

Metodología para construir una red de investigadores con base en teoría de redes complejas *

Mónica Jhoana Mesa-Mazo 

Docente Investigadora, Corporación Universitaria Empresarial Alexander von Humboldt Armenia - Colombia
mmesa4@cue.edu.co

Jorge Mario García-Usuga 

Docente Investigador, Universidad del Quindío, Armenia - Colombia
jmgarcia@uniquindio.edu.co

Julián Andrés Rincón-Penagos 

Docente, Universidad del Quindío, Armenia - Colombia
jarincon@uniquindio.edu.co

RESUMEN

PALABRAS CLAVE

Redes complejas; vigilancia científico tecnológica; redes de investigación; medidas de centralidad; Instituciones de Educación Superior; Python

Este artículo tiene como objetivo desarrollar una herramienta computacional basada en la teoría de redes y vigilancia científico-tecnológica para fortalecer los procesos de investigación en una institución de educación superior: Corporación Universitaria Empresarial Alexander von Humboldt en Colombia. Se construyeron dos redes: una de investigadores y coinvestigadores, y otra de palabras clave de proyectos de investigación. El análisis de centralidad reveló grupos de colaboración interdisciplinarios y la existencia de investigadores aislados. Los resultados destacan la importancia de fomentar la colaboración entre investigadores y la interdisciplinariedad. Se proponen futuras investigaciones para mejorar la herramienta y su aplicación en la toma de decisiones estratégicas en una Institución de Educación Superior. Esta aproximación basada en redes complejas proporciona percepciones sobre la investigación en la institución y su potencial para enriquecer la producción investigativa y el desarrollo tecnológico.

Methodology for building a network of researchers based on complex network theory

ABSTRACT

KEYWORDS

Complex networks, scientific and technological surveillance; research networks; Centrality measures; Higher education institutions; Python

The objective of this article is to develop a computational tool based on network theory and scientific-technological surveillance to strengthen research processes in a higher education institution, case study: The Alexander von Humboldt University Business Corporation in Colombia. Two networks were constructed: one of researchers and co-researchers, and another of keywords of research projects. The centrality analysis revealed interdisciplinary collaborative groups and the existence of isolated researchers. The results highlight the importance of fostering collaboration among researchers and interdisciplinarity. Future research is proposed to improve the tool and its application in strategic decision-making in a Higher Education Institution. This approach based on complex networks provides insights about research in the institution and its potential to enrich research production and technological development.

Recibido: 02/03/2023 Evaluado: 27/05/20236 Aceptado: 25/08/2023

Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) Published by Universidad Libre - Cali, Colombia.

Fuente de financiación: Proyecto "Herramienta computacional con base en teoría de redes y vigilancia científica-tecnológica para el fortalecimiento de los procesos de investigación en la Corporación Universitaria empresarial Alexander von Humboldt". Código D.I.I.01-2022 y aprobado en el acta ACTA 019-23/11/2021

Contribución de los autores

- Autor 1: Conceptualización; Autor 2: Software; Autor 3: Visualización

Cómo citar este artículo/How to cite: MESA-MAZO Mónica Jhoana; GARCÍA-USUGA, Jorge Mario; RINCÓN-PENAGOS, Julián Andrés. Metodología para construir una red de investigadores con base en teoría de redes complejas. En: Entramado. Enero - Junio, 2024. vol. 20, no. 1 e-9818 p. 1-16.

<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.9818>

Metodología para criar uma rede de pesquisadores com base na teoria de redes complexas

RESUMO

PALAVRAS-CHAVE

Redes complexas; vigilância científica e tecnológica; redes de pesquisa; medidas de centralidade; instituições de ensino superior; Python

Este artigo tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional baseada na teoria de redes e na vigilância científico-tecnológica para fortalecer os processos de pesquisa em uma instituição de ensino superior, estudo de caso da Corporación Universitaria Empresarial Alexander von Humboldt na Colômbia. Foram construídas duas redes: uma de pesquisadores e co-pesquisadores e outra de palavras-chave de projetos de pesquisa. A análise de centralidade revelou grupos colaborativos interdisciplinares e a existência de pesquisadores isolados. Os resultados destacam a importância de promover a colaboração entre pesquisadores e a interdisciplinaridade. Propõe-se uma pesquisa futura para aprimorar a ferramenta e sua aplicação na tomada de decisões estratégicas em uma instituição de ensino superior. Essa abordagem de rede complexa fornece percepções sobre a pesquisa na instituição e seu potencial para enriquecer a produção de pesquisa e o desenvolvimento tecnológico.

I. Introducción

Las Instituciones de Educación Superior en Colombia (IES) constantemente son evaluadas por el Ministerio de Educación Nacional de Colombia (MEN), el cual ofrece un marco de referencia para que revisen aspectos puntuales en su gestión y avancen en sus procesos de mejora continua ([Colombia. Ministerio de Educación Nacional de Colombia, 2013](#)). Estas IES deben asumir los procesos de renovación de registro calificado de cada uno de sus programas académicos. Por otra parte, aunque no es obligatoria, muchas Instituciones de Educación Superior (IES) en Colombia optan por someterse a procesos de acreditación de alta calidad, debido a los beneficios que conlleva en términos de calidad educativa, reconocimiento y mejora continua. De esta manera se contribuye a elevar el nivel general de la educación superior en el país ([Colombia. Consejo Nacional de Acreditación República de Colombia, 2021b](#)).

