

SERENDIPIA Y MEDICINA, SU HISTORIA, FUNDAMENTOS Y FUTURO: HACIA UNA “SERENDIPIA ARTIFICIAL”

SERENDIPITY AND MEDICINE: ITS HISTORY, FOUNDATIONS AND FUTURE: TOWARDS AN ARTIFICIAL SERENDIPITY

Victor Maojo^{1,2,3,4,5}; Juan Pazos¹

1. Departamento de Inteligencia Artificial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos. Universidad Politécnica de Madrid.
2. Catedrático de Inteligencia Artificial y Director del Grupo de Informática Biomédica. Universidad Politécnica de Madrid.
3. Miembro, Academia Americana de Informática Médica (ACMI)
4. Miembro, Academia Internacional de Informática de Ciencias de la Salud (IAHSI)
5. Académico Correspondiente, Real Academia Nacional de Medicina de España (RANME).

Palabras clave:

Serendipia;
Medicina;
Descubrimiento científico;
Penicilina;
Razonamiento deductivo;
Razonamiento inductivo;
Razonamiento abductivo;
Inteligencia Artificial;
Inteligencia Artificial Generativa.

Keywords:

Serendipity;
Medicine;
Scientific discovery;
Penicillin;
Deductive reasoning;
Inductive reasoning;
Abductive reasoning;
Artificial intelligence;
Generative artificial intelligence.

Resumen

La Serendipia, considerada clásicamente como “el descubrimiento de cosas no buscadas”, ha tenido una importancia decisiva en las ciencias humanas y tecnologías, y particularmente en la medicina. En este artículo se hace una revisión de múltiples descubrimientos serendípicos realizados en las ciencias biomédicas, más allá del clásico ejemplo de la penicilina y Fleming, y se describen los diversos tipos de serendipia propuestos. Más allá de esta revisión, se analizan los modelos de razonamiento lógico usados en la investigación científica, y cómo podrían justificar los procesos mentales que pueden conducir a los descubrimientos serendípicos. En este contexto, se propone una visión prospectiva del papel de la serendipia en el contexto actual del impacto de la Inteligencia Artificial en la ciencia y tecnología, y los fundamentos básicos de lo que podrá denominarse como “Serendipia Artificial”. En este sentido, las “alucinaciones” -errores- que aparecen en las respuestas realizadas por la IA generativa podrían ser una base futura para esas futuras serendipias artificiales.

Abstract

Serendipity, classically considered as “the discovery of things not sought”, has had a decisive importance in the human sciences and technologies, and particularly in medicine. This article reviews multiple serendipitous discoveries made in biomedical sciences, beyond the classic example of penicillin and Fleming, and describes the various types of serendipity already known. Beyond this review, the models of logical reasoning used in scientific research are analyzed, and how they could justify the mental processes that can lead to serendipitous discoveries. In this context, a prospective vision of the role of serendipity in the current context of the impact of Artificial Intelligence on science and technology is proposed, and the basic foundations of what could be labelled as “Artificial Serendipity”. In this sense, the “hallucinations” -errors- that appear in the responses made by generative AI could be a future basis for these future artificial serendipities.

INTRODUCCIÓN. SERENDIPIA: CONCEPTOS E HISTORIA

¿Qué es Serendipia? En la 23ª edición del DRAE del 2014 y en su actualización del 2022, en la entrada del término Serendipia aparece: “Adaptación del inglés Serendipity y éste de Serendip, hoy Sri Lanka, por alusión a la fábula oriental “The three Princess of Serendip” (1). También: “Hallazgo valioso que se produce de manera accidental o casual. El descubrimiento de la

penicilina fue una serendipia”. Sin embargo, dicha definición es incompleta o incluso incorrecta. En efecto, la serendipia se puede definir, en el sentido kantiano del término, como un descubrimiento o hallazgo fortuito, realizado por accidente o casualidad, sobre algo que no se estaba buscando pero que facilita una solución para otro problema ya existente con anterioridad. Citando otra fuente, Royston M. Roberts (2), dice: “Yo he acuñado el término “pseudoserendipia” para designar descubrimientos accidentales que logren culminar

Autor para la correspondencia

Victor Maojo
Real Academia Nacional de Medicina de España
C/ Arrieta, 12 · 28013 Madrid
Tlf.: +34 91 159 47 34 | E-Mail: secretaria@ranm.es

un camino de búsqueda, en contraste con el significado de la verdadera Serendipia, la cual describe descubrimientos de cosas no buscadas.” Según esta diferente visión, el descubrimiento de la penicilina, que se comenta en detalle más adelante, sería un descubrimiento pseudoserendípico, es decir, en realidad Fleming estaba buscando un agente antibacteriano cuando realizó su descubrimiento, por tanto no totalmente serendípico. Pasteur, en múltiples ocasiones utilizó la frase: “En los campos de la observación, el azar no favorece más que a espíritus preparados”. La primera vez que la utilizó pudo ser en 1854, con ocasión del discurso que pronunció como Decano en la inauguración del curso en la Facultad de Ciencias de Lille.

En el año 2000, “Serendipia” fue votada como la palabra más popular en el idioma inglés en el contexto de un concurso nacional convocado en un festival literario en Inglaterra (3). El término fue originalmente acuñado en el siglo XVIII por el escritor Horace Walpole tras leer el cuento de hadas persa “Los tres príncipes de Serendip”, antes mencionado, para referirse a “la facultad de hacer descubrimientos afortunados por accidente”. Desde sólo unas pocas referencias a finales de los 1950, en la actualidad aparecen en Google más de veintiocho millones de referencias para el término “serendipity”, cuando en 2008 sólo se habían registrado tres millones. Irónicamente, Serendipia es también una de las palabras más buscadas en inglés y una de las más difíciles de traducir. Habitualmente, se usa, un tanto imprecisamente, como sinónimo de suerte, “acaso...” o “chiripa”.

Se ha propuesto que existen tres postulados clave de la Serendipia: 1.- hallazgo accidental, 2.- descubrimientos debidos a la sagacidad del investigador, y 3.-, cuando el investigador está buscando algo diferente y encuentra el hecho -físico o conceptual- que va a ser descubierto. Pese a que la serendipia en la ciencia podría parecer un suceso muy improbable, o incluso anecdótico, desde una perspectiva científica su importancia es tal que un 10 % de los artículos científicos más citados sugieren la Serendipia como contribuyente a las innovaciones más revolucionarias (4). Si nos referimos a la farmacología para buscar ejemplos significativos en el campo de la medicina, podemos encontrar agentes farmacológicos tan significativos como:

- En el caso de la píldora anticonceptiva, en un inicio se buscaba una sustancia abortiva y se acabó descubriendo una sustancia anticonceptiva. No fue un golpe de suerte, ya que se conocía que el barbasco Cabeza de Negro, una planta casi extinta hoy en México, era usada desde hacía siglos por las mujeres indígenas y causó sorpresa su actividad biológica.
- Tres conocidas moléculas con propiedades antipsicóticas, como la clorpromazina, haloperidol y clozapina, fueron descubiertas tras una investigación en la que se buscaban fármacos con efectos antihistamínicos, analgésicos y

antidepresivos, respectivamente, por lo que podríamos categorizarlos como descubrimientos serendípicos primarios (5).

