



DEPENDENCIA SENSIBLE A LAS CONDICIONES INICIALES: UN RASGO DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS CLAVE PARA ENTENDER EL DESARROLLO DE LA AUTONOMÍA INTELECTUAL

SENSITIVE DEPENDENCE ON INITIAL CONDITIONS: A COMPLEX DYNAMICAL SYSTEM'S KEY FOR THE UNDERSTANDING OF INTELLECTUAL AUTONOMY'S DEVELOPMENT

Ana María Trigueros Pina

Universidad Internacional de la Rioja, España

[[http://anamaria.trigueros@doctorado.unini.edu.mx](mailto:anamaria.trigueros@doctorado.unini.edu.mx)] [<https://orcid.org/0009-0009-8400-4087>]

Información del manuscrito:

Recibido/Received: 14/02/2025

Revisado/Reviewed: 20/05/2025

Aceptado/Accepted: 23/07/2025

RESUMEN

En las últimas décadas, equipos interdisciplinares del Santa Fe Institute de Nuevo Méjico, analizan las matemáticas que subyacen en la evolución de los sistemas dinámicos complejos. Gracias a la computación, podemos ver gráficamente una curiosa propiedad de estos: la dependencia sensible a las condiciones iniciales. Algunos aspectos matemáticos de la complejidad se han verificado con aproximaciones significativas en el ámbito de la física. Trasladar al comportamiento humano es una tarea todavía muy lejos de nuestro alcance: el nivel de complejidad es incomparablemente mayor y la libertad humana parece impedir cualquier pronóstico; sin embargo, varios autores apuntan hacia el estudio del psiquismo humano desde esta perspectiva. No esperamos verificar constantes matemáticas todavía, pero encontrar rasgos o patrones puede ser trascendental para que la mirada de los educadores comprenda los procesos complejos que se esconden tras la apariencia de linealidad del desarrollo humano. ¿Qué opinan los profesores sobre la dependencia sensible a las condiciones iniciales en el desarrollo de la autonomía intelectual? Con la ayuda del programa ATLAS.ti podemos tratar datos cualitativos y obtener relaciones entre ellos. ¿En qué medida el ser humano es marcado en el inicio? ¿qué factores pueden condicionar o revertir el proceso? Cientos de entrevistas a docentes y la opinión de algunos genetistas, parecen confirmar que el psiquismo humano se comporta como un sistema dinámico complejo. Un resultado esperanzador para el docente si esta dependencia va más allá del inicio y permite provocar un cambio significativo en la trayectoria educativa, incluso cuando ha sido marcada negativamente desde el principio.

ABSTRACT

In recent decades, interdisciplinary teams at the Santa Fe Institute of New Mexico, have analyzed the mathematics that underlies the evolution of complex dynamical systems. Thanks to computing, we can graphically see a curious property of these: the sensitive

Keywords:

sensitive dependence, intelectual autonomy, initial conditions.

dependence on initial conditions (SDIC). Some mathematical aspects of complexity have been verified with significant approximations in physics. Translating to human behavior is a task still very far from our reach: the level of complexity is incomparably greater, and human freedom seems to prevent any prediction; However, several authors point towards the study of the human psyche from this perspective. We do not expect to verify mathematical constants yet, but finding features or patterns can be transcendental for educators to understand the complex processes that hide behind the appearance of linearity of human development. What do teachers think about sensitive dependence on initial conditions in the development of intellectual autonomy? With the help of the ATLAS.ti program we can process qualitative data and obtain relationships between them. To what extent is the human being marked at the beginning? What factors can condition or reverse the process? Hundreds of interviews with teachers and the opinion of some geneticists, seem to confirm that the human psyche behaves as a complex dynamic system. A hopeful result for the teacher if this dependency goes beyond the beginning and allows for a significant change in the educational trajectory, even when it has been negatively marked from the beginning.

Introducción

Tradicionalmente se ha hablado de complejidad como cualidad de lo complejo, en el sentido de complicado; pero existe otra definición más profunda que procede de la epistemología y que, en palabras de César Merea, E. (2013, p. 26) “corresponde a una reacción de las ciencias humanas contra la paradójica simplificación en que habrían caído las ciencias duras, que, al ir descubriendo la complejidad de sus objetos de conocimiento, se fueron especializando y adquiriendo una visión reduccionista del mundo”. Las Ciencias de la Complejidad forman parte hoy de multitud de trabajos de investigación en todos los ámbitos en las últimas décadas. En las Ciencias de la Educación, varios autores enfocan la investigación considerando la importancia en la educación de tener en cuenta la multitud de variables que intervienen. Así se dice que la educación es un proceso complejo, en el sentido de *complicado*; pero no es esa la acepción que aquí se considera, sino que, se observa el proceso educativo desde la perspectiva, y teniendo en cuenta los procesos matemáticos que subyacen a los sistemas dinámicos complejos, con el propósito de comprender mejor el comportamiento humano, tantas veces paradójico, imprevisible, con crecimientos o desplomes marcados por crisis repentinas e inesperadas. Todo docente en su tarea se siente desconcertado, por la imprevisibilidad y sorpresa del desarrollo humano. Paradójicamente esto es esperanzador. Comprender que el ser humano puede sorprender y se resiste a ser encasillado impide todo diagnóstico definitivo por complicadas que sean las circunstancias; cada crisis puede desembocar en una discontinuidad, creciente o decreciente y la influencia del docente puede ser clave en este proceso. Aunque todavía la matematización del problema no se realiza en sentido estricto (apenas se han logrado resultados aceptables en las ciencias físicas donde, con el experimento de las bobinas de convección, se logró una aproximación bastante aceptable de la constante de Feigembau $\delta \cong 4'6692 \dots$ límite de las razones de la amplitud de los intervalos que se suceden en el camino hacia el caos); se buscan paralelismos entre los aspectos matemáticos de la complejidad y la evolución en el desarrollo de la autonomía intelectual del individuo. Numerosos autores incluyen la palabra complejidad en el campo de las Ciencias de la Educación: Puente Vigiola, I. (2020), hace un recorrido histórico desde el punto de vista filosófico; Joaqui Robles, D. y Ortiz Granja, D. N. (2020), tratan de enfocar la investigación educativa desde un aspecto holístico; Y en la misma línea González Carrasco, M. (2004); Fuentes Guevara, D. (2016), y muchos otros. Todos tratan de aplicar una visión eminentemente filosófica de la complejidad; de la misma manera que Morin, E. (2019), a lo largo de su trayectoria como filósofo de la complejidad. Todos miran al hombre como ser complejo en cuyo comportamiento confluyen multitud de variables que interactúan entre sí; pero todavía se está muy lejos de trasladar los resultados matemáticos de la complejidad al campo del psiquismo humano. Tratar de encontrar las constantes matemáticas universales que rigen la evolución de un sistema dinámico complejo en la evolución del comportamiento humano, es por ahora una utopía.