La investigación desempeña un papel fundamental en el proceso de acreditación de la educación superior en Colombia. Esto se debe a que la investigación aporta significativamente a la evaluación de la calidad, la mejora constante y la pertinencia de las instituciones académicas. Aquellas instituciones de educación superior que impulsan y respaldan la investigación suelen estar más capacitadas para cumplir con los requisitos de calidad académica y la búsqueda de la excelencia en la educación superior ([Colombia. Consejo Nacional de Acreditación República de Colombia, 2021a](#)).

Por las razones anteriores, es necesaria una estrategia que aporte al mejoramiento de algunos procesos investigativos en la Corporación Universitaria Empresarial Alexander von Humboldt (CUE AvH). Dicha estrategia consiste en desarrollar una herramienta computacional con base en la teoría de redes e implementada bajo los principios de la vigilancia científica-tecnológica que permitirá el fortalecimiento de dichos procesos de gestión de investigación en la CUE AvH.

Para el desarrollo de este trabajo, se tuvo en cuenta que la vigilancia científico-tecnológica y las redes complejas son dos áreas de estudio fundamentales en el entorno actual de la investigación y la innovación. La vigilancia científico-tecnológica implica el monitoreo constante de avances en la ciencia y la tecnología, lo que permite a las organizaciones estar al tanto de las tendencias emergentes y las oportunidades para el desarrollo de nuevas tecnologías o productos ([Marulanda, Hernández y López, 2016](#); [Carrillo, Páez, Suárez y Luna, 2018](#)).

Así mismo, la vigilancia científico-tecnológica sigue siendo una herramienta fundamental en la era digital. También existen otras herramientas con propósitos similares como las redes sociales, las alertas de noticias y otras fuentes en línea que pueden proporcionar información valiosa. La vigilancia científico-tecnológica se destaca por su enfoque sistemático y estructurado ([San Juan y Rodríguez, 2016](#)). Esta metodología permite a las organizaciones y profesionales profundizar en la investigación, identificar tendencias a largo plazo y realizar un seguimiento continuo de avances específicos en sus campos de interés. Además, la vigilancia científico-tecnológica a menudo involucra la recopilación y el análisis de datos a gran escala, lo que brinda una visión más profunda y precisa de las dinámicas del conocimiento científico y tecnológico. Aunque las alternativas pueden ser útiles para obtener actualizaciones rápidas, la vigilancia científico-tecnológica sigue siendo esencial

para la toma de decisiones estratégicas, la identificación de oportunidades de innovación y la planificación a largo plazo en el ámbito científico y tecnológico ([Muñoz, Marín y Vallejo, 2006](#); [Velasco y García, 2006](#); [Giménez y Román, 2001](#)).

Por otro lado, las redes complejas se centran en el análisis de las interconexiones y relaciones entre distintos elementos, ya sea en sistemas sociales, biológicos o tecnológicos ([Estrada, 2012](#); [Newman, 2010](#)). Estas redes proporcionan una comprensión más profunda de cómo los elementos individuales interactúan y se influyen mutuamente en contextos diversos.

Las redes complejas se destacan como una herramienta fundamental en la vigilancia científica y tecnológica, debido a su capacidad para capturar y representar interacciones, dependencias y estructuras intrincadas en sistemas interconectados ([Turnbull et al., 2018](#); [Sergiou, 2020](#); [Sergiou, Lestas, Antoniou, Liaskos y Pitsillides, 2020](#)). A diferencia de otras metodologías como los modelos basados en agentes, la teoría de juegos o los modelos basados en sistemas dinámicos, las redes complejas permiten un análisis más profundo de los fenómenos, revelando conexiones no evidentes y patrones emergentes. Esto resulta especialmente valioso en campos donde las relaciones y las influencias entre elementos son esenciales para la comprensión, como en la biología molecular, las redes sociales, la epidemiología y la ciencia de datos. Además, las redes complejas pueden adaptarse a una variedad de datos y contextos, proporcionando una representación versátil para la vigilancia científica y tecnológica ([Miyashita y Sengoku, 2021](#); [Di Bella, Gandullia, y Preti, 2021](#)).

La inclusión de redes complejas en la vigilancia científica-tecnológica es esencial debido a su capacidad para desentrañar relaciones y tendencias en un mundo cada vez más interconectado. Estas redes permiten una representación más realista y completa de la complejidad inherente en la ciencia y la tecnología modernas. Al incorporar datos multidisciplinarios y multicanal en un solo marco, las redes complejas pueden identificar innovaciones emergentes, colaboraciones científicas y desarrollos tecnológicos antes de que sean evidentes en enfoques más simples. Además, facilitan la identificación de nodos críticos, lo que es crucial para la toma de decisiones estratégicas. En resumen, las redes complejas brindan una perspectiva más profunda y precisa en la vigilancia científica-tecnológica, lo que puede conducir a una ventaja competitiva en la adopción de innovaciones y la anticipación de tendencias en constante evolución ([Güemes y Ponce-Jaramillo, 2019](#); [Lubango, 2015](#)).

En conjunto, la vigilancia científico-tecnológica y el análisis de redes complejas se han convertido en herramientas esenciales para la toma de decisiones estratégicas, la identificación de oportunidades de investigación y la optimización de procesos en un mundo caracterizado por un rápido avance tecnológico y la interconexión global.