- Jenner, descubridor de la vacuna de la viruela -o más bien, la persona que la describió por primera vez, ya que se habían realizado preparados antivariolíticos con mucha anterioridad- no conocía la teoría microbiana que fue descrita años más tarde por Pasteur, por lo que su aportación se basaba en métodos observacionales. Jenner comprobó que las mujeres que ordeñaban vacas eran inmunes a la viruela. Así, propuso que el contacto de estas mujeres con el pus de las ampollas del ganado tenía el efecto de proteger a las mujeres de la infección con la viruela (6).
- Otro ejemplo de serendipia en fármacos es el minoxidil, originalmente usado como medicamento para la hipertensión. Muchos de los pacientes que lo tomaban notaron que su vello tenía mayor fortaleza y volumen. Por ello, se comenzó a usar como tratamiento tópico contra la alopecia.
- La viagra, conocido fármaco para el tratamiento de la disfunción eréctil, fue descubierto para este uso al aparecer como efecto secundario en un ensayo clínico para el tratamiento de la angina de pecho.
- El descubrimiento de la quinina para el tratamiento del paludismo cuenta también con su leyenda propia. Según esta, de dudosa credibilidad, la esposa del virrey de Perú, condesa de Chinchón, pudo ser curada de la malaria mediante el uso de corteza de un árbol. Posteriormente, se trajo esta corteza a Europa, y el conocido botánico sueco Linneo le habría dado el nombre de “chinchona” a esta clase de árboles, y de ahí se habría modificado el nombre a quinina. De todos modos, parece más creíble que simplemente esta corteza de árbol fuera usada por los indios americanos, y posteriormente los jesuitas la traerían a Europa. Los ingleses usarían después el gin-tonic, ya que la tónica contiene quinina, como preventivo para la malaria (7).
- Insulina: a finales del siglo XIX era aún desconocido que la diabetes mellitus, una enfermedad común, tuviera la etiología hoy conocida, la de un defecto glandular. En 1889, el profesor von Mering le pidió a su asistente en la Universidad de Estrasburgo, Minkowski, que extirpara el páncreas de un perro para un estudio de la absorción posterior de grasa intestinal. El perro comenzó a mostrar un aumento considerable de hambre y sed, a la vez que su orina atraía a las moscas, y un análisis posterior comprobó que la muestra contenía un claro exceso de glucosa. Años después, Banting y Best comprobaron que la administración de extracto de páncreas aliviaba los síntomas de la diabetes, descubriéndose así el sustrato de la insulina.

- La anestesia tuvo también un descubrimiento serendípico, cuando Wells asistió a una representación en el famoso circo Barnum, en la que se ofrecía una actuación con el ya conocido gas hilarante, que producía risas incontroladas. En ella, un participante sufrió una aparatosa herida, pero aparentemente no sintió dolor tras haber inhalado el gas. Wells, que era dentista, reconoció al momento su posible relevancia médica y comenzó entonces su aplicación en su consulta. Después de varios fracasos experimentales, se demostró en 1846 su uso como anestésico en operaciones quirúrgicas (8). En esta misma referencia, Cannon cita más ejemplos como son los descubrimientos de la regulación vasomotora del sistema nervioso por Bernard, la anafilaxia por Ricetto el descubrimiento de la vitamina K por Dam.

Asimismo, el refresco más consumido y conocido mundialmente, la Coca-Cola, tiene también un origen serendípico. Fue patentada en 1886, como “Pemberton’s French Wine Coca”, para propósito medicinal, como un estimulante tónico y nervioso y un posible remedio para los dolores de cabeza. Este derivado de la zarzaparrilla española llegó a ser más tarde el refresco más consumido del mundo y de siempre.

Sea como fuere, no se discute ya actualmente la importancia de los descubrimientos serendípicos y, sin embargo, en gran medida, sigue siendo una gran incógnita ya que, al menos de momento, el ser humano no puede controlarla ni producirla. Con todo, presenta una gran historia, llena de colorido y multitud de anécdotas. Ya en 1674 Robert Hooke, por algunos calificado como el azote de Newton -por las veces que le enmendó la plana-, aludía, aunque sin citarla, pues no conocía el término que se acuñó años más tarde, a la importancia de la serendipia en la investigación avanzada. En efecto, Hooke describía la invención como “sólo un golpe de suerte del azar”. Y escribió: “Descubriremos rápidamente que el número de observaciones e invenciones considerables recopiladas de esta manera superará cien veces a las que se encuentran intencionalmente”. (9). Lo más curioso del caso es que el propio Hooke fue beneficiario de la serendipia sin ser consciente de ello, y no reconoció su importancia. Así ocurrió cuando buscando el “paralaje” estelar se dio de bruces, serendípicamente, con la aberración astronómica. Se define “paralaje”, del griego cambio o diferencia, como el cambio aparente de la posición de un objeto que ocurre al mirarlo desde dos posiciones distintas. En astronomía, paralaje es la desviación angular de la posición aparente de un astro, dependiendo del punto de vista, elegido para observarlo. La importancia de la paralaje en la época de Robert Hooke era debida a que resultaba ser un experimento crucial para dilucidar cuál de los dos sistemas del mundo el geocéntrico, de Ticho Brahe, o el heliocéntrico de Copérnico, era correcto. El término aberración es polisémico hasta el punto de que el DRAE da varias explicaciones distintas del mismo. En astronomía, es el desvío aparente de los

astros, resultante de la combinación de la velocidad de la luz con el movimiento de la Tierra.

Quién sí lo aprovechó fue, años más tarde, en 1727, James Bradley (10). En 1775, Priestley corroboró la conclusión de Hooke al establecer que “se debe más a lo que llamamos azar, es decir, filosóficamente hablando, a la observación de acontecimientos que surgen de causas desconocidas, que a cualquier diseño adecuado o teoría preconcebida”(11).

En un sentido similar, Bridgman (12), comentaba: “Cuán rara vez el curso del desarrollo científico está determinado por factores que son bastante fortuitos en cuanto a cualquier conexión con el propósito humano inmediato”. Opinión que comparte Merton (13): “Será una profesión de fe bastante humillante, ya que atribuyo un papel considerable al azar”. Asimismo, Michel de Montaigne atribuía los éxitos en medicina principalmente a la buena fortuna (14). Por su parte, Root-Berstein (15) pensaba que la invención era guiada por la intención, pero el descubrimiento por la sorpresa. Harwitt, tras examinar 43 fenómenos cósmicos, concluyó que aproximadamente la mitad tuvieron lugar de una manera serendípica (3).

