



Complejidad y ciencia de sistemas: aproximación a su impacto actual en el mundo

Complexity and systems science: study of its current impact
Complexidade e ciência de sistemas: abordagem do seu impacto
atual no mundo

Juan David Luján-Villar¹  & Roberto Carlos Luján-Villar² 

¹ Secretaría de Educación Distrital. Bogotá-Colombia. Correo: lujanvillar@gmail.com

² Doctorado en Salud. Universidad del Valle. Cali-Colombia. Correo:
janlujazz@gmail.com

Fecha de recepción: 15 de enero de 2019.

Fecha de aceptación: 9 de julio de 2019.

RESUMEN

INTRODUCCIÓN. Este trabajo presenta un abordaje aproximativo al impacto actual de las ciencias de la complejidad y de sistemas mediante el análisis de algunos indicadores de su producción científica escrita. **OBJETIVO.** Especificar cuáles son las ciencias de la complejidad y de sistemas, y realizar el análisis de su impacto actual a través de diferentes métodos y técnicas de visualización de sus contribuciones y relaciones. **MÉTODO.** Se estableció un modelo de simulación mediante la metodología del análisis de redes sociales (ARS), basado en los atributos de la red multidisciplinaria diseñada de las ciencias de la complejidad y de sistemas, con técnicas de visualización. **RESULTADOS.** Los resultados indican que los sistemas de control y dinámicos, los sistemas dinámicos, y la biología de sistemas dominan el terreno de la complejidad científica. Se evidenció una importante contribución por parte de las ciencias sociales computacionales al campo de la complejidad a partir de campos como el modelado y simulación basados en agentes y el análisis de redes sociales. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.** Se concluye que es necesaria la continuidad de las exploraciones transdisciplinarias entre los campos canónicos de las ciencias de la complejidad y de sistemas, y las ciencias sociales computacionales.

Palabras clave: Análisis de redes sociales, complejidad, ciencia de sistemas.

ABSTRACT

INTRODUCTION. This paper presents an approximate approach to the current impact of the complexity and systems sciences through the analysis of some indicators of their written scientific production. **OBJECTIVE.** Specify what are the sciences of complexity and systems, and perform the analysis of their current impact through different methods and techniques to visualize their contributions and relationships. **METHOD.** A simulation model was established through the methodology of Social Network Analysis (SNA), based on the attributes of the



multidisciplinary network designed for complexity and systems sciences, along with other visualization techniques. **RESULTS.** The results indicate that control and dynamic systems, dynamic systems, and systems biology dominate the terrain of scientific complexity. In addition, an important contribution was made by the computational social sciences to the field of complexity from fields such as Agent Based Modelling and Simulation and the Social Network Analysis. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS.** It concludes on the need to continue the transdisciplinary explorations between the canonical fields of complexity and systems sciences, and the computational social sciences.

Keywords: Social network analysis, complexity, systems science.

RESUMO

INTRODUÇÃO. Este artigo apresenta uma abordagem aproximada do impacto atual das ciências e sistemas de complexidade, analisando alguns indicadores de sua produção científica escrita. **OBJETIVO.** Especifique quais são as ciências de complexidade e sistemas, e realize a análise de seu impacto atual através de diferentes métodos e técnicas para visualizar suas contribuições e relacionamentos. **MÉTODO.** Um modelo de simulação foi estabelecido através da metodologia de análise de redes sociais (ARS), baseada nos atributos da rede multidisciplinar desenhada para complexidade e ciências de sistemas, juntamente com outras técnicas de visualização. **RESULTADOS.** Os resultados indicam que sistemas dinâmicos e de controle, sistemas dinâmicos e biologia de sistemas dominam o terreno da complexidade científica. Além disso, uma contribuição importante foi dada pelas ciências sociais computacionais ao campo da complexidade a partir de campos como modelagem e simulação baseados em agentes e análise de redes sociais. **DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.** Conclui sobre a necessidade de continuar as explorações transdisciplinares entre os campos canônicos de complexidade e ciências de sistemas e as ciências sociais computacionais.

Palavras-chave: Análise de redes sociais, complexidade, ciência de sistemas.

INTRODUCCIÓN

Este estudio ofrece un panorama actual de lo que se conoce como ciencias complejas y de sistemas (CCS). El interés se enfocó en continuar el puente entre este enorme campo de actividad científica y las ciencias sociales de última generación. Debido a que las CCS establecen una verdadera amalgama de perspectivas transdisciplinares que cruzan metodologías, técnicas, modelos, metaheurísticas, algorítmicas, simulaciones, lógicas, y razonamientos argumentativos de diversa índole y en múltiples niveles, la pertinencia de continuar la sinergia entre los distintos enfoques de las CCS y sus constructos científicos es menester, a propósito del avance tecnológico que el siglo XXI trajo consigo.

Las CCS y su panorama en Latinoamérica y más allá

En el campo académico existen como mínimo dos tipos de complejidad asociadas a los modelos que se utilizan en las investigaciones complejas aplicadas a la realidad sociocultural actual por parte de antropólogos, sociólogos, psicólogos y demás investigadores sociales. El primero son los algoritmos de la complejidad y sus perspectivas interdisciplinares. El segundo se conoce como pensamiento complejo



(PC) y se basa en una fuerte tendencia filosófica y discursiva. Aunque en los últimos tiempos en Latinoamérica se realizó un esfuerzo por la unión del PC y las CCS [1], el debate aún continúa.

La cuestión es muy densa como para tratarla en corto espacio, pero existe un hecho verídico, los debates sobre las divisiones que se tienen de la complejidad en el terreno de lo social a nivel filosófico y científico no se resolvieron con pacificaciones amenas entre ambos espectros investigativos y posiciones teóricas. El lector puede indagar sobre los diferentes posicionamientos y corrientes, la literatura en español al respecto es abundante: [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10]. Con lo expuesto hasta el momento, en este trabajo la discusión se sitúa desde las CCS y no desde el denominado PC es decir, este estudio aboga por la exploración del conjunto de perspectivas algorítmicas y sistémicas de última generación respecto a problemas que se tornan de otras maneras intratables, con el ánimo desde las ciencias sociales y humanas en profundizar en lo que podrían ser unas ciencias sociales complejas al considerar la utilidad de algunos de sus campos relevantes de experimentación.

Algunos destacados complejólogos del otro lado del Atlántico como Helbing, quien hace eco de otros en esta misma tónica, encuentran que un campo transversal como el modelado de sistemas es una posibilidad pluralista en el terreno científico de la complejidad. Para Helbing [11], los campos fructíferos de investigaciones empíricas a través de la colaboración y modelación multi o transdisciplinar son los siguientes:

- La modelización de los propios sistemas socioeconómicos.
- La comprensión de los impactos que los sistemas de ingeniería tienen en el mundo socioeconómico.
- La modelización de los mecanismos sociales que impulsan la evolución y la difusión de innovaciones, normas, tecnologías, productos, etc.
- Los desafíos científicos relacionados con la gestión de la complejidad y el diseño de sistemas.
- La aplicación de mecanismos de coordinación y cooperación social para la creación de sistemas técnicos auto-organizados (como controles de tráfico descentralizados o los sistemas de igual a igual o entre pares).
- El desarrollo de sistemas tecno-sociales, en el que el uso de la tecnología se combina con competencia y conocimiento humano (como redes sociales de colaboración, mercados de predicción, sistemas de recomendación, o la web semántica) [11].