Partiendo de este punto, a través de una vigilancia científico-tecnológica es posible analizar los procesos de investigación en una institución de educación superior en una ventana de tiempo, con el fin de tener la posibilidad de generar insumos oportunamente para apoyar en mejores decisiones en la institución. Según [Romero, Lavarca, y Pérez \(2019\)](#), la vigilancia científico-tecnológica es usada como herramienta de gestión de la información. Además, proporciona a las personas encargadas de tomar decisiones los elementos indispensables para la articulación de la política y el fortalecimiento del ecosistema científico tecnológico como pilar del desarrollo de la nación.

Este artículo tiene como objetivo desarrollar una herramienta computacional con base en la teoría de redes y vigilancia científico-tecnológica con el propósito de fortalecer los procesos de investigación en la Corporación Universitaria Empresarial Alexander von Humboldt en la ciudad de Armenia, Quindío, Colombia. Para esto, en el marco teórico se abordaron los temas de redes complejas y vigilancia científico-tecnológica; de igual forma, se describe la recolección de información de la base de datos de la institución, la creación del dataset con la información de proyectos de investigación entre 2018 y 2021. Con esta información se construyeron dos redes, la primera de investigadores principales y coinvestigadores; la segunda red está relacionada con las palabras clave de cada proyecto de investigación. Luego, se lleva a cabo un análisis de centralidad a cada una de las redes y se describen los resultados que arrojaron ambas sobre los procesos investigativos de la institución como caso de estudio. Finalmente, se analizan los resultados encontrados y se plantean una serie de conclusiones y trabajos futuros en este campo.

2. Marco teórico

La vigilancia científico-tecnológica es un proceso estratégico que consiste en la recopilación, análisis y evaluación continua de información científica y tecnológica relevante. Su objetivo principal es permitir a las organizaciones mantenerse al tanto

de los avances y tendencias en su campo de interés. A través de la vigilancia científico-tecnológica, las instituciones pueden tomar decisiones informadas, identificar oportunidades de innovación, anticipar cambios en el entorno competitivo y optimizar sus estrategias de investigación y desarrollo. Este proceso implica la identificación de fuentes de información, la selección y análisis de datos, y la difusión de resultados que puedan influir en la toma de decisiones estratégicas. La vigilancia científico-tecnológica se ha convertido en una herramienta esencial para la innovación y la competitividad en un mundo caracterizado por un constante avance en la ciencia y la tecnología ([Muñoz-Durán, Marín-Martínez y Vallejo-Triano, 2006](#); [Velasco y García, 2006](#)).

Por otra parte, la teoría de redes complejas se basa en el concepto matemático de grafo, planteado en 1736 por el matemático suizo Leonhard Paul Euler, quien desarrolló esta teoría para resolver el problema de los puentes de Königsberg ([Rahman, 2017](#); [Diestel, 2017](#); [Jungnickel, 2005](#)).

Formalmente el concepto de grafo se define de la siguiente forma ([Bondy y Murty, 2008](#); [Rahman, 2017](#); [Estrada, 2012](#)):

Un grafo es una tripla ordenada $(V(G), E(G), \psi_G)$, donde G es el grafo, $V(G)$ un conjunto no vacío de nodos o vértices, $E(G)$ es un conjunto de aristas y ψ_G es una función la cual, asocia a cada arista de un par ordenado de nodos o vértices, es decir, si $u, v \in V(G)$ con $e \in E(G)$ y $\psi_G(e) = uv$, entonces decimos que e une los vértices u y v .

Un grafo, en su esencia, es una representación visual de las relaciones y estructuras que se encuentran en diversos campos. Aunque pueden existir variaciones en la notación utilizada, el concepto fundamental de nodos y aristas se mantiene constante ([West, 2001](#); [Harju, 2014](#)). Igualmente, un grafo se define como un conjunto de vértices que se conectan entre sí a través de una propiedad métrica. En última instancia, la identidad de los nodos y vértices es de menor relevancia en comparación con la configuración de sus conexiones, ya que es esta disposición lo que aporta un valor fundamental a la comprensión de la estructura subyacente ([Wilson, 1970](#)).

Ahora bien, un grafo, se puede como ya se mencionó es un conjunto de nodos y aristas que enlazan estos nodos. La función principal de los grafos es representar y modelar las relaciones e interacciones entre elementos individuales. Por otro lado, el concepto de una red compleja abarca un ámbito más amplio, ya que se refiere a sistemas compuestos por un gran número de componentes interconectados. Estas redes complejas van más allá de la mera representación de las conexiones entre nodos, ya que incluyen propiedades emergentes y dinámicas que se derivan de la estructura y las interacciones en la red ([Boccaletti, Latora, Moreno, Chavez, y Hwang, 2006](#); [Estrada, 2012](#)).

Así pues, mientras que un grafo se enfoca principalmente en la abstracción de las conexiones entre nodos, una red compleja es un concepto más amplio, que involucra la estructura, la dinámica y las propiedades emergentes de un sistema interconectado, afectando tanto a los nodos como a las aristas. En esencia, un grafo puede considerarse como un caso especial de una red compleja, donde la red en cuestión es relativamente simple y carece de propiedades emergentes sustanciales.

