

## 400 años del *Harmonices Mvndi* de Johannes Kepler

Conmemoramos con la portada de este número de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** el cuarto centenario de la publicación de la obra de Johannes Kepler *Harmonices Mvndi*, aparecida en la ciudad austriaca de Linz en 1619. Contiene esta obra la tercera Ley de Kepler, que relaciona el período orbital del planeta en su movimiento en torno al Sol con el tamaño de la órbita y, más detalladamente, presenta que el cuadrado del período orbital dividido por el cubo de la distancia media entre el Sol y el planeta es una constante, igual para todos los planetas del sistema solar, lo que constituye para Kepler una de las armonías del universo, armonía de los mundos.

Con esta tercera ley de Kepler se completan las leyes del movimiento planetario postuladas por él, las cuales dan nacimiento a la física clásica, la física celeste, en el siglo XVII, como ciencia del movimiento. Las dos primeras leyes del movimiento planetario fueron publicadas por Kepler en la *Astronomia Nova* de 1609, obra elaborada en Praga, que presenta el estudio detallado del movimiento de Marte a partir de las tablas astronómicas de Tycho Brahe.

Para Johannes Kepler el *Harmonices Mvndi* es la continuación de su *Mysterivm Cosmographicvm*, publicado en Tubinga en 1596. Estas dos obras constituyen para él una unidad que resume su concepción del universo e integra todos los aspectos fundamentales de la existencia, la unidad de espíritu y el universo físico como creación del Dios matemático, geómetra, puesto que para él la geometría es anterior a la creación, es Dios mismo. Johannes Kepler es un místico que busca conocer la mente de Dios, saber qué idea tuvo Dios como fundamento para crear y dar forma al universo. En sus obras de 1596 y 1619 compendia su imaginario universal.

Kepler es un talento universal extraordinario, que reúne filosofía natural, matemáticas, astronomía, óptica, astrología y teología; es un genio comparable con otros grandes genios descendientes de los suavios, antiguos germanos que habitaban la región de la Selva Negra en el suroeste de Alemania. Allí, muy cerca de Stuttgart, está la pequeña población de Weil der Stadt, donde en 1571 nace Kepler, prematuro, muy débil físicamente, con el aspecto poco agraciado que lo caracterizará toda su vida y un estado de salud que supondrá un permanente sufrimiento y lo convertirá en un ser hipocondríaco, aquejado por múltiples enfermedades y víctima de epidemias como la de viruela, que le afectaría la vista y limitaría progresivamente sus observaciones astronómicas. Kepler vive así, siempre enfermo, 58 años y, finalmente, fallece en Ratisbona, Baviera, en 1630. Al igual que su salud, también su vida familiar estuvo abocada al sufrimiento, en un mundo sacudido por las confrontaciones religiosas de la reforma y la contrarreforma y por las guerras que ello provocó y que afectaron su infancia ante las ausencias de un padre siempre alejado en el frente de batalla de alguna de esas guerras, hasta que los dejó definitivamente cuando Kepler tiene 18 años. Posteriormente, Kepler tuvo que enfrentar otros momentos dolorosos: su madre fue víctima de persecuciones, acusada de brujería en varias ocasiones, por lo que pasó un largo periodo confinada en prisión y murió poco después de ser liberada. Kepler se casó dos veces; su primera esposa y tres de sus cinco hijos de ese primer matrimonio mueren, en tanto que tres de los siete hijos de su segundo matrimonio también fallecen tempranamente. A pesar de todos estos acontecimientos penosos, el desarrollo intelectual de Johannes Kepler es extraordinario, y sus estudios abarcan las artes, las lenguas clásicas, las ciencias sociales, la teología, las matemáticas, la astronomía y la astrología. Su formación universitaria la realiza en la Universidad de Tubinga y, asimismo, en su región natal, en la Selva Negra, cerca de Stuttgart.

A sus 23 años Kepler ya era profesor de matemáticas en la ciudad de Graz, en Austria. Corría el año de 1594 y, según cuentan los autores expertos en Kepler y en su leyenda, en plena clase de matemáticas en esa ciudad, cuando presentaba el problema geométrico de demostrar que las tres alturas de un triángulo equilátero se cruzan en un punto que es el centro del triángulo y en relación de 2 a 1 para cada altura, dibujó en este punto dos círculos, uno de ellos circunscrito al triángulo, de manera que sus tres vértices lo tocaban, en tanto que el segundo quedaba inscrito de forma que cada lado del triángulo era tangencial al círculo, siendo los radios de estos dos círculos los segmentos mayor y menor resultantes del cruce de las alturas del triángulo, razón por la cual quedaban en relación de 2 a 1. Ya dibujados el triángulo y los círculos en el tablero, repentinamente Kepler quedó absorto. En su mente surgió una idea que lo impactaría de por vida: reconoce que los dos círculos presentan un gran parecido con las órbitas de Júpiter y Saturno, órbitas circulares con un radio de 9,5 UA para Saturno y de 5,2 UA para Júpiter, así que la relación es de 10 a 5 UA, aproximadamente, donde UA es una unidad astronómica igual a la distancia del Sol a la Tierra. ¿Sería esta la idea que tuvo Dios cuando creó el universo? ¿La de poner los seis planetas (los conocidos en esa época) en órbita en torno al Sol a distancias dadas por figuras geométricas regulares (de caras iguales), insertadas entre órbita y órbita? Y no figuras planas, como el triángulo equilátero, sino tridimensionales, como los sólidos platónicos, que son solo cinco, justo lo requerido para los cinco espacios que surgen cuando son seis los planetas del universo: un hexaedro