Las CCS de punta se preguntan por cuestiones basadas en las posibilidades planteadas por Helbing, alejadas de una discursividad pura o una matematización científicista. Así, este tipo de razonamiento incluye perspectivas genuinas de complejidad que procuran delimitar las problemáticas del modelado de sistemas complejos o cualquier otra orientación hacia la creación de modelos y sistemas de



optimización basados en diversas tecnologías y en la resolución de problemas de diversa índole. Aunque en Latinoamérica el PC goza de mayor popularidad, quizá por la misma facilidad con la cual muchos autores abordan sus campos de conceptualización, epistemologías, estrategias investigativas y preceptos disciplinares, en algunas ocasiones consagrados a determinados autores, en la academia anglosajona no ocurre del mismo modo. Por ejemplo, en una enciclopedia como la editada por Meyers [12] la cual consta de cerca de 10.450 páginas, el PC [*complex thinking*] no es aludido en absoluto. En un índice de capital importancia como lo es ScienDirect.com propiedad de Elsevier el término *complex sciences* reporta 2.149.938 pero el termino *complex thinking* puntúa un total de 198.949 entradas.

Conte, Paolucci, y Cecconi [13] encontraron en una reciente investigación sobre modelos basados en agentes (MBAs), columna vertebral de las ciencias sociales computacionales y complejas, que tienen en la actualidad más importancia en su número de publicaciones que otros campos científicos bastante consolidados. Su evaluación de los impactos de los modelos computacionales y simulativos es satisfactoria, y fue realizada sobre una base de datos importante como lo es Google Scholar. El presente estudio se suma a esta línea de trabajo.

La corriente principal de la implementación de estas tecnologías se establece a partir de los marcos teóricos de la complejidad, y es conocida como ciencias sociales computacionales (CSC). Para Cioffi-Revilla [14], las CSC cubren cuatro áreas principales y enfoques metodológicos; 1) la extracción automatizada de información; 2) las redes sociales; 3) la complejidad social, y 4) la simulación social. Las relaciones formales surgen entre los cuatro campos a partir de leyes, modelos, medidas, metodologías y escalas, y sus principales diferencias radican en los enfoques desde los cuales las CSC provienen; las ciencias computacionales y las ciencias sociales. En las primeras, el foco se centra en los desarrollos algorítmicos y computacionales a partir de diferentes tipos de datos, variables y modelos, y en las segundas los modelos parten de los métodos derivados del análisis de datos empíricos, la explicación teórica y la simulación informática [15], entre otras posibilidades como los análisis históricos o lingüísticos.

Como se puede ver, dentro de la corriente principal de las CCS se encuentran las CSC. Por esta razón, es indispensable reconocer la necesidad de continuar el diálogo transdisciplinar entre ambas formas de realización científica sobre los fenómenos complejos y la identificación de sus propiedades. Debido a que no existe, según nuestras consultas, un trabajo formal en el cual se relacionen a partir de indicadores los 35 campos que componen las CCS, sí se parte de la emblemática enciclopedia editada por Meyers [12] el presente trabajo encuentra asidero en la búsqueda de establecer un perfil introductorio de la situación actual de las CCS a partir de la consideración cuantitativa de la producción científica publicada de estos campos.

Conforme con lo anterior, esta propuesta tiene como objetivo principal especificar cuáles son las ciencias de la complejidad y de sistemas, y realizar el análisis de su impacto actual a través del estudio de sus relaciones e importancia en el



mundo científico. Los resultados nos ayudan a comparar el ritmo de expansión de los diversos campos que componen las CCS. En tanto indicador, se presenta la notoria importancia de los modelos y simulaciones utilizadas hacia lo que hemos denominado tecnologías de investigación social (TIS) [16].

MÉTODO

Metódica y materiales

Para el presente estudio se utilizaron los indicadores de la base de datos de ScienceDirect propiedad de Elsevier. El índice se construyó con base en la discriminación temática y disciplinar realizada por Meyers [12] en la mayor enciclopedia que se conozca sobre las CCS hasta la fecha. El resultado fueron 35 campos que componen las CCS y el proceso consistió en documentar las etiquetas de publicación de las 35 áreas en cuestión hasta el 6 de junio de 2018 (ver tablas 1, 2 y 3), lo cual para la fecha registraba trabajos del año 2019.

Como consecuencia de los resultados establecidos se prosiguió a realizar la modelación de una red entre las diversas áreas o disciplinas seleccionadas para evidenciar los grafos que simulan la red de la CCS. Es importante recordar que para este estudio el análisis de la red simulada se basó en los atributos cuantitativos determinados por el número de publicaciones de cada campo a partir de las diferentes variables obtenidas. El análisis cualitativo se basó en los grafos obtenidos de las diferentes visualizaciones y simulaciones emprendidas.

Debido al carácter exploratorio de este estudio, se utilizaron diferentes relaciones entre los campos de la red para evidenciar los niveles de importancia e impacto de los diferentes campos que componen las CCS. El método fue el análisis de redes sociales (ARS) empleado a partir de: 1) la extracción/adquisición de los datos iniciales mediante una indagación preliminar; 2) un posterior análisis de datos establecido sobre las posibilidades que brinda el ARS; y 3) una simulación basada en los atributos de la red edificada sobre los datos relacionados.

Instrumentos y técnicas de recolección de datos

Para consolidar la información se creó una planilla con los datos de las 35 áreas seleccionadas a partir de la refinación del volumen de producción de cada campo desde 1995 hasta 2019. El total de variables consideradas (cada una de las características de los campos de las ciencias de la complejidad y de sistemas que arroja la plataforma) fue de 24, todas de tipo continuo. Posteriormente se diseñó la planilla de codificación de la red propuesta y se introdujeron los atributos con el fin de visualizar las relaciones entre los campos que componen y definen las CCS. No obstante, para determinar los valores de los atributos en este estudio sólo se utilizaron 5 variables continuas de las 24 obtenidas, consideradas de capital importancia.



Con el ánimo de tener una perspectiva complementaria se indagó sobre la etiqueta *complex sciences* en la base documental de ScienceDirect la cual arrojó 2.149.938 trabajos publicados al 6 de junio de 2018, lo cual incluye a la fecha publicaciones del año 2019. A partir de este indicador se concluyen algunos aspectos relacionados con el impacto gradual de las CCS en el mundo científico (ver figura 1).

Técnicas de análisis de datos

Se utilizó el programa UCINET v.6.516 para establecer el análisis y modelación de la red diseñada, y para su visualización se empleó el programa asociado NetDraw v.2.139 incluido dentro del primer paquete. Los parámetros de análisis se derivan de [17], el cual es un libro teórico y manual del uso de este software. Como complemento se graficó la matriz de diagrama de dispersión de los atributos de la red propuesta con el software PermutMatrix v.1.9.3 EN [19] para la identificación de las seriaciones resultantes en la red.

Procedimiento

Sobre lo anterior como complemento del presente trabajo se suma la realización de una indagación bibliográfica sobre discusiones recientes adelantadas sobre las perspectivas de complejidad a propósito de las ciencias sociales desde Latinoamérica.

