

Ecosystem Visualization and Diversity Analysis of the Fourth Digital Age in Architecture

Aarón Tadeo Onchi-Rascón¹, Jorge Alberto Cid-Cruz¹, Camilo Caraveo-Mena², David Abdel Mejía-Medina², Gonzalo Bojórquez-Morales¹

¹ Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México
onchia@uabc.edu.mx; cid.jorge@uabc.edu.mx; gonzalobojorquez@uabc.edu.mx

² Universidad Autónoma de Baja California, Valle de las Palmas, México
camilo.caraveo@uabc.edu.mx; damejia@uabc.edu.mx

Abstract. The Fourth Digital Age in Architecture is characterized by the fact that the computer is not only a representation tool. Now, it is a creative partner in the design process thanks to the development of Artificial Intelligence (AI) and Robotics in the field of Digital Fabrication (DF). Network Visualization allows studying these developments through graphical analysis tools. There are few studies that analyze the relationship that Architecture has had with respect to computer media in its fourth stage. The present work consists of mapping scientific production in this age, to identify its morphology of network of authors and themes that are built in the relationship between AI, Robotics and DF. The resulting morphology shows that Robotics research works as an intermediary articulator between theoretical, AI and technological development issues.

Keywords: Digital Fabrication, Artificial Intelligence, Robotics, Network Visualization, State-of-the-art.

1 Introducción

El desarrollo y la innovación en el Diseño Asistido por Computadora (*Computer Aided Design; CAD*) y Fabricación Digital (FD) han generado nuevas líneas de investigación que aportan a las disciplinas de la Arquitectura, la Ingeniería y la Construcción (AIC) (Menges & Knippers, 2020). Tom Wujec (2017) ha identificado que la relación entre el Diseño y la Computación se ha desarrollado en cuatro eras progresivas: (1) la invención de los programas CAD (imitan la acción de dibujar), (2) el modelado en tercera dimensión, (3) la simulación (interrelación de objetos con propiedades), y (4) la Inteligencia Artificial (las máquinas pueden aprender).

En las primeras tres eras, la computadora únicamente asiste a representar y documentar. La implementación de algoritmos metaheurísticos y estrategias

de Inteligencia Artificial (IA) ha permitido involucrar a las máquinas a asistir en el diseño a través del reconocimiento de rutas de solución a problemáticas determinadas. Por otro lado, la visualización de redes, en el ámbito de la sociología, permite dar cuenta de desarrollos tecnocientíficos, a través de herramientas de análisis gráfico computacional desarrollados con algoritmos basados en Multi-Agentes (Stieler et al., 2022).

El avance en los medios de comunicación y el acceso de información fueron fenómenos que promovieron migrar de un pensamiento lineal a uno complejo a partir de los últimos años del movimiento moderno. El matemático, biólogo e informátologo Warren Weaver (1998; 1991), quien junto a Claude E. Shannon (1998) desarrollaron la *Teoría Matemática de la Comunicación* en 1949, distinguió las metodologías aplicadas por la ciencia para la resolución de problemas en el escrito intitulado *Science and Complexity* en 1948.

Dichas metodologías fueron clasificadas por Weaver de acuerdo con el tipo de problemas y la cantidad de variables que implicaban: (1) problemas de la simplicidad, (2) problemas de la complejidad desorganizada, y (3) problemas de la complejidad organizada. Estos últimos, a pesar de estar conformados por una gran cantidad de variables, muestran características de organización, y en 1948, ya intuía que los dispositivos computacionales iban a ser prometedores para desarrollar nuevas metodologías que los abordaran.

Estas distinciones relacionadas con la complejidad han tenido injerencia en los estudios de la comunicación visual. Manuel Lima (2011), en su libro *Visual Complexity: Mapping Patterns of Information*, relaciona la comunicación visual con la neurociencia y destaca la importancia de las configuraciones de redes para el estudio de los sistemas complejos. Las redes representan entidades con atributos que poseen significados y significantes a través de un flujo de trabajo que incluye entradas, procesos y salidas de información (IPO).

