

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

Historia física de las plantas

Karina Galache · Wednesday, February 24th, 2021

Categorías: Ciencias Naturales y de la Salud, Zona Abierta

Todo es simple y ordenado excepto, por supuesto, el mundo.

Nigel Goldenfeld^[1] y Leo P. Kadanoff^[2]

La matemática es el arte de designar con el mismo nombre cosas distintas

Henri Poincaré^[3]

Nacen más individuos de los que pueden sobrevivir. Un grano en la balanza puede determinar qué individuos han de vivir o cuáles han de morir, qué variedad o especie ha de vivir y cuál ha de morir, qué variedad de especie ha de aumentar en número de individuos y cuál ha de disminuir o acabar por extinguirse

Charles Darwin^[4]

Las plantas, los vegetales en general, han despertado interés en la historia de la humanidad, desde la mirada cotidiana de cualquier persona hasta los viajeros naturalistas y los científicos, sin obviar el punto de vista de los artistas plásticos. Algunos expertos en caos y sistemas complejos han repensado muchos aspectos científicos y formas de mirar el mundo natural utilizando física, matemáticas, historia, biología y artes, esto es, viajando en el más completo sentido semántico.

Ralph Abraham^[5] escribió un estudio sobre los orígenes de la complejidad y el caos “The Genesis of Complexity” que compila los fundamentos de la teoría de la complejidad soportándola en tres grandes disciplinas: la biología matemática, la dinámica no lineal y la cibernética.

El valor de la complejidad descansa en los fenómenos emergentes, por ejemplo la superconductividad y la superfluidez, además aparece la cualidad de la adaptabilidad de estos fenómenos emergentes. Este conjunto de fenómenos emergentes (y adaptativos, como la vida) no son formas que se derivan de las leyes fundamentales de la física; sin embargo, no contravienen dichas leyes y no las incumplen. Otra característica frecuente que suele estar asociada a los

fenómenos emergentes es la dimensión fractal o la asociación geométrica de las dimensiones no enteras, y la autorreplicación como una propiedad asociada. Esto es fácil de imaginar pensando en las plantas.

Una visión muy generalizada entre algunos estudiosos avanzados de la física es que el reduccionismo^[6] está alcanzando su límite en algunos aspectos o especialidades y no sirve como basamento de la evolución de esta disciplina, al menos en algunos casos y aspectos.

En la tradición reduccionista se da una especie de jerarquización en la que los sucesos emergen de los primeros principios, y una vez establecidos, se avanza con estos cimientos. Poincaré reflexionó mucho al respecto y señaló “5 o 6” principios sustentadores de la física (Segunda ley de Newton, Ley de acción y reacción, Principio de conservación de la energía, Principio de Carnot, Principio de relatividad y Principio de mínima acción). Esta última inclusión es una visión interesante no exenta de aspectos sorprendentes, cuya historia es lectura recomendable para entender la evolución de la forma del conocimiento científico, que introduce una visión ampliamente enriquecedora.

La observación de las plantas

La observación científica requiere conocimiento, creatividad, minuciosidad y delicadeza de pensamiento (escuchar, ver y contrastar/comparar con lo que sabemos y por supuesto con audacia, con atención y con capacidad reflexiva). Goethe decía “vemos lo que sabemos” y es un punto de partida.

La botánica actual es una disciplina de la biología vinculada con algunas de las ramas de las ciencias de la complejidad. La observación y la descripción de las plantas es muy rica y variada. Desde sus inicios está vinculada con las artes plásticas: la pintura, el dibujo y a los motivos ornamentales y en cierto sentido siguen estando muy ligados a ellas.

En el estudio del mundo natural, las primeras aportaciones al conocimiento de las plantas proceden del mundo griego. Durante la Edad Media se desarrolló imbricándose en la literatura, transmitiéndose sin aportar avance en su comprensión; no había estudiosos en sentido estricto, sino personas que aprendían lo ya sabido y se encargaban de transmitirlo sin mejoras o perfeccionamiento alguno.