RESULTADOS

Uno de los primeros resultados indica la progresiva magnitud del crecimiento de las CCS. Como se aprecia en la figura 1 el *total de artículos, artículos de revisión y artículos de investigación* de los 35 campos de las CCS, establece que desde 1995 hasta 2017 el volumen de producción de este macrocampo científico se incrementó casi el doble, ya que en este lapso de tiempo pasó de 65,753 trabajos publicados a 107,720 en el último año, tal como se presenta en la tabla 1 y su respectivo gráfico. Se identifica cierta inestabilidad hacia el inicio del nuevo siglo, pero diez años después las teorías complejas y sus metodologías retomarían el fuerte impacto que presentaron en la comunidad científica a mediados de la década del noventa. Sin duda, al finalizar el año 2019 según los indicadores del año 2018 muestran que el nivel de producción de las CCS aumentará de manera considerable. Ambos años presentan los *drafts* aceptados previos a su publicación, como suele ser usual en la ciencia contemporánea, además de los ya publicados.

Tabla 1. Número de publicaciones con la etiqueta *complex sciences* entre 1995 y el 2018 (incluye parte del 2019)

Año de publicación	Número de publicaciones con el termino <i>Complex Sciences</i> (refinadas por años)
2019	108
2018	76,726
2017	107,720
2016	98,598
2015	96,894
2014	86,983
2013	80,595
2012	72,769
2011	66,847
2010	59,611
2009	58,029
2008	55,613
2007	52,460
2006	50,308
2005	44,472
2004	38,701
2003	38,187
2002	32,912
2001	33,839
2000	30,025
1999	31,584
1998	41,274
1997	61,211
1996	65,904
1995	65,753

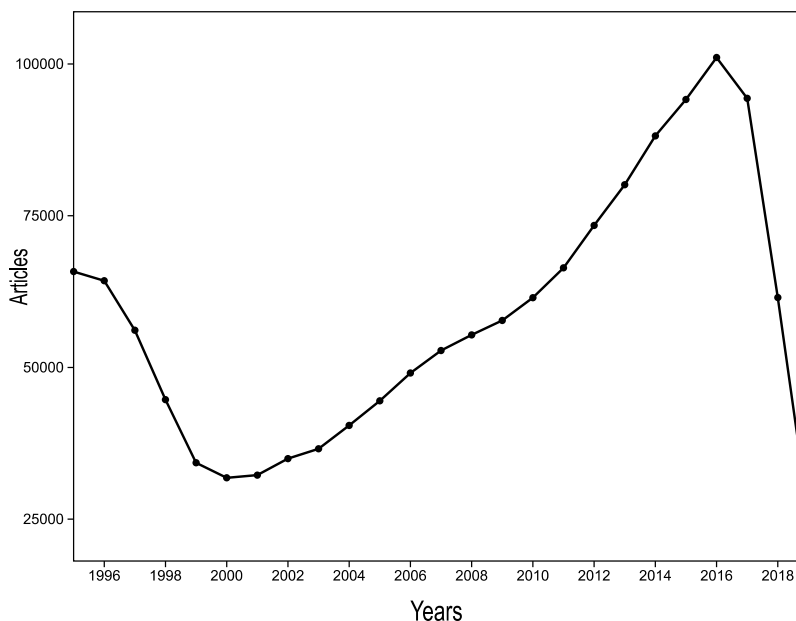


Figura 1. Visualización anual del total de artículos, artículos de revisión, artículos de investigación, entradas de enciclopedia y capítulos de libros de los 35 campos de las CCS entre 1995 y 2018 (incluye parte del 2019)

Otro de los hallazgos de este estudio establece que dentro de los 35 campos de la complejidad, los sistemas de control y dinámicos (SCD) con un total de 1.202.818 publicaciones dominan el campo de las CCS por un margen de casi 40.000 publicaciones en total sobre los sistemas dinámicos (SD) básicos que cuentan con un –también impresionante– número de publicaciones 1.137.403, seguidos de cerca del campo de la biología de sistemas (BS) 1.064.302 (ver tabla 2). Se dice que: “Formalmente, un modelo SD consiste en un sistema de ecuaciones de diferencia de tiempo discreto con diferenciación hacia delante o hacia atrás (...) Un modelo completo de simulación social SD consiste en diagramas causales que explican la red de dependencias y la implementación del código asociado” [14]. Esta distinción es necesaria para comprender la naturaleza de la modelación. Se dice que existen como mínimo dos tipos de modelos orientados a variables (*Variable-oriented models*) donde entran la popular dinámica de sistemas y los modelos derivados de la teoría de colas, y los modelos orientados a objetos (*Object-oriented models*) donde los autómatas celulares (AC’s) y los modelos basados en agentes (MBA’s) son ejemplares modélicos de este tipo. En su intersección se encuentran las simulaciones sociales híbridas (*Hybrid social simulations*) [14] los cuales incluyen parámetros adicionales en los modelos con el fin de identificar contextos más reales donde ocurren, tales parámetros incluyen por ejemplo, integrar capacidades cognitivas en los



agentes y demás capacidades de relacionamiento social es decir, aquello que podemos denominar inteligencia [18].

Tabla 2. Campos de las CCS y 5 indicadores totales de producción científica

Campos	Total de artículos	Artículos de revisión	Artículos de investigación	Enciclopedia	Capítulos de libros
1. Modelado y simulación basados en agentes (MBAS)	138,891	11,572	96,977	1,878	10,750
2. Aplicaciones de física y matemáticas a las ciencias Sociales (AFMCS)	17,157	864	9,603	496	2,619
3. Autómatas celulares y sus bases matemáticas (ACS)	3,701	303	2,585	99	342
4. Caos y Complejidad en astrofísica (CCA)	25,411	1,363	17,236	404	2,993
5. Modelado climático, calentamiento global y predicción del tiempo (MCCGPT)	15,621	1,244	10,626	694	1,459
6. Redes complejas y teoría de grafos (RCTG)	68,076	4,107	48,842	876	8,181
7. Complejidad y no-linealidad en robótica autónoma (CNLRA)	3,464	142	2,543	43	256
8. Complejidad en química computacional (CQC)	40,714	5,300	26,219	1,203	4,768
9. Complejidad en terremotos, tsunamis y volcanes, y previsión y alerta temprana de sus peligros (CTTVPATP)	119	15	36	12	23
10. Nanociencia computacional y teórica (NCT)	2,777	228	1,097	51	165
11. Sistemas de control y dinámicos (SCD)	1,202,818	78,431	882,978	13,305	97,205
12. Minería de datos y descubrimiento de conocimiento (MDDC)	25,554	2,711	15,777	550	3,455
13. Complejidad ecológica (CE)	89,392	7,904	61,231	2,866	9,113
14. Teoría ergódica (TE)	23,442	777	18,054	198	1,674
15. Finanzas y econometría (FE)	33,471	967	27,567	160	1,479
16. Fractales y multifractales (FM)	4,126	119	3,278	28	142
17. Teoría de juegos (TJ)	119,102	4,968	81,785	2,009	12,674
18. Computación granular (CG)	55,265	2,548	40,216	369	5,970
19. Sistemas inteligentes (SI)	213,523	7,205	142,160	1,639	21,781
20. Ecuaciones diferenciales ordinarias no-lineales y sistemas dinámicos (EDONLSD)	40,189	1,727	30,557	421	3,925
21. Ecuaciones diferenciales parciales no-lineales (EDPNL)	109,226	3,275	85,507	1,021	9,531
22. Percolación (P)	94,892	3,735	71,986	1,146	6,732
23. Teoría de la perturbación (TP)	292,606	13,089	226,236	2,923	20,153
24. Probabilidad y estadística en sistemas complejos (PESC)	152,726	7,731	120,007	1,768	13,146
25. Ciencia de la información cuántica (CIC)	146,308	9,016	106,287	2,268	10,935
26. Análisis de redes sociales (ARS)	310,117	21,182	220,246	6,190	24,766
27. Computación suave (CS)	685,802	24,695	526,731	3,115	43,515
28. Soluciones (SOL)	39,734	828	30,624	216	1,047
29. Física estadística y no-lineal (FENL)	54,097	2,678	37,716	970	4,588
30. Sinérgica (S)	31,403	2,021	24,620	159	1,319
31. Sistemas dinámicos (SD)	1,137,403	59,689	846,469	11,747	65,638
32. Biología de sistemas (BS)	1,064,302	94,663	671,376	12,369	64,889
33. Dinámica compleja de la gestión del tráfico (DCGT)	16,921	1,055	11,897	272	2,132
34. Computación no convencional (CNC)	12,118	781	8,587	138	1,194
35. Wavelets (W)	61,400	2,078	46,955	345	2,948