TIPOS DE “SERENDIPIA”

Los descubrimientos pueden tipificarse, que no clasificarse, como sigue:

1. No serendípicos, aquellos en los que se encuentra lo que se busca. A su vez, se dividen en:

a. Puros: Se busca X y se encuentra X, sin más. La inmensa mayoría de los descubrimientos son de este tipo.

b. Pseudoserendípicos: Se busca X y, por “chiripa”, se encuentra X. Por ejemplo, el principio de Arquímedes y la penicilina por Fleming. Sería un descubrimiento, casual, de una solución concreta a un problema que ya se estaba investigando. Posteriormente se describen estos dos descubrimientos, que justifican esta categoría pseudoserendípica.

2. Serendípicos: Se busca X y fortuitamente se encuentra Y, que no se buscaba y es tan bueno o mejor que X. Se subdividen en:

a. Puros: Se busca X y se encuentra Y. Por ejemplo, el descubrimiento de América. La mayoría de los descubrimientos serendípicos citados previamente son de este tipo.

b. Con “propina”. Se busca X y se obtiene X e Y. Por ejemplo, el computador. Dentro de este tipo de serendipia hay algún caso, en que la propina es múltiple, como es el caso

de la ecuación de Dirac, donde además de encontrar la ecuación del electrón, lo buscado, se encontró: la explicación del spin y el momento magnético de la partícula, la antimateria y la explicación de la teoría de campos.

Para probar lo aquí afirmado, forzoso es tener en cuenta el descubrimiento de la penicilina por Fleming. Ésta es, de forma resumida, su historia, tal y cómo la contó él mismo (16): “Se hicieron dos subcultivos de esos mohos (que habían aparecido fortuitamente sobre una placa que contenía bacterias), así como experimentos para descubrir las características de esa sustancia bactericida que se estaba formando claramente en el cultivo de los mohos y que se estaba difundiendo en el medio (nutritivo). Encontrándose que el caldo de cultivo en el que el moho había crecido adquirió sorprendentes características bacteriostáticas, bactericidas y bacteriolíticas, para muchas de las bacterias patógenas más frecuentes. Sospechando que eso podía ser un antiséptico que sería eficaz para aplicar o inyectar en las regiones afectadas por microbios sensibles a la penicilina.” Posteriormente, en su Nobel Lecture del 11 de Diciembre de 1945, dijo: “El trabajo que había sido llevado a cabo tras largo tiempo acerca del antagonismo (entre mohos y antisépticos) no tuvo influencia alguna sobre la invención de la penicilina. Esto fue el resultado de un incidente dichoso que se produjo cuando yo trabajaba acerca de un problema puramente académico, que nada tenía que ver con el antagonismo oponiendo los mohos a los antisépticos. En mi primera publicación yo habría podido decir que había llegado a mi conclusión de forma metódica, que suponía que había sustancias bactericidas producidas por los mohos, y que había comenzado a estudiar el problema. Eso hubiera sido falso y preferiría decir la verdad: que la penicilina había nacido de una observación accidental. Mi único mérito es que no desdeñé la observación y que abordé el problema como un bacteriólogo.” (17). El único testigo del “incidente” fortuito, Pryce, tiempo después (18) corroboró ese relato como sigue: “Él tomó el cultivo, lo observó y tras un rato dijo escuetamente: es curioso. Lo que me sorprendió es que no se contentó solamente con mirar, sino que actuó inmediatamente. La mayor parte de nosotros observa algo, siente que puede ser importante, pero permanece instalado en el asombro.”

Las palabras del propio Fleming muestran que él buscaba lo que ahora se denomina un antibiótico. Más aún, pues realmente él previamente había ya encontrado también fortuitamente uno, la lisozima, pero dicho antibiótico sólo era eficaz contra microorganismos no patógenos. Más aún, el 4 de septiembre de 1945, en una conferencia ante la Academia de Medicina de Lyon, Fleming afirmó que el verdadero descubridor de su moho había sido el francés Duchesne cuyos experimentos con cultivos de penicillium” habían sido publicados a finales del siglo XIX y dado a la luz cincuenta años después por un bibliotecario. Fleming añadía: “Mientras yo he descubierto los efectos antibacterianos del Penicillium por casualidad, Duchesne

había llegado a ellos mediante una investigación metódica.” En efecto, en 1896, el estudiante de medicina francés Clement Duchesne, mostró nítidamente la acción antibacteriana del “Penicillium”. Duchesne, había ingresado, con 20 años, en la Academia de Medicina Militar de Lyon. Había leído los escritos de Pasteur y estaba dedicado al estudio de los microorganismos. Sabía que si una sola espora del hongo caía en un pedazo de pan húmedo, fruta podrida, queso o jamón, en pocos días se multiplicaba. Y que en otros lugares en los que era de esperar que los hongos prosperasen solían hallarse ausentes. De este modo, aunque las células de este hongo eran muy frecuentes en el aire, casi nunca se las veía, con el microscopio, en agua que hubiese sido añadida a cultivos bacterianos. Duchesne se preguntaba si las bacterias mataban a los hongos. Alentado por Gabriel Roux, director del “Instituto de Salud Pública”, se entregó a su tesis de investigación sobre el tema del antagonismo entre bacteria y hongo. Como sujeto de investigación eligió el hongo “Penicillium glaucum”.

Al inicio, Duchesne descubrió que la presencia de la bacteria en un medio en el que estaba creciendo el hongo conducía, generalmente, a la rápida desaparición de éste. A pesar de lo cual, conjeturó que tal vez en la lucha por la existencia entre hongos y bacterias, podrían darse ciertas condiciones en las que el hongo prevaleciera, ganando la partida. Llevando dicha conjetura al terreno experimental, Duchesne, cultivó Penicillium en un pedazo de alimento húmedo al que transfirió bacterias de la especie “Escherichia Coli”. A las pocas horas, examinó el hongo y descubrió que la bacteria había sido aniquilada. A continuación, inoculó cultivos virulentos de microorganismos patógenos como la susodicha Escherichia Coli y bacterias tifoideas en conejillos de Indias, y luego inyectó a la mitad de los animales caldo nutritivo en el que había crecido el “Penicillium”. Sorprendentemente, al día siguiente, los animales a los que se les había suministrado el caldo estaban vivos, y los no inyectados muertos. Al parecer, el crecimiento de las bacterias en los animales había sido inhibido mediante el extracto crudo del hongo representado por el caldo. Un año después de iniciadas sus investigaciones, en 1897, Duchesne las describió en una tesis doctoral de 56 páginas (19). En ella señalaba que, desde sus tiempos de estudiante, apenas si había tenido ocasión de realizar unos pocos experimentos, y que, en cualquier caso, su trabajo debería repetirse y confirmarse. Y añadía que una investigación más profunda podría llevar a nuevos avances cuya aplicabilidad directa de higiene y terapia profilácticas quedaría de manifiesto. El 17 de diciembre de ese año, 1897, Duchesne obtuvo su doctorado y entró en la sanidad militar suspendiendo su actividad investigadora. Cinco años después, 1902, contrajo una enfermedad pulmonar, probablemente tuberculosis, que con altibajos, el 30 de agosto de 1912, lo llevó a la tumba. Sin duda, sin esa muerte prematura, con probabilidad rayana en la certeza, el descubridor de la penicilina hubiera sido él. Ambos, Fleming y Duchesne, tuvieron un predecesor el inglés John Tyndall (1820-1893), quién, siguiendo los trabajos de refutación de la

