



Director 
Luis Vega

Secretaria 
Paula Olmos

Edición Digital
Roberto Feltrero

La simulación como elemento innovador en el método científico. Un ejemplo en Astrodinámica

ROSA MARÍA HERRERA
*Departamento Física-Matemática
APYCE & GIE (UPM)
Madrid (España)
herrera.rm@gmail.com*

RESUMEN

La simulación se fue incorporando en algunos procesos científicos como procedimiento valioso para poner a prueba modelos con el fin de validarlos, corregirlos o desecharlos, y en último extremo para afianzar o refutar teorías (parcial o totalmente) y para estudiar algunos tipos de problemas empíricos poco manejables. Esta práctica adquirió protagonismo y mayor visibilidad, por una parte, con la aparición de los grandes computadores (como herramienta de trabajo) pues permite analizar ciertas situaciones difíciles de reproducir a escala de laboratorio, por ejemplo en trabajos de Astrodinámica y, por otra parte, como elemento externo de control de procesos en estudio. De este modo, la simulación computacional, en relativamente poco tiempo, se convirtió en una parte sensible y potente del propio método científico y devino en un pilar más sobre el cual sustentarlo. Es una herramienta útil, que va aumentando su presencia en ciencia básica, en ciencia aplicada y en tecnología.

PALABRAS CLAVE: simulación, método científico, computadora

ABSTRACT

In some scientific processes, the simulation was incorporated as valuable procedure to test models in order to validate, correct or discard, and in last term to strengthen or refute theories (partial or completely) and to study some types of problems, empirically unmanageable. This practice gained prominence and visibility, on the one hand, with the advent of big computers (as tools) to analyze certain situations which are difficult to reproduce on a laboratory scale; for example, in works of Astrodynamics and, moreover, as an external control element, in process under study. Thus, computer simulation became in a relatively short time a sensitive and powerful scientific method, by itself and also a pillar on which sustain scientific investigation. Therefore, this useful tool continuously increases its presence in basic science, applied science and technology.

KEYWORDS: Simulation, Scientific Method, Computer



Copyright © ROSA M. HERRERA

Se permite el uso, copia y distribución de este artículo si se hace de manera literal y completa (incluidas las referencias a la Revista Iberoamericana de Argumentación), sin fines comerciales y se respeta al autor adjuntando esta nota. El texto completo de esta licencia está disponible en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/es/legalcode.es>

1. INTRODUCCIÓN

La creación de 'modelos' científicos que corroboren (o no), total o parcialmente, las teorías en ciencias de la naturaleza, en general, y en Física en particular es casi imprescindible no solo en aplicaciones más o menos directas, sino también en desarrollos científicos básicos. Para validar modelos, se emplean distintos tipos de herramientas, aquí nos ocupamos de una de ellas, la simulación computacional, implicándola directamente en el método científico como elemento innovador.

Para elaborar estas notas he elegido un ejemplo de la Mecánica Celeste, porque es una ciencia que forma parte simultáneamente de corpus de conocimiento de los saberes más antiguos, y al mismo tiempo es una de las ramas más activas en la actualidad y en las que la investigación es más dinámica. Con el fin de enmarcar el problema en su contexto reseñaré a continuación algunas otras características importantes del mismo, que confirman en cierto modo la 'oportunidad' del ejemplo.

- i) Otros procesos que han cobrado auge en la última centuria más o menos simultáneamente en la Mecánica Celeste y Espacial son los 'estudios cualitativos'¹ de las soluciones matemáticas de los problemas en muchas de las situaciones en que la solución cuantitativa no era viable por métodos analíticos clásicos.²
- ii) Además el desarrollo de las 'Geometrías no euclídeas' ha creado un marco teórico de naturaleza matemática distinto del clásico euclidiano, potencialmente muy rico y que sigue proporcionando buenos resultados en desarrollos cotidianos.
- iii) Asimismo, la 'Topología' aporta otra visión en un ambiente matemático diferente y se muestra como una herramienta muy eficaz. (Algunos problemas clásicos del Análisis no lineal en sistemas dinámicos han evolucionado a problemas de Topología.)