Esto probablemente sucedió porque las disciplinas descriptivas de la naturaleza no matematizadas carecían de instrumentos mentales para añadir valor a las observaciones que realizaban los copistas, y además estos no solían ocuparse de efectuar alguna aportación más afinada de esas observaciones.

Claro está que algunos de estos “botánicos” descriptivos en la antigüedad hicieron un buen trabajo al plasmar en sus dibujos lo que veían, analizando levemente sus observaciones con la intención de encajarlas en su visión general del mundo, pero los sucesivos copistas iban deformando los dibujos iniciales hasta hacer irreconocibles los modelos de partida. En realidad, apenas se conocía cómo se desarrollaba la vida de las plantas y su estructura, y lo más parecido a un estudio comprensivo más o menos sistematizado de las mismas, era el conocimiento de su utilidad curativa en medicina o sus cualidades culinarias.



Teofrasto

Teofrasto^[7] y Dioscórides^[8] fueron dos de los más importantes estudiosos botánicos pre-científicos que hicieron aportaciones en la descripción general de las plantas. Teofrasto intentó clasificarlas en clases según sus analogías y diferencias por su aspecto y su forma. Con este criterio las agrupó en: arbustos, matorrales y hierbas; para ello comparaba sus estructuras con las de los animales buscando similitudes y diferencias, además consideraba como criterio importante la zona terrestre donde se desarrollaban la plantas; por ejemplo, distinguía las plantas que son frecuentes en regiones húmedas y frías del norte, así, esperaba que un árbol tuviese un determinado tipo de raíz, de tronco y de hojas, y que estas serían diferentes de otras raíces, troncos y hojas de los tipos de plantas de otra región más cálida o seca.

También describía sus aspectos curativos y beneficiosos para la salud; en general, lo que en teoría podría aparecer como una observación muy empírica, constatando efectos beneficiosos probados, en la práctica estaban imbuidos de un verdadero carácter mágico. De hecho, en algunas culturas la recolección de hojas, raíces, etcétera, remite a sus tradiciones más antiguas que son mezcla de ritos y soluciones a problemas de salud.

El conocimiento popular de las plantas, relativamente empírico, que iba transmitiéndose entre generaciones sirvió de base para iniciar el estudio de los aspectos sistemáticos -más bien poco desarrollados y desestructurados- que procedían de las descripciones de la Historia Natural de Plinio, recopilación de trabajos escritos, que no se corresponden con el resultado de una observación sistemática de la naturaleza vegetal.

El primer tratado basado en los datos obtenidos del contacto directo con la naturaleza se  encuentra en La materia médica de Dioscórides, trabajo^[9] preparado en 60 d. C., que fue una fuente usada en la elaboración de muchos herbarios que iban compilándose y posteriormente traducándose; en él se observan desde obras cuidadosas y bien realizadas como De Juliana Inicia Codex^[10] (500 d. C.) hasta muchas otras de menor envergadura y categoría. La materia médica procura describir las plantas en sus hábitats y con aplicaciones para la cura de algunas dolencias. La zona geográfica mejor descrita es el Mediterráneo oriental; en mucho menor grado de detalle aparecen las regiones nórdicas.

Posteriormente durante el siglo xv, se elaboraron herbarios de algunas otras regiones europeas y se comenzó a esbozar el estudio analítico de los vegetales y paulatinamente se empezó a sistematizar la botánica al estilo de pensamiento de la ciencia moderna.

No obstante, esta nueva manera de abordar el estudio tuvo que ir sustituyendo el potente

pensamiento aristotélico de que las plantas están dotadas de un “alma vegetal” que es la que corresponde a la nutrición, pero carecen del alma animal, que controla el movimiento voluntario y es propia del pensamiento racional; las plantas (ni se mueven, ni piensan). Este enfoque prevaleció hasta el siglo xvii. En resumen, las plantas solo están dotadas de un “alma” vegetativa en esta concepción.