generación espontánea, mostró en 1874 la acción antibacteriana del *Penicillium glaucum*. Su informe fue leído ante la Royal Society of London en 1876 y publicado como monografía en 1881(20). Sin embargo, Tyndall no prestó la debida atención a sus observaciones y no intentó determinar el mecanismo de la acción que había descubierto.

Hay un caso de pseudoserendipia en medicina que no ha sido muy comentado como tal. Uno de los autores de este artículo tuvo conocimiento de este tema por una carta personal enviada a él por el mismo autor del descubrimiento, el médico australiano Barry Marshall, que obtuvo el premio Nobel de Fisiología y Medicina por el descubrimiento de la relación directa que existe entre el *Helicobacter Pylori* y la úlcera gástrica. En esta carta Marshall describía cómo, al investigar diversos aspectos de la úlcera gástrica a través de búsquedas de artículos relacionados, en Medline, aparecieron varios de ellos que mencionaban el *Helicobacter pylori* en casos de úlcera gástrica. Marshall escribió una comunicación sobre este tema y quiso publicarlo en una conferencia local; pero sorprendentemente, -o no tan sorprendentemente ya que la hipótesis principal existente en aquel tiempo relacionaba la úlcera gástrica con el estrés, y la aparición de una bacteria no resultaba convincente por la falta de datos concluyentes-, esa publicación fue una de las pocas que no fueron aceptadas en esa conferencia. Ante esta situación, Barry Marshall decidió ingerir una muestra con *Helicobacter pylori*, que le produjo una úlcera gástrica que luego tuvo que ser tratada con antibióticos, mostrando en este caso singular esta posible relación, luego confirmada en múltiples investigaciones posteriores. Este ejemplo muestra también la importancia de no confundir correlaciones con relaciones causales, ya que antes de este descubrimiento todos los datos existentes en la casuística del tema parecían indicar la relación directa entre estrés y úlcera gástrica. De repente la aparición de esta bacteria, el *Helicobacter pylori*, hizo que esta hipótesis fuese automáticamente modificada, para indicar la relación causal directa entre la bacteria y la úlcera gástrica. Inmediatamente después del descubrimiento de Marshall, los mismos datos que apuntaban al stress como causa ahora confirmaban la etiología bacteriana. Nota: no ha sido la primera vez que un investigador experimenta consigo mismo una hipótesis científica, ¡pero el elevadísimo número de fracasos, y sus consecuencias, sugieren que este método de experimentación no es el más adecuado!

Hay otros tipos posibles de descubrimientos indirectamente relacionados con la serendipia, pero que realmente no pueden ser llamados como serendipia pura o incluso pseudoserendipia. Un ejemplo sería cuando uno encuentra -por casualidad o sin ella-, no un fenómeno aún no descrito antes, sino a otra persona que ha descubierto algo o generado una hipótesis que puede conducir a toda una nueva investigación científica, pero que no se ha percatado de su relevancia en la misma u otra área científica. Hay múltiples ejemplos, algunos llamativos. Así, en 1925, un joven Norbert Wiener, padre de la Cibernética, impartió una conferencia

en la Universidad de Göttingen, Alemania, sobre los estudios que había hecho sobre la armonía musical -la vibración de una cuerda de una guitarra como ejemplo, en frecuencia y duración en el tiempo- y cómo la precisión en el tono implicaba una cierta vaguedad en la medición del tiempo, y viceversa. Aunque Wiener mismo era un gran experto en mecánica cuántica, en esa conferencia estaba Werner Heisenberg, que posteriormente, en 1927, habría comprendido la relevancia de la presentación de Wiener y, trasladando el concepto a la mecánica cuántica, describía su famoso Principio de Indeterminación. Este describe cómo no es posible medir a la vez la posición y momento de una partícula en el nivel cuántico, usando el mismo tipo de razonamiento que había usado Wiener, sin citarlo (21), cometiendo posiblemente así el “quasiplagio” que podríamos denominar “nostrificación”. Este término, adaptado del alemán “nostrifizieren”, y propuesto para su inclusión en el DRAE por los autores y otros colegas, se usaba en las universidades alemanas para hacer suyos los títulos otorgados por otras universidades también alemanas. Un competidor de Einstein, Max Abraham, que fue quien lo popularizó, lo usaba para señalar a quienes tomaban una idea, teoría, procedimiento, etc., ajeno y lo modificaban justamente lo suficiente para que pareciera propio, por lo que tiene matices diferentes al término castellano “apropiación”. Se ha propuesto repetidamente que el propio Einstein habría sido, él mismo, un nostrificador, lo que paradójicamente él mismo denunció al gran matemático David Hilbert, en relación a su Teoría de la Relatividad General. David Hilbert había escuchado en una conferencia la investigación que Einstein estaba haciendo para encontrar esta teoría, y Hilbert pensó él mismo en buscar la solución por métodos matemáticos, no experimentales, que encontró sólo unos pocos días más tarde que el propio Einstein, en una carrera científica histórica (22).

Hay múltiples ejemplos de este tipo de sucesos en la ciencia, cuando un despierto científico escucha o lee a otro científico -muchas veces de otras áreas científicas- que no ha sido consciente de la importancia de lo que ha comentado en una conferencia o artículo y lo aprovecha para su propio trabajo. Aunque hay en estos casos un componente mayor de “nostrificación” -hacer de uno mismo, o de varios, lo que es originalmente de otros, en resumen de un tema muy amplio en ciencia-, que la propia casualidad de coincidir en un momento y tiempo concreto con otra persona que ha hecho una observación que va a ser clave posteriormente. Otro ejemplo de nostrificación puede ser el famoso artículo sobre la teoría de la relatividad especial de Einstein, de 1905 (23), que olvida incluir referencias concretas de otros científicos como Poincaré, Lorentz, etc, sin los cuales no habría podido escribir su artículo. Se cita muchas veces la literaria historia de Einstein paseando e imaginando cómo la luz pasa por los árboles y cómo él, ya desde adolescente, imaginaría espacios curvos y paradojas de gemelos viajando en naves espaciales en el tiempo, pero más bien se debería pensar en su imaginación encendida por las lecturas de otros científicos previos.