Con estos mimbres, en el último siglo nos hallamos con que tenemos en nuestras manos un utillaje muy versátil que abre una nueva vía en el estudio de la evolución de los sistemas físicos (nótese que el comentario no es solo válido para los sistemas asociados a la Mecánica Celeste).

¹ La forma de la curva solución.

² Este camino fue iniciado por Poincaré, apoyándose en los trabajos de Beltrami y las matemáticas no euclídeas.

Llegados a este punto, es quizá conveniente precisar lo que se entiende por simulación, aunque la idea intuitiva está formada en la mente del lector previamente. En los ambientes científicos y técnicos, se suele entender por simulación la representación de un proceso (o fenómeno) mediante otro similar, pero más simple, que permite analizar sus características.

En este sentido, la simulación es anterior a la aparición de los grandes ordenadores y seguramente su uso se inició en la industria y después se extendió al mundo de la investigación científica.³

Como ejemplos típicos de simulación anterior a la realizada con grandes computadoras bastantes de las cuales se han potenciado computacionalmente cabe citar:

- La construcción de maquetas sobre infraestructuras de ingeniería civil y en arquitectura. Son célebres las maquetas de los edificios invertidos de Gaudí y en este punto la ciencia y el arte se tocan.
- El entrenamiento virtual de los pilotos.
- Los sistemas dinámicos y la Tierra.
- El papel innovador de los nuevos materiales y la comprensión de la materia. Colisiones de galaxias.
- El asunto gravitacional del problema de los n cuerpos (este es un tema concernido por el ejemplo principal de este trabajo). En esta cuestión se empezó a trabajar con las buenas herramientas matemáticas del análisis en el siglo XVII. Hacia la mitad del pasado siglo, se comenzó la tarea computacional con 100 cuerpos, ahora se estudian $n = 10^5$ cuerpos.

Para acabar este apartado, creo que también podría resultar interesante subrayar que, si bien, en cierto sentido, los grandes ordenadores se emplean como un laboratorio virtual para realizar experimentos físicos, con la enorme ventaja de que permiten controlar todos los detalles, hay un aspecto fino a considerar: no está corroborado ni es evidente que el mundo virtual y el mundo “objetivo” sean idénticos.

Además, a medida que se van perfeccionando estos procesos, se va constatando (al menos en el ambiente de la Astrodinámica) que la Física (piénsese en

³ En sentido estricto los experimentos mentales son una especie de simulación y esos son viejos conocidos de los estudiosos en ciencia básica

las leyes que la gobiernan) en el mundo virtual difiere levemente de la Física del mundo objetivo (deliberadamente elude el término 'real' para evitar otras complicaciones). Pero aunque no siempre es viable, en ocasiones se puede minimizar esta discrepancia mediante el uso de recursos adicionales como la mejora de las propias máquinas computadoras⁴ y también con otras herramientas auxiliares de tipo matemático.

El resto de este artículo se desarrolla en dos partes. En la primera se hace una somera descripción de los varios e importantes papeles que desempeña la computación en la Física, con una visión amplia, con el fin de subrayar la relevancia de esta práctica, que en último extremo va más allá, seguramente, que el simple buen uso de una instrumentación valiosa e introduce algunas modificaciones en la concepción no solo del *modus operandi* del trabajo científico, sino de su definición o concepción.

Por esta razón, se esboza también una presentación breve de la historia de la introducción de los ordenadores en el método científico. En ese sentido se comenta la obra de J-L Lions, *El planeta Tierra. El papel de las Matemáticas y de los superordenadores*, y se introduce su 'trilogía universal'. Considerando de este modo el papel de los ordenadores en el estudio global de grandes sistemas.

En la segunda parte, se muestra el ejemplo elegido, presentando la simulación computacional como un elemento innovador en la investigación y en la creación científica.