La descripción asociada a esta visión tiene numerosos errores, uno fundamental es el desconocimiento de que las plantas elaboran su propio alimento; es decir, no lo toman directamente de la tierra como se pensaba originariamente (según esta visión el suelo proporcionaba a las plantas su alimento en forma totalmente asimilable o digerida). El pensamiento mágico sostenía que cada planta que tuviera alguna aplicación medicinal, o de otra índole, era semejante formalmente a aquello en lo que se iba a usar (Paracelso).

En cuanto a la mirada artística de las plantas cabe decir que el dibujo minucioso está asociado con el conocimiento del mundo vegetal; la ilustración ha resultado siempre importante; posiblemente no hay ninguna ciencia que más le deba al arte del dibujo y la pintura que la botánica, sobre todo cuando los artistas comenzaron a representar del natural y dejaron de copiar trabajos previos.

El microscopio, una nueva perspectiva

Hay bastantes descripciones herbarias hasta bien entrado el siglo xvii, quizá con interés científico relativo; sin embargo, suponen un muestrario de la diversidad vegetal que, en ocasiones está dotado de belleza artística y de un minucioso cuidado visual. Además en el siglo xvii se empezó a utilizar el microscopio para observación vegetal. Robert Hooke comprobó que las plantas tienen estructuras básicas que denominó células, y organizaciones celulares que constituyen órganos.



Robert Hooke. Pintura al óleo de Rita Greer, 2011.

En 1682 la Royal Society publicó una anatomía de vegetales en la que se citaba un sistema vascular, si bien los problemas de los que se ocupaba esta sociedad científica eran la reproducción vegetal y el desarrollo y la alimentación. En las observaciones más pormenorizadas surgieron dudas sobre si los vegetales estaban dotados de sexualidad- Sir Thomas Millington⁽¹¹⁾ y Nehemiah

Grew⁽¹²⁾ fueron los primeros en avanzar en la identificación de los órganos sexuales de los vegetales; el segundo identificó las partículas que las abejas recogen con las patas y transportan a otras plantas como uno de los aspectos reproductivos; en sus conversaciones botánicas Millington defendía que los estambres constituían los órganos masculinos. Ambos consideraban que las plantas son hermafroditas, pero no tenían bien definido el proceso de fecundación y no cayeron en la cuenta de qué era lo que las abejas transportaban de unas plantas a otras. En estas etapas de trabajo consideraban a las plantas como seres hermafroditas que no se autofecundan.

El conocimiento del polen, los estambres y las anteras y sus respectivos cometidos en la 

reproducción de las plantas se debe a Rudolf J. Camerarius⁽¹³⁾, pero hasta el siglo xix no fue aceptada con generalidad la sexualidad de las plantas. Había otros asuntos que tampoco se entendían bien; se pensaba por ejemplo acerca de la nutrición, que si la planta recibe los nutrientes totalmente elaborados desde el suelo, no los transforma por sí misma. Además las plantas están dotadas de otros órganos, ¿para qué sirven las hojas?, ¿cómo distinguen las plantas las sustancias buenas de las malas entre todas las que absorben?, la savia, como fluido circulante, si es así

siempre ¿cuál es la fuerza que la mueve?

Los grandes nombres de la botánica surgieron posteriormente; cabe señalar: Van Helmot^[14] quien realizó un experimento muy reconocido de fisiología vegetal y demostró que la mayor parte de la energía vegetal procede del agua, sustancia que le ayuda a elaborar su propia materia (no de la tierra como se suponía previamente); para demostrar esto realizó un experimento que resultó concluyente: consistía esencialmente en un balance de la cantidad de materia que había ganado el árbol: plantó un árbol en una cierta cantidad de tierra previamente calibrada; al finalizar su experimento el árbol había ganado 45 kg y la cantidad de materia que había perdido la tierra eran 57 g, no obstante, no descartó la posibilidad de que algunas características propias de frutos o flores procediesen de la aportación material del suelo; también Stephen Hales^[15] trató el transporte del agua de las plantas y la absorción del aire.