Sin embargo, algunos científicos de la complejidad: David Feldman (Santa Fe Institute), Robert Bishop, Stephen H. Kellert, entre otros, afirman que podríamos atrevernos a buscar paralelismos incluso en el ámbito humano, aunque no con resultados exactos y precisos. El presente estudio analiza similitudes entre las dinámicas observadas por los educadores y las propias de los sistemas dinámicos complejos. Como dice Feldman, D. (2023, *Introduction to Dynamical Systems and Chaos*, Unit 3.5, min 4:21), hay que contemplar el posible paralelismo “de la misma manera que contemplaríamos una caricatura representando una imagen real”. Es decir, buscando rasgos, patrones,

similitudes. Aunque este tipo de paralelismos matemáticos todavía no se ha establecido en las Ciencias de la Educación, por la dificultad de medir matemáticamente el comportamiento humano, en el presente estudio se trata de detectar semejanzas entre los rasgos topológicos de la dinámica compleja, las coincidencias en otras ciencias, y la percepción de los docentes sobre la evolución de sus alumnos. Se analiza un único aspecto matemático entre los que caracterizan los sistemas dinámicos complejos que puede tener enormes repercusiones en la mirada del educador: la dependencia sensible a las condiciones iniciales (SDIC). Una propiedad que se puede visualizar en términos matemáticos gracias a las ciencias de la computación. (Tablas 1 y 2)

Por otra parte, y muy importante para el tema de la investigación, explica Feldman, D. que esta sensibilidad, se mantiene a lo largo de todo el recorrido en la sucesión recurrente que modeliza el paso del tiempo para un sistema dinámico, representada entre otras similares mediante la función $x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$. Feldman afirma que, un sistema que tiene dependencia sensible a las condiciones iniciales, se comporta como si todo momento fuera un momento decisivo:

At every moment, the future trajectory is poised between those possible different futures, and the difference between those is a tiny little flap of gust of wind from a butterfly flapping its wings [...] so it's this continuous sensitivity where at every point along the journey a tiny change can make a big change later on and there is no way to know what those changes will be. (2023, Unit 3.3, V.5, min 3: 27)

Método

Para la presente investigación se utiliza una metodología mixta que combina por un lado la hermenéutica en el análisis de la literatura referente a los posibles campos y modos de aplicación de la perspectiva compleja, a la que se suma, más allá de la perspectiva filosófica, la aplicación de los aspectos matemáticos de la complejidad. Para esto se utiliza la modelización por ordenador mediante el software: Bifurcation Diagram for the Logistic Map y Logistic Equation: Comparing Initial Conditions de ComplexityExplorer.org, a fin de detectar la significación matemática de la propiedad analizada en el estudio: la dependencia sensible a las condiciones iniciales (SDIC).

Dada la novedad de la extensión al campo de las Ciencias de la Educación de los aspectos matemáticos de la complejidad, se ve conveniente reforzar el acercamiento de éstos a la conducta humana con un análisis transdisciplinar, propio de la perspectiva compleja, de los mismos aspectos matemáticos en el campo de la física y la biología, buscando paralelismos que refuerzen la hipótesis acerca de la universalidad de los aspectos de la dinámica compleja, en nuestro caso de una propiedad fundamental: SDIC.

Teniendo en cuenta las múltiples precauciones necesarias para trasladar propiedades de los sistemas físicos o biológicos al estudio de la persona, cuya libertad pone en entredicho cualquier intento de determinismo, se ve conveniente reforzar la hipótesis analizada con las aportaciones procedentes de la experiencia docente. Para ello, frente al análisis matemático y transdisciplinar, se sitúa el análisis cualitativo basado en las percepciones de los docentes, reforzando la perspectiva holística del estudio. Mediante el software para tratamiento de datos cualitativos ATLAS.ti se procesa una muestra de 600 entrevistas a docentes y alumnos de prácticas de la Facultad de Educación de UNIR en las provincias de Alicante, Valencia y Murcia; analizando entre los códigos señalados, las experiencias sobre el fenómeno de SDIC en el instante inicial y a lo largo del proceso educativo, así como su relación con el desarrollo de la autonomía intelectual. Los

parallelismos encontrados aportan una interesante confirmación que abre la puerta a futuras investigaciones.

Visualización matemática del fenómeno de dependencia sensible a través del Programa Logistic Equation: Comparing Initial Conditions.

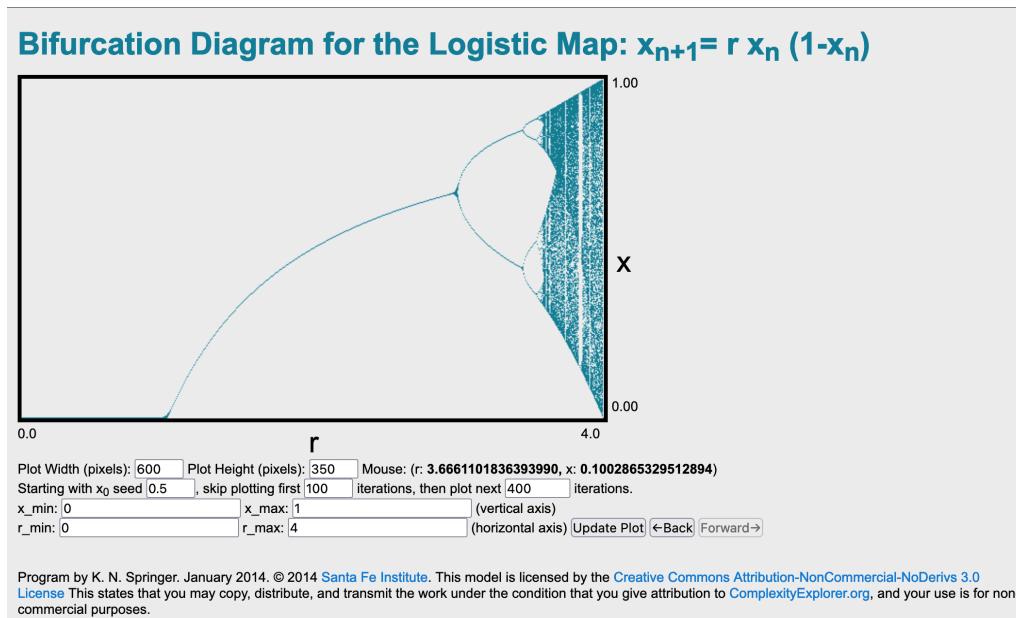
Feldman, D. pone a disposición, desde el SFI (ComplexityExplorer.org), en el curso Introduction to Dynamical Systems and Chaos, el programa para visualizar las trayectorias de la función logística: $x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$ Logistic Equation: Comparing Initial Conditions.

En principio se comienza estudiando una función particular, más tarde, como suele ocurrir en matemáticas, los resultados encuentran un paralelo en el mundo físico y real. Científicos de la complejidad (Mitchell, M., Feldman, D., Krakauer, D., Bishop, R., y muchos otros) han estudiado el principio de la *universalidad* que extiende este resultado a un amplio conjunto de funciones, que subyacen al proceso dinámico de los sistemas complejos representados en el tiempo mediante una función recurrente.

La ecuación $x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$ modeliza el crecimiento de una población con tasa de crecimiento r. Es a partir de ella como se descubre el famoso diagrama de bifurcaciones que representa las tendencias (límite) de la función recurrente según los valores de r.

Figura 1

El diagrama de bifurcaciones o mapa logístico.