2. LA COMPUTACIÓN EN FÍSICA

2.1. GESTACIÓN DEL CONTEXTO. GENERALIDADES

Con la revolución industrial y la fabricación y el perfeccionamiento de las máquinas empezó una nueva etapa en los desplazamientos y se modificó (*innovó*, en un sentido débil o no tanto) el concepto de transporte, que se generalizó y pasó a formar parte, en no demasiado tiempo, de la vida cotidiana como una actividad indispensable y común. En consecuencia, se agilizó la circulación de información y de ideas, y se facilitó el intercambio de propuestas y conocimientos. Y este proceso culminó, de alguna manera, con el advenimiento de la computación, que propició la realización de algunas

⁴ Se están desarrollando técnicas matemáticas para explorar cómo se modifican las leyes físicas en los ordenadores. Un caso concreto interesante, los especialistas en física de fluidos realizan experimentos simulados por ordenador y emplean para ello técnicas muy depuradas lo que les permite avanzar con gran éxito. La idea de hacer este comentario me surgió tras una conversación personal con A. Estany

actividades impensables sin el auxilio de esta herramienta; pero no solo, sino que otras tareas muy laboriosas que requerían capacidades mecánicas y de cálculo veloz superiores a las humanas se pudieron llevar a cabo de una manera más eficaz.

El uso de Internet consolidó el hábito de la circulación de ideas y propuestas, y se propició una nueva forma de relación interpersonal, no solo para el intercambio científico habitual (actas, trabajos, colaboraciones,...) sino también para el manejo de la información disponible simultáneamente por distintos equipos no situados en el mismo emplazamiento físico, así se generalizó ampliándose enormemente el trabajo en cooperación realizado por personas ubicadas en diferentes lugares del planeta, e incluso que en muchas ocasiones no se conocen personalmente.

El estado actual parece indicar que esta cooperación entre especialistas de áreas próximas, pero distintas y/o en distantes lugares de trabajo se está ampliando hacia la colaboración entre equipos de trabajo de materias diversas, la *comunicación interdisciplinar*, que provee enriquecimiento en los planteamientos y propuestas en varias direcciones. En este sentido, una nueva forma de *innovación* tranquila se está empezando a gestar.

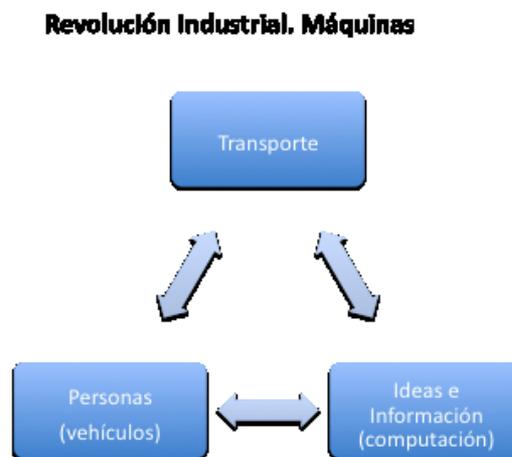


Figura 1. La puesta en circulación con relativa facilidad de personas e ideas propició cambios profundos en la concepción de la investigación científica.

2.2. LOS ORDENADORES COMO HERRAMIENTA 'MULTIUSO' EN LAS ÁREAS CIENTÍFICAS CON LENGUAJE Y ESTRUCTURA MATEMÁTICA. “LA TRILOGÍA UNIVERSAL”

Cuando se publicó en español el importante trabajo del matemático francés J-L Lions [1928-2001] (Lions, 1990) ya estaba consolidada y consagrada su célebre ‘trilogía universal’ (modelos, análisis y control). En la introducción del libro se aventura directamente en consideraciones sobre las extraordinarias, por valiosas, cualidades de la pareja Matemáticas-Computadores (M-C), superordenadores, como los designa él.