Una contribución importante se debe al filósofo y físico Robert Boyle^[16], quien seleccionó algunas plantas y las introdujo en agua, al cabo de cierto tiempo observó sustancias aceitosas en las mismas, esto le sirvió para consolidar la idea de que la tierra es un soporte de la planta, pero sus propiedades o características esenciales no proceden de la tierra. Otros científicos observaron y trataron el estudio de la circulación de la savia de abajo hacia arriba.

En 1671, Malpighi^[17] descubrió que las hojas son órganos encargados de transformar las sustancias simples en las sustancias complejas que forman la materia constitutiva de las plantas y, al mismo tiempo, almacenan dichas sustancias complejas para su uso posterior. Ahí es donde interviene la savia. Propuso también que los cotiledones son verdaderas hojas de las plantas en desarrollo, y lo demostró eliminando en algunos ejemplares los cotiledones y comprobando que sin ellos no se produce desarrollo de la planta a partir del embrión. Análogamente las hojas de las plantas adultas son imprescindibles. Lo que Malpighi no sabía era la función que desempeña la clorofila, y no asociaba su implicación en el color verde de las hojas. Por otra parte, notó que las plantas respiran, y más tarde observó también que se alimentan a través del aire; con la colaboración de su amigo y colega Grew, autor de la obra *Anatomy of plants*, quien afirmó que el sol, la tierra, el agua y el aire contribuyen al crecimiento de los vegetales. Escrito en el estilo de la época: “hay observaciones que parecen demostrar que el aire está impregnado de principios vegetales”.

Es importante señalar que también incorporó a los estudios botánicos las teorías corpusculares de la física que estaban en pleno auge en su tiempo. La física nunca ha estado lejos de las demás ciencias de la naturaleza^[18]; los expertos en la historia de la botánica pueden imbricarla en el estudio de la evolución de la historia del pensamiento científico, leer la vida científica de Stephen Hales es un ejercicio recomendable.



La complejidad y la botánica, simulación computacional de las plantas

Entender la vida de las plantas es tan complicado como la vida de otros organismos vivos; muchos aspectos de la vida vegetal son bien conocidos pero no se sabe todo. Los seres humanos utilizan los métodos a su alcance para tratar de descifrar cualquier asunto relativo a su vida y desarrollo. Con

este fin, los matemáticos, los expertos en ciencias computacionales, los físicos, los ingenieros, los investigadores especialistas en botánica crean modelos matemáticos que simulan plantas virtuales; como ocurre en otras ciencias y artes.

Además, la agricultura requiere un buen conocimiento botánico, la aclimatación de los diversos cultivos de unos continentes a otros, los invernaderos y la biodiversidad son diversos aspectos en los que el conocimiento de las plantas ha crecido.

Un árbol, ejemplo de planta virtual

Para crear una planta virtual se recurre a un modelo geométrico; por ejemplo, usamos una idea inicial como punto de partida: la autosimilitud, característica de los objetos fractales. La idea básica es que un árbol está formado por muchos “árboles” pequeños. Este objeto geométrico con estructura 3D compleja elaborado en el ordenador se inicia a partir de un elemento simple que se replica a escalas diferentes: del tronco emergen las ramas principales que a su vez se subdividen en ramitas secundarias, hasta que el volumen se estabiliza; sin embargo, la superficie continúa en expansión. Este fenómeno se observa bien en las hojas, por ejemplo, y el crecimiento del número de hojas contribuye a mejorar la fotosíntesis.

Para iniciar el proceso cada estructura o subestructura se describe mediante formas geométricas sencillas: un cilindro sustentador simboliza un tronco, un segmento indica una rama, y las hojas aparecen como polígonos. Este ensamblaje proporciona una primera aproximación. El sencillo esquema geométrico se puede expresar de modo analítico como una familia de curvas diferenciales^[19], polinomios de grado tres definidos a trozos que permiten calcular pendientes, curvaturas y orientaciones y se usan para representar aproximadamente las principales configuraciones de este árbol (o generalizando, de una planta).

