmonices Mundi* Kepler retoma esta idea y la expande al modelo heliocéntrico, de manera que cada planeta que se traslada alrededor del Sol lo hace emitiendo ciertas notas musicales. Estas notas dependerán de la distancia entre los planetas y el Sol, y de las velocidades con las que se trasladan; de manera que el movimiento de los seis planetas crea una sinfonía perceptible sólo para Dios. Uno no puede leer esta hipótesis y no enamorarse de ella, aunque sea totalmente falsa y científicamente no aporte nada.

Es así como con estas tres obras, Kepler logra revolucionar a la astronomía pensando también en las que podrían ser las causas del movimiento y no únicamente en el modelo geométrico que se puede describir a partir de lo observado. Es por eso que Kepler decide incluir el modelo de Tycho, en parte debido al sentimiento de obligación que sentía con su familia y con él mismo, y en parte porque quería probar que no se puede tomar únicamente a la geometría para determinar si un sistema planetario es correcto o incorrecto; es necesario considerar las causas físicas.

Un aspecto importante que diferencia a Kepler del resto de los científicos es que en sus obras no sólo expone sus resultados, sino que también escribe sobre sus errores y sobre los métodos que lo

llevaron a sus descubrimientos. Kepler tiene tanto respeto a la verdad que no le importa publicar sus errores e ideas más locas, a diferencia de Newton que se caracteriza por su rigor científico. Esto hace que sus obras lleguen a ser cansadas, tediosas y que actualmente leer la obra completa de Kepler sea más por curiosidad, que por necesidad. Bien dicen: “será la tarea de los futuros pensadores científicos probar y explicar por completo las teorías y los datos que dejó Kepler.”¹⁷⁶

Además, a diferencia de la mayoría de los científicos que buscan convencer a la gente de que sus ideas son correctas, Kepler dedica su vida a simplemente exponer lo que piensa; a él no le interesa el valor de sus ideas o si la gente lo toma en cuenta, para él lo importante es que la gente pueda conocer la verdad, cualquiera que esta sea.

Es por eso que hoy en día Kepler únicamente es famoso por sus tres leyes planetarias, éstas se enseñan en todas las escuelas para estudiar el movimiento de los planetas del Sistema Solar; pero lamentablemente durante su vida y los años posteriores, su trabajo siempre fue poco reconocido, y muchas veces fue eclipsado por Copérnico o por Galileo. Tuvieron que pasar muchos años desde la muerte de Kepler para que se retomaran sus libros y se instituyeran sus ideas como leyes; tan es así que la traducción al inglés de sus obras no fue si no hasta el siglo XX (*Koestler, 1985*).

Es importante resaltar que las ideas, que hoy son las tres leyes, no están señaladas como tales en sus libros. Para Kepler las leyes del movimiento planetario son unas ideas más dentro de su gran obra; pero la importancia que tienen para la cosmología moderna es decisiva, pues probablemente sin ellas Newton nunca hubiera llegado a la gravitación.

Formalmente las tres leyes son:

1ª ley – Los planetas giran alrededor del Sol en órbitas elípticas, y el Sol se encuentra en uno de los focos.

2ª ley – El radio vector que une al Sol con un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales.

3º ley – El cuadrado de los periodos de los planetas es proporcional al cubo del semi-eje mayor de sus órbitas elípticas.

Estudiando las tres leyes planetarias de esta manera, es fácil pensar que estas fueron obra de la casualidad, pero realmente Kepler fue un hombre que dedicó su vida a la astronomía y que tuvo la capacidad de explorar los problemas del cosmos desde distintos puntos de vista. Su inocencia, honestidad y locura, muchas veces esconden su inteligencia y su capacidad intelectual. Pero parte de la genialidad de Kepler, y la razón por la cual sus descubrimientos son inmortales, es que fue capaz de romper con los estigmas y con los prejuicios que en esa época gobernaban los conocimientos que se tenían del Universo, como los círculos y la velocidad uniforme. Kepler fue

¹⁷⁶ Charles River Editors. *Johannes Kepler*, 57.

- “It would be the task of future scientific thinkers to fully prove and explain the theories and data Kepler left.”

capaz de estudiar los datos por sí solos y de llegar a conclusiones, sin tomar en cuenta las hipótesis previas.

Para nosotros nos puede parecer inmediato pensar en una elipse después de un círculo, pero para esa época no era fácil romper con lo dicho por 'el gran Aristóteles' y por todos los que lo siguieron; además de que las cónicas no eran tan conocidas, ni estudiadas. Como dice Arthur Koestler: "¿Quién eres tú, Johannes Kepler, para destruir la divina simetría?"¹⁷⁷

Antes de Kepler, la astronomía se centraba únicamente en adecuar los datos obtenidos de las observaciones a un modelo geométrico, tomando como base a los círculos y considerando una velocidad constante. Kepler es el primer astrónomo que se centra en los datos y busca hacer un análisis de ellos sin tener una idea preconcebida de ellos.