Anticipa Lions que la combinación de las acciones de ambas (M-C) proporciona una herramienta universal, que aplica al estudio de la Tierra considerado como primer gran sistema, formado por multitud de subsistemas, que es la manera en que se estudia y se considera habitualmente. La portentosa capacidad de cálculo y la rapidez con que este se efectúa permite la intervención sobre dicho sistema, *el control*. De este modo se posibilita la capacidad de operar sobre el mismo y corregir de modo coherente las actuaciones en él sobre la marcha de la propia investigación, así esta evoluciona con mayor agilidad.

La ‘trilogía universal’ se compone según el inventor de esta expresión de tres elementos, a saber: i) la realización de modelos⁵, ii) el análisis de los modelos y iii) el control, en sentido todavía externo. Véase el esquema de la figura 2.



Figura 2. Esquema de acciones destacadas de las computadoras en la investigación científica. Obsérvese el doble uso de la computación

⁵ En términos matemáticos se suele usar la voz modelización, pero no está recogida en el DRAE, y aquí he decidido usar la expresión realización de modelos

Este planteamiento se aplicaría al sistema planeta Tierra, en el cual el tamaño de los fenómenos espacio-temporales que se estudian requiere la simplificación procedente de una mirada cargada tanto de inteligencia natural como de bagaje adquirido, es decir de una mirada experta.

Asimismo, el autor plantea la cuestión del éxito de dicha aplicación de la 'trilogía universal' a nuestro planeta y aquí se inicia un camino analítico que conduce del estudio parcelado en los subsistemas naturales al estudio global, y por esta vía se empiezan a vislumbrar las correlaciones entre la atmósfera, la flora, la fauna, el estado del océano. De este modo, los sistemas que se estudian crecen en complejidad.

En otra etapa de la aplicación de la 'trilogía universal', los científicos se lanzan a trabajar sistemas nucleares y otros sistemas... Así, se desemboca en el estudio actualizado de los problemas globales del planeta.

Von Neumann (1903-1957) en la década de los cuarenta del siglo pasado ofrecía una visión amplia de las posibilidades de los ordenadores y de sus aplicaciones. En este tiempo empezó a destacar su importancia para formular modelos, que ya dejaron de ser solo analíticos, aunque aun no se había dado el paso a su uso predictivo. Tendría que perfeccionarse posteriormente la teoría de control hasta llegar a la concepción actual de la misma, y en este proceso desempeñan un papel interesante la teoría de juegos y los automatismos.

La construcción de modelos se comienza a llevar a cabo a partir de los elementos estructurales más simples, después se siguen algunos ensayos con las correlaciones para empezar tímidamente a construir modelos de más envergadura y más completos. La siguiente etapa está ya a punto de iniciarse: la predicción (de lo habitualmente hasta ahora impredecible).

El estudio de la meteorología, la circulación general del aire..., los modelos atmosféricos adquieren un estatus de protagonistas. Y ponen en evidencia la gran 'sensibilidad' del sistema a las condiciones iniciales y esa 'no linealidad' torna extremadamente compleja la búsqueda de la solución analítica del problema matemático planteado (de ahí se sigue el nacimiento y desarrollo de nuevas ramas matemáticas, como los desarrollos de la topología).

La 'trilogía universal' es de carácter circular (cíclico) porque cada parte influye o revierte en las otras, de las cuales a su vez depende. En este sentido, los métodos de control suministran herramientas para la realización de modelos, el análisis sirve para corregir el modelo (o validarlo) que se refuerza a su vez con el control, lo global

adquiere mucho peso. En una investigación tradicional conseguir trabajar con lo global es una tarea *casi* siempre ardua y señal de etapa avanzada de desarrollo y *casi* nunca suplanta a lo local, en aras de la eficacia de la misma y de la comprensión del proyecto, pero la capacidad de los ordenadores sigue creciendo, se alcanzará su límite, pero ese tiempo aún no ha llegado.

Hasta ahora se ha mencionado la complejidad del proceso, pero el lector quizá ya debe sospechar a esta altura que el cálculo del estado de un sistema, por simple que este sea, no es una operación sencilla ni por los métodos analíticos o geométricos habituales (o incluso los más avanzados), y ni siquiera por los métodos topológicos, el resultado es que en no pocas ocasiones es inabordable. En ese sentido en muchas circunstancias se recurre a la práctica habitual (de extraordinaria eficacia en la ciencia desde hace varios siglos), que son los cálculos aproximados, las perturbaciones. De esta manera, el modelo real se aproxima por otro más sencillo para hacerlo factible.