Estas curvas como estructuras básicas o esqueletos, carecen de las restricciones que las conformaciones moleculares que organizan la dinámica de la planta (nuestro árbol) presentan, y esto significa que una planta no está representada con precisión total; además en esta aproximación tampoco se consideran las condiciones climáticas externas, ni la forma de los cultivos alrededor, ni si pertenece a un bosque o está aislado y otros elementos como intervenciones humanas en el entorno.

Entre los procesos moleculares que se conocen pero que en primera aproximación no se representan en el modelo, los botánicos destacan algunos órganos importantes: los meristemas (donde se producen las divisiones celulares para originar hojas, flores, y alguna estructura más), el xilema, que es el conjunto de vasos y sus tejidos conductores que transportan el agua y los minerales desde las raíces hasta las hojas, y también el floema que es el conjunto de tejidos conductores que transportan a la savia elaborada por las hojas a otros órganos.

Los procesos de información

La dinámica del modelo de un árbol se puede elaborar combinando situaciones aleatorias con situaciones deterministas para obtener una descripción bastante aproximada de la realidad o lo más aproximado a la realidad que sea posible.



Cadena de Markov, proceso que seLo ubicamos en una zona climática concreta, ya que se

desarrolla en un tiempo discreto, donde sabe que las zonas climáticas se explican bastante bien cada variable aleatoria varía en el tiempo y mediante leyes mecánicas deterministas. Sin embargo, la donde el valor que la variable tiene en cada aparición de nuevos órganos es aleatoria, ya que depende de la etapa solo depende de la inmediatamente de los recursos del entorno v.g.: la riqueza de la tierra, la anterior.

presencia de otras plantas, etc., y todo eso puede determinar, por ejemplo, el número de hojas de la planta virtual. Con estas consideraciones se usan “cadenas de Markov”^[20] que son útiles como modelo aleatorio para explicar eventos sucesivos (en general mecánicos).

Este procedimiento también es valioso en el estudio general de las plantas, no solo de nuestro árbol, ya que se consideran también otros fenómenos aleatorios como la orientación de la planta con respecto a la luz, la componente predominante del viento más frecuente, el régimen de lluvias, etcétera. Así, la aplicación de geometría, ecuaciones diferenciales, cálculo de probabilidades, permiten simular el crecimiento y desarrollo de una planta en varios segundos.

La dinámica no lineal y las ciencias de la vida, generalidades...

La física, las matemáticas y la ingeniería han influido en el desarrollo y enfoque de otras ciencias, como es el caso de las ciencias de la vida. La ciencia de los sistemas complejos supone una integración de gran cantidad de disciplinas, por ejemplo la dinámica no lineal y la teoría del caos, la física estadística, la teoría de los procesos estocásticos, la teoría de la información, la teoría de redes, las ciencias de la vida y las ciencias de la computación, la biotecnología. En estos estudios multidisciplinares han emergido el estudio del caos y de la complejidad como fuentes de conocimiento y de aprendizaje avanzado. No es una novedad, la física clásica ha estado presente en la resolución de algunos problemas de la vida humana; por ejemplo, la radiología, la espectroscopia láser; en problemas motores del cuerpo humano, la mecánica da origen a la ortopedia. Schrödinger^[21] es imprescindible y su influencia comprende hasta James Watson^[22].

Centrados en los fenómenos vitales (ciencias de la vida) y la dinámica no lineal -un sistema dinámico evoluciona en el tiempo- y las variables que intervienen también se desarrollan temporalmente. Una célula se puede mirar como un sistema dinámico, dado que evoluciona en el tiempo y este hecho no es baladí porque dependiendo de cómo sea esa evolución la célula se reproduce y sobrevive. Según explican los expertos, las proteínas son cruciales en la fisiología celular y ahí es donde interviene la topología de las redes (las redes son grafos, y sus estructuras están bien estudiadas), como las redes de proteínas interactivas son dinámicas -los estímulos que influyen en la dinámica de la célula, para crecer, reproducirse, etc.- Contando con la experiencia de los biólogos, los especialistas en sistemas dinámicos consideran que la teoría de bifurcaciones, al explicar la influencia de la variación de un parámetro en un sistema dinámico es una herramienta adaptable. Esta nueva mirada matemático-física que, en una línea de actuación distinta del estudio de las ecuaciones diferenciales (resolviéndolas analíticamente), trabaja en el aspecto geométrico-topológico del retrato de fase que abrió la noción de estabilidad estructural y bifurcación^[23].