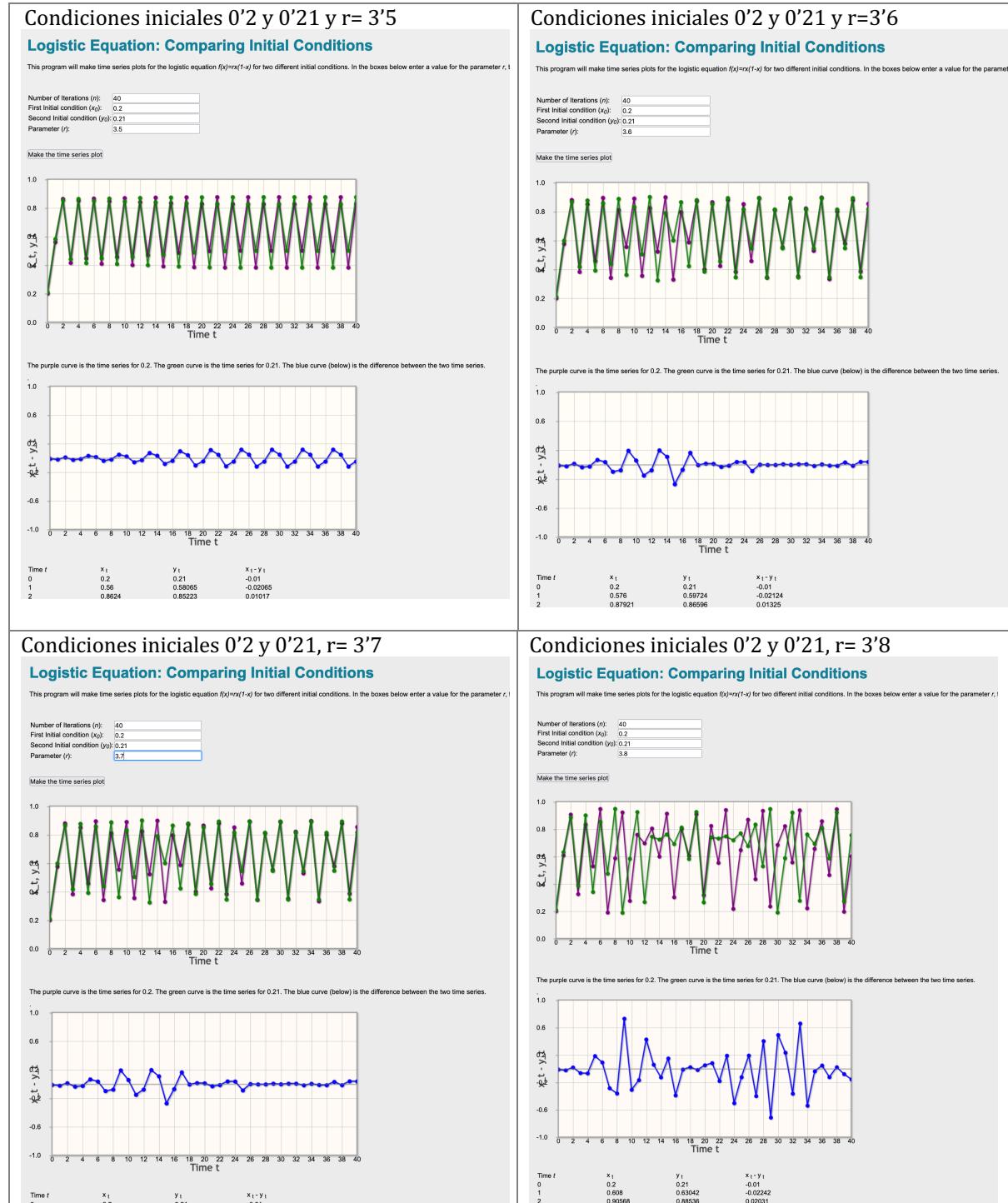
Nota. Elaboración propia a partir del Programa Bifurcation Diagram for the Logistic Map (SFI). Para valores de x, r: $0 \leq r \leq 4$, $0 \leq x \leq 1$. Para cada r se representa el límite de la sucesión con $x_0 = 0.5$. Es importante señalar que para casi todas las condiciones iniciales los valores límite son similares hasta que se llega a las zonas cercanas al caos, para $3.56994 \leq r \leq 4$ donde comienza alta dependencia a las condiciones iniciales.

Las imágenes de las Tablas 1 y 2 dan una idea del grado de sensibilidad a los valores iniciales (o semillas). En las casillas de inicio se puede elegir el número de iteraciones (n = 40), número suficiente para observar la evolución. En las casillas First Initial Condition y Second Initial Condition, se introducen las dos condiciones iniciales en cada caso. En la

primera tabla se mantienen éstas fijas para ver cómo varían al aumentar los valores de r ($1 \leq r \leq 4$). En la segunda tabla, se mantiene r fijo en la zona del caos ($r=4$) para observar la evolución en el tiempo de la separación de las trayectorias respectivas para cada condición inicial. Se trata de observar el comportamiento en un caso particular (crecimiento de una población) para trasladar por el principio de universalidad, a una amplia gama de funciones primero, y después a los sistemas dinámicos complejos en general.

Figura 2

Aumento de la sensibilidad a las condiciones iniciales cuando r se acerca a 4



Nota: Elaboración propia usando el Programa Logistic Equation Comparing Initial Conditions.

Dependencia sensible a las condiciones iniciales: un rasgo de los sistemas complejos clave para entender el desarrollo de la autonomía intelectual

Con el aumento del valor de r , ($3.5 \leq r \leq 4$) las trayectorias representadas en la parte superior difieren cada vez más pronto. En la gráfica superior se observan las dos trayectorias superpuestas. En la gráfica inferior se pueden observar en azul las diferencias entre ambas gráficas.

Figura 3

Fuerte sensibilidad a las condiciones iniciales cuando $r=4$



Nota: Elaboración propia usando el Programa Logistic Equation Comparing Initial Conditions.

Con el valor $r=4$ nos situamos en la zona del caos, donde la sensibilidad a las condiciones iniciales es muy fuerte. Se acercan las condiciones iniciales hasta diferir éstas en tan solo 10^{-10} . Se observa cómo, aunque con unas unidades de tiempo más, pronto las gráficas difieren completamente a pesar de iniciar en valores prácticamente idénticos.

En principio se trata de una propiedad de una función matemática recurrente muy sencilla que parecería que nada tiene que ver con la realidad y mucho menos con el comportamiento humano. Sin embargo las ciencias de la complejidad revelan muchas sorpresas: tal y como explica Feldman, D. (2023, Unit 6.5), lo que ocurre con esta función sucede con un conjunto muy amplio de funciones (este fenómeno se repite con todas las funciones con un único máximo cuadrático que mapean un intervalo en sí mismo); más aún, se trata de un fenómeno universal que subyace transversalmente a todos los sistemas dinámicos que tienen comportamiento aperiódico en las zonas próximas al caos (cuando r se aproxima a 4); no sólo sistemas físicos, sino también biológicos, sociológicos... Es inevitable preguntar si el fenómeno de la universalidad puede extenderse también al campo de la psicología. Cuestión todavía abierta porque la libertad humana parece rechazar cualquier tipo de sistematización; y filósofos y psicólogos debaten entre libertad y determinismo. Pero los investigadores del caos amplían continuamente el ámbito de aplicación de esta nueva ciencia. Morin, E. (2019), desde el ámbito filosófico, introduce las ideas de la complejidad dejando claro que la complejidad no se opone al determinismo y está presente en todos los ámbitos; algo muy familiar, por otra parte, para los matemáticos que investigan el caos, ya que éste es generado por funciones matemáticas deterministas. No sólo desde la filosofía; desde el ámbito de la psiquiatría, Caparrós, N. y Cruz Roche, R. en su obra Viaje a la Complejidad (2012-13) hacen un recorrido por los diferentes niveles en los que está presente, desde el físico hasta el psicológico. Pero también desde la física y las matemáticas, los científicos de la complejidad ven extenderse cada vez más el horizonte de aplicación: Feldman, D. (2023), en su curso Introducción a los Sistemas Dinámicos y Caos reflexiona sobre las implicaciones en la vida cotidiana de los estudios sobre el caos y comenta:

"Creo que esto es importante para cualquier área de la ciencia [...] el mundo sigue reglas, pero estas reglas no tienen por qué ser ordenadas o permitir predicciones; este es uno de los giros que el caos y la sensibilidad a las condiciones iniciales nos da [...] Algunos argumentan que los fenómenos que son sensibles a las condiciones iniciales nos alejan del determinismo y nos dan un espacio en donde el libre albedrío vuelve a tener espacio. Personalmente no estoy muy seguro. Puede que nos aleje de la tristeza del determinismo, pero no es claro como el efecto mariposa, que es en esencia impredecible, deje un espacio para la libertad, aunque no estoy muy seguro sobre como pensar en ello" (Feldman, 2023, Unit 3.8 Summary, part 2, min 7:41-8:55)

Aunque Feldman no se pronuncia, es muy importante su reflexión sobre la complejidad incluso en el ámbito de la libertad personal. El simple hecho de analizar la cuestión de la libre voluntad frente al determinismo, desde su perspectiva eminentemente matemática, es ya muy significativo. Como él, otros científicos de la complejidad como Kellert, S.H., Bishop, R. (2017), y más recientemente Hoefer, C. estudian cómo afecta el caos a todos los ámbitos de estudio, incluida la filosofía y la psicología. Así, Hoefer, C. en su libro Causal Determinism, afirma:

"The popularization of chaos theory in the relatively recent past perhaps made it seem self-evident that nature is full of genuinely chaotic systems. In fact, it is far from self-evident that such systems exist, other than in an approximate sense. Nevertheless, the mathematical exploration of chaos in dynamical systems helps us to understand some of the pitfalls that may attend our efforts to know whether our world is genuinely deterministic or not" (2023, p. 20)

Más recientemente, Van der Maas, H.L.J. (2023), ha tratado con mayor profundidad el tema en su libro: *Complex-Systems Research in Psychology*, en el que afirma ya en su prólogo: "We, with our complex brains embedded in various hierarchies of social systems,

are the ultimate complex systems" (p. xv) y en el que cita a Doyne Farmer, J. (2017) como frase introductoria: "We have a increasing need to model ourselves" (p. vii).

El hecho de preguntarse por el determinismo en todos los ámbitos (incluido el comportamiento humano) desde la perspectiva de la matemática que analiza el caos ya es sorprendente. Sin resolver la cuestión de la libertad, tratamos de analizar la experiencia de la dependencia sensible a las condiciones iniciales; algo que se conoce como característica determinante de la complejidad de un sistema. Tal y como afirma Hoefer:

A deterministic chaotic system has, roughly speaking, two salient features: (i) the evolution of the system over a long time period effectively mimics a random or stochastic process – it lacks predictability or computability in some appropriate sense; (ii) two systems with nearly identical initial states will have radically divergent future developments, within a finite (and typically short) timespan. We will use "randomness" to denote the first feature, and "sensitive dependence on initial conditions" (SDIC) for the latter. Definitions of chaos may focus on either or both of these properties; Batterman (1993) argues that only (ii) provides an appropriate basis for defining chaotic systems. (2023, pp. 16-17)

Así para algunos autores, detectar en la conducta humana la evidencia de SDIC, confirmaría el comportamiento complejo de la misma y permitiría deducir el conjunto de propiedades de los sistemas dinámicos complejos. Situar la libertad del comportamiento humano como el límite en la escala de organismos complejos y sus niveles de complejidad, sería uno de los aspectos en los que podría incidir la presente investigación: poseer un pequeño margen de elección, sería suficiente para el manejo de cambios significativos. He aquí una visualización matemática de la libertad que, por otra parte, es crucial para la visión del docente y previene de un defecto frecuente: encasillar a los alumnos.

¿Pertenece el comportamiento humano a este tipo de sistemas altamente sensibles a las condiciones iniciales?

Las gráficas anteriores proporcionan una imagen visual del significado del fenómeno de SDIC. Difiere mucho de la separación de dos trayectorias lineales que inician con inclinaciones diferentes. Se trata de otro nivel: variaciones infinitesimales producen, extraordinariamente pronto, recorridos totalmente diferentes. Así lo relata Bishop, R. en su libro Chaos: "Many authors consider an important mark of chaos to be trajectories issuing from nearby points diverging from one another exponentially quickly. However, it is also possible for trajectory divergence to be faster than exponential". (2017, p. 6)

Algunos autores visualizan una esfera en equilibrio sobre el vértice de un cono entendiendo la sensibilidad para caer en una dirección ante los mínimos influjos. Como expresa Bishop citando a Poincaré: "A man walking on a Street on his way to his business. He start out a particular time. Meanwhile unknown to him, there is a tiler working on the roof. The tiler accidentally drops a tile, killing the business man. Had the business man started out at a slightly earlier or later time, the outcome of his trajectory would have been vastly different!" (2017, p. 6). Como dice Yorke, J.A. (2015, min. 3): "Everybody knows about chaos. In fact, you may not know you know about chaos, but you live chaos"

Aportaciones desde la física.

Existe un sorprendente paralelismo entre SDIC y las teorías que se han desarrollado en las últimas décadas (1960-2020) sobre el *principio antrópico* o *el ajuste fino del universo* (Dicke, Carter, Feynman, Barrow, Tipler, Penrose...). Son muchos los científicos que en los últimos años han trabajado sobre esta sensibilidad en las condiciones iniciales que parece marcar todos los procesos naturales tanto físicos como biológicos. Así Smoot, G. (Premio Nobel de Física) afirma en Bollarée, M. & Bonassies, O:

“El Big Bang, el acontecimiento más semejante a un cataclismo que podamos imaginar, si le lo analiza detenidamente, aparece como finamente orquestado” (2023, p. 279). Desde el instante inicial, existen una veintena de valores numéricos invariables en el tiempo y en el espacio. En la siguiente lista se puede apreciar la extremada sensibilidad de los valores más importantes:

Tabla 1

Las principales constantes del universo y la precisión de su ajuste.

Constante de Gravitación Universal	$G = 6'67418 \cdot 10^{-11} m^3 K g^{-1} s^{-2}$
Constante de acoplamiento	$\alpha - g = 10^{-39}$
Fuerza electromagnética. Cte de estructura fina.	$\alpha = 0'0072973525376$
Interacción fuerte (cohesión de los núcleos atómicos).	$\alpha - s = 1$
Interacción débil	$\alpha - w = 10^{-6}$
Velocidad de la luz	$c = 299792458 m \cdot s^{-1}$
Constante de Planck	$h = 6'626070040 \cdot 10^{-34} J \cdot s$
Constante de Boltzmann	$k = 1'380649 \cdot 10^{-23}$
Carga del protón (+) y del electrón (-)	$1'6021766208 \cdot 10^{-19}$
Masa del protón	$1'6726219 \cdot 10^{-27}$
Masa del neutrón	$1'674927471 \cdot 10^{-27}$
Masa del electrón	$9'10938356 \cdot 10^{-31}$
Cte cosmológica que fija la curvatura inicial del universo	$1'289 \cdot 10^{-52} \cdot m^{-2}$

Nota. Fuente: Bolloreé & Bonnassies (2023)

Lennox, J. (citado por Bolloreé, M. & Bonnassies, 2023), profesor de Matemáticas en Oxford, explica: “Al principio del Universo, para que pueda existir la química que permite la vida, la relación entre la fuerza electromagnética y la fuerza de gravedad debió estar ajustada con una precisión de $1 \cdot 10^{-40}$. (pp. 184-185)

Bolloreé, M. & Bonnassies, O. citan en su libro una larga lista de los científicos que desde finales del s. XX hasta nuestros días avalan la teoría del ajuste fino. Una única variación en uno de esos decimales habría impedido la aparición de la vida; una variación en la velocidad de expansión en el decimal 15, según Robert Dicke y el Universo se habría desparramado. En el decimal 60 según Planck (2023, p. 192)