La cuarta era digital en la Arquitectura, se encuentra constituida por una revolución (gracias a la IA) de procesos computacionales y robótica con directa repercusión en la FD. El análisis de su complejidad, a través de la visualización de redes, brinda la oportunidad de estudiar su morfología desde un punto de vista topológico para identificar los actores, en términos de la Teoría Actor-Red (Latour, 2005), y el ecosistema tecnocientífico que se construye en esta disciplina.

Las primeras tres eras han sido documentadas y estudiadas: López-Chao et al. (2022) mapean el uso de las tecnologías de la segunda y tercera era de la computación en el Diseño como métodos de registro, procesamiento y representación en la Arquitectura. Por otro lado, el trabajo de Kim et al. (2021), a través del estudio de las redes de respuesta a las crisis epidémicas en Corea (2015), es un ejemplo de análisis de diversidad de comunidades en la visualización de redes. Así, este trabajo busca identificar: ¿Cuál es la morfología de la red de autores y temas que se construye en esta cuarta era? ¿Qué puede decir sobre las relaciones existentes entre la robótica, la FD y la IA? ¿Es posible categorizar los elementos de la red de acuerdo con las comunidades que se generen?

2 Metodología

La recolección de datos se apoyó en estrategias de búsqueda de recursos bibliográficos a través de dos bases de datos, reconocidas por tener amplios repositorios de publicaciones de alta calidad: *Scopus* y *Web of Science*. La búsqueda consistió en introducir la siguiente cadena, en cada motor de búsqueda: *TITLE-ABS-KEY ("digital fabrication")*. Es decir, los artículos debían tener el término FD ya sea en su título, su resumen o sus palabras clave.

Como criterios de inclusión, se buscó que los artículos fueran de investigación, de conferencia y sección de libro. Así mismo, debían ser escritos en inglés o español en un periodo del 2018 al 2023. Como criterios de exclusión, los artículos sin acceso abierto, o que trataran la FD sin contribuir a la Arquitectura, la Construcción Robótica o al Diseño de un Robot fueron desechados.

2.1 Selección de estudios y recolección de datos

Fueron aprovechados los motores de búsqueda de las bases de datos para recuperar artículos que pasaron los filtros automáticos de disponibilidad de acceso, idioma, periodo y tipo de publicación. Todos los artículos resultantes, fueron descargados en formato RIS para ser importados al gestor bibliográfico *Zotero*, el cual, permitió procesar los resultados, depurarlos y borrar elementos duplicados. Después, fueron exportadas las colecciones bibliográficas en el mismo formato e importadas al programa *VOSviewer* (van Eck & Waltman, 2010), para generar la primera configuración (*layout*) de red.

La estrategia de recolección de datos sucedió posterior a estas primeras configuraciones. En *VOSviewer* fueron generadas dos redes: (1) una que relate la coocurrencia de palabras clave, y (2) otra que vincule la coautoría de los artículos. Al momento de importar la colección de publicaciones, en cada una de las redes generadas, fue cambiado el modelo de disposición topológica a través del algoritmo de regresión *Log-Lineal* (*Log-Lin*) integrado en el programa. Esto permitió generar un esquema inicial de modularidad legible en el reconocimiento de las comunidades que conforma cada red. Posteriormente, las redes fueron exportadas en formato GML para ser importadas en el programa *Gephi* (Bastian et al., 2009)

2.2 Configuración y análisis de datos recuperados

La configuración de datos (y su visualización) se basa en estrategias de disposición topológicas de red a través de algoritmos de organización (*layout*). Estos algoritmos se encuentran integrados como parte de las librerías del programa *Gephi* y tienen el objetivo de funcionar como herramientas para la visualización de grafos. Los algoritmos de layout son: *Kamada-Kawai* (1989), *Fruchterman-Reingold* (1991), *Force Atlas* (Bastian et al., 2009), *Force Atlas 2* (Jacomy et al., 2014).

Para la visualización y organización de los mapas importados se eligió el algoritmo *Force Atlas*, que funciona a través de vectores de fuerza (Ortíz-Muñoz & Hidalgo-Delgado, 2015). Este algoritmo destaca por ofrecer una organización legible para la posterior lectura de las comunidades que constituyen la red, y permite modificar el esquema inicial generado con anterioridad en *VOSviewer*.