Las redes sociales son un ejemplo de una red compleja, las personas son en la mayoría de los casos los nodos o entidades, mientras que las aristas son el tipo de relación que tiene entre ellos ([Mayo, Abdelzaher y Ghosh, 2015](#); [Pei, Morone y Makse, 2018](#)). En una red bibliográfica, los nodos son los artículos, libros u obras similares, mientras que las aristas dan cuenta de la forma en cómo estos se citan entre sí ([Boyack Y Klavans, 2019](#); [Maltseva Y Batagelj, 2019](#)). En conclusión, un conjunto de nodos puede generar distintas redes dependiendo de la forma en cómo se decida relacionar los nodos ([Estrada, 2012](#); [Newman, 2010](#); [Newman, Barabasi y Watts, 2011](#)).

Como antecedentes a este artículo, se puede mencionar el trabajo presentado por [Ostos, Rentería-Ramos y Cala \(2021\)](#); en él, los autores proponen la construcción de un modelo de vigilancia tecnológica para la gestión estratégica de la investigación científica en instituciones de educación superior en Colombia. Este modelo está compuesto por un sistema de información que incluye artículos científicos, planes de intervención para las regiones y el país, y datos de políticas públicas relacionadas con Ciencia, Tecnología e Información. Los resultados clave de este estudio indican que la creación de un sistema complejo permitió identificar las áreas prioritarias de la producción científica en el país. En última instancia, la investigación evidenció que los temas de investigación científica que se abordan en Colombia por las instituciones educativas no coinciden con las necesidades identificadas.

Por otra parte, investigadores como [Vaseashta \(2014\)](#), ilustra cómo el proceso de toma de decisiones estratégicas es complejo y requiere una base sólida de conocimientos, orientación colectiva, capacidades analíticas y evaluación de riesgos. En su trabajo, presenta tres metodologías (TechFARM, ADAMS y NESTTS) que combinan diversas disciplinas científicas y tecnologías de vanguardia para proporcionar a los responsables de la toma de decisiones soluciones plausibles y rutas alternativas. Estas metodologías se aplican en análisis de tendencias y prospectiva, y se han adaptado a una variedad de campos, desde defensa hasta ciberseguridad, salud y seguridad ambiental, lo que respalda la formulación de políticas y recomendaciones de inversión en beneficio del público en general.

De igual forma, [Ena, Mikova, Saritas y Sokolova \(2016\)](#), en su trabajo introducen una metodología sistemática de monitoreo de tendencias tecnológicas (TTM) basada en un análisis de datos bibliométricos. La metodología se desarrolla teniendo en cuenta varios fundamentos clave como el aumento en el número de fuentes de datos, la necesidad de enfoques de agrupamiento personalizados y la mejora del impacto de las políticas a través de la recopilación de inteligencia orientada al futuro sobre desarrollos emergentes y posibles cambios disruptivos. Los autores presentan un nuevo algoritmo para la agrupación de datos con el fin de superar las limitaciones de las herramientas de agrupación disponibles para identificar tendencias tecnológicas. El estudio sitúa las actividades de TTM en un contexto más amplio de políticas para utilizar los resultados en la formulación de políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación y en procesos de elaboración de estrategias de I+D.

3. Metodología

En este artículo se hace una descripción de la construcción de la red de investigadores en una institución específica: La Corporación Universitaria Empresarial Alexander Von Humboldt como un caso de estudio, mientras se describen las fases generales que pueden aplicarse en situaciones similares.

Uno de los referentes clave para esta investigación fue el enfoque presentado por la Universidad Santo Tomás en Colombia. En este enfoque, se implementó el Modelo de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Estratégica (MOVTEA) con el fin de analizar diversas propuestas académicas. El objetivo principal de dicho modelo consistió en la creación de una serie de herramientas e instrumentos destinados a mejorar las estrategias utilizadas en los procesos de toma de decisiones relacionados con la creación de nuevos programas académicos ([Mesa Angulo, Ostos Ortiz y Rentería, 2020](#)).

Fases para la construcción de la red de investigadores

Recolección de información: La oficina de investigaciones de la institución, brindó los documentos de las propuestas de los proyectos de investigación de todas las facultades durante la ventana de tiempo 2018 a 2021. De dicha información se obtuvieron datos como año, título del proyecto, investigador principal, coinvistigadores, tipo de proyecto, grupo de investigación, facultad, área temática, área de conocimiento, programa académico y palabras clave.

Construcción del Dataset: Despues de recolectar la información, se procede a la construcción de la base de datos (Dataset) que agrupa toda la información que se obtuvo en el paso anterior. Esta información debe tener alguna de estas extensiones: **xlsx, csv o cualquier gestor de archivos tipo tabla de datos.**

El Dataset debe pasar por un proceso de depuración de datos, el cual incluye tareas como la eliminación de registros duplicados, la corrección de valores erróneos o inconsistentes, la eliminación de datos obsoletos o irrelevantes, la estandarización de formatos y la verificación de integridad de los datos. El Dataset debe suministrar al gestor de red toda la información necesaria para identificar los nodos y las aristas, tarea que es crucial para la construcción de la red.

Construcción de la red: Una vez depurada la información del conjunto de datos, se procede a construir la red. Para este propósito, se utiliza un gestor de redes, en este caso, Python con NetworkX. Esta biblioteca de Python se emplea para la creación, manipulación y estudio de estructuras de redes, como grafos y grafos dirigidos ([Platt, 2019](#)). Además de este software, se utilizaron otras herramientas, como Gephi, diseñada específicamente para la creación de redes complejas. En cuanto al hardware, no es necesario contar con computadoras de alto rendimiento. Las aplicaciones presentadas en este trabajo se ejecutaron en un computador personal con requisitos mínimos.