¿Por qué por ejemplo G tiene exactamente ese valor? Demaret, J. (1994, p. 2) confiesa que ese valor no puede ser explicado por ninguna teoría existente. Pero si su relación con la fuerza nuclear fuerte no fuese exactamente de 10^{39} , no podría haber vida en el universo. Lo mismo ocurre con las otras 20 constantes como explican Geraint, F. y Barnes, L. A. (2016, pp 108-109)

El cosmólogo Trint Xuam Thuan fue más lejos aún al demostrar que, para que el Universo carezca de curvatura, la densidad primitiva tenía que haber sido determinada con una precisión del orden de una parte sobre 10^{60} . (Barros, 2019, p. 9)

Algunos científicos de la complejidad ya han relacionado la dinámica del universo y su origen con el psiquismo humano. Así, César Merea, E. en su reflexión sobre *Complejidad y Psiquismo*, tras detallar el proceso de origen del universo, afirma con rotundidad: “Corresponde decir que la complejidad del psiquismo es la complejidad del Big Bang y que esa es su esencia.” (2013, p. 24)

Complejidad que hace referencia al despliegue de la energía como elemento central en expansión, pero también al ajuste fino de sus comienzos.

Desde el ámbito de la física llegan las primeras intuiciones sobre el caos. Feigenbaum se inició reflexionando sobre el transcurrir del tiempo, la periodicidad, la observación de los cúmulos de nubes y sus formas aparentemente fruto del azar. Poco a poco, el caos se ha ido extendiendo a todos los procesos. ¿Es posible considerar también los procesos humanos? Todavía no estamos en condiciones de aplicar fórmulas

matemáticas al comportamiento humano, pero algo deja entrever que tal vez la misma libertad pueda explicarse desde la perspectiva del caos. De hecho, algunos físicos durante las últimas décadas se han preguntado por ello. En esta línea apunta Barros, P. en sus comentarios a la obra de Gleick (1987): “Los creyentes en el caos [...] especulan acerca del determinismo y el libre albedrío, la evolución y la índole de la inteligencia consciente. Sienten que interrumpen cierta tendencia de lo científico al reduccionismo, al análisis de los sistemas en términos de sus partes constitutivas [...] creen que buscan la totalidad”. (2019, pp. 11-12)

Erwin Schrödinger publicó en 1944 su libro *What is life?* en torno a la cuestión de la vida. En él, contempla los organismos vivos como, en palabras de Cruz Roche (2013, p.16), *islotes neguentrópicos*. Schrödinger hace una reflexión sobre el comportamiento de los átomos y moléculas en la materia inerte: curiosamente, a nivel macroscópico siguen las leyes físicas, pero al acercarnos a cada molécula y átomo particular se observa un comportamiento errático. Sólo al considerar el promedio estadístico de sus posiciones responden de manera exacta a las leyes físicas. Sin embargo, en los organismos vivos esto no es así: cada molécula sigue perfectamente las complejas leyes de la genética y la vida. Schrödinger, disculpándose al opinar sobre biología, materia en la que él no es experto, se sorprende de la precisión y organización de cada molécula orgánica (teniendo en cuenta que publica su libro en 1944 cuando todavía se desconocía mucho en cuanto a la organización de la molécula de ADN). En esta línea se hace una pregunta más profunda, que sigue siendo actual y oportuna para la presente reflexión: *¿Por qué son los átomos tan pequeños? ¿Por qué cada neurona es tan pequeña comparada con el tamaño del cerebro? ¿En qué manera contribuye cada pequeñísima unidad en orden a un pensamiento global producido en el cerebro?* Este físico, Premio Nobel por sus trabajos sobre la ecuación que lleva su nombre y sus aportaciones a la física cuántica, da una respuesta que se adelanta a las posteriores investigaciones sobre los sistemas dinámicos complejos y su dependencia sensible a las condiciones iniciales:

Why should an organ like our brain, with the sensorial system attached to it, of necessity consist of an enormous number of atoms, in order that its physically changing state should be in close and intimate correspondence with a highly developed thought? On what grounds is the latter task of the said organ incompatible with being, as a whole or in some of its peripheral parts which interact directly with the environment, a mechanism sufficiently refined and sensitive to respond to and register the impact of a single atom from outside? (p.3)

Sorprende por un lado la precisión y estabilidad del funcionamiento, a pesar de la vulnerabilidad de la materia física y las variaciones del entorno; y por otro, la delicada sensibilidad para captar los cambios en él y responder o adaptarse a ellos.

Algunas ideas que iluminan desde la genética

Es imposible no establecer un paralelismo entre el ajuste fino del universo en el instante inicial y el comienzo de la vida humana y las circunstancias que lo rodean. Como dice Lejèune, J. “La vida tiene una historia muy larga, pero cada uno tiene un comienzo muy preciso: el momento de la concepción”. (2009, p. 35)

En las Ciencias de la Educación son bien conocidas las repercusiones de las primeras etapas de la vida, su permanente y obstinada incidencia en los procesos de desarrollo de la autonomía. ¿Cuánto es preciso retroceder para evaluar la influencia del entorno en el posterior desarrollo? ¿Es tan importante el instante inicial del ser humano como el big-bang para el universo? ¿posee la nueva criatura esa dependencia sensible a las condiciones iniciales propia de los sistemas dinámicos complejos? Los estudios de

psicología sobre *adversidad temprana*, tal y como muestra la Asociación Española para la ayuda mutua en casos de Adversidad Temprana y Apego, revelan datos interesantes sobre la persistencia a lo largo del desarrollo de la influencia de factores negativos en la primera infancia, incluido el momento de la gestación. Aunque es difícil retroceder hasta el instante inicial para desvelar si existe dependencia sensible a las condiciones iniciales en el inicio de la vida humana, existen algunos textos que iluminan de modo especial la presente investigación: En el año 1989, Jerôme Lejèune, genetista francés descubridor de la trisomía 21 característica del Síndrome de Down, viajó desde Francia para asistir al Tribunal de Justicia de Maryville, en Tennessee, para ayudar en la difícil decisión de considerar el estatuto legal de siete embriones humanos congelados. En su declaración aportó una detallada exposición sobre el proceso de formación del nuevo individuo en la que se refirió a los primeros instantes en estos términos:

El jovencísimo ser humano, justo después de la fecundación, después de haberse dividido en dos células, se divide en tres. Porque, curiosamente, no nos dividimos en dos, cuatro, ocho... no; al comienzo no lo hacemos así. Tras la división en dos células aproximadamente iguales, sólo una de ellas se divide en dos. Hay pues un momento en el que, dentro de la zona pelúcida pasamos por un estadio de tres células. Esto se sabe desde hace cincuenta o sesenta años, pero sigue siendo un enigma embriológico ya que, después de esta etapa de tres células, arranca de nuevo, se llega a cuatro, y se continúa con múltiplos de dos. ¿Qué significa todo esto? No lo sabemos con exactitud, pero es de gran importancia: podemos manipular embriones de ratones y separar las células que están dentro de la zona pelúcida de un embrión de dieciséis células y tomar algunas de ellas. Podemos coger otras pocas células de otro embrión, y ponerlas todas juntas dentro de una nueva zona pelúcida de la que se expulsa al legítimo ocupante. La mayor parte de las veces fracasa, pero a veces surge una quimera. Si se ha escogido un embrión negro y uno blanco nos encontraremos con un ratón con la piel moteada. Esto puede hacerse con un número muy pequeño de células. Hemos intentado con tres alineamientos diferentes y se han conseguido ratones con características de los tres. Se ha intentado con cuatro y no funciona, cinco, y tampoco. Lo que viene a recordarnos que, cuando nos dividimos al comienzo de nuestra vida pasamos por un estadio de tres células. Quizás, en ese momento, una de las células manda un mensaje a las otras dos [...] para comprender de repente: ¡No somos una población de células, estamos unidas para formar un individuo! Es decir, la individualización, lo que establece la diferencia entre una población de células de un cultivo y un individuo se establece en el estadio de tres células, es decir, muy pronto después de la fecundación. (2009, pp. 45-46)