Para conformar las comunidades de la red, fue necesario ejecutar algoritmos de modularidad que permitan consolidar grupos de los diferentes nodos representantes de datos (temas y autorías) de las publicaciones recolectadas e interrelacionadas. Estos algoritmos son parte de las opciones de análisis estadístico del programa, y se basan en el método de optimización de grupos de *Louvain* y *Leiden*. Diversos autores han demostrado que el algoritmo de *Leiden* es una actualización mejorada del de *Louvain* (Kim et al., 2021; Traag et al., 2019), por tanto, para efectos del análisis de este trabajo, fue utilizado el primero. La modularidad (\mathcal{H}), define cuantitativamente la calidad de las particiones de la red, y su fórmula es:

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2m} \sum_c \left(e_c - \gamma \frac{K_c^2}{2m} \right) \quad (1)$$

Traag et al. (2019) define el método como: *aquel que intenta maximizar la diferencia entre el actual número de conexiones en una comunidad y la cantidad esperada de tales conexiones* (p.1). En la cual e_c es el actual número de conexiones en la comunidad c . La cantidad esperada de conexiones es expresada por $\frac{K_c^2}{2m}$, donde K_c es la suma de grado de los nodos en la comunidad c , y m es el número total de conexiones en la red. Así mismo, $\gamma > 0$ es un parámetro de resolución, en donde, el aumento del valor significa una mayor cantidad de comunidades.

Una vez determinados los grupos que conforman la red, fue realizado el análisis de dichas comunidades a través de los índices de diversidad H y equitatividad E de Shannon, los cuales son útiles para medir la diversidad de las especies (sujetas a aumento) de una comunidad. El índice H es directamente proporcional a la riqueza y la E en una comunidad. En este sentido S indica la cantidad total de especies. La fracción de población que constituye una especie i es representado por p_i y luego se multiplica por el logaritmo natural de la proporción $\ln p_i$. El resultado es sumado a través de todas las especies y multiplicado por -1. Entre más grande sea el valor del índice H , mayor es la diversidad de la comunidad (Kim et al., 2021).

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \times \ln p_i \quad (2)$$

El índice E indica la equitatividad entre diversas especies en una comunidad, y es definida por la siguiente formula:

$$E = H / \ln S \quad (3)$$

La cohesión estructural de cada comunidad (también llamado subgrafo) fue analizada a través del coeficiente de densidad promedio D , así como también, el promedio de cómo los nodos se encuentran incrustados en su vecindad mediante el coeficiente medio de agrupamiento C , es decir, *la probabilidad de que dos vecinos de un nodo sean vecinos a sí mismos* (Kim et al., 2021, p. 377).

3 Resultados

Los resultados de la búsqueda y selección de estudios arrojaron una cantidad de 1,449 registros únicos examinados. De esa cantidad, las redes generadas (desde VOSviewer a Gephi) dieron como resultado un número de 2,318 palabras clave de autor interrelacionados por coocurrencia, y 690 autores vinculados por coautoría.

Una vez importadas las redes preliminares a Gephi, (Bastian et al., 2009), fue determinado el rango de tamaño de los nodos y de las etiquetas de acuerdo al grado de cada nodo. Éste corresponde a la suma del grado de salida y de entrada de conexiones de cada nodo, es decir, a la interconectividad que tiene en la red, ya sea por coocurrencia (palabras clave) o por coautoría (autores). El rango elegido para escalar los nodos fue de 10 como tamaño mínimo a 60 como tamaño máximo, así mismo, el texto de las etiquetas fue de 0.5 (mínimo) a 12 (máximo).

Para establecer el criterio de modularidad, fue realizado un cálculo preliminar a través del algoritmo *Louvain* con parámetros de resolución γ de 0.8, 1.0 y 1.22, con el objetivo de verificar el número de comunidades que se conforman. Este primer acercamiento tuvo el objetivo de ser contrastado con los resultados obtenidos con el algoritmo de *Leiden*, y de esta forma elegir el parámetro que, de manera más cercana, se compaginen.