Richard Feynman cuenta frecuentemente en sus numerosos libros y artículos cómo la observación de eventos cotidianos constituía frecuentemente el origen de sus investigaciones, aunque su colega Murray Gell-Mann -anteriormente amigo, no después, como se adivina fácilmente por este comentario- se refería, por ejemplo, a los famosos diagramas de Feynman como diagramas de Stückelberg, por el físico que fue el primero en idear una notación similar (24). El mismo Feynman sugería la influencia que Stückelberg tuvo en sus trabajos y recordaba con tristeza la falta de reconocimiento que había tenido por sus brillantes trabajos, que inspiraron a otros físicos de renombre. Stückelberg, de nombre Johan Melchior Ernst Karlo Gerlach (1905-1984), es un caso singular ya que sus avances en física teórica dieron como fruto varios Premios Nobel -que él no recibió-, entre ellos los de Hideki Yukawa, Schwinger, SinItiro, Feynman y Wilson. Un caso muy similar reciente es, tristemente para la Ciencia española, el de Francisco Martínez Mojica. Al estudiar la vida microbiana en los ambientes de extrema salinidad de Santa Pola, realizó un descubrimiento serendípico al intuir que grupos de bases repetidas y agrupadas (de ahí las siglas CRISPR en inglés), entre los millones de bases que componen un genoma bacteriano, podían significar algo para la biología de las bacterias (25). Este descubrimiento fue luego usado por Jennifer Doudna y Emmanuel Charpentier para crear las herramientas de edición genética que les valieron el Premio Princesa de Asturias en 2015 y el Premio Nobel de Química en 2020. Merecidos premios, pero que muchos consideran que seguramente deberían haber sido compartidos con el investigador ilicitano.

Otro ejemplo que se menciona a veces como serendípico es el de Watson y Crick con el descubrimiento de la estructura del ADN, pero la realidad fue que conocieron que una mujer colega, Franklin, había realizado una radiografía de un fragmento de ADN -radiografía que pudieron ver sin el permiso de Franklin, por cierto- en la que se podía intuir su estructura helicoidal. Se ha mencionado frecuentemente a Franklin y la “nostrificación” que hicieron Watson y Crick de su trabajo, pero también el sufrido becarío que ayudaba a Franklin en la realización de estas radiografías -probable causa del cáncer que acabó trágicamente con la vida de Franklin- es aún más frecuentemente olvidado en esa revisión de la historia.

UNA CONJETURA SOBRE LAS BASES Y LOS MECANISMOS DE LA SERENDIPIA

Los paseos por cualquier lugar y la observación de fenómenos singulares, es algo que le ocurre directamente y con frecuencia a muchas personas, pero el reconocimiento de esta singularidad y la importancia de esa observación casual es algo reservado a unos pocos.

Leo Szilard, uno de los grandes de la física del siglo XX, fue el primero en describir el concepto

“información” tal y como se conoce actualmente en ciencia y tecnología. En 1933, Szilard asistió a una conferencia de otro gran físico, Ernest Rutherford, en la que éste había desechado la idea de que pudiese generarse una gran cantidad de energía de los átomos. Al salir de la conferencia Szilard se paró en un semáforo -hoy famoso por este hecho- cerca del British Museum en Londres. Al cambiar la luz del semáforo al color verde, una idea inmediatamente surgió en su cabeza, pensando en que, si fuese posible encontrar un elemento químico que, bombardeado por un neutrón pudiese liberar dos neutrones, esto llevaría a una reacción en cadena que liberaría cantidades enormes de energía (26). Poco tiempo después patentó la idea, aunque ni americanos, japoneses, rusos o alemanes le pagaron nada por su uso ni le pidieron permiso al intentar fabricar la primera bomba atómica.

El madrileño maestro de canto Manuel García Jr, hijo del cantante favorito del compositor italiano Gioachino Rossini y hermano de la mítica soprano María Malibrán, caminaba un día por un parque cuando observó el reflejo de la luz en unos árboles cercanos, e imaginó lo que podría ser el uso de espejos para observar la laringe de los cantantes a los que daba clase. Esta idea le llevó a la construcción del primer laringoscopio realizado con éxito y que fue publicado por el autor en los Proceedings de la Royal Society de Londres (27), llevando al inicio pionero de la otorrinolaringología moderna. La revista JAMA publicó en 1905 (28) una reseña del homenaje que se había realizado a Manuel García, ya centenario, por este descubrimiento pionero. También hay que decir que los editores de la revista, en tiempos modernos, han olvidado este hecho publicado en su misma revista y niegan esta autoría pionera del maestro madrileño, como los autores han podido comprobar en una comunicación reciente enviada a JAMA.

El nacimiento de la informática médica puede considerarse fruto de una casualidad, que también podría tipificarse como pseudoserendípica. Diversos médicos, que trabajaban en hospitales de Salt Lake City, Ginebra y Boston, observaron en sus recorridos rutinarios de los hospitales en que trabajaban, las unidades de Informática que acababan de ser situadas -en los años 1960- en salas alejadas de la parte clínica o de laboratorios. Allí pudieron ver los computadores que se habían comprado por los gestores económicos para manejar las estadísticas y gestiones financieras de los hospitales. Al sentir la curiosidad de conocer para que servían esos dispositivos, tan caros y enormes en aquel tiempo, y preguntar por su finalidad, obtuvieron una respuesta similar: “estos computadores se usan para manejar grandes cantidades de datos y hacer cálculos complejos”. Seguramente otros muchos hicieron la misma pregunta y pasaron sin más, pero ellos inmediatamente pensaron en las posibilidades que habría para su uso en la investigación médica, ya que en su trabajo científico previo tenían precisamente grandes problemas al tener que manejar grandes cantidades de datos, cuya solución encontraron en el uso de computadores. Esos fueron los casos

de los pioneros del área Jean Raoul Scherrer, en Ginebra, de Octo Barnett en el Massachusetts General Hospital de Boston, y de Homer Warner en la University of Utah. Estos tres investigadores contaron a los autores, muchos años después, cómo había sido este primer encuentro de cada uno de ellos, que marcaría el inicio de toda una disciplina científica, que ha acabado siendo una especialidad médica en países como los Estados Unidos.

investigación serendípica -particularmente en la pseudoserendípica-. En efecto, estas neuronas inconscientes habrían estado continuamente activas en los científicos que realizaron estos descubrimientos, y ante un fenómeno habitual, que no hubiese llamado la atención en la mayoría de personas de la calle, e incluso investigadores, habría desencadenado otra activación neuronal consciente. Un ejemplo es el famoso “¡Eureka!” de