Fuente: elaboración propia partir de datos de ScienceDirect. Consultado el 6 de junio de 2018

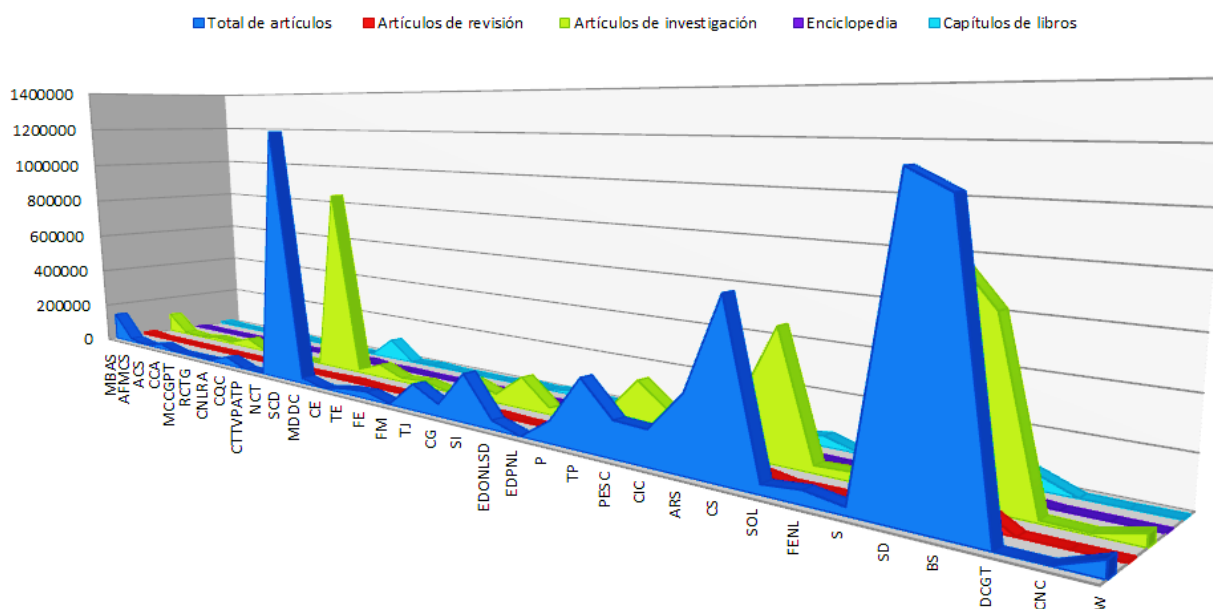


Figura 2. Total de artículos, artículos de revisión y artículos de investigación de los 35 campos de las CCS

La figura 2 evidencia las relaciones entre los 35 campos de las CCS. Se observa la superioridad del volumen de producción de los SCD, la SD, y la BS, su relevancia se presenta en las variables total de artículos y artículos de investigación. En este último indicador el nivel publicación es desbordante: los SCD aparecen con 882978 entradas, la SD presentan 846.469 items y la BS reporta 671,376 trabajos. Sin embargo, un campo emergente como lo es la computación suave (CS) obtuvo un sorprendente número 526.731 de reportes investigativos. Asimismo, los campos del ARS el cual obtuvo un decoroso número de 220.246 entradas y la teoría de la perturbación (TP) presenta un importante número de 226.236 trabajos publicados en la misma variable.

Red de las CCS

Para evidenciar las relaciones entre los campos de las CCS se simuló una red de todos los campos que la componen. En este proceso se empleó una serie de relaciones directas entre todos los nodos (*nodes*) debido a la dificultad que implica establecer relaciones de este tipo a partir de criterios subjetivos. Con el ánimo de identificar en la red relaciones basadas en los atributos recaudados en la exploración adelantada, se procedió a identificar las distancias y similitudes a partir del cómputo y posterior visualización de la red. De manera general, la red presenta un total de 35 nodos, 1190 vínculos (*arcs*) y una alta densidad 1.

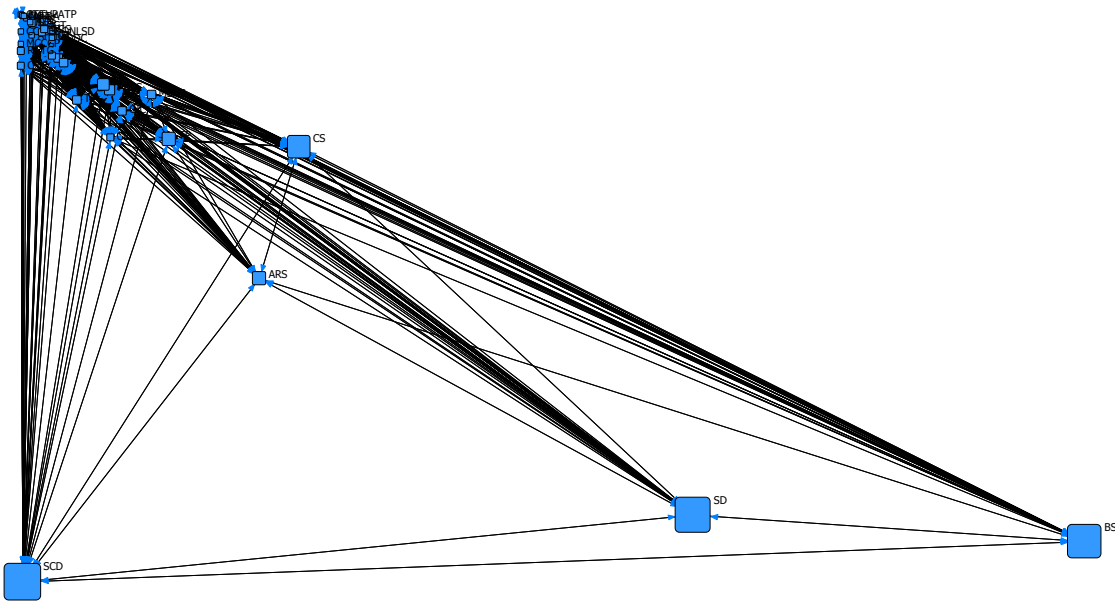


Figura 3. Red visualizada con los atributos (variables) en eje x (variable horizontal) = total de artículos y el eje y (variable vertical) = artículos de investigación.