El parámetro γ elegido fue de 1.0, donde el algoritmo de *Leiden* es el que rige. El resultado fue para la red de palabras clave (coocurrencia), con una calidad de particiones \mathcal{H} de 0.326, un total de 9 comunidades (grupos) consolidadas para el algoritmo de *Leiden*. Por otro lado, para el algoritmo de *Louvain*, se obtuvo una calidad \mathcal{H} de 0.304, con también 9 grupos. En el caso de la red de autores (coautoría), con *Leiden* fueron obtenidas un total de 167 comunidades con una calidad \mathcal{H} de 0.800, y con *Louvain* 166 comunidades y una calidad \mathcal{H} de 0.792. En todos los casos de ejecución del algoritmo de *Leiden*, fue establecida una cantidad de iteraciones de 1000 (Tabla 1).

Tabla 1. Tabla comparativa de resultados de modularidad obtenida entre los algoritmos de *Leiden* y de *Louvain*, con un parámetro de resolución $\gamma = 1.00$.

Grafo	$H(Lei)$	$H(Lou)$	Grupos # (Lei)	Grupos # (Lou)
Palabras Clave	0.326	0.304	9	9
Autores	0.800	0.792	167	166

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La distribución de las redes resultantes, con sus comunidades definidas, manifiestan no sólo la interconectividad de los agentes que componen el sistema, sino también, su disposición de topología muestra el peso (relevancia por coocurrencia o coautoría) de cada uno de éstos a través del tamaño y su posición con respecto al centro del grafo. Entre más grande es el nodo, mayor grado de importancia e interconexión tiene con sus vecinos, su comunidad y el sistema; mientras que, entre más al centro se encuentran los nodos, mayor es la interrelación con el sistema. Los nodos y comunidades que se encuentran hacia los extremos, con mayor dispersión, tienen menor relación con los agentes del centro.

De esta manera, el grafo resultante de la coocurrencia de palabras clave manifiesta una red en donde la (1) Fabricación Digital, (2) la Fabricación, (3) la Impresión 3D, (4) el Diseño y (5) la Robótica son las temáticas de investigación con mayor relevancia en la colección de recursos literarios recuperados (Fig. 2). Así mismo, las comunidades generadas constituyen un conjunto de enfoques de investigación distribuidos consecutivamente y mostrados en la siguiente relación (Tabla 2).

Tabla 2. Relación de comunidades del grafo de coocurrencia de palabras clave generadas por el algoritmo de modularidad de *Leiden*, con un parámetro $\gamma = 1.00$.

Comunidad ID	#	%	Enfoque	Color en grafo
0	657	28.34	Fabricación Digital & Educación	Morado
1	462	19.93	Estructuras, Maderas & Textiles	Naranja
2	389	16.78	Robótica & Inteligencia Artificial	Verde
3	381	16.44	Impresión 3D, Construcción & Concreto	Magenta
4	221	9.53	Materiales & Medicina	Cyan
5	92	3.97	Sintetizado de Materiales	Azul
6	72	3.11	Sustentabilidad & Innovación	Café

7	25	1.08	Citología, Electrónica & IA	Rojo
8	19	0.82	Computación interactiva & Interfaces Hapticas	Turquesa

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Paralelamente fue realizado un análisis de modularidad con una resolución $\gamma = 0.80$, la cual arrojó seis comunidades, en la cual, el grupo de Impresión 3D, Construcción y Concreto se encuentra en segundo lugar de cantidad (538) y porcentaje (21.21%) de nodos. Esta comunidad con una resolución de $\gamma = 1.00$, es subdividida en otra que consiste en Sustentabilidad & Innovación. También, el grupo de Materiales & Medicina se subdivide en Sintetizado de Materiales y el de Fabricación Digital & Educación desprende la comunidad Computación interactiva & Interfaces Hapticas.

Por otro lado, para el análisis de diversidad de Shannon, así como de conexión (cohesión estructural) de las comunidades (Fig. 1), fue necesario subdividir cada una de éstas en subgrupos, con el fin de obtener el índice de diversidad H y de equitatividad E , así como la densidad del grafo D y el coeficiente medio de agrupamiento C . Para hacer esta subdivisión, fue utilizada la misma metodología de modularidad a través del algoritmo de *Leiden*. La relación de resultados se enlista a continuación (Tabla 3).

Tabla 3. Relación de resultados del análisis de diversidad de Shannon y de conexión (cohesión estructural) de los subgrupos del grafo de coocurrencia de palabras clave.