Es por eso que Kepler es un científico muy interesante y difícil de analizar. Metodológicamente es imposible encasillarlo en una sola corriente de pensamiento, porque no tiene un solo método de trabajo; es un científico moderno, un filósofo natural antiguo y un pensador metafísico, todo al mismo tiempo. Las hipótesis de Kepler son tan distintas una de la otra que no es posible englobarlas en una sola idea. Sus tres leyes son el claro reflejo del errático cambio en el razonamiento de Kepler: la primera ley surge por la obsesión de Kepler con la geometría, la segunda ley nace gracias a la confianza que Kepler le tenía a los datos de Tycho, y la tercera ley surge por la búsqueda incansable de las simetrías.

Puede que los trabajos de Kepler no tengan tanta relevancia, ni que sean tan famosos como los de otros científicos de su época, pero lo que es cierto es que Kepler abrió las puertas a una nueva forma de razonamiento científico y su trabajo fue realmente revolucionario; utilizó a la astronomía para encontrar a Dios, pero al final, el Dios que encontró no era el Dios que esperaba. La primera ley rompe con la perfección del círculo y vacía el centro del Universo, mientras que la segunda ley deshecha a la velocidad uniforme de los planetas. Únicamente la tercera ley reconoce un poco de lo que Kepler esperaba, rescatando las armonías que siempre buscó.

Algunos piensan que Kepler vivió toda su vida buscando la perfección, pero en realidad lo único que fue constante fue que siempre fue un hombre profundamente religioso, todos sus estudios siempre estaban enfocados en leer la mente de Dios.

Es curioso ver cómo a pesar de que todas las obras de Kepler fueron hechas para enaltecer el nombre de Dios, en cada libro, el Creador tiene un rol diferente. En el *Mysterium Cosmographicum* es el gran geómetra que solo tiene 5 sólidos para construir el Universo, en la *Astronomia Nova* es el físico al que se le ocurrió usar elipses y en la *Harmonices Mundi* es el conductor de orquesta que compuso la sinfonía más bella.

¹⁷⁷ Koestler, *Kepler*, 91.

Regresando a uno de los objetivos de este trabajo, uno puede ver claramente cómo la forma de trabajo y los propios descubrimientos científicos que logra hacer Kepler, están muy ligados a todo lo que sucede en su vida personal:

- Siendo el joven e iluso profesor de Graz, su vida era una incertidumbre, pero tenía toda la ambición de trascender; de igual manera sus aportes científicos eran más excéntricos, exagerados y ambiciosos, al igual que su primer libro.
- Después de trabajar con Tycho Brahe, de ser nombrado matemático imperial y de por fin tener una estabilidad económica, llega su momento de mayor lucidez y de mayor eficacia científica, cualidades que logra plasmar en su obra.
- Lamentablemente la desgracia y la incertidumbre vuelven a alcanzar su vida. Pero Kepler, que ya es un científico bien formado, logra sobreponerse a todas estas dificultades y su última obra termina siendo una combinación de todo lo que él es.

Como se mencionó en la introducción, el trabajo aquí presentado es un análisis de las tres obras más importantes de Kepler, resaltando sus ideas principales y haciendo una comparación en cómo fue que su vida personal afectó los resultados y el desarrollo de lo presentado en sus libros científicos. Pero espero que este trabajo, además de mostrar la importante relación entre lo personal y lo profesional, haya logrado mostrar la cara humana de un científico, que muchas veces es olvidado o es reducido a tres leyes, pero que en realidad dedicó su vida al desarrollo de la ciencia y a la búsqueda de la verdad, cualquiera que esta sea.

El objetivo secundario de este trabajo se planteó como mostrar a los científicos como personas menos rígidas y más reales, para acercar a los jóvenes a la ciencia y que la vean como una posibilidad real en su vida. Y aunque únicamente se mostró a un científico y difícilmente algún alumno de secundaria o preparatoria llegará a leer este trabajo, personalmente la elaboración de éste me sirvió mucho para conocer de manera más profunda a un personaje tan interesante como lo es Kepler, y para darme cuenta de que sí es posible humanizar a la ciencia y de que la ciencia sí es alcanzable para todos, algo que espero poder transmitir a mis alumnos y a futuras generaciones.

Al final, el trabajo de Kepler se resume en tener la imaginación necesaria para pensar en una hipótesis que rompiera con las ideas preconcebidas de la época, tener la habilidad y el conocimiento para hacer los cálculos necesarios y para comparar dicha hipótesis con los datos obtenidos, así como tener una confianza plena en la validez de las observaciones realizadas. Esta es la razón por la cual Kepler se sale del esquema de los grandes científicos de la Revolución Copernicana y por lo que lamentablemente no siempre se le da el reconocimiento que merece. Su manera de hacer ciencia no se parece en nada a lo que se hacía en esa época y menos a lo que hacemos hoy en día. Kepler no puede ser considerado únicamente un astrónomo observacional, sino también un físico y un filósofo.