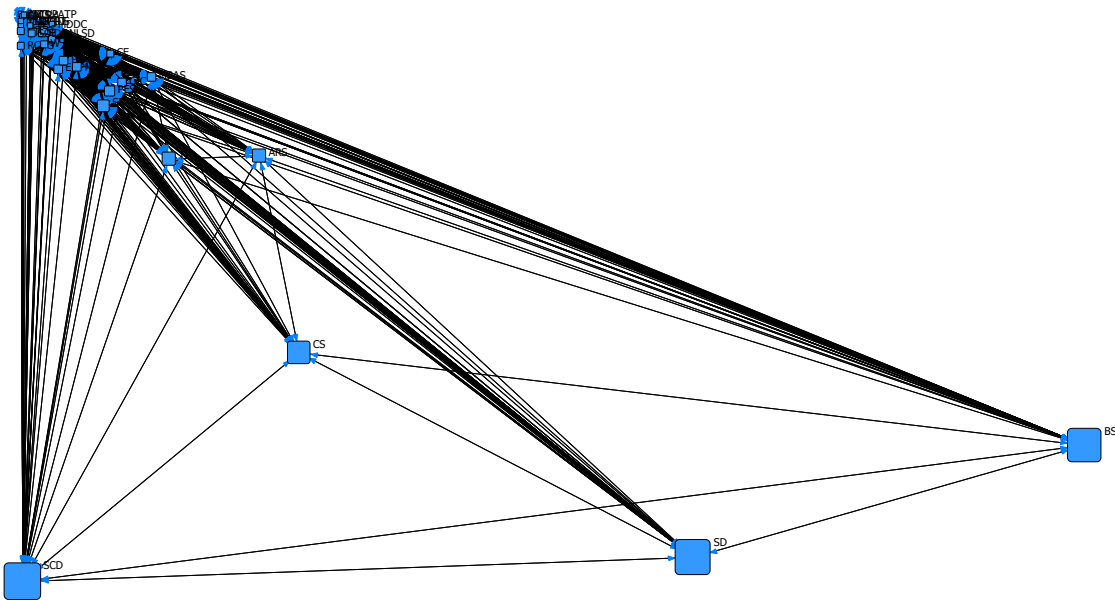


Figura 4. Red visualizada con los atributos (variables) en el eje x (variable horizontal) = total de artículos y el eje y (variable vertical) = artículos de revisión.

Las figuras 3 y 4 presentan los grafos resultantes que evidencian cómo los patrones de vínculos difieren dentro y entre los nodos. En efecto, se visualizó el tamaño de cada nodo a partir del nivel de preponderancia que cada una de las variables presenta en cada campo de las CCS. Es decir, debido al volumen registrado de la producción de cada campo, se determinó el tamaño de cada nodo. Para una visualización del distanciamiento entre cada nodo de la red se empleó la visualización

por atributos como coordenadas dentro del espacio de la red. En este sentido, los atributos como coordenadas, representan el aislamiento y los nodos ocultos y visibles recrean las distancias entre los campos que componen la red. Por consiguiente, los grafos planteados en 2 dimensiones (figuras 3 y 4) presentan un alineamiento horizontal cercano entre los SCD, los SD, la BS y la CS. Un acercamiento triangular menor ocurre con el ARS, la TP y los SI y el resto de los componentes de la red.

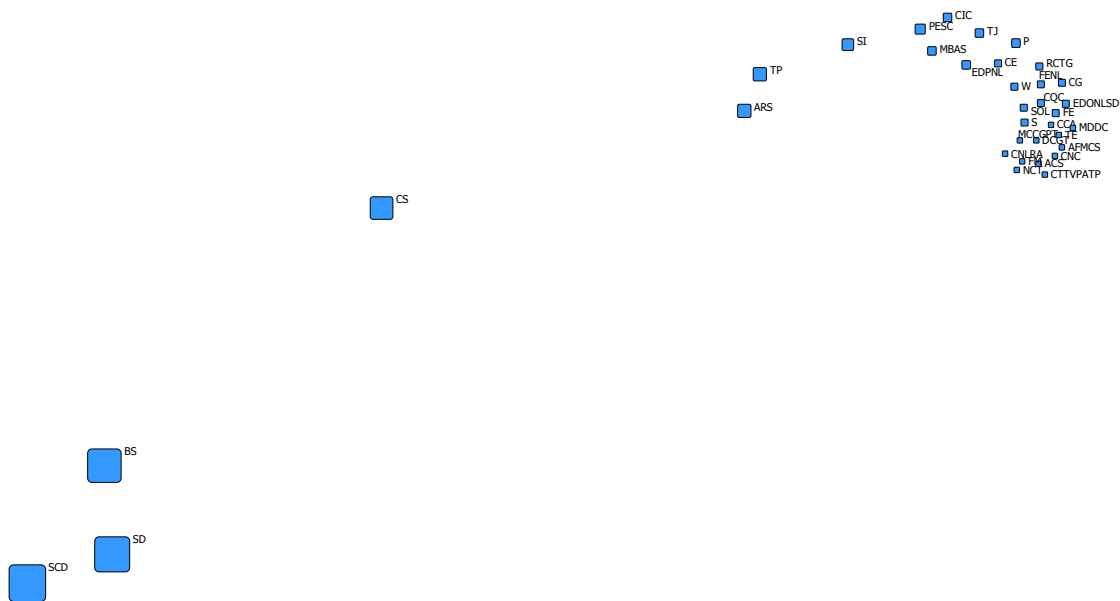


Figura 5. Escalado multidimensional (en inglés MDS) de la red de las CCS.

La figura 5 presenta el agrupamiento de los nodos –como se puede observar– y refleja una cercanía de tipo euclidiano en un espacio métrico por ende topológico en dos dimensiones sobre los datos establecidos, lo cual refleja las distancias entre los campos de las CCS a partir de las similitudes que componen el conjunto de datos presentados, identificados como puntos azules –como se dijo de diferentes tamaños– en el espacio de la red. Las distancias se obtuvieron de las relaciones entre los 5 ítems seleccionados para el análisis y presentaron un *stress* inicial de 0.094361997 y un *stress* final de 0.049 después de 12 iteraciones. En este contexto el *stress* es la cantidad de distorsión de un mapa, por lo tanto el objetivo de los algoritmos de escalado multidimensional es reducir el *estress* [17]. La figura 5 también ejemplifica la cercanía en términos de la producción científica de los 28 campos restantes que conforman las CCS.