Otra consideración, en mi opinión muy interesante y útil, que hay que tener en cuenta, es que la mayoría de los sistemas físicos pueden representarse de maneras distintas, y al mismo tiempo a veces es factible que dos sistemas físicos diferentes se describan por el mismo modelo matemático. De este modo, si conocemos uno de ellos podemos usarlo para adquirir conocimiento acerca del otro y calcularlo (es decir, funciona en los dos sentidos).

Aquí renace con fuerza el viejo concepto de 'analogía' que cobra en este proceso un valor inusitado y que es preciso llevar a cabo con sumo cuidado.

Ciertamente, existen otros métodos para desarrollar modelos (de tipo distinto al basado en la recién citada analogía); lo que suele ocurrir es que en sistemas físicos grandes, casi siempre hay que utilizar una combinación de todos los procedimientos disponibles de realización.⁶ De modo inicial, para enlazar con los problemas de la Mecánica Celeste que sirven de motivo en estas notas, el camino de la analogía es posiblemente el más conveniente.

Leibniz (1646-1716) que pensaba en un lenguaje universal, tuviera o no en mente una máquina, inició el camino que habría de emprenderse. También cabe citar a Babbage (1792-1871) y Pascal (1623-1662), posteriores aportaciones proceden de Gödel (1906-1978), Turing (1912-1954), estamos viendo ya pensadores de máquinas, aunque la realidad conlleva una relación entrecruzada que contiene muchos más nombres. Mediada la pasada centuria llegamos a los ordenadores en el sentido que los pensamos en la actualidad.

⁶ En trabajos posteriores quizá se puedan desarrollar estos otros aspectos.

En la literatura de sistemas dinámicos no lineales,⁷ técnica matemática implicada en la Mecánica Celeste, se cita a los meteorólogos como pioneros del uso de los modelos con fines de predicción, como ya se ha comentado, y para ellos la simulación por ordenador no es un complemento a la modelización numérica, sino una herramienta imprescindible. Todo un logro para la modelización predictiva, la simulación.

En Mecánica Celeste, en la cual el trabajo de analogía es obligatorio y necesario por la dimensión espacio temporal, los avances en el estudio de los sistemas no lineales derivados de la meteorología son una fuente de inspiración frecuente.

3. USO DE LOS ORDENADORES EN MECÁNICA CELESTE Y ESPACIAL

Poincaré de manera '*retrospectiva*' sostiene en cierto sentido el ejemplo modelo de la Mecánica Celeste que he elegido:

[...] Il était donc tout naturel que la Mécanique Céleste fût le premier modèle de la Physique Mathématique ; mais depuis cette Science a évolué ; elle évolue encore, elle évolue même rapidement [...] (Poincaré, 1899).

La gran utilidad de la simulación aquí subrayada en Astrofísica, en Mecánica Celeste y en general en las Ciencias del Espacio es debida en gran parte a las enormes magnitudes con que se trabaja en estas ciencias, que sobrepasan las dimensiones de una vida humana en todos los sentidos, espacial, temporal, psicológico, geológico...

Los conocimientos del espacio son conocimientos corales. Si todo el desarrollo del conocimiento humano (y concretamente el científico) es una obra colectiva, el arquetipo es la Astronomía⁸ y sus ciencias afines. En este mismo apartado aparecen tabulados algunos estudios en curso a modo de ejemplo en los que la simulación es especialmente atractiva.

⁷ Sistemas dinámicos en los cuales la solución de las ecuaciones es muy sensible a las condiciones iniciales, es decir pequeñas variaciones en el momento inicial hacen que las soluciones sean muy diferentes, como ya se apuntó anteriormente.

⁸ La Astronomía es la única actividad científica en la cual cualquier persona aficionada puede aportar información y conocimiento.