Se construyeron varias redes, entre ellas la red de autores, la cual toma como nodos a los investigadores y coinvistigadores de cada proyecto de investigación y las aristas se definieron a través de las palabras clave de los proyectos de investigación

que tuvieran en común. Por otra parte, se construyó la red de palabras clave, en ésta los nodos son las temáticas de trabajo y las aristas representaban los investigadores y coinvestigadores que estuvieran indagando en dichos temas.

Estas redes también deben pasar por un proceso de validación de información, donde se verifique lo aportado por el Dataset esté correctamente representado en la red y que no se presenten ambigüedades (nodos repetidos, nodos ausentes, aristas dobles o bucles). El Dataset puede dar lugar a construir una red o varias de ellas dependiendo de las variables que se quieran estudiar, de hecho se pueden realizar redes que estén relacionadas por temas de investigación, palabras clave, citas bibliográficas, temas de estudio, grupos de investigación, trabajos en conjunto, etc.

Análisis de medidas de centralidad: El análisis de centralidad en una red es una técnica utilizada en teoría de redes para identificar y evaluar la importancia o centralidad de nodos específicos en una red. La centralidad se refiere a la medida en que un nodo ocupa una posición destacada o influyente en la red en función de diversos criterios. El análisis de centralidad es fundamental para comprender la estructura y el funcionamiento de una red, así como para identificar nodos clave en términos de su influencia, conectividad o control ([Estrada, 2012](#)).

Una vez completada la construcción de la red, se procedió a realizar un análisis de centralidad. Este análisis involucró la evaluación de medidas como la “Degree Centrality,” que permite identificar los nodos mejor conectados, es decir, aquellos con más conexiones o relaciones más sólidas con otros nodos ([Zhang Y Luo, 2017](#)). Esta evaluación facilita la rápida identificación de los nodos con mayor grado de interacción. Por ejemplo, al considerar la red de investigadores, donde los nodos representan a los investigadores y coinvestigadores, y las aristas representan los proyectos de investigación, el análisis de “Degree Centrality” revelará qué investigadores participan en más proyectos y cómo se relacionan con otros investigadores, incluso si no trabajan juntos o no forman parte del mismo grupo de investigación. Del mismo modo, en el caso de la red de palabras clave, donde los nodos representan las temáticas de trabajo y las aristas conectan a los investigadores, el análisis de centralidad proporciona información sobre cuáles temas son los más estudiados por la comunidad de profesores de la institución.

4. Resultados

Como se explicó en la metodología, se construyeron dos redes a partir del mismo dataframe. La primera de ellas toma como punto de partida a los investigadores y coinvestigadores como los nodos y a las aristas como las palabras clave que tengan en común estos en sus trabajos. Para la segunda, los nodos son las palabras clave mientras que las aristas son los investigadores y coinvestigadores que trabajan en esas temáticas.

4.1. Red de investigadores

En la [Figura 1](#), se presenta la red de investigadores relacionados con palabras clave entre los años 2018 al 2021 de la Corporación universitaria empresarial Alexander von Humboldt (CUE AvH). Su finalidad, es detectar que investigadores tienen relación con otros y en qué temas están trabajando, esto sugerido a partir de las palabras clave de los proyectos de investigación.

La red de la [Figura 1](#) cuenta con 52 nodos y 46 aristas. Por razones éticas, los nombres de los investigadores fueron codificados con la etiqueta “In” más un número que permite identificarlo. Así por ejemplo, los investigadores In41 e In13 tienen en común la palabra clave aprendizaje significativo, esto implica que ambos profesionales en sus investigaciones tienen este tema en común; pero no necesariamente ambos están en el mismo proyecto. La escala de colores ubicada a la derecha de la [Figura 1](#), muestra el valor del grado de centralidad Degree Centrality, el cual, muestra en color rojo los nodos con bajo grado de conectividad y los de color amarillo con mayor grado.

En la [Figura 1](#) se observan las diferentes tendencias investigativas de la CUE AvH. Los diferentes subgrafos que se presentan en tonalidades de color naranja y amarillo indican la conectividad entre algunos grupos de investigadores, a pesar de que no necesariamente pertenecen al mismo grupo de investigación y/o proyecto de investigación. Por otra parte, los investigadores que son representados por los nodos de color rojo son profesionales tales que no existe otro par académico en la institución que tengan el mismo interés de investigación. En la [Figura 2](#), se muestra el subgrafo mejor conectado del grafo mostrado en la [Figura 1](#).