ID	#	SG #	H	E	D	C	Enfoques de los subgrupos (SG) de cada comunidad
0	657	8	1.80	0.87	0.02	0.32	Fabricación digital, Educación, Cultura maker, Maquinaria & software, Fabricación interactiva, Networking, Modelos paramétricos.
1	462	8	1.96	0.94	0.02	0.31	Construcción, Madera, Textiles, Diseño computacional, Personalización en masa, Optimización, Biomimética, Análisis estructural.
2	389	7	1.79	0.92	0.03	0.33	Robótica, Automatización, IA, Industria 4.0, Interacción humano-robot.
3	381	6	1.65	0.92	0.04	0.35	Impresión 3D, Concreto, Construcción, Desarrollo sustentable, Teoría.
4	221	4	1.27	0.91	0.06	0.36	Materiales, CAD & salud dental, Medicina.

5	92	7	1.88	0.96	0.07	0.38	Electrónica flexible, Nanotecnología & Metamateriales, Substratos, Metales, Sintetizado.
6	72	6	1.68	0.94	0.08	0.40	Sustentabilidad, Personalización, Interacción humano-computadora.
7	25	3	1.01	0.92	0.20	0.46	Citología & optimización, Robótica de enjambre, Inteligencia de enjambre.
8	19	2	0.69	1.00	0.24	0.45	Control de máquinas, Computación interactiva & Interfaces Hapticas.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

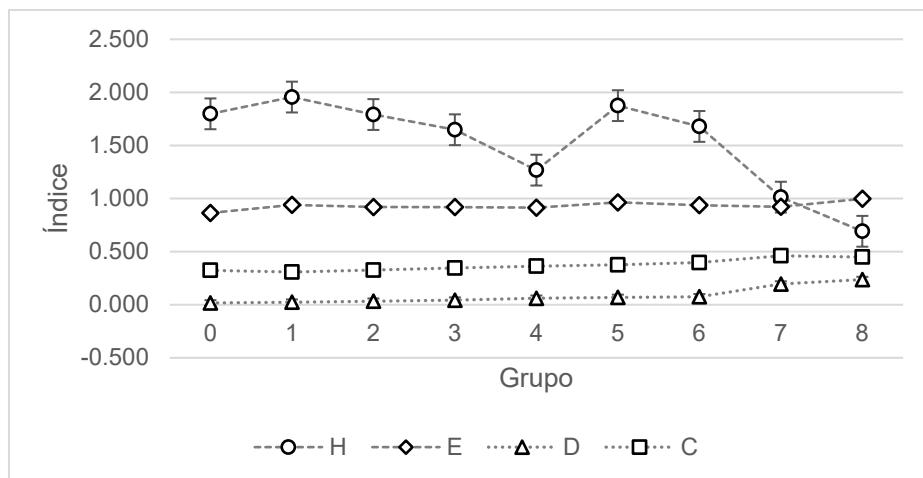


Figura 1. Gráfica comparativa entre los índices de análisis de diversidad y de conexión (cohesión estructural) de los subgrupos del grafo de coocurrencia de palabras clave. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Con respecto al grafo de autores y sus interrelaciones, la red muestra que los actores de mayor relevancia en la citación de artículos de investigación relacionados con la FD son: (1) Wangler, T., (2) Gramazio, F., (3) Kohler, M., (4) Mata-Falcón, J., (5) Mechtcherine, V., (6) Flatt, R.J., (7) Lloret-Fritsch, E., (8) Reiter, L., (9) Bos, F.P., (10) Lowke, D., (11) Kloft, H., (12) Nerella, V.N., (13) Roussel, N., (14) Dillenburger, B., y (15) Hack, N. Así mismo, las comunidades generadas constituyen una comunidad de citación y coautoría muy definida entre sus grupos (Fig. 3).

El análisis de diversidad y de conexión de autores fue realizado directamente sobre las comunidades resultantes y no fue necesario particionarlas en subgrupos. El índice de diversidad H y de equitatividad E , así como la densidad del grafo D y el coeficiente medio de agrupamiento C se enlistan a continuación (Tabla 4).

Tabla 3. Relación de resultados del análisis de modularidad, diversidad y de conexión (cohesión estructural) de las comunidades del grafo de interrelación de autores.