Observaciones/ Experimentos	Teorías	Modelos
El viento solar (considerado en el laboratorio como una turbulencia)	Teorías sobre la aceleración de partículas	Turbulencias en el viento solar/La interacción de los vientos con el medio interestelar
Regiones donde se forman estrellas	Plasmas/ Inestabilidades/zonas de reconexión	Discos de acreción/ Plasmas de laboratorio
Galaxias activas	Teorías de plasmas	Transporte de plasmas en el laboratorio

Tabla 1. Hay bastantes más ejemplos, pero estos parecen significativos. A partir de la columna de modelos comienza el ciclo de la simulación como está indicado en la Figura 3

El ciclo de la simulación

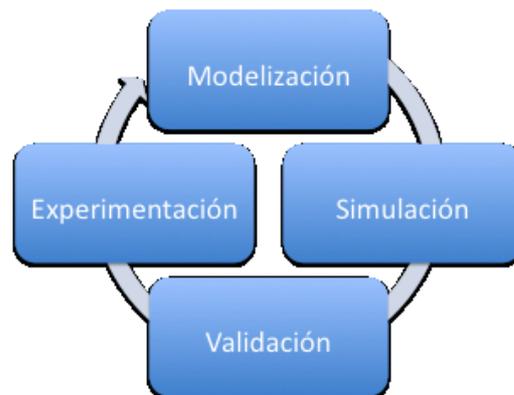


Figura 3. Esquema del ciclo de la simulación. En Astrofísica y Astronáutica ciencias básicas y aplicadas la simulación resulta un trabajo muy útil para entender procesos, por ejemplo, cómo funciona una supernova

Aquí se presenta someramente un ejemplo en el que la simulación computacional aparece claramente como un pilar en el método científico de investigación en ciencia básica (Mecánica Espacial). Además se sigue directamente de la realización de modelos. El problema es el siguiente: se trata de estudiar la evolución (cambio considerando diferentes valores del parámetro tiempo, t de las órbitas de los planetas

interiores del Sistema. Son los planetas rocosos y más pequeños (Mercurio, Venus, La Tierra, Marte). Son planetas sin apenas satélites naturales salvo Phobos y Deimos (Marte) y nuestra Luna, al contrario que los planetas gigantes, gaseosos y más alejados del Sol que tienen enorme cantidad de cuerpos orbitándoles. La estabilidad de la que gozamos ahora es el resultado de un proceso muy largo y complicado, una solución de compromiso o de equilibrio de fuerzas. Pero en un tiempo futuro en la escala de años parecida a la edad del Sistema Solar actual, ¿qué procesos se pueden dar?, ¿cómo habrá evolucionado nuestro sistema planetario? En ese sentido se plantean las ecuaciones que lo describen, y los cálculos de las soluciones son de una complejidad extrema, e inabarcables para un equipo humano científico corriente.

Pero disponemos de una herramienta interesante, la *simulación computacional* sustentada en estudios numéricos en tiempos largos.

La simulación a largo plazo de la evolución de las órbitas de los objetos planetarios del Sistema Solar está siendo llevada a cabo con la potente herramienta de la computación. El cálculo por métodos analíticos de las órbitas de los planetas del sistema más allá de 200 millones de años hubiese sido imposible e incluso casi impensable.

El Sistema Solar, del cual formamos parte, no tiene garantizada la estabilidad dinámica (del tipo actual necesario para nuestra existencia) a largo plazo, pero los astrónomos se afanan en desentrañar esta incógnita. Una pista importante para pensar que no todo será como ahora se detecta en el tipo de resultados con las ecuaciones que se manejan en los estudios de Mecánica Celeste y Astrodinámica. El tipo de órbitas son bien conocidas de los matemáticos y algún indicio en ese sentido muestran.

Pero no es solo en la actualidad cuando se encuentran indicios que estimulan la investigación en ese camino, sino que los estudiosos en profundidad del Sistema Solar ya tenían intuiciones y opiniones al respecto desde hace bastantes siglos, de Kepler hay constancia escrita de sus dudas, aun desde una visión fundamentada en otra concepción cosmológica.