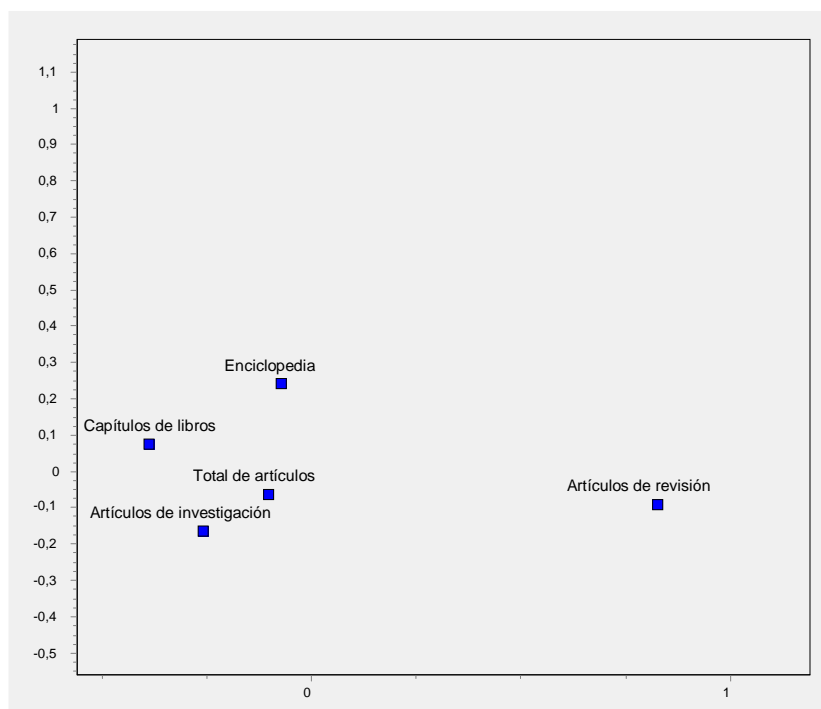


Figura 6. Escalado multidimensional MDS de los atributos de la red de las CCS.

El objetivo del MDS es proporcionar una representación visual del patrón de proximidades entre un conjunto de objetos [17] lo cual se puede observar en la figura 6. Los campos de las CCS están ubicados en el espacio de modo que dos campos con perfiles similares a lo largo del tiempo y a partir de los diferentes volúmenes de producción científica escrita se sitúan uno cerca del otro. Las variables *total de artículos* y *artículos de investigación* evidencian vínculos *relativamente fuertes*, lo cual significa que el valor de los datos es grande en relación con los valores de fila y columna [17]. Es importante manifestar que las variables presentadas como atributos de la red, no son campos de producción científica nominalmente distintos entre sí, por el contrario son modalidades complementarias que identifican las direcciones a partir de las cuales se puede establecer –como en efecto, se observa– una tendencia hacia donde se dirigen las CCS.

Por otra parte, la figura 6 también presenta que el conjunto de los datos muestra con mayor relevancia la variable *artículos de investigación*. El poder de esta variable indica el fructuoso panorama investigativo de las CCS en el contexto internacional. Este prometedor panorama se relaciona con el amplio número de centros de investigación de las CCS ligados a las principales academias del planeta, el alto nivel de sus presupuestos conceptuales y metodológicos, y el constante flujo de saberes que de modo general recorren la transdisciplina compleja.

Como se puede observar a partir de los resultados presentados no es posible hablar de una teoría compleja absoluta o acabada, por el contrario los 35 campos relacionados aquí, amerita identificar algunas diferencias entre los enfoques de sistemas generales y la complejidad organizada por ejemplo, los flujos, las dinámicas



de sistemas, los niveles de sensibilidad, presupuestos conceptuales o el plano teórico, el primero de arriba hacia abajo y la segunda de abajo hacia arriba, y además considerar las similitudes entre ambos enfoques, por ejemplo, la modelación formal, el lenguaje técnico o las simulaciones.

Seriación de las CCS

Otro de los aspectos investigados fue la seriación de los datos presentados como atributos de la red ya que esta metodología permite establecer una secuencia u ordenación de los datos presentados a nivel estadístico. En su naturaleza, este método busca describir el mejor orden de enumeración de un conjunto de objetos descritos, utilizando una estructura secuencial a partir de los datos utilizados en las variables empleadas. En nuestro caso, la utilización de esta posibilidad se establece sobre un marco comparativo el cual presenta una interesante visualización de las CCS y sus distancias.

Este método busca encontrar una enumeración de filas o columnas que mejor exprese las relaciones de semejanza entre los elementos que constituyen un conjunto. Para establecer una relación consistente se utiliza la seriación de las filas o columnas de un conjunto de datos, desde lo cual se obtienen formas independientes no necesariamente bajo un agrupamiento jerárquico. En la implementación llevada a cabo en este estudio la matriz simétrica cuadrada contiene medidas de semejanza entre pares de elementos.

Los criterios de optimización para esta implementación son los siguientes. Las filas contienen un objetivo de función que presenta un coeficiente de Pearson $R = 0.453$, una longitud de la trayectoria (la suma de la distancia entre pares de filas vecinas) $S = 1570310.002$ y las columnas presentan un indicador de $R = 0.470$, una longitud de la trayectoria $S = 5383528.011$ con disimilitud a partir de una distancia euclidiana. Se empleó una regla de enlace (*linkage rule*) de vinculación simple (*single linkage*) también conocida como vecino más cercano (*nearest neighbor*), y una regla de seriación arbórea de escalamiento unidimensional (*unidimensional scaling UDS*) con un método de discriminación numérico.

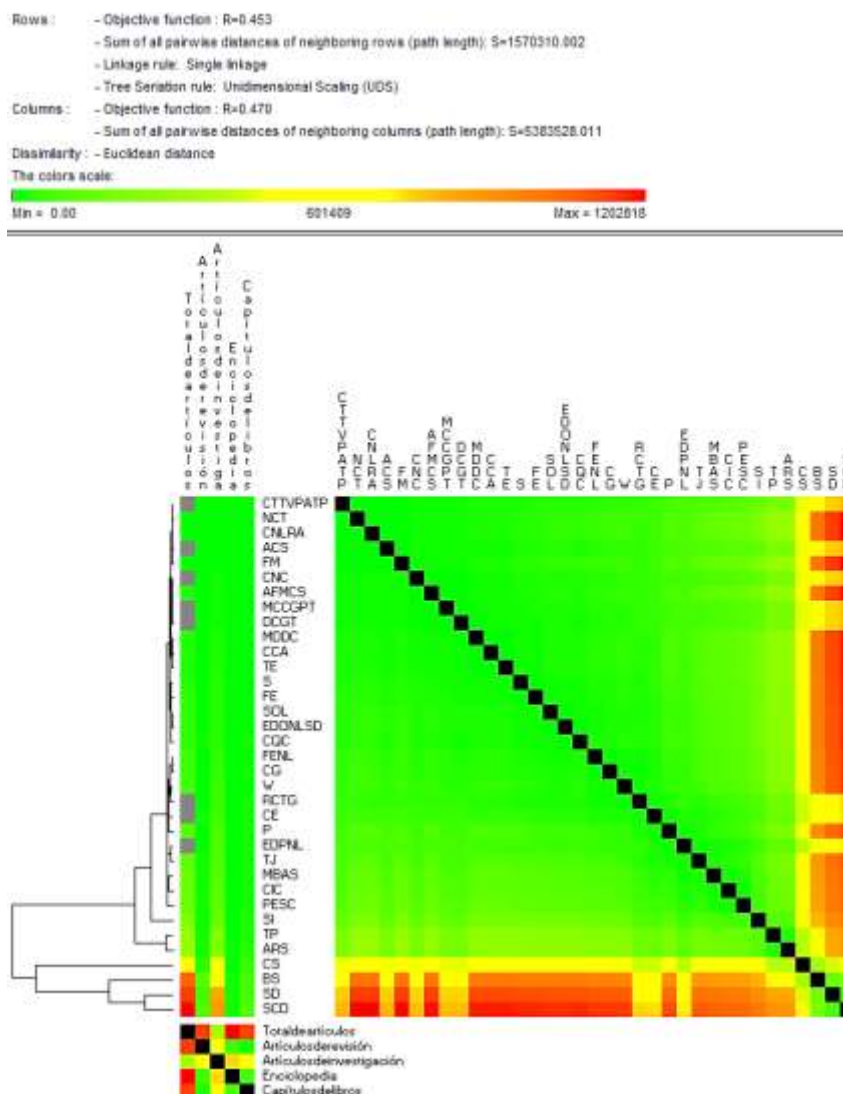


Figura 7. Seriación de las CCS a partir de sus distancias de disimilitud.