Nodos #	Grupos #	H	E	D	C
690	167	4.29	0.84	0.003	0.285

Fuente: Elaboración propia, 2023.

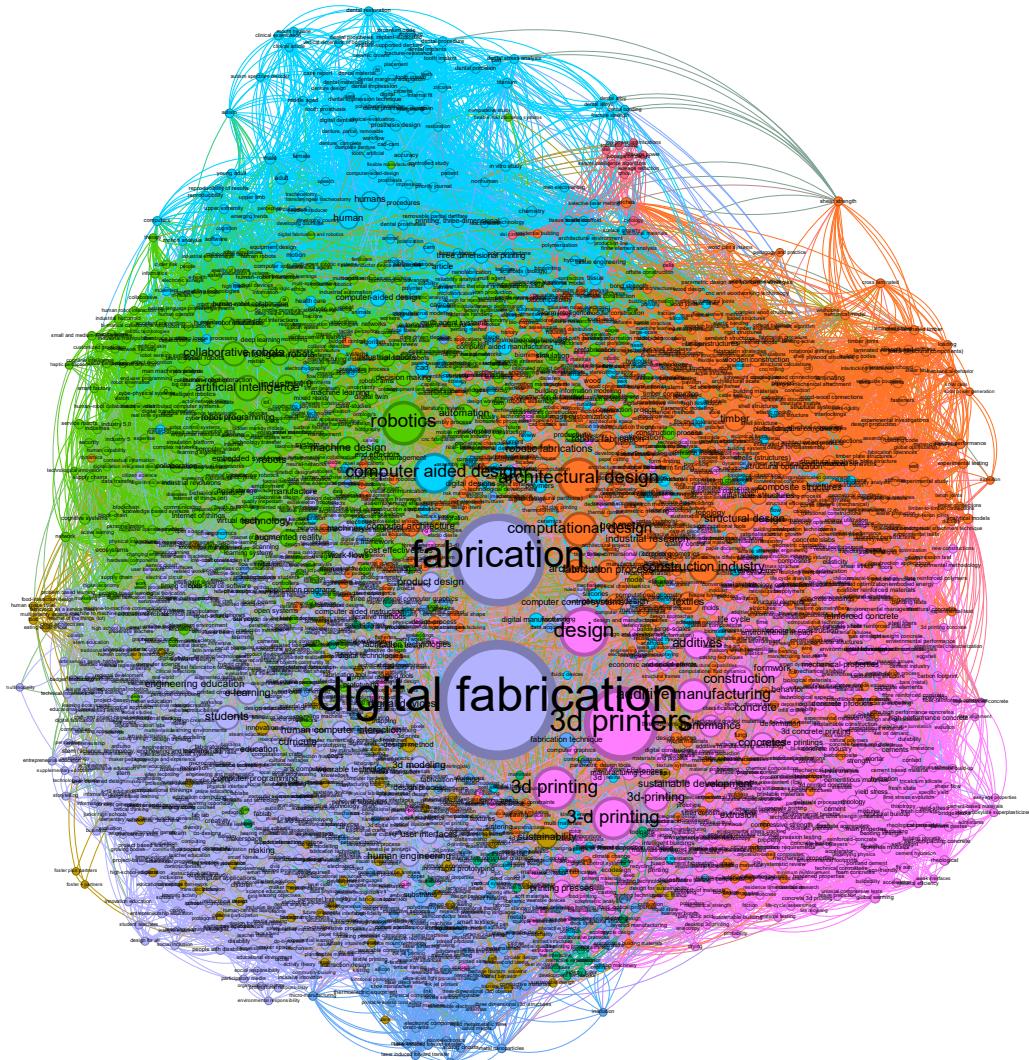


Figura 2. Grafo de coocurrencia de palabras clave de publicaciones de investigación relacionados con la FD. La imagen muestra las comunidades identificadas a través del algoritmo de Leiden. Fuente: Elaboración propia, 2023.