Si bien la computación (como herramienta de trabajo) permite el estudio de la estabilidad dinámica del Sistema Solar a largo plazo, el lector debe tener en cuenta que la preparación previa de la tarea a realizar por la máquina es sumamente compleja y ha de ir precedida de estudios muy rigurosos que sirvan para definir la función sobre la que se ha de trabajar. Aun así también para una computadora es un

problema difícil. Podemos conseguir todas las iteraciones⁹ que se precisen de una función casi siempre, pero no siempre. Esto se debe en parte a que la computadora solo trabaja con una cantidad finita de números racionales por lo que iterar a partir de un estado inicial que sea un número irracional es un tarea inviable, por tanto eso exige indagar sobre la función más adecuada para este propósito buscado con los límites que el propio funcionamiento de la máquina proporciona.

Otra cuestión es encontrar el tipo de función que se quiere iterar, encontrar la más conveniente es un paso delicado, pues si bien hay sistemas caóticos descritos por reglas muy sencillas. Así en el aspecto matemático del problema se trata de entender lo que hace que un mecanismo sea caótico y desde el punto de vista físico buscamos ver en qué condiciones se produce.

4. VÍAS ADICIONALES DE TRABAJO

La mirada investigadora de un científico que se dedica a la Física siempre ha necesitado dotarse de todo tipo de herramientas en sentido amplio (teóricas, conceptuales, mecánicas, de alta tecnología, matemáticas y en general de muy diversa índole).

En ese camino, la modelización matemática desempeña un papel no menor, en sus tareas de entender y predecir y se ha visto potenciada en la última centuria con la puesta en funcionamiento de los ordenadores de gran potencia.

Además, el desarrollo de algunas ramas matemáticas nacidas muy próximas a la teoría de la relatividad general y a la mecánica cuántica está dando origen a nuevas visiones de la estructura del Sistema Solar en particular, pero también del universo en general y al mismo tiempo produce otras ideas cosmológicas, lo cual conducirá a nuevas formulaciones conceptuales, a otros desarrollos teóricos y seguramente a concepciones filosóficas algo distintas. Asimismo, se están originando nuevas profesiones relacionadas con este ambiente. La sinergia con otras maneras de ver el mundo y la simulación para perfeccionar las teorías o para desecharlas es una práctica común en la actualidad.

Por otra parte, hay que considerar otros aspectos, por ejemplo, la necesidad cada vez mayor de analizar los grandes sistemas físicos de manera global (sin dejar de lado los análisis parciales) que comenzaron con los estudios sobre el planeta Tierra de J-L Lions se han ampliado a los desarrollos de la Mecánica Celeste y a otras

⁹ En sistemas dinámicos se suele utilizar la idea de iteración de una función que se puede definir grosso modo como la composición de una función consigo misma un número n de veces.

especialidades astronómicas. La simulación computacional desempeña un papel decisivo en este proceso y se ha integrado plenamente con varias funciones, incorporándose casi como parte estructural indispensable en el “método científico” (al menos en buena parte de la ciencia física).

En el caso de los sistemas dinámicos no lineales, como los que son objeto de estudio de la Mecánica Celeste, se usan por su interesante valor predictivo y observacional, y por su capacidad para confirmar o refutar datos, es decir, por su valor de calculistas potentes. Nuevas preguntas surgen de cierto tipo de respuesta a cuestiones bien estudiadas. Asimismo planteamientos poco usuales cada vez son más frecuentes. Y visiones innovadoras se desarrollan y se nos aproximan... Quienes se dedican al estudio del sistema físico universo en cualquiera de sus aspectos, acostumbrados a trabajar con modelos y aproximaciones de largo término a manejar perturbaciones globales y locales, y a las mediciones indirectas están explorando la potencialidad de estas máquinas, pero no solo ellos, los especialistas en las leyes fundamentales de la naturaleza también utilizan los servicios que estos instrumentos ponen a su alcance. Esto es solo el comienzo.