“Creemos que la influencia de la imaginación como un instrumento de investigación ha sido pasada por alto por aquellos que se aventuraron a dar leyes a la filosofía. Esta facultad es una de las de más valor en las investigaciones físicas.”¹⁷⁸

¹⁷⁸ Brewster, *The martyrs of science*, 240.

- “The influence of the imagination as an instrument of research has, we think, been much overlooked by those who ventured to give laws to philosophy. This faculty is of the greatest value in physical inquiries.”

Referencias

- Balchin, Jon. *Quantum Leaps: 100 scientists who changed the world*. Londres: Arcturus Publishing Limited, 2014.
- Banville, John. *Kepler*. Nueva York: Vintage International, 1993.
- Baumgardt, Carola. *Johannes Kepler: Life and Letters*. Nueva York: Philosophical Library, 1951.
- Brewster, David. *The martyrs of science; or, The lives of Galileo, Tycho Brahe, and Kepler*. Nueva York: Nabu Public Domain Reprints, 1923.
- Bryant, Walter W. *Kepler*. Nueva York: The Macmillan Company, 1920.
- Bynum, William. *A Little History of Science*. Londres: Yale University Press, 2013.
- Caspar, Max. *Kepler*. Traducido por C. Doris Hellman. Nueva York: Dover Publications, 1993.
- Charles River Editors. *Johannes Kepler*. Estados Unidos: Charles River Editors, 2018.
- Connor, James A. *Kepler's Witch: An Astronomer's Discovery of cosmic Order Amid Religious War, Political Intrigue, and the Heresy Trail of His Mother*. Nueva York: HarperCollins Publishers, 2004.
- Donahue, William H. *Selections from Kepler's Astronomia Nova: A Science Classic Module for Humanities Studies*. Traducido y seleccionado por William H. Donahue. Santa Fe: Green Lion Press, 2008.
- Ferguson, Kitty. *Tycho & Kepler: the unlikely partnership that forever changed our understanding of the heavens*. Nueva York: Walker & Company, 2002.
- Heilbron, J.L. *The History of Physics: A Very Short Introduction*. Nueva York: Oxford University Press, 2018.
- Kepler, Johannes. "Prefacio." En *Dioptrics*. Traducido por Edward Stafford Carlos. Londres: Rivingtons, 1880.

- _____. *Epitome Astronomiae Copernicanae*. (Epitome of Copernican Astronomy & Harmonies of the World) Traducido por Charles Glenn Wallis. Nueva York: Prometheus Books, 1995.
- _____. *Harmonices Mundi*. (The Harmony of the World) Traducido por E.J. Aiton, A.M. Duncan y J.V. Field. Filadelfia: American Philosophical Society, 1997.
- _____. *Mysterium Cosmographicum*. (El Secreto del Universo) Traducido por Eloy Rada García. Madrid: Alianza Editorial, 2013.
- _____. *Astronomia Nova*. Traducido por William H. Donahue. Santa Fe: Green Lion Press, 2015.
- _____. *Somnium*. (The Dream) Estados Unidos: Nexum, 2015.
- _____. *The Harmonies of the World*. Estados Unidos: Scholar's Choice, 2018.
- _____. "Libro V". En *Las Armonías del Mundo*. Traducido por José Luis Arántegui Tamayo. En *A Hombros de Gigantes: Las Grandes Obras de la Física y la Astronomía*. Ciudad de México: Crítica, 2019.
- Koestler, Arthur. *Kepler*. Traducido por Domingo Santos. Barcelona: Salvat Editores, 1985.
- Love, David K. *Kepler and the Universe: How One Man Revolutionized Astronomy*. Nueva York: Prometheus Book, 2015.
- Okasha, Samir. *Philosophy of Science: A Very Short Introduction*. Nueva York: Oxford University Press, 2016.
- Perkwitz, Sidney. *Physics: A Very Short Introduction*. Nueva York: Oxford University Press, 2019.
- Prince, Lawrence M. *The Scientific Revolution: A Very Short Introduction*. Nueva York: Oxford University Press, 2011.
- Sagan, Carl. *Cosmos*. Traducido por Miquel Muntaner i Pascual y María del Mar Moya Tasis. Barcelona: Editorial Planeta, 1982.
- Small, Robert. *An Account of the Astronomical Discoveries of Kepler: Including an Historical Review of the Systems which had Successively Prevailed Before his Time*. Londres: T. Gillet, 1804.