Todo el diseño del nuevo ser se realiza en el instante inicial. Cualquier leve modificación en el proyecto global del individuo en ese instante tendrá repercusiones a largo plazo. Lejèune resumía en su conferencia *La encarnación de la inteligencia* recogida en *En el comienzo, la vida*: “En el principio hay un mensaje, y ese mensaje es la vida” (2019, p. 79). La extraordinaria sensibilidad del útero materno y su respuesta a las emociones negativas de cara a la concepción es un signo de que la naturaleza trabaja en la dirección de la búsqueda de las condiciones óptimas en el momento de la fecundación. En esta línea el Dr. Ruiz Zambrana (2024) señala que el estrés como estilo de vida complica la fertilidad femenina y masculina, no sólo desde la perspectiva del mayor bien para la madre. Como explica Lejèune, desde la concepción, es el embrión el que dirige todos los cambios que se producen en el cuerpo de la madre, de cara a su propio beneficio. Todo apunta a que las condiciones óptimas van dirigidas a la importancia del ambiente que rodea el instante inicial de la vida.

Tras leer la declaración de Lejéune ante el Tribunal de Justicia de Maryville, no parece irrelevante, que la naturaleza prevea para el instante de la concepción la atmósfera psicológica que acompaña a un acto de amor. Es difícil retroceder hasta el primer instante para constatar las repercusiones de las condiciones en el instante de la concepción y diferenciarlas como un instante clave más allá del proceso total de gestación y primera infancia, pero La teoría de la complejidad revela que todo sistema dinámico complejo posee una fuerte dependencia a las condiciones iniciales. En nuestro caso, como afirma Caparrós (2013) y tal como refleja el título de su obra: El psiquismo (es) un proceso hipercomplejo, o como hemos afirmado: el sistema complejo por excelencia.

En esta misma línea Lejèune, habla sobre la sensibilidad en la transmisión de la información para la creación del nuevo ser:

Para transmitir la información de padres a hijos, la naturaleza emplea el lenguaje más pequeño posible. Y esto es muy necesario, pues la vida se aprovecha del movimiento de las moléculas para poner orden en los movimientos erráticos de las partículas mismas, de modo que ese azar se transforme de acuerdo con la necesidad del nuevo ser [...] Con la vida nos encontramos en los límites mismos de la materia, la energía y la información. (2009, p. 37)

Las ciencias de la complejidad y la psicología

Experiencia de los docentes sobre la dependencia sensible en el instante inicial y a lo largo del proceso educativo

Para completar la presente investigación se tendrá en cuenta la experiencia de los profesionales de la educación recabada en las visitas y entrevistas a docentes de unos 600 colegios de España (Alicante, Murcia y Valencia) con motivo del seguimiento a los alumnos de prácticas de la Facultad de Educación de UNIR.

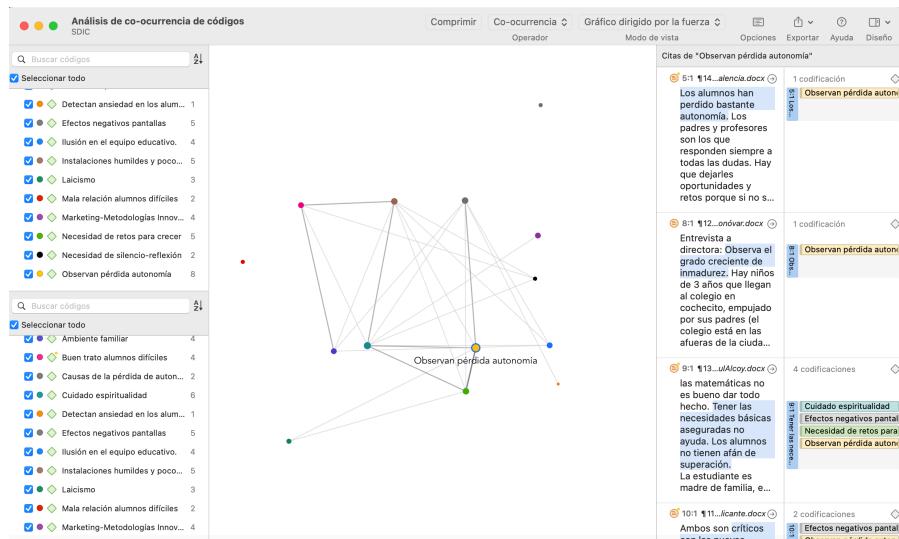
En las entrevistas se conversa con docentes y alumnos de prácticas, así como miembros del personal directivo de centros educativos y gabinetes de psicología. Las entrevistas son procesadas con el software ATLAS.ti para el tratamiento de datos cualitativos. No todas las entrevistas poseen la misma calidad. Se diferencian entre ellas las realizadas en gabinetes de psicología de las llevadas a cabo en colegios. Los primeros, recogen alumnos diagnosticados y poseen información relevante sobre las circunstancias que rodearon el proceso de concepción y gestación, aproximándose más al instante inicial. Bajo la etiqueta de *Entrevistas especiales* se reúnen conversaciones con docentes de larga experiencia, que constatan la evolución a través de los años dedicados a la docencia, junto a otros más jóvenes, pero reflexivos, con verdadera vocación e intuición; interesados en analizar las causas del descenso en la madurez de los estudiantes. Todos con deseo de compartirlo de cara a la investigación y profundización en el conocimiento de la evolución de la autonomía intelectual de los estudiantes.

El software ATLAS.ti permite visualizar las relaciones entre los diferentes códigos marcados en los diferentes textos y la frecuencia de su aparición.

Resultados

Figura 4

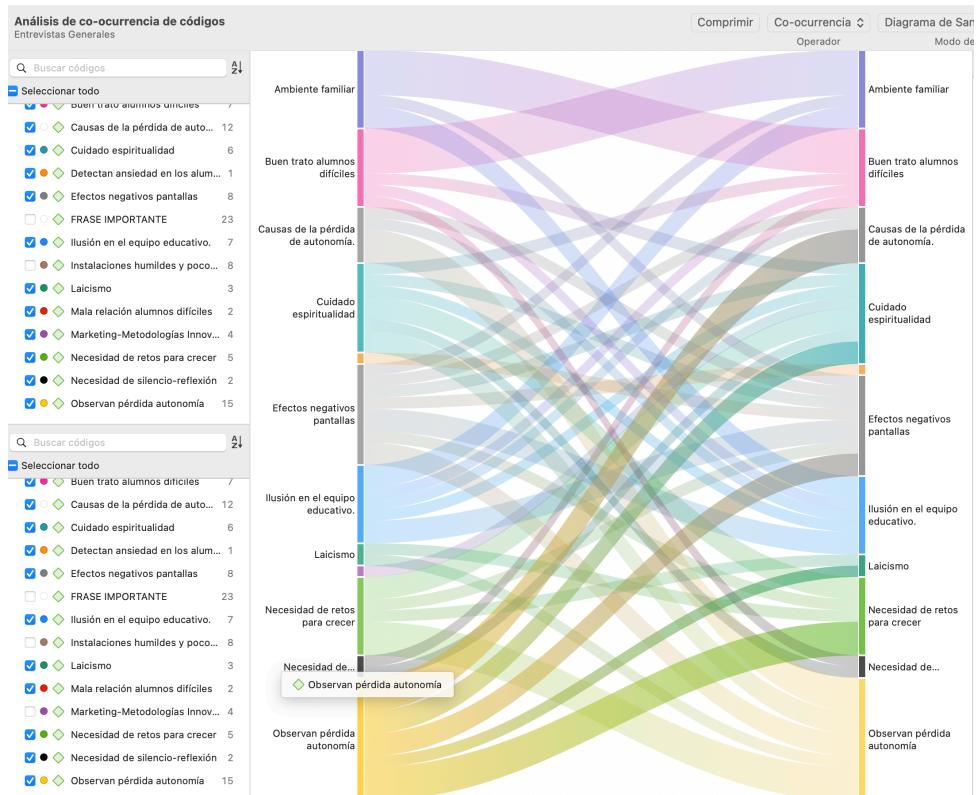
La pérdida de autonomía, motivo de preocupación entre los docentes