En la figura 7 se presentan las distancias entre los diferentes campos de las CCS a partir de las distancias de disimilitud entre los diferentes atributos. Se puede apreciar cómo el método de conglomerado (*clustering method*) agrupó bajo el criterio de agregación señalado, un árbol obtenido por agrupamiento jerárquico, lo cual indica la prominencia de los SCD, los SD, la BS, y la CS. Esta relación es lógica y consistente con lo descrito a lo largo de este análisis. En lo que respecta a las CSC se evidencia la prominencia del ARS revela un campo bastante productivo con relación a las principales corrientes de trabajo en las CCS. En el caso de la CS es una excelente noticia que las lógicas difusa y probabilística, las diferentes metaheurísticas, la neurocomputación o los métodos de búsqueda y optimización tengan un marco de acción tan amplio en el cuerpo bibliográfico de las CCS, sí recordamos la utilidad de este tipo de modelos en las ciencias humanas y sociales.



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Una de las primeras conclusiones indica que los SCD son un campo bastante heterogéneo y su popular uso en diferentes marcos de trabajo y perspectivas interdisciplinarias se explica por su larga tradición de uso, debates y diversas aplicaciones en la arena científica. Los presupuestos cibernéticos o sistemas de control que incluye esta metodología también son usuales y evolucionaron en diferentes disciplinas, además al lado de otras tecnologías como los MBAS, ACs, y la CS los SCD se alían con frecuencia en diferentes estrategias investigativas difíciles de abordar en el espacio dedicado a este escrito.

Este trabajo pone de relieve el creciente e importante impacto del modelado social mediante tecnologías vanguardistas. Aunque sabemos que las ideas de complejidad son bastante antiguas, los desarrollos computacionales recientes son bastante interesantes para su aplicación en diversas problemáticas de la organización y dinámicas sociopoblacionales multigeográficas. Al margen de la retórica discursiva habitual en algunos campos de las ciencias sociales y humanas desde hace 30 años aproximadamente el potencial algorítmico de la complejidad propició una verdadera revolución metodológica para indagar los aspectos de los diversos mundos sociales contemporáneos desde los más diversos objetivos de estudio.

Para Epstein [20], el propósito de la simulación social involucra como eje motivador generar los aspectos de las dinámicas sociales, y su objetivo multipropósito es definido como ciencia social generativa. Su propuesta implica la modelación matemática, la inclusión de aspectos cognitivos en los modelos de simulación, los MBAs y sus componentes racionales, afectivos y sociales, la computación y las extensiones del estudio de las dinámicas de sistemas desde el no-equilibrio. Su ambiciosa propuesta es bastante sustancial y demuestra ejemplos prácticos y de libre acceso para cualquier estudioso interesado en estas perspectivas.

En esta misma línea heterodoxa de investigación, Axelrod [21] desde la década de los ochenta invitaba de manera cordial a los estudiosos de las diversas disciplinas a conocer las técnicas y conceptos de la complejidad a partir de la exploración formal de los MBAs, el modelado de abajo hacia arriba y los sistemas sociales artificiales que él y su equipo popularizarían –a partir de sus impresionantes resultados sobre simulaciones de sociedades artificiales– en la década de los años noventa.

Miller y Page [22] introdujeron un espléndida ejemplificación de los usos de las metodologías complejas en las ciencias sociales a partir del estudio de diversos sistemas complejos adaptativos. Para estos autores, la complejidad de lo social deviene la irreductibilidad de los elementos que conforman un sistema social. Así, un sistema exhibe una fuerza organizativa que proviene de abajo hacia arriba, donde una pequeña modificación en sus condiciones iniciales desencadena una conducta compleja en el sentido no-lineal del término. Todo indica que la tendencia de un



sistema social apunta a la producción de complejidad. En este punto, los modelos devienen en mapas de la realidad, donde se pueden efectuar asignaciones verosímiles de clase de equivalencia sobre los más disímiles y diversos fenómenos. El modelado computacional aparece como una posibilidad de abordar cuestiones de esta naturaleza.

En definitiva, con este estudio pretendimos extender la comprensión de los componentes principales de las designadas ciencias de la complejidad. Todo ello da como resultado una importante red de campos que revela un alto nivel de interdependencia. Aunque para los lectores familiarizados con las CCS algunos campos presentados en este espacio podrían no ser parte de la red presentada, el crecimiento independiente de sus elementos constituyentes proporciona una idea sólida de los aportes científicos de cada uno, y sobre todo de la magnitud de esas ideas a nivel investigativo. Estos resultados también descentralizan la antigua idea de que la complejidad se constituye por los sistemas complejos adaptivos, los fractales, el caos, la dinámica no-lineal, la termodinámica, o un manojito de algoritmos de computación al servicio de problematizaciones de cualquier índole. Por el contrario, los altos volúmenes de trabajos registrados en campos disciplinares tan variados como la teoría de juegos (TJ), los MBAs, el ARS, la ciencia de la información cuántica (CIC) o la teoría de la perturbación (TP) entre otros, demuestra la necesidad de profundizar en las CCS como algo mucho más profundo que la opinión simple emanada desde el habitual sentido común.

Las estadísticas de las redes de la vida real demuestran los niveles de complejidad de muchos fenómenos que presentan distribuciones mixtas. Estas perspectivas metodológicas son capaces de reconstruir redes que se encuentran en un estado de falta de información [23] [24]. Abordajes similares respecto a enfoques metodológicos mixtos encuentran aplicaciones en variados objetos de investigación; imágenes, redes sociales y textos [25], donde las barreras disciplinares se ven permeadas por una serie de presupuestos transdisciplinarios que abogan por modelos investigativos mixtos aplicados al descubrimiento de sistemas complejos, niveles de interacción, patrones y propiedades estructurales, rasgos colectivos de fenómenos emergentes, comportamientos colectivos e individuales, principios complejos de optimización y procesos dinámicos, resultado de exploraciones empíricas y simulaciones que proponen técnicas de refinamiento en el manejo de los datos y la precisión de sus análisis.

Las limitaciones del presente estudio se encuentran en la imposibilidad de contrastar la información obtenida con otra plataforma dedicada a la publicación de estudios científicos, reportes de diversa índole o la administración de una cantidad similar de producción científica publicada en el nivel que posee la fuente consultada. Esta situación impide en la actualidad contrastar con algunos parámetros como los expuestos en este espacio.