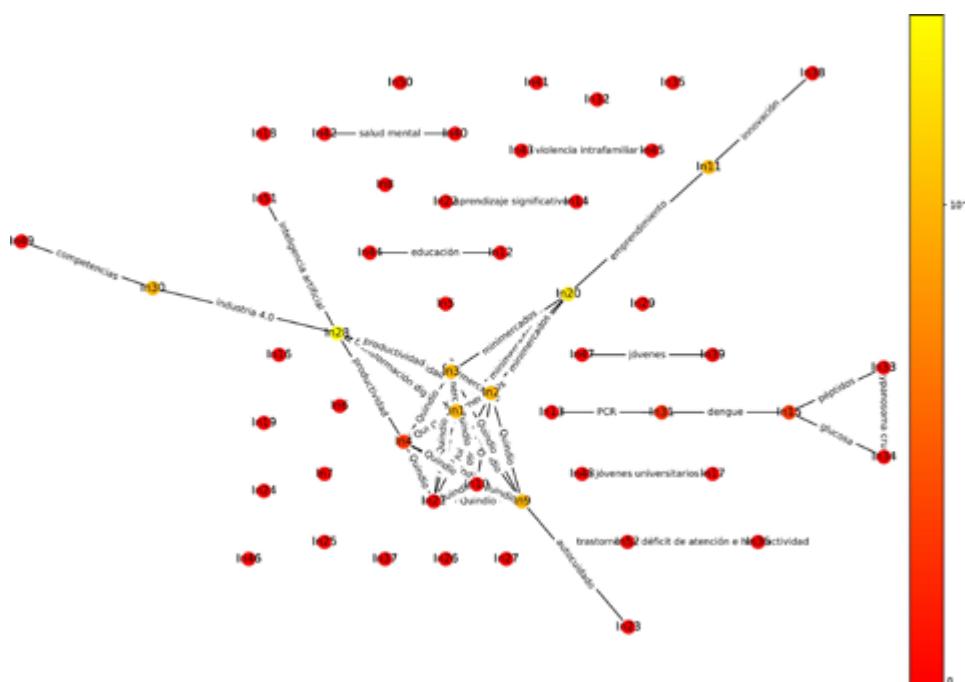


Figura 1. Red de investigadores y palabras clave
Fuente: Elaboración propia

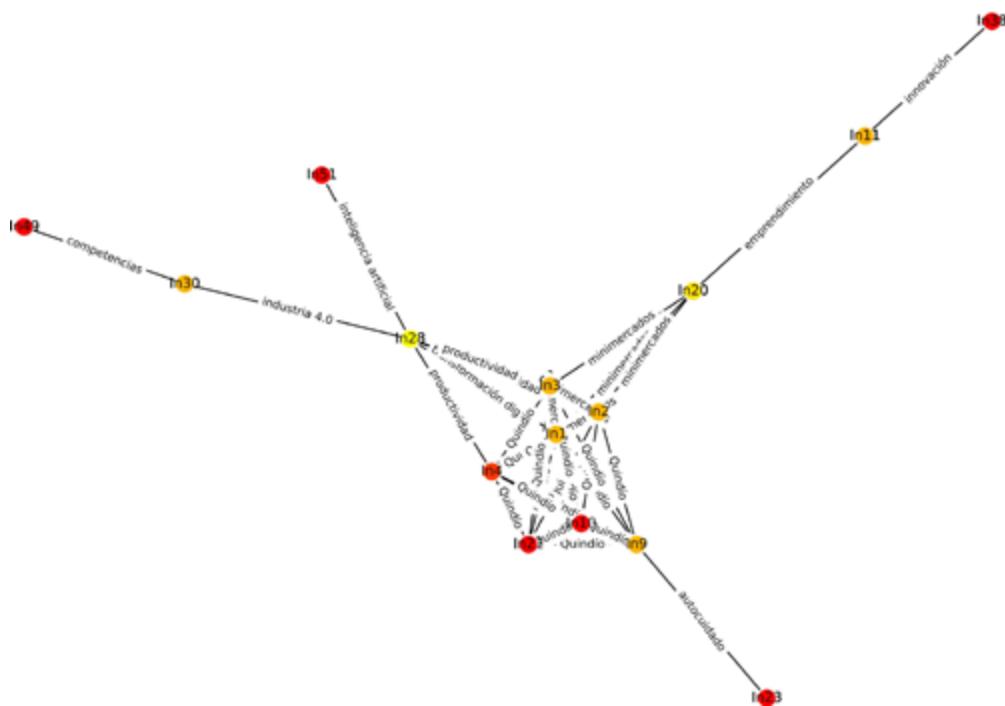


Figura 2. Subgrafo de la red de investigadores con palabras clave
Fuente: Elaboración propia

Este subgrafo es el más representativo y muestra a los investigadores mejor conectados de la red, teniendo así varios temas en común. En subgrafo de la [Figura 2](#), las aristas reflejan la conectividad entre los investigadores de dos facultades de la institución educativa a través de las palabras clave de los proyectos de investigación. Además, se observa que los investigadores In1, In2, In3, In4, In8, In20 y In28 tienen más conexiones con otros nodos, es decir, su grado de centralidad es mayor respecto a los demás. Esto implica que sus investigaciones abarcan diversas temáticas en la ventana de tiempo.

La red muestra otros subgrafos que son relevantes en el contexto investigativo de la universidad, donde se evidencian otras temáticas como educación y salud. Las [Figura 3 y 4](#) se observan palabras clave como dengue, glucosa y educación entre otras.

La [Figura 4](#) muestra la relación entre los docentes de la misma Facultad. Es el caso de los investigadores In12, In31, In15, In38 y In33, los cuales pertenecen a la Facultad de Ciencias médicas.