entre Saturno y Júpiter, un tetraedro entre Júpiter y Marte, un dodecaedro entre Marte y la Tierra, un icosaedro entre la Tierra y Venus, y un octaedro entre Venus y Mercurio. Así, Kepler construye el modelo del universo que publica en el *Misterio Cosmográfico* de 1596, modelo que mantiene a lo largo de toda su vida, desde 1595, incluso después de descubrir, en 1609, que las órbitas no son circulares sino elípticas, utilizando la distancia media para cada órbita planetaria a falta del radio de la órbita circular, como lo deja consignado en su obra de 1619, *La armonía de los mundos*.

Para Johannes Kepler conocer la mente de Dios pasaba por entender por qué los planetas eran seis, por qué las distancias de los planetas al Sol eran las que se observaban astronómicamente, y por qué en el movimiento de los planetas en su órbita la distancia del planeta al Sol va cambiando, así como también cambia la velocidad del planeta, más lenta cuando está más distante del Sol y más veloz cuando está más cerca. En Kepler se mezclan misticismo y ciencia: sabe que su modelo del universo debe ser comprobado por la observación directa de la naturaleza y que solo la medición puede validar su modelo. Por esto recurre a los datos de mayor precisión disponibles en su época: las tablas astronómicas de Tycho Brahe, quien durante más de 20 años había registrado las posiciones de los astros, noche a noche, con la ayuda de un gran equipo de colaboradores en los observatorios astronómicos de la isla de Hven en Dinamarca. Es el año de 1600 cuando Kepler contacta a Tycho Brahe, quien se ha trasladado con todo su enorme equipo humano e instrumental de Hven a Praga, donde recibe el apoyo de Rodolfo II, káiser del Sacro Imperio Romano Germánico. Para 1601 Kepler tiene ya los datos de Tycho Brahe, quien le recomienda estudiar con especial atención los de Marte, en los que son más notables pequeños detalles peculiares del movimiento planetario. Es de este análisis de datos, del estudio del movimiento de Marte, que resultan las dos primeras leyes de Kepler: la primera, que el movimiento planetario ocurre en órbitas elípticas en torno al Sol, ubicado en uno de los focos de la elipse, y la segunda, que el radio vector del Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. En 1609, desde Praga, Kepler publica sus resultados en la *Nueva Astronomía*. Y sí que es nueva esta astronomía, porque nunca se había pensado en órbitas elípticas. Hasta ese momento, el movimiento celeste se había concebido como circular, el “movimiento natural en los cielos”, que para un místico como Kepler sería lo obvio, acorde con la perfección de Dios. Por ello resulta paradójico que haya sido precisamente Kepler quien descartara el círculo y, llevado por su rigurosidad científica, matemática, haya visto la necesidad de introducir la elipse, menos divina, como trayectoria planetaria. ¿Acaso la órbita circular es de mejor familia que la trayectoria elíptica? La respuesta resulta grandiosa, porque son de igual familia, la familia de las cónicas, de los cortes cónicos estudiados alrededor del año 200 a.C. por Apolonio de Perge y por Hipatia de Alejandría en el 400 a.C.: el círculo, la elipse, la parábola y la hipérbola. Y son éstas cónicas las posibles trayectorias de los objetos en todo campo gravitacional, cuál de ellas, depende de las condiciones iniciales del movimiento.

Los resultados del estudio del movimiento de Marte reportados en la *Nueva Astronomía* aplican también para los demás planetas. Kepler logra los descubrimientos con el movimiento de Marte, pero reconoce las mismas leyes para los demás planetas, donde los efectos de excentricidad de la elipse son menores, lo que la hacen muy cercana al círculo. Este estudio detallado aplicado a todos los seis planetas le permite a Kepler comparar las características del movimiento de todos ellos y las relaciones de la distancia mínima y la distancia máxima del planeta a Sol, para encontrar así relaciones que concuerdan con las armonías concebidas a partir de la geometría y estudiar las figuras geométricas regulares en dos y tres dimensiones, lo cual constituye el tema central que desarrolla en la *Armonía de los Mundos*.