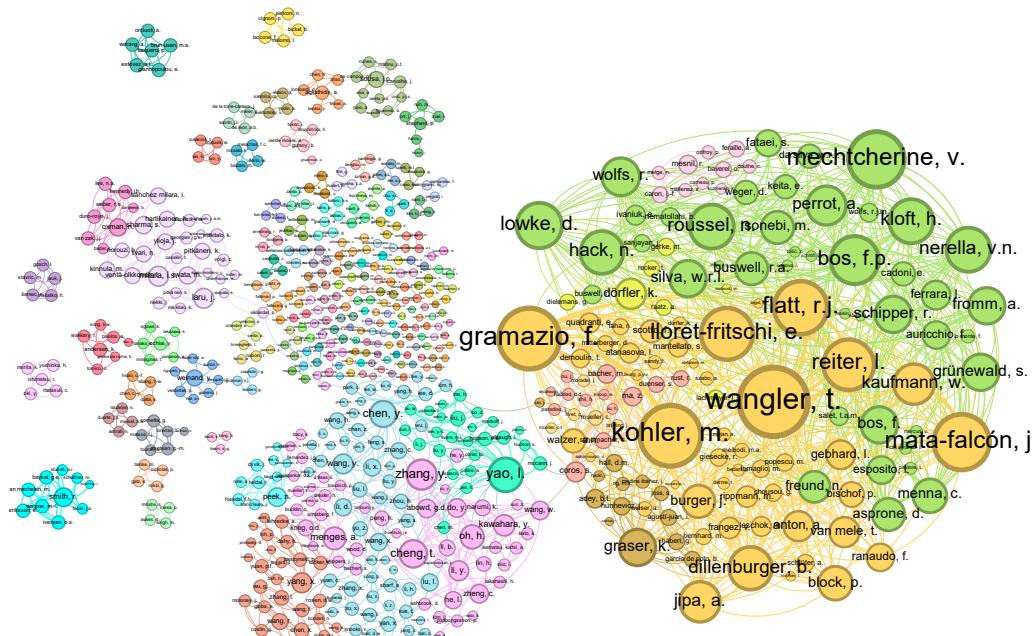


Figura 3. Grafo de los autores de mayor relevancia en la publicación de trabajos de investigación relacionados con la FD. La imagen muestra las comunidades identificadas a través del algoritmo de *Leiden*. Fuente: Elaboración propia, 2023.

4 Discusión

Los resultados obtenidos en este análisis topológico de la cuarta etapa digital en la Arquitectura reflejan que la investigación científica brinda una atención importante a la *Impresión 3D*, la *Fabricación Aditiva* y la *Innovación en el Concreto*. En el análisis, es posible contrastar que estos tópicos se posicionan en un segundo lugar de relevancia (si se toma en cuenta que *Sustentabilidad e Innovación* es parte de esta comunidad). Esta cuarta era digital eclosionó a partir de la IA, y ha permitido que el rol de las computadoras no solo sea representacional, sino también un actor creativo en el proceso de diseño arquitectónico.

Estos procesos virtuales pertenecen a una realidad con peso *teórico*, y no sólo *tecnológico*, en los desarrollos científicos. En la lectura del grafo, el posicionamiento de los nodos describe el nivel de importancia de este peso epistemológico (como representantes de actores y temas de investigación), y es relevante para contrastar su relación con otros. En este sentido, la IA se encuentra en el extremo superior izquierdo de la tercera comunidad (mostrado

en el grafo de color verde), con una menor cercanía que el estudio de la *Impresión 3D* (extremo inferior derecho y magenta en la red) con la FD.

Si consideramos que el grafo muestra una prevalencia de estudio de los aspectos técnicos (con la *Impresión 3D* y la *Robótica* hacia el centro), la posición de la IA sugiere que su investigación es menor, a pesar de ser un tópico importante en la evolución de la FD. Por otro lado, es posible verificar que la IA se encuentra estrechamente vinculada con la *Robótica*, como un tópico de tipo *tecnológico* que se articula casi con todas las comunidades existentes, menos con la *Impresión 3D* y el *Concreto* (a pesar de que las maquinarias de impresión también son medios robóticos).

Diversos autores, en la literatura analizada (Melenbrink et al., 2020; Wagner et al., 2020) han manifestado que, uno de los principales problemas de la FD, es su accesibilidad por escala (que repercute en contratiempos de transportabilidad y asequibilidad). Los medios de *Impresión 3D* utilizados para el *Concreto*, *Tierra* y la *Construcción*, demandan grúas o brazos robóticos de gran tamaño para su automatización. Aprovechar esta brecha temática de investigación, es decir, dirigir los estudios hacia la aplicación y el desarrollo de modelos de IA aplicados a la *Robótica* y orientados a la reducción de su escala, pueden contribuir a solventar el problema de accesibilidad, y a estrechar la relación de los aspectos *teóricos* y *tecnológicos* en la FD.