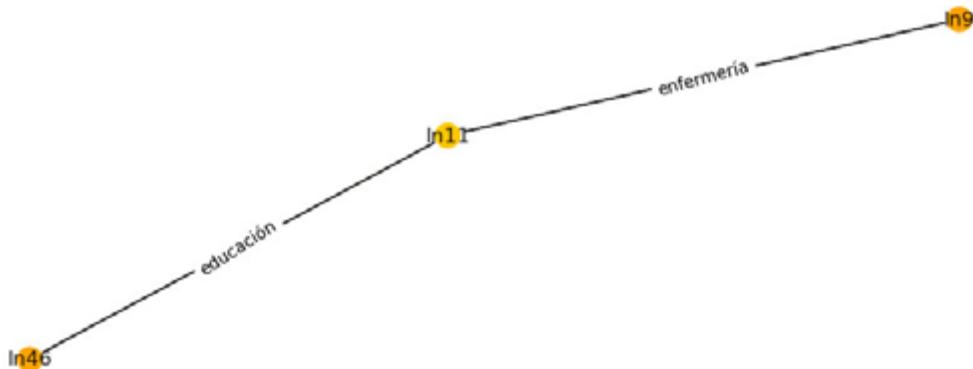


Figura 3. Subgrafo de la red de investigadores con palabras clave de la Facultad de Ciencias Médicas
Fuente: Elaboración propia

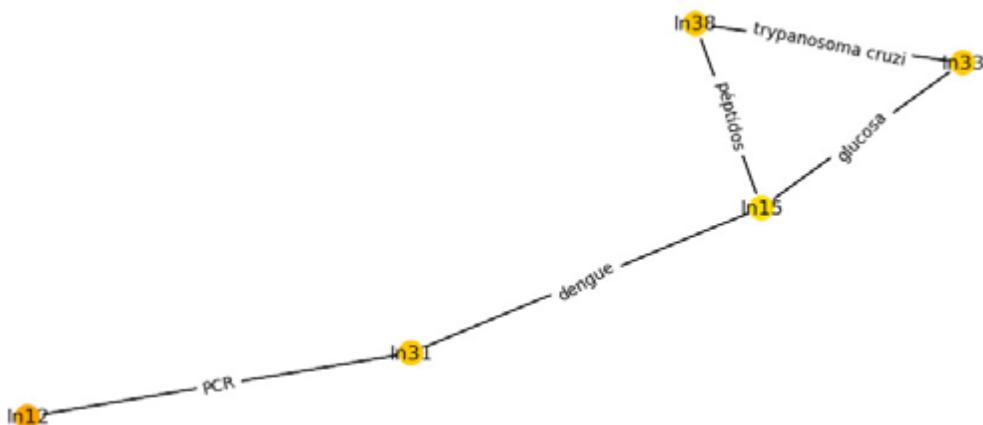


Figura 4. Segundo subgrafo de la red de investigadores con palabras clave de la Facultad de Ciencias
Fuente: Elaboración propia

El Degree Centrality mide la cantidad de aristas que inciden en cada nodo, así por ejemplo, en la [Figura 4](#) el nodo In15 tiene grado 3, debido a que está conectado con otros tres investigadores por tres aristas. La [Figura 5](#), ilustra la distribución del grado (Degree) de los nodos de la red de la [Figura 1](#), donde aproximadamente el 35% de los nodos, tienen grado cero, lo cual indica que en la CUEAvH entre el año 2018 y 2021, no hay otro par académico con el mismo interés de investigación, estos nodos se pueden apreciar en la [Figura 1](#) con el color rojo.

Por otra parte, los nodos de grado 3 y 4 son los menos frecuentes, al igual que los de grado 5 y 6, es decir, dan cuenta de los investigadores que tienen mucho en común con otros pares académicos. De hecho, el 15% de los investigadores de la institución, cuentan con al menos tres pares académicos con temas en común.

Además, la [Figura 5](#) muestra que poco más del 35% de los nodos tiene grado 1, es decir se conecta sólo con otro investigador, lo cual indica la poca conectividad de la red.

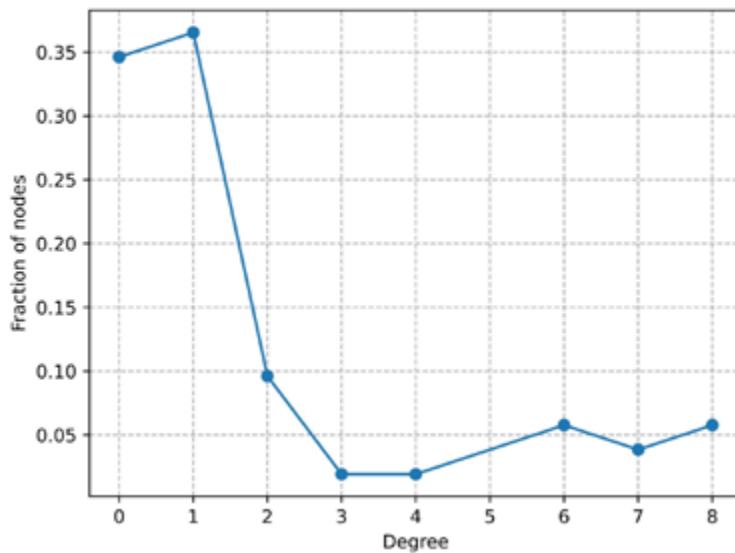


Figura 5. Distribución de grado de Centralidad del grafo de investigadores y palabras clave.

Fuente: Elaboración propia

4.2. Red de palabras clave

Para este enfoque, se tomó como nodo a las palabras clave y las aristas a los investigadores. El objetivo de esta red es identificar qué tema de investigación es más relevante en la CUEAvH.