Además, la visión global de las Ciencias de la Naturaleza salvo para quienes trabajan en contacto directo con la Matemática es costosa, y aquí encontramos un soporte muy eficaz.

Con respecto al control externo a los procesos científicos que se refieren aquí, pero sobre todo el relativo al funcionamiento y la validez de los modelos, los reajustes necesarios en los mismos, los cambios teóricos que sugieren, las nuevas preguntas que propician, las nuevas vías que pueden abrir para incitarnos a llegar un poco más lejos, y su presentación para validación social es de una riqueza notable.

5. CONCLUSIONES: LA CIENCIA BÁSICA QUE EMERGE DE LA CIENCIA APLICADA Y LA TECNOLOGÍA

La innovación en Astrodinámica es pluripotencial y pluridisciplinar y conlleva numerosos problemas abiertos.

En la actualidad, la simulación numérico-computacional en física de fluidos ha alcanzado un alto grado de desarrollo y perfeccionamiento. Asimismo, en el contexto astrofísico se están trabajando los procesos que involucran plasmas que comprenden desde fenómenos de baja energía en sistemas planetarios hasta los descubiertos más recientemente, y los que se hallan en una etapa muy productiva de estudio son los

objetos de alta energía hallados por procedimientos que involucran rayos x y rayos gamma. La enorme ventaja que proporciona el hecho de que algunas observaciones se puedan realizar tanto desde tierra como desde observatorios orbitales analizando e interpretando la conducta de plasmas térmicos y no térmicos.

En general, el estudio de los plasmas que se realiza en el seno de la física de la materia condensada está llevando a equipos pluridisciplinarios, formados principalmente por físicos y matemáticos a descubrir fases de la materia enmarcadas en los sistemas mesoscópicos¹⁰ en el nivel cuántico, superconductores topológicos y semiconductores topológicos, y al diseño de nuevos materiales en este ámbito, como el grafeno y otros materiales de la nanoescala que se encuentra en un fase muy interesante de estudio.

Estas herramientas y estos nuevos materiales caen de lleno en el campo de estudio y discusión de los objetos y los fenómenos astrofísicos para dilucidar nuevos caminos en la investigación y abrir nuevas líneas de trabajo científico.

REFERENCIAS

- Estany, A. (2012). "The Stabilizing Role of Material Structure in Scientific Practice". *Philosophy Study*, vol. 2, nº 6, pp: 398-41.
- Herrera, R.M. (2012). "Equations, Theories and Sciences that use them". *Actas congreso Mathematics Everywhere*, Castro Urdiales, 22-38.
- Laskar J. & Gastineau, M. (2009) 'Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth". *Nature*, letters, vol. 459.
- Lions, J.-L. (1990) "El planeta Tierra. El papel de las matemáticas y los superordenadores. Instituto de España", Espasa-Calpe, Madrid.
- Milani, A. & Gronchi, G. (2010) "Theory of Orbit Determination", Cambridge Univ. Pres., 2010
- Poincaré, H. (2007) "Le valeur de la science", Flammarion, France, 22
- (1899) "Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste". Gauthier Villars et fils.

AGRADECIMIENTOS: Agradezco las facilidades que grupo APYCE me ha dado para el desarrollo de la investigación que ha originado las ideas presentadas en este artículo. Asimismo deseo agradecer el intercambio creativo de opiniones con mis colegas del GIE "Pensamiento Matemático" de la UPM.

ROSA MARÍA HERRERA: es físico y su desempeño profesional se ha desarrollado en el ambiente de la física-matemática, su área de interés se centra en el estudio de la dinámica del sistema solar, asimismo desarrolla intensa labor editorial (editora jefe y asesora científica) en el campo de la matemática académica. En los últimos años se ha interesado por el vínculo interdisciplinar de la física y la matemática con la filosofía y la historia de la ciencia y por la modelización y simulación computacional.

¹⁰sistemas en la frontera de la física cuántica y la física clásica