Figura 1. Uno de los autores (VM) con dos de los pioneros de la informática médica, Homer Warner y Reed Gardner, en Salt Lake City (2011)

Las investigaciones realizadas en el siglo XXI sobre mecanismos cerebrales inconscientes y automáticos han recordado las ideas premonitorias de Freud sobre estos procesos inconscientes, propuestas hace un siglo. El Nobel Eric Kandel reconsideraba esa propuesta de Freud, recordando la existencia de un inconsciente -no reprimido, contrariamente a la concepción psicoanalítica clásica de Freud- que constituye una actividad cerebral de una importancia mucho mayor a la que se ha considerado hasta hace poco, al no estar focalizada en impulsos instintivos ni conflictos psicológicos ocultos a la consciencia (29). Estos mecanismos inconscientes serían clave en numerosas tareas rutinarias, hábitos y habilidades perceptivas y motoras, que requieren memoria implícita. Pese a no estar sujeto al tipo de represiones y complejos sexuales a los que se refería Freud en su teoría psicoanalítica, el inconsciente implícito no es accesible directamente a la conciencia -de ahí, por ejemplo, la limitación de educir todo el conocimiento de expertos para construir sistemas de Inteligencia Artificial basados en el conocimiento-.

Aquí se propone la conjetura siguiente: el papel de estas neuronas inconscientes sería clave en la

leyenda, gritado por un Arquímedes que estaba concentrado en resolver el problema planteado por el rey Hierón II para averiguar cómo calcular la proporción real de oro en la corona que un joyero artesano le había entregado, y así descartar que le hubiese estafado. Al introducir su cuerpo en una bañera para darse un baño, como habría pasado millones de veces antes en tantos humanos, Arquímedes habría observado con atención el fenómeno que se producía, desplazando el agua con su cuerpo, descubriendo así la base del Principio físico que posteriormente describiría y lleva su nombre. Una actividad inconsciente, continua, habría propiciado ese descubrimiento. Son incontables los casos musicales en los que músicos afirman haber soñado célebres composiciones musicales durante ese periodo de descanso, particularmente en una primera fase del sueño, como Paul McCartney de The Beatles con sus célebres Let it be y Yesterday, Keith Richards de The Rolling Stones con su Satisfaction, o Tchaikovsky que contaba que no podía dormir, asediado por la música que su cerebro continuamente creaba. Kandel describía la actividad de estas neuronas inconscientes en los procesos creativos

en las artes visuales, que nosotros hemos trasladado al ámbito de la música en otra publicación reciente (30).

Esa actividad inconsciente continua en personas que buscan solucionar problemas -Fleming con investigaciones biológicas antibacterianas, Szilard en la mecánica cuántica, Manuel García con el estudio de la laringe de sus alumnos de canto- habría propiciado ese “relámpago creativo”, esa actividad cerebral desencadenada súbitamente ante la observación de un fenómeno, que llevaría posteriormente al descubrimiento científico.

¿Cuál sería entonces el mecanismo lógico de ese proceso serendípico o pseudoserendípico que se produce en esos pocos, geniales científicos de aparente intuición o suerte, pero siempre predispuestos a concentrar su atención en fenómenos ocasionales que otros ni siquiera considerarían? El tipo de razonamiento lógico habitual en las ciencias naturales es el inductivo.

Ante una serie de observaciones $O_1, O_2, O_3, O_4 \dots O_n$, se elabora una regla inductiva R , que engloba estas observaciones. Esta regla será válida hasta que aparezca otra observación que la invalide, haciendo necesaria la búsqueda de otra regla nueva, que pueda englobar esas nuevas observaciones. Como decía Bertrand Russell (31), un pollo puede hacer un proceso de razonamiento inductivo después de que observe que cada día por la mañana el granjero le da comida, y ese proceso se repita durante dos meses. La regla inductiva sería “el granjero me da comida todas las mañanas”, que se probará como cierta durante un tiempo posterior, hasta que un buen día el granjero coge el pollo, lo mata y se lo come, invalidando la regla, y apareciendo otra nueva, más precisa: “el granjero le da comida al pollo todas las mañanas hasta que un día lo mata y se lo come”.

De este modo en las ciencias naturales no existirá la verdad absoluta sino que habrá una búsqueda continua de la verdad, sin poder estar nunca seguros de que se llega a una verdad definitiva. Por otra parte, el razonamiento deductivo, utilizado también en la ciencia, por ejemplo, en procesos de clasificación como es el caso del diagnóstico médico, se tiene una proposición que se conoce que es cierta ($p \rightarrow q$) -o un conjunto de ellas- y entonces ante la aparición del hecho P , puede deducirse Q . En el diagnóstico médico, el profesional médico evalúa las diferentes hipótesis existentes, basándose en sus conocimientos y experiencia, pide una serie de pruebas, y al final elabora el diagnóstico más plausible, descartando otras hipótesis más inciertas. El problema en la ciencia es que esta proposición, o el conjunto de ellas, es raramente seguro que sea cierta -salvo en el caso de las matemáticas, donde puede demostrarse su certeza, en contextos matemáticos específicos- mientras que en el caso por ejemplo de los diagnósticos médicos habrá una incertidumbre asociada a ella.

En un tercer tipo de razonamiento, denominado abductivo, uno se encuentra con la aparición de un hecho Q , y podrá abducir que la causa de esta

será ese hecho P , con el que se puede construir esa regla $p \rightarrow q$. En inteligencia artificial ha habido numerosas investigaciones basadas en el razonamiento inductivo y el relacionamiento deductivo, pero ha sido más complicado la modelización y formalización del razonamiento abductivo (32).

Una conjetura que es posible aventurar sobre la base del razonamiento utilizado en el descubrimiento serendípico es que la investigación científica normal en las ciencias naturales se basaría en el razonamiento inductivo, pero el descubrimiento serendípico o pseudoserendípico tendría un componente diferente, con mayor peso del razonamiento abductivo, que se ha asociado tradicionalmente también con la formación de hipótesis científicas y la creatividad artística, por ejemplo. Ante una observación concreta, inesperada, que no coincidiría con el conocimiento científico existente en un momento concreto, la mente abierta del descubridor serendípico, elaborará una nueva hipótesis, insospechada hasta entonces, que llevará posteriormente por él -u otros, como fue el caso de Fleming, ya que el descubrimiento que él hizo del penicillium en las muestras contaminadas, tuvo que esperar hasta la Segunda Guerra Mundial para que otros equipos de bioquímicos aislase la penicilina para su uso médico, tan necesario en ese periodo bélico.



Figura 2. Primera radiografía médica realizada por Wilhelm Röntgen mostrando la mano de su esposa Anna Bertha Ludwig. Wikimedia Commons.