Queda pendiente establecer un número mayor de relaciones posibles entre los 35 campos identificados como parte de las ciencias de la complejidad y de sistemas.



Podría ser discutible incluir o no como CCS algunos de los campos incluidos en este estudio. No obstante, el criterio de selección –como se explicó– es un monumental referente a este respecto. Por otro lado, tal como se manifiesta en [26], las CSC demandan una comprensión teórica desde sus variadas aplicaciones en consonancia con los presupuestos de la simulación social y la teorización de los mecanismos sociales que afectan los sistemas complejos sociales humanos y la emergencia de sus fenómenos y comportamientos.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Esta investigación no contó con ningún tipo de financiamiento externo al de los autores.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés en la elaboración de esta investigación.

APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Este estudio es un aporte sobre el estado actual de las referenciadas –pero muy poco definidas– ciencias de la complejidad. Es un intento original de definir el impacto de los 35 campos identificados que conforman las ciencias de la complejidad a partir de indicadores fiables. Por otra parte, es una contribución objetiva sobre la discusión del debate actual sobre las ciencias de la complejidad y el pensamiento complejo desde Latinoamérica.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

Juan David Luján. Idea de investigación, modelación, análisis y redacción de artículo. Roberto Carlos Luján. Idea de investigación, análisis y redacción del artículo.

REFERENCIAS

- [1] L. Rodríguez. (coord). La emergencia de los enfoques de complejidad en América Latina. Desafíos, contribuciones y compromisos para abordar los problemas complejos del siglo XXI. Tomo I. Buenos Aires: Comunidad Editora Latinoamericana, 2016.
- [2] Grupo Anthropokaos. Estudios en antropología compleja. Buenos Aires: Editorial SB, 2006.
- [3] C.E. Maldonado. (ed.). Complejidad: ciencia, pensamiento y aplicaciones. Bogotá: Universidad Externado de Colombia, 2007.




- [4] C.E. Maldonado y N.A. Gómez Cruz. El mundo de las ciencias de la complejidad. Un estado del arte. Documento de Investigación No. 76. Bogotá D.C., Colombia: Universidad del Rosario, 2010.
- [5] L. Rodríguez y J.L. Aguirre. Teorías de la complejidad y ciencias sociales. Nuevas Estrategias Epistemológicas y Metodológicas. *Nómadas*, vol. 30, núm. 2, 2011-2012.
- [6] C. Reynoso. Complejidad y caos: Una exploración antropológica. Buenos Aires: Editorial SB, 2006.
- [7] C. Reynoso. Modelos o metáforas. Crítica del paradigma de la complejidad de Edgar Morin. Buenos Aires: Editorial SB, 2009.
- [8] J.L. Solana. (coord.). Con Edgar Morin, por un pensamiento complejo. Madrid, España: Universidad Internacional de Andalucía/Akal, 2005.
- [9] J.L. Solana. El pensamiento complejo de Edgar Morin. Críticas, incomprensiones y revisiones necesarias. *Gazeta de Antropología*, vol. 27, núm. 1, 2011.
- [10] P. Sotolongo y C.J. Delgado. La revolución contemporánea del saber y la complejidad social. Hacia unas ciencias sociales de un nuevo tipo. Buenos Aires: Campus Virtual, CLACSO Libros, 2006.
- [11] D. Helbing. Pluralistic modeling of complex systems, 2010. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1007.2818.pdf>
- [12] R. Meyers. (ed). Encyclopedia of Complexity and Systems Science. New York: Springer, 2009.
- [13] R. Conte, M. Paolucci y F. Cecconi. Trends in Social Science: The Impact of Computational and Simulative Models, en *New Frontiers in the Study of Social Phenomena*, F. Cecconi, Ed. Cham: Springer, 2016, pp. 145-152.
- [14] C. Cioffi-Revilla. Introduction to Computational Social Science: Principles and Applications. Cham: Springer, 2017.
- [15] N.P. Hummon y T.J. Fararo, The Emergence of Computational Sociology. *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 20, núm. 2-3, pp. 79-87, 1995.
- [16] J.D. Luján Villar. Ciencias sociales y sostenibilidad: tecnologías de investigación social aplicadas a lo urbano y lo rural. *Revista de Antropología y Sociología: VIRAJES*, vol. 20, núm 1, 61-81, 2018.
- [17] S.P. Borgatti, M.G. Everett y C. Johnson. Analyzing social networks. London: SAGE Publications Limited, 2013.
- [18] A. Caballero y J. Botía. Hybrid multi-agent system simulations: Cognitive and social agents. 2012 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), pp. 1231-1238, 9-12 Sept, 2012.




- [19] G. Caraux y S. Pinloche. PermutMatrix: a graphical environment to arrange gene expression profiles in optimal linear order. *Bioinformatics*, 2005 vol. 21, núm. 7, pp. 1280-1281, 2005.
- [20] Epstein, J.M. *Agent zero: toward neurocognitive foundations for generative social science*. New Jersey: Princeton University Press, 2014.
- [21] R. Axelrod. *La Complejidad de la Cooperación: Modelos de Cooperación y Colaboración Basados en Agentes*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica, 2004.
- [22] J. Miller y S. Page. *Complex adaptive systems: An introduction to computational models in social life*. Princeton: Princeton University Press, 2007.
- [23] G. Cimini, T. Squartini, F. Saracco, D. Garlaschelli, A. Gabrielli y G. Caldarelli. The statistical physics of real- world networks. *Nature Reviews Physics*, vol. 1, pp. 58-71, 2019.
- [24] MT. Thai, W. Wu y H. Xiong. *Big data in complex and social networks*. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [25] W. van der Aalst, I.I. Dmitry, M. Khachay, S.O. Kuznetsov, V. Lempitsky, I.A. Lomazova, N. Loukachevitch, A. Napoli, A. Panchenko, P.M. Pardalos, A.V. Savchenko y S. Wasserman (editores). *Analysis of Images, Social Networks and Texts*. 6th International Conference, AIST 2017. Moscow, Russia, July 27-29, 2017. Revised Selected Papers. Cham: Springer, 2018.
- [26] R. Conte, G. Bonelli, N. Gilbert, C. Cioffi-Revilla, G. Deffuant, J. Kertesz, V. Loreto, S. Moat, J-P. Nadal, A. Sanchez, A. Nowak, A. Flache, M. San Miguel, y D. Helbing. Manifesto of computational social science. *European Physical Journal. Special Topics*, vol. 214, núm 1, pp. 325-346, 2012.

NOTA BIOGRÁFICA



Juan David Luján-Villar. ORCID ID.  <https://orcid.org/0000-0001-8622-4774>. Licenciado en Educación Artística. Magister en Investigación Social Interdisciplinaria. Docente de la Secretaría de Educación Distrital. Miembro del Grupo de Investigación Literatura, Educación y Comunicación (LEC), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.



Roberto Carlos Luján Villar. ORCID ID.  <https://orcid.org/0000-0001-6435-4412>.
Sociólogo. Estudiante Doctorado en Salud, Universidad Del Valle. Investigador asociado de la Fundación para el Desarrollo de la Salud Pública (FUNDESALUD). Cali, Colombia.



Esta obra está sujeta a la Licencia Reconocimiento-SinObraDerivada 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/> o envíe una carta Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.