La complejidad bucea en la biología por la gran cantidad de información que aporta, y los físicos-matemáticos indagan en la célula como sistema dinámico. En general, se acepta que la física

fundamenta las otras ciencias, ya que todos los objetos y seres vivos están contruidos con las partículas elementales que la física estudia como sistemas aislados. Sin embargo, el mundo no es un sistema aislado y los sistemas biológicos e incluso los sistemas físicos tampoco lo son. Los sistemas biológicos además no son cerrados, y por tanto en el mundo de lo vivo intervienen tanto el entorno como el sistema objeto de análisis -y sus leyes-. Por su método de trabajo la física tiene una estructura jerárquica, y en cada nivel existen reglas o leyes que lo determinan, que son independientes entre sí, y también leyes que emergen de los principios básicos. La biología proporciona una mirada diferente de esta jerarquización y no necesita conocer las leyes físicas que subyacen, por eso los biólogos no estudian teoría cuántica, ni física nuclear, ni exploran el marco teórico de la relatividad.

La botánica en la complejidad: geometría fractal y caos



Observar la naturaleza vegetal (y la naturaleza en general) con mirada geométrica afianza la complejidad. Al observar geométricamente algunos aspectos de la naturaleza se observa en numerosas ocasiones autosemejanza v.g: un árbol, una línea de costa, etcétera. Se entiende por autosemejanza la repetición del mismo tipo de estructura geométrica a diferente escala desde la menor hasta la mayor del objeto o del fenómeno estudiado (una imagen sencilla: un árbol reitera arbolitos).

Mandelbrot^[24] fue el matemático que encontró y definió esta característica y la denominó fractal, esta propiedad geométrica se detecta en estructuras complejas. En paralelo, el estudio de algunos sistemas naturales detecta conductas dinámicas no lineales, ya que las ecuaciones de evolución que las describen no lo son. Yorke^[25] encontró que el caos es un mecanismo que se puede definir a partir de la idea “dependencia sensible a las condiciones iniciales”, y este hecho es importante para explicar la capacidad de predicción de un sistema.

El caos se ha introducido en todas las ramas de la ciencia y en cierto sentido ha reforzado la fortaleza de la física y las matemáticas como ciencias soporte del resto de las disciplinas de índole creativo científico incluidas las ciencias biomédicas y las ingenierías de diverso tipo.

El caos se ha introducido en todas las ramas de la ciencia y en cierto sentido ha reforzado la fortaleza de la física y las matemáticas como ciencias soporte del resto de las disciplinas de índole creativo científico incluidas las ciencias biomédicas y las ingenierías de diverso tipo.

Referencias

^[1] Nigel Goldenfeld (¿?, 1957), desconozco el lugar de nacimiento

^[2] Leo P. Kadanoff (Nueva York, 1937- Chicago, 2015)

^[3] Henri Poincaré (Nancy, 1854- París, 1912). “Ciencia y Método”

^[4] Charles Darwin (Shrewsbury, 1809 – Down House, 1882) “El origen de las especies” c. XIV, - dependencia sensible a las condiciones iniciales- a través de “Las matemáticas y la física del caos” Manuel de León y Miguel Á.F. Sanjuán

^[5] Ralph Abraham (Vermont, 1936)

^[6] En física todos los fenómenos se derivan de las leyes y principios fundamentales. Esta idea y forma de desarrollo se denomina reduccionismo.

^[7] Teosfrasto (Lesbos, 371 a.C.- 287 a.C.)