La red de palabras clave mostrada en la [Figura 6](#), cuenta con 368 nodos que son extraídos de 110 proyectos de investigación entre los años 2018 a 2021. Además, se tiene 52 investigadores, sin embargo, el grafo tiene 350 aristas, lo cual indica que el investigador, aparece varias veces dado que durante esos cuatro años ha presentado varios proyectos de investigación. Además, la red tiene un promedio de grado de 0.951, esto indica que como mínimo cada nodo tiene una arista, es decir, al menos un investigador que hace referencia a esa palabra clave.

En la red de palabras clave de la [Figura 6](#), no se podrá visualizar en el grafo las 350 palabras clave, dado que esta cantidad de etiquetas de los nodos dificulta la lectura de la figura. Sin embargo, en las Figuras 8, 9 y 11 se mostrarán casos particulares de algunos subgrafos de esta red, donde se visualizará las etiquetas de los nodos con las palabras clave.

Por otra parte, la densidad de una red es un número que pertenece al intervalo cerrado $[0,1]$, donde si un grafo tiene densidad 1, es por que todos sus nodos están conectados entre si, mientras que si la densidad es 0, la red solo tiene nodos aislados sin aristas. En pocas palabras, la densidad es una medida que me indica que tan conectada esta la red. Este valor se calcula usando la ecuación (I):

$$\rho(G) = \frac{2m}{n(n-1)} \quad (I)$$

Donde G es un grafo o red, n es el número de nodos y m es el número de aristas. Para el caso de la red de palabras clave, su valor es $\rho(G)=0.0051$; lo que indica que es una red poco densa, es decir, poco conectada. El valor de la densidad, junto con el promedio de grado indican que en una temática investigativa, la mayoría de los casos sólo un investigador de toda la institución educativa está interesado en ese tema. Además, al ser no densa, indica que existe una variedad de temas de investigación que se están trabajando en la institución; sin embargo, se resalta que no hay grupos interdisciplinarios al rededor de estos temas.

Por otra parte, otra forma de analizar la red de la [Figura 6](#) es por medio del agrupamiento de los nodos, lo cual se define como una comunidad ([Provan, Veazie, Staten y Teufel-Shone, 2005](#)). En la [Figura 7](#) se muestran los subgrafos de temas que se tratan en la institución.

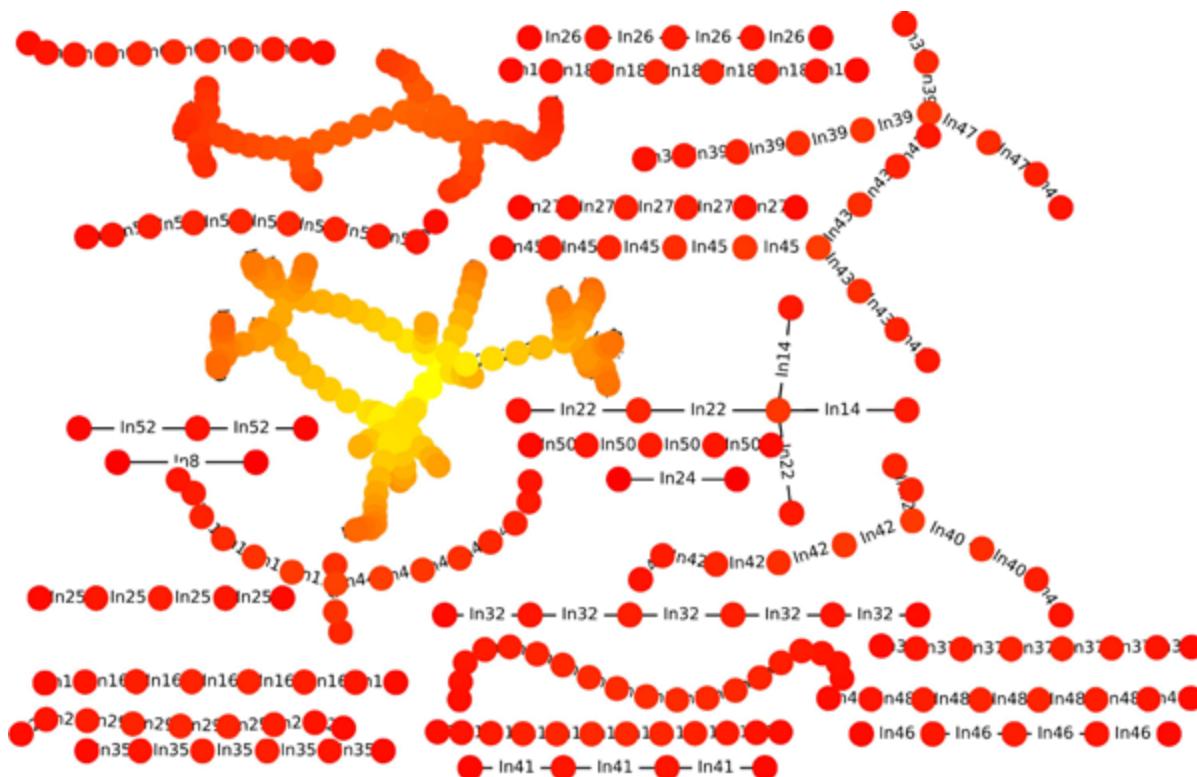


Figura 6. Red de palabras clave

Fuente: Elaboración propia