Por tanto, ¿Qué pasaría si los resultados de investigación de la FD tuvieran un enfoque más equilibrado entre la *teoría* y la *técnica*?; y si esto fuera así, ¿Cuál sería el impacto que la IA tendría en sus desarrollos? Futuros estudios, tendrán como enfoque el análisis dinámico la red en esta cuarta etapa, con el objetivo de visualizar la progresión temporal de las publicaciones de investigación relacionadas con la FD; para de esta forma, verificar si la relevancia del estudio de la IA y los temas *teóricos* han ido en aumento progresivo conforme ha avanzado el tiempo.

Referencias

- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, 3(1), 361–362. <https://doi.org/10.1609/icwsm.v3i1.13937>
- Fruchterman, T. M. J., & Reingold, E. M. (1991). Graph drawing by force-directed placement. *Software: Practice and Experience*, 21(11), 1129–1164. <https://doi.org/10.1002/spe.4380211102>
- Jacomy, M., Venturini, T., Heymann, S., & Bastian, M. (2014). ForceAtlas2, a Continuous Graph Layout Algorithm for Handy Network Visualization Designed for the Gephi Software. *PLoS ONE*, 9(6), e98679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098679>

- Kamada, T., & Kawai, S. (1989). An algorithm for drawing general undirected graphs. *Information Processing Letters*, 31(1), 7–15. [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(89\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0020-0190(89)90102-6)
- Kim, Y., Kim, J., Oh, S. S., Kim, S.-W., Ku, M., & Cha, J. (2021). Community Analysis of a Crisis Response Network. *Social Science Computer Review*, 39(3), 371–390. <https://doi.org/10.1177/0894439319858679>
- Latour, B. (2005). *Reassembling the social: An introduction to actor-network-theory*. Oxford University Press.
- Lima, M. (2011). *Visual complexity: Mapping patterns of information*. Princeton Architectural Press.
- López-Chao, V., Amado, A., & Miotto Bruscato, U. (2022). Un enfoque bibliométrico a los procedimientos gráficos como método de investigación. *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 27(45), 218–231. <https://doi.org/10.4995/ega.2022.16451>
- Melenbrink, N., Werfel, J., & Menges, A. (2020). On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. *Automation in Construction*, 119, 103312. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103312>
- Menges, A., & Knippers, J. (2020). *Architecture research building: ICD/ITKE 2010/20* (1a ed.). Birkhauser.
- Ortíz-Muñoz, E., & Hidalgo-Delgado, Y. (2015). Detección de comunidades a partir de redes de coautoría en grafos RDF. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 27(1). <https://acimed.sld.cu/index.php/acimed/article/view/858/547>
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1998). *The mathematical theory of communication* (21. print). Univ. of Illinois Press.
- Stieler, D., Schwinn, T., Leder, S., Maierhofer, M., Kannenberg, F., & Menges, A. (2022). Agent-based modeling and simulation in architecture. *Automation in Construction*, 141, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104426>
- Traag, V. A., Waltman, L., & Van Eck, N. J. (2019). From Louvain to Leiden: Guaranteeing well-connected communities. *Scientific Reports*, 9(1), 5233. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41695-z>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). *VOSviewer—Visualizing scientific landscapes* (1.6.19) [Software]. Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. <https://www.vosviewer.com/>
- Wagner, H. J., Alvarez, M., Kyjanek, O., Bhiri, Z., Buck, M., & Menges, A. (2020). Flexible and transportable robotic timber construction platform – TIM. *Automation in Construction*, 120. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103400>
- Weaver, W. (1991). Science and Complexity. En G. J. Klir, *Facets of Systems Science* (pp. 449–456). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0718-9_30
- Wujec, T. (2017). *The Future of Making: Understanding the forces shaping how and what we create*. Melcher Media. <https://www.autodesk.com/future-of-making-things/hardcopy-book>