Los docentes constatan el hecho de la pérdida de autonomía en general, a pesar de los esfuerzos del profesorado y de la continua implicación de los padres en el proceso educativo. la gran implicación de padres y profesores genera desconcierto; parece actuar en sentido inverso.

Figura 5

Gráfico de co-ocurrencia de códigos: La pérdida de autonomía es un fenómeno multicausal.



No existe una única causa detectada por los docentes como fundamental a la hora de explicar la pérdida de las habilidades que contribuyen a la autonomía intelectual.

Figura 6

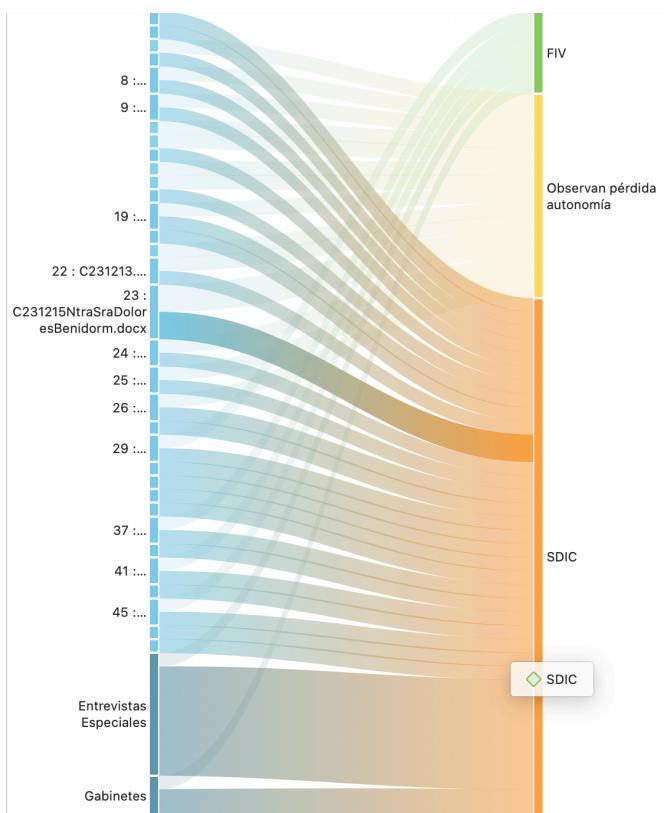
Co-ocurrencia de códigos relacionados con SDIC y la mejora de la Autonomía



Se observa dependencia sensible y ésta presenta una relación significativa con los factores que mejoran el desarrollo de autonomía en el alumnado.

Figura 7

Frecuencia de la percepción del fenómeno de dependencia sensible



El código SDIC recoge aspectos de las entrevistas que hacen alusión a la observación de una respuesta inesperada ante situaciones difíciles.

Discusión y conclusiones

Un análisis transdisciplinar pone de manifiesto el paralelismo existente entre los resultados matemáticos de las Ciencias de la Complejidad, la Física, la Genética y la Psicología. La trascendencia del instante inicial se revela en todas ellas, ajustándose a la modelización matemática observada en las gráficas de las Tablas 1 y 2. Un proceso, que, como Feldman señala, se generaliza a un amplio conjunto de funciones que subyacen a todos los sistemas que presentan una dinámica compleja. Existen niveles de complejidad que en el mapa logístico de la Fig. 1 aumentan cuando r se aproxima a 4.

Las Ciencias de la Complejidad han ido extendiendo sus campos de aplicación a la Biología, la Economía, la Sociología. Las Ciencias del Comportamiento, se presentan como el campo más delicado para su introducción desde el momento en que toda ciencia que tenga al ser humano como objeto debe lidiar con el escollo de un fenómeno único: la libertad. Sin embargo, en el pensamiento complejo, la propia libertad puede convertirse en objeto de estudio.

Algunos científicos de la complejidad como Caparrós y Cruz Roche (2013) apuntan hacia el ser humano como el organismo hipercomplejo por excelencia. Aunque, como apunta Feldman, los paralelismos matemáticos habrá que entenderlos en sentido metafórico o en sentido topológico, matemáticamente hablando. Detectar algunos rasgos puede ser muy revelador dada la trascendencia de su aplicación.

Los paralelismos encontrados en el análisis de un rasgo, esencial según Karl Hoefer, como es el fenómeno de la dependencia sensible a las condiciones iniciales, en sistemas físicos y biológicos, resultan iluminadores. En el ámbito de la física, se retrotraen al instante inicial del universo, revelándose como un carácter esencial, presente en toda la dinámica al situarse en el ajuste y equilibrio de todas las constantes físicas esenciales. Aunque sin tratamiento matemático, aparece en el campo de la genética, apuntando a una importancia clave del instante inicial.

En las figuras 2 y 3, se revela respectivamente la autonomía como preocupación central y como fenómeno multicausal. Por otra parte (Fig. 4), el fenómeno de dependencia sensible a las condiciones iniciales es señalado entre las posibles causas de pérdida de autonomía intelectual por los profesionales de la psicología, que, con los consiguientes reparos, señalan la trascendencia de las circunstancias que rodean a los primeros instantes y ponen en el punto de mira las diferentes técnicas de fecundación como elemento que podría estar en el origen de diagnósticos posteriores. (Código FIV Figura 5). Resultados incipientes y todavía confusos por la cantidad de variables en juego, pero que apuntan en una misma dirección: la importancia crucial del instante inicial.

Se constata (Figura 5) como una constante en las conversaciones con los docentes de distintas etapas lo que Feldman ya señalaba acerca del fenómeno de SDIC: *Parece como si cada instante fuese crucial*; la dependencia sensible se mantiene a lo largo de todo el proceso, puesto que la evolución del sistema dinámico es modelizada matemáticamente por una función recurrente: $x_{n+1} = F(x_n)$, en la que, por el grado de complejidad, las mínimas variaciones en un punto de la trayectoria presentan la misma sensibilidad que se observaba en el instante inicial. Cada instante actúa como instante inicial.

Este fenómeno es ampliamente constatado por la mayoría de los docentes, especialmente el grupo EE, señala casi unánimemente la experiencia de la desproporción entre el nivel de dedicación y atención a alumnos con especiales dificultades y los resultados obtenidos, no de forma inmediata, pero sí a corto o medio plazo. El encuentro

con antiguos alumnos es revelador para ellos de la influencia que, en ocasiones, no es posible detectar a corto plazo.