^[8] Dioscórides (Anazarba, C. 40- C. 90)

^[9] Opinan algunos expertos de historia de la botánica, que el orden puede indicar que el autor puede ser un hombre del ejército

^[10] Conocido por el Dioscórides de Viena contiene también ilustraciones sobre animales, además de las de plantas.

^[11] Thomas Millington (Newbury, 1628- Golfield, 1703/4) físico

^[12] Nehemiah Grew (Warwickshire, 1641- Londres, 1712) botánico y médico

^[13] Rudolf Camerarius (Tubingen, 1665 -1721) médico y botánico

^[14] Jan Baptista Van Helmot (Bruselas, 1580 – 1644) científico en varias disciplinas

^[15] Stephen Hales (Reino Unido, 1667 – 1761) clérigo y científico

^[16] Robert Boyle (Waterford, 1627- Londres 1691) físico y filósofo

^[17] Marcello Malpighi (Bologna, 1628- Roma, 1694)

^[18] Quien esté interesado en la historia de la ciencia, observará la imbricación de la filosofía, las matemáticas y la física con el resto de las disciplinas.

^[19] Estas curvas se conocen como splines, esencialmente se trata de curvas técnicas muy manipulables y es habitual su uso en la infografía de las películas de dibujos animados y otros.

^[20] Una cadena de Markov es un proceso que se desarrolla en un tiempo discreto, donde cada variable aleatoria varía en el tiempo y donde el valor que la variable tiene en cada etapa solo depende de la inmediatamente anterior.

^[21] Erwin Schrödinger (Erberd, 1887- Viena, 1961)

^[22] James Watson (Chicago, 1928-)

^[23] El impulsor de esta forma de visión (enfoque) fue Henri Poincaré (Nancy, 1854- París, 1912), quien es considerado un gran sabio en varias disciplinas científicas, mente creativa y analítica, de gran cultura que hizo aportaciones valiosas en las ciencias “duras”.

^[24] Benoît Mandelbrot (Varsovia, 1924 -Massachusetts, 2010) matemático, en el libro “Fractal Geometry of Nature” (1982) presenta y explica sus estudios sobre fractales. Premio Japan 2003 con James A. Yorke

^[25] James Alan Yorke (New Jersey, 1941). Matemático y físico, escribió con Alliwod y Sauer el libro “Chaos: An Introduction to Dynamical Systems” Doctor Honoris Causa en la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (España) y el premio Japan 2003 con B.M.

Bibliografía

Amasuno, M. A.: La materia médica de Dioscórides en el lapidario de Alfonso X el sabio (Literatura y ciencia en la Castilla del siglo xiii). CSIC. Cuadernos Galileo de Historia de la Ciencia, Madrid, 1987

Bois, D.: Atlas des plantes de jardins et d'appartement exotiques et Européens, Librairie des Sciences Naturelles, Paul Klincksieck, éditeur, París, 1896

Cover, Th. M. & Thomas, J. A.: Elements of information theory, Wiley, 2006

Crombie, A. C.: Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo/T1 (siglos v-xiii) y T2 (siglos xiii-xvii). Alianza Universidad, Madrid, 1979 -la versión española usada, hay otra de 1974-

De León, M. & Sanjuán, M. A. F.: Las matemáticas y la física del caos, Libros de la Catarata, CSIC, Madrid, 2009

Gleick, J.: The Information: A History, A Theory, A Flood, Vintage, 2012

Pierce, J. R.: An Introduction to Information Theory: Symbols, Signals and Noise, Dover, 1980

Schrödinger, E: ¿Qué es la vida?, Tusquets, Barcelona, 2006

Software <http://openalea.gforge.inria.fr/dokuwiki/doku.php?id=openalea>, simulación de plantas virtuales

Solis, C. & Selles, M.: Historia de la ciencia, Espasa Calpe, Madrid, 2005

This entry was posted on Wednesday, February 24th, 2021 at 9:51 am and is filed under [Ciencias Naturales y de la Salud](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.