En la portada de este número de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, se reproduce la página de presentación del *Harmonices Mvndi* del año M.DC.XIX. Allí reza que la obra constaba de cinco libros: *Primus Geometricvs; Secundus Architectonicvs; Tertius Harmonicvs; Quartus Metaphysicvs, Psychologicvs & Astrologicvs; Quintus Astronomicvs & Metaphysicvs*. Johannes Kepler, luego de tratar en el primer libro la geometría de las figuras regulares en dos dimensiones, pasa en el segundo libro a la arquitectura, la geometría de los cuerpos sólidos regulares tridimensionales. En estos dos libros enfatiza las relaciones armónicas en las figuras geométricas, y las transfiere a los sonidos musicales, tema que desarrolla en el tercer libro, en el que se revela el fundamento geométrico de las armonías musicales, con lo que se enriquecen los conceptos de armonía iniciados por los antiguos pitagóricos alrededor del año 500 a.C. Luego en el cuarto libro Kepler aplica también estos conceptos de relaciones armoniosas geométricas a las cartas astrales, al movimiento de los planetas con respecto a las constelaciones de las estrellas fijas distantes, introduciendo así las armonías en la astrología. Culmina este desarrollo con el libro quinto, donde descubre las mismas armonías en las relaciones geométricas de las trayectorias de los planetas, relaciones resultantes de las excentricidades de las elipses, las cuales se observan en las distancias mínimas y máximas entre cada planeta y el Sol, así como en el movimiento de cada planeta y la variación de su velocidad a lo largo de la órbita elíptica. Asocia entonces las armonías geométricas del movimiento planetario a las armonías de los sonidos musicales que ha tratado en el tercer libro, para llegar finalmente a la “música de las esferas”, las armonías musicales del movimiento planetario que se nutren de la idea de Dios para la creación universal. Este es Johannes Kepler en todo su esplendor místico, buscando integrar arte, filosofía, ciencia, universo físico y existencia espiritual. Estos aspectos están integrados a lo largo de toda su obra, que por esto resulta difícil de seguir, y exige del lector un gran esfuerzo para descubrir allí dónde están inmersas las tres famosas leyes de Kepler, que tan fácilmente encontramos en los libros de física actuales.

La trascendencia de la obra de Kepler para la ciencia, que adopta las leyes del movimiento planetario despojándolas del misticismo, reside en que contribuyeron de manera esencial a la formulación de la ley de la gravitación universal de Isaac Newton y, así, a la unificación de cielos y tierra, la unificación de las leyes del movimiento en la Tierra de Galileo Galilei con las leyes del movimiento planetario, lo que Newton llama las reglas de Kepler. En la segunda ley de Kepler, Newton reconoce que la fuerza que ejerce el Sol sobre los planetas es central, dirigida a lo largo de la línea de unión entre el Sol y el planeta, y en la tercera ley reconoce que la fuerza gravitacional es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Newton aplica sus tres leyes, entre ellas, por fuerza, la ley de la gravitación universal, y obtiene las órbitas elípticas que siguen los planetas, la ley de las áreas y la relación correcta entre periodo y tamaño de las órbitas, es decir, lo que se concreta en las tres leyes de Kepler. Es así como, observando desde la Tierra el movimiento celeste, nació la física como ciencia del movimiento... *PEDES IN TERRA AD SIDERA VISUM*.

Bernardo Gómez Moreno (Dr.rer.nat.)

Académico de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Profesor Emérito, Universidad de los Andes, Colombia

### Referencias

- Kepler J.** (1619). *Harmonices Mvndi*, Linz, Austria. Smithsonian Libraries, Internet Archive. <https://archive.org/details/ioanniskeplerih00kepl/page/n10>
- Kepler J.** (1621). *Mysterivm cosmographicvm*, Frankfurt am Main, Alemania. University of Toronto, Internet Archives. <https://archive.org/details/prodromusdissert00rhti/page/n6>
- Kepler J.** (1621). *Astronomia Nova*, Praga. University of Toronto. <https://archive.org/details/astronomianovaai00kepl/page/n4>
- Caspar M.** (1993). *Kepler*, Internet Archive. Internet Archive <https://archive.org/details/kepler00casp>
- Dreyer J.L.E.** (1953). *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, Dover Publications Inc. Internet Archive. <https://archive.org/details/AHistoryOfAstronomyFromThalesToKepler>
- Koestler A.** (1968). *The sleepwalkers: A history of man's changing vision of the universe*, Ed. Penguin. Internet Archive. <https://archive.org/details/sleepwalkerhisto00koes>