Como anécdota, un descubrimiento serendípico puede implicar que el científico sea inmediatamente consciente de su importancia potencial, pero no de sus consecuencias secundarias -¿o sí?. Röntgen descubre los Rayos X en su laboratorio pero la primera prueba que realiza para probar su posible aplicación médica la hizo con la mano de su mujer, con varios experimentos que implicaban una alta exposición de ella a los Rayos X, con efectos difíciles de predecir en ese momento. También hay una radiografía conocida que hizo Röntgen de la mano del histólogo Kolliker -también recordado porque fue la primera figura de la medicina que reconoció la importancia de los descubrimientos neuronales de Ramón y Cajal. También Jenner, que tenía varios hijos, hizo el primer experimento de su vacuna con el hijo de su jardinero, o Leonardo Da Vinci renunció al orgullo de poder ser el primer hombre en volar dejando la prueba de su artilugio volador a algún otro confiado probador.

¿INTELIGENCIA ARTIFICIAL + SERENDIPIA = SERENDIPIA ARTIFICIAL?

Desde el año 1956 -año “oficial” de inicio de la Inteligencia Artificial (IA)- se ha propuesto en numerosas ocasiones que la IA podría realizar todo tipo de tareas cognitivas que realizan los seres humanos. Entre estas se puede destacar la memoria, razonamiento lógico, planificación, búsqueda de información, manejo del lenguaje, etc. Posteriormente ya se empezaron a sumar diversas propuestas más complejas acerca de cómo los sistemas de IA podrían plantear ideas creativas artísticas, por ejemplo, en literatura, música o pintura, por ejemplo- o realizar descubrimientos científicos. En los últimos años, el desarrollo de sistemas del llamado “Deep Learning” y de la IA generativa plantea también la posibilidad de que estos sistemas acaben creando nuevas hipótesis, obras artísticas, descubrimientos científicos, incluso si en la actividad o planificación de sus desarrolladores no había sido diseñado así. Estos sistemas de IA generativa comienzan a tener comportamientos autónomos inesperados (33), que pueden ser incluso peligrosos -como engañar a sus diseñadores o tener iniciativas propias no previstas-, que serían una de las posibles consecuencias futuras de la propia complejidad -creciente, casi mes a mes- de estas redes profundas, con cientos de capas de neuronas artificiales, que acabarían teniendo comportamientos emergentes no previstos en un principio en su diseño original.

La enorme cantidad de datos de los que puede disponerse en múltiples áreas, y la medicina es solo un ejemplo de ello, ha favorecido la creación de bases de datos gigantescas. Colaboradores de los autores trabajan en proyectos en los que manejan datos de cientos de millones de pacientes para selección de candidatos a ensayos clínicos. Estas bases de datos se amplían hasta el punto que es previsible que toda la población humana esté incluida en un tiempo cercano en estas bases de datos, consciente

o inconscientemente. Cuando uno acepta sin más las “cookies” asociadas a las comúnmente llamadas “apps” o a páginas Web concretas, o acepta asimismo el contrato que casi nadie suele leer al descargar estas apps, está poniendo sus datos a disposición de la empresa que ha creado esta aplicación. Obviamente estos datos pueden ser usados para el propio beneficio de la empresa -económico, social, incluso político, como ha pasado con el caso de uso de información de votantes estadounidenses que tenían información personal en Facebook, que fue aprovechada por otra empresa para la primera campaña presidencial de Donald Trump en Estados Unidos, que finalmente llegó a ser presidente. Estas enormes bases de datos facilitan la búsqueda de correlaciones que pueden tener también un gran interés científico o médico. Es sabido que las correlaciones no implican una relación causal, pero pueden ser el inicio de generación de una hipótesis o conjetura que puede ser posteriormente confirmada. De hecho, el primer sistema de aplicación de la IA con éxito, el sistema experto DENDRAL, tenía como meta la generación de hipótesis científicas partiendo del conocimiento y la información que manejaba, para el análisis de señales de espectrografía, el premio Nobel Joshua Lederberg (34)

El ejemplo antes comentado de Barry Marshall y la correlación que aparecía en un número de artículos científicos en Medline, entre el *Helicobacter pylori* y la úlcera gástrica, que luego él pudo sugerir como significativa, es un ejemplo. En un trabajo previo, uno de los autores, años antes de que apareciera ChatGPT, ya había usado con sus colaboradores un *Transformer* para analizar Pubmed completo para la búsqueda de ciertos tipos de información (35). Transformers son sistemas preentrenados de IA, capaces de realizar procesamientos muy complejos centrando su atención en un conjunto concreto de palabras en un texto, usados en sistemas como ChatGPT, cuya T viene de *Transformer*. Este uso de los *Large Language Models* (grandes modelos de lenguaje, en español) y *Transformers* de la IA generativa para analizar conjuntos de datos gigantescos como los de Pubmed, puede favorecer muy pronto la posibilidad de generar un alto número de hipótesis y conjeturas, algunas de las cuales podrían ser comprobadas o descartadas por científicos que usan estos sistemas de IA. Un sistema como DeepMind con AlphaFold de Google (36), que ha conseguido predecir la estructura tridimensional de cientos de miles de proteínas, había sido premiada con el premio Lasker, que suele ser anticipo del Premio Nobel, y que en efecto consiguieron sus autores en Octubre de 2024. Asimismo, sólo un día antes Hopfield y Hinton consiguieron el Premio Nobel de Física por sus avances en las redes de neuronas artificiales, también de IA, y es posible anticipar que haya en un futuro cercano un premio Nobel de Fisiología y Medicina concedido a una investigación que haya sido fuertemente apoyada, o incluso basada, en una propuesta realizada con IA gracias a sus capacidades de análisis masivo de datos en áreas como la medicina.

Las “alucinaciones” mismas, que son efectos no deseados de las preguntas -los llamados “prompts”

que se hacen a un sistema de IA Generativa, tipo Chat GPT, con respuestas erróneas o incluso disparatadas, no son más que el resultado de los cálculos probabilísticos que el sistema hace para encontrar una respuesta adecuada al generar el texto de respuesta, calculando las palabras que deben ir conjuntamente en las frases de esa respuesta. Estas respuestas pueden parecer absurdas en muchas ocasiones, pero se basan en un cálculo probabilístico, y no es posible descartar tampoco que alguna de estas muchas alucinaciones pudiera tener un significado mucho más profundo que un simple error. De hecho, anecdóticamente, la hipótesis planteada por Marshall al proponer la relación causal entre úlcera gástrica y *helicobacter pylori* ni siquiera fue considerada como plausible la primera vez que quiso presentarla en un congreso nacional. Muchas de las ideas que han cambiado la ciencia fueron originalmente consideradas como “ideas locas”, y no diferirían de algunas de las muchas alucinaciones que un sistema de IA generativa puede crear. Los mismos Einstein y Bohr solían desechar propuestas erróneas de otros científicos como “no suficientemente locas” para poder ser consideradas como posibles grandes descubrimientos científicos. Será entonces cuestión de que el científico esté despierto y atento a este inmenso número de alucinaciones para poder descubrir en ellas el equivalente a una observación que podemos realizar en el mundo real, y que lleve a propuestas de investigación basadas en esta aparente “Serendipia Artificial”.