Se podrían sintetizar los resultados en algunas ideas claves para la tarea docente: El ser humano es afectado fuertemente en el inicio y mantiene, en alguna medida, esa dependencia sensible a lo largo de todo su proceso evolutivo, comportándose como, lo que varios científicos de la complejidad llaman, el organismo hipercomplejo por excelencia. Esa fuerte sensibilidad implica el indeterminismo que, es inherente a toda dinámica compleja, y que constituye una buena noticia para la práctica docente: nadie está irremediablemente perdido. Las influencias en el inicio, pese a ser fuertemente condicionantes, no determinan irremediablemente al ser humano, desde el momento en que esa sensibilidad es mantenida a lo largo del proceso. Ello permite al educador trabajar con esperanza en situaciones en las que aparentemente es demasiado tarde, bien por la magnitud de las circunstancias, o por lo prolongado de sus efectos, sabiendo que pequeñas influencias en el sentido adecuado pueden desencadenar cambios significativos. Por ello, y abriendo otra línea de investigación, el fenómeno de la dependencia sensible apunta hacia una creciente personalización en el ámbito educativo. Sólo desde una mirada personal se pueden activar los resortes adecuados y afinar los cambios necesarios, tanto en la didáctica de los conocimientos y sus procesos de asimilación, como en la influencia que sobre el proceso de aprendizaje ejerce el entorno: relaciones afectivas, modelos de conducta, vocación, sentido y trascendencia de los procesos vitales.

La confluencia de los distintos campos y la sintonía en las percepciones de los docentes apuntan hacia la afirmación del ser humano como organismo hipercomplejo, afectado fuertemente por las condiciones que rodean al instante de su concepción; que mantiene dependencia sensible, a lo largo de todo su desarrollo, mostrándose altamente receptivo a la mirada y expectativas de sus educadores, de modo que pequeños gestos puede resultar trascendentales en el proceso del desarrollo de su autonomía intelectual.

Gran responsabilidad para los docentes, pero también causa de esperanza ante casos difíciles en los parece difícil encauzar trayectorias fuertemente afectadas por un ambiente adverso. Las Ciencias de la Complejidad inician su andadura en el campo de las Ciencias de la Educación aportando herramientas matemáticas para un conocimiento más profundo de la persona y de lo que el caos puede decir acerca de sus reacciones desconcertantes, que escapan al determinismo o la predicción, pero que por ello son reveladoras también de las sorprendentes posibilidades de cambio que esconde el ser humano en cualquier instante de su trayectoria evolutiva.

Agradecimientos

Al Instituto Santa Fe de Nuevo México para las Ciencias de la Complejidad, por poner a disposición, en un lenguaje asequible, toda su tarea investigadora, junto con las herramientas computacionales que modelizan matemáticamente los procesos complejos. Especialmente Melanie Mitchell y David Feldman, que ofrecen en sus cursos una amplia y detallada visión de la dinámica compleja.

A todos los docentes que han ofrecido en las entrevistas su tiempo y su experiencia, compartiendo también el desánimo ante la desproporción entre su esfuerzo y los resultados. Para ellos se realiza el presente trabajo de investigación, con el deseo de profundizar en el conocimiento de los procesos de desarrollo y las desconcertantes reacciones del ser humano, por una parte reveladoras de su complejidad y resistencia a la

determinación, pero también de la esperanza que surge de la fuerte dependencia (SDIC), que hace posible lo que hemos llamado *libertad*, es decir, la posibilidad del ser humano de romper cualquier condicionamiento para cambiar su destino.

Referencias

- Asociación española para la Ayuda Mutua en casos de Adversidad Temprana y Apego (2022). *Trauma por Adversidad Temprana en menores adoptados y acogidos*. <https://petalesespana.org/trauma-por-adversidad-temprana-en-menores-adoptados-y-acogidos/>
- Barros, P. (2019). Comentarios a la obra de Gleick, J: *Caos. La creación de una ciencia*. <http://www.librosmaravillosos.com/caos/pdf/Caos - James Gleick.pdf>
- Bishop, R. (Spring 2017 Edition) Chaos, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Zalta <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/chaos/>
- Bolloreé, M. & Bonnassies, O. (2023). *Dios, la ciencia, las pruebas, El albor de una revolución. Prólogo de Robert W. Wilson, Premio Nobel de Física*. Ayregraf.
- Caparrós, N. y Cruz Roche, R. (2012). *Viaje a la Complejidad. Del Big Bang al origen de la vida. Nivel de integración físico*. Biblioteca Nueva.
- Caparrós, N. y Cruz Roche, R. (2012). *Viaje a la Complejidad. Del origen de la vida a la emergencia del psiquismo. Nivel de integración biológico*. Biblioteca Nueva.
- Caparrós, N. y Cruz Roche, R. (2013). *Viaje a la Complejidad. La complejidad de lo social. La trama de la vida. Nivel de integración social*. Biblioteca Nueva.
- César Merea, E. (2013). *Viaje a la Complejidad, El psiquismo, un proceso hipercomplejo*. Biblioteca Nueva.
- Demaret, J. y Lambert, D. (1994). *Le Principe Anthropique* (p.2). Armand Colin.
- Feldman, D. (2023). *Introduction to Dynamical System and Chaos*. Units 3.3, 3.5, 3.8, 6.5 <https://www.complexityexplorer.org/courses/186-introduction-to-dynamical-systems-and-chaos>
- Feldman, D. (2019). *Chaos and Dynamical Systems*. Printeton University Press.
- Geraint, F. y Barnes, L.A. (2016). *A Fortunate Universe*, Cambridge University Press.
- Hoefer, C. (2023). Causal Determinism, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2023 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.) <https://plato.stanford.edu/archives/win2023/entries/determinism-causal/>
- Kellert, S. (2023). Interview with Lead Instructor David Feldman at the Santa Fe Institute New Mexico: *Introduction to Dinamical System and Chaos*. Unit 10.2 <https://www.complexityexplorer.org/courses/186-introduction-to-dynamical-systems-and-chaos>
- Lejèune, J. (2009) *¿Qué es el embrión humano?*, Documentos del Instituto de Ciencias para la Familia, Universidad de Navarra. Rialp.
- Lejèune, J. (2019) *En el comienzo la vida. Conferencias inéditas (1968—1992)*. BAC.
- Mitchell, M. (2023) *Introduction to Complexity*. <https://www.complexityexplorer.org/courses/185-introduction-to-complexity>
- Morin, E. (2019). *Pensar la Complejidad. Crisis y Metamorfosis*. Col-lecció Honoris Causa. Universitat de València.
- Ruiz Zambrana (2024). *Reducir estrés aumenta las posibilidades de fertilidad femenina*. <https://www.cun.es/actualidad/noticias/estres-complica-fertilidad-femenina>
- Schrödinger, E. (1944). *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell* (p.3). Based on lectures delivered under the auspices of the Dublin Institute for Advanced Studies at Trinity College, Dublin.

Dependencia sensible a las condiciones iniciales: un rasgo de los sistemas complejos clave para entender el desarrollo de la autonomía intelectual

- Smoot. G., & Davison. K. (1994). Arrugas en el tiempo, Plaza y Janés.
- Trint Xuan, T. (1988), *Le Chaos et l'harmonie*, Fayard. In Bolloreé, M. & Bonnassies, O. Ayregraf.
- Van der Maas, Han L. J. (2024). *Complex-Systems Research in Psychology*. The Santa Fe Institute Press.
- Yorke, J. A. (2015) *The many facets of chaos*. Conferencia en la Facultad de Matemáticas de la UCM [Video] Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=op4PM8_Mbg8