CONCLUSIONES

En este artículo se han recogido numerosas historias y descripciones de sucesos y descubrimientos que han sido denominados serendípicos tradicionalmente, o más recientemente también como pseudo-serendípicos. A estas historias tradicionales se han añadido otras vividas por los autores con los científicos que las originaron. Asimismo, se ha indicado que muchas de estas casualidades aparentes podrían tratarse de préstamos no originalmente pensados por los investigadores originarios de los eventos y “nostrificados” por los investigadores posteriores.

Se han descrito también diversas conjeturas acerca de los mecanismos conscientes e inconscientes que podían subyacer a los descubrimientos en típicos que se han realizado, así como cuál sería el proceso lógico que podría seguir el cerebro humano para manejar este tipo de observaciones y descubrimientos. Esta es una aportación propuesta en el contexto actual del “boom” de la IA, particularmente de la que se denomina IA generativa. En este contexto se ha planteado en este artículo la posible aparición de situaciones futuras que se podrían denominar como “Serendipia Artificial”, en la conjunción entre Serendipia e Inteligencia Artificial, que llevaría a la creación de nuevas y numerosas hipótesis y conjeturas que podrán dirigir o ayudar en buena parte de la investigación científica de las próximas décadas.

DECLARACIÓN DE TRANSPARENCIA

Los autores/as de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Armeno C. Perigrinaggio di tre giovani figliuoli del re di serendippo. In: Enrico Cerulli. Una raccolta persiana di novelle tradotte a Venezia nel 1557. Atti della Accademia Nazionale dei Lincei: Memorie, classe di scienze morali, storiche et filologiche. 1975; ser. 8, vol. 18, fasc. 4.
2. Roberts RM. Serendipity: Accidental discoveries in science. New York: John Wiley; 1989.
3. Campanario JM. Using citation classics to study the incidence of serendipity in scientific discovery. *Scientometrics*. 1996; 37: 3-24.
4. <https://producciocientifica.uv.es/documentos/5ec464b4299952379f6e057a>
5. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-edward-jenner-e-ignaz-philipp-13126074>.
6. Donoso A, Neumann M, Arriagada D. Fortuna y Serendipia: Historia de algunos fármacos empleados en Cuidados Intensivos Pediátricos. *Andes pediátr*. 2022; 93(4): 591-598. doi: 10.32641/andespediatr.v93i4.4424]
7. Cannon WB. The way of an investigator: a scientist's experiences in medical research. New York: London: Hafner Publishing Company; 1965.
8. Hooke R. *Lectiones cutlerianae, or a collection of lectures: Physical, mechanical, geographical and astronomical: Made before the Royal Society on several occasions at Gresham College*. London: John Martin; 1679.
9. Bradley J. An account of a new discovered motion of the fixed stars. *Philos T R Soc*. 1729; 35: 637-661.
10. Priestley J. Experiments and observations of different kinds of air. London: J Johnson; 1775.
11. Bridgman PW. *The way things are*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press; 1959.
12. Merton RK, Barber EG. *The travels and adventures of serendipity: a study in historical semantics and the sociology of science*. Princeton, NJ: Princeton University Press; 2004.
13. Thiry-Cherques HR. Chance and fortune. *Organization*. 2004; 12(4): 590-600.
14. Root-Bernstein RS. *Discovering: Inventing and solving problems at the frontiers of scientific knowledge*. Cambridge, Ma: Harvard University Press; 1989.
15. Fleming A. On the antibacterial action of cultures of penicillium, with a special reference to their use in isolation of B Influenza. *Br J Exp Pathol*. 1929; 10(3): 226-236.
16. Fleming A. Penicillin. In: *Nobel Lectures. Physiology or Medicine, 1942-1962*. Amsterdam: Elsevier; 1964.
17. Hare R. *The birth of penicillin and disarming of microbes*. London: Allen et Unwin; 1970.

18. Duchesne E. Contribution à l'étude de la concurrence vitale chez les microorganismes: Antagonism entre moisissures et les microbes. Lyon: Alexandre Rey; 1897.
19. Tyndall J. Essays on the floating matter of the air in relation to putrefaction and infection. London: Longmans Green; 1881.
20. Conway F, Siegelman J. Dark hero of the information age: In search of Norbert Wiener, the father of cybernetics. Cambridge, MA: Basic Books; 2005.
21. Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Ann Phys. 1905; 17(10): 891-921.
22. Schweber, S. QED and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga. Princeton, NJ: Princeton University Press; 1994.
23. Jogalekar A. Leo Szilard, a traffic light and a slice of nuclear history. Scientific American. 2013, February 12.
24. García Tapia A. Manuel García: Su influencia en la laringología y en el arte del canto. Madrid: Moya; 1905.
25. Manuel Garcia and the laryngoscope. JAMA. 1905; XLIV(13): 1041.
26. Kandel Eric R. The age of insight: The quest to understand the unconscious in art, mind, and brain, from Vienna 1900 to the present. New York: Random House; 2012.
27. Maojo, V. Cerebro y música. Entre la neurociencia, la tecnología y el arte. Barcelona: EMSE EDAPP; 2018.
28. Russell B. Problems of philosophy. Oxford [etc.]: Oxford University Press. 1959.
29. Russell S, Norvig P. Artificial Intelligence: a modern approach. 4th ed. London: Pearson; 2020.
30. Park PS, Goldstein S, O'Gara A, Chen M and Hendrycks D. AI deception: a survey of examples, risks, and potential solutions. Patterns. 2024; 5(5): 100988.
31. Lindsay Robert K, Buchanan Bruce G, Feigenbaum Edward A and Lederberg Joshua. Applications of artificial intelligence for organic chemistry: The Dendral Project. New York: McGraw- Hill; 1980.
32. Rosado E, García-Remesal M, Paraiso-Medina S, Pazos A, Maojo V. Using machine learning to collect and facilitate remote access to biomedical databases: Development of the biomedical database inventory. JMIR Med Inform. 2021; 9(2): e22976.
33. Senior AW, Evans R, Jumper J et al. Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. Nature. 2020; 577(7792): 706-771.

Si desea citar nuestro artículo:

Maojo V, Pazos J. Serendipia y medicina, su historia, fundamentos y futuro: hacia una "serendipia artificial". An RANM. 2024;141(03): 248-258. DOI: 10.32440/ar.2024.141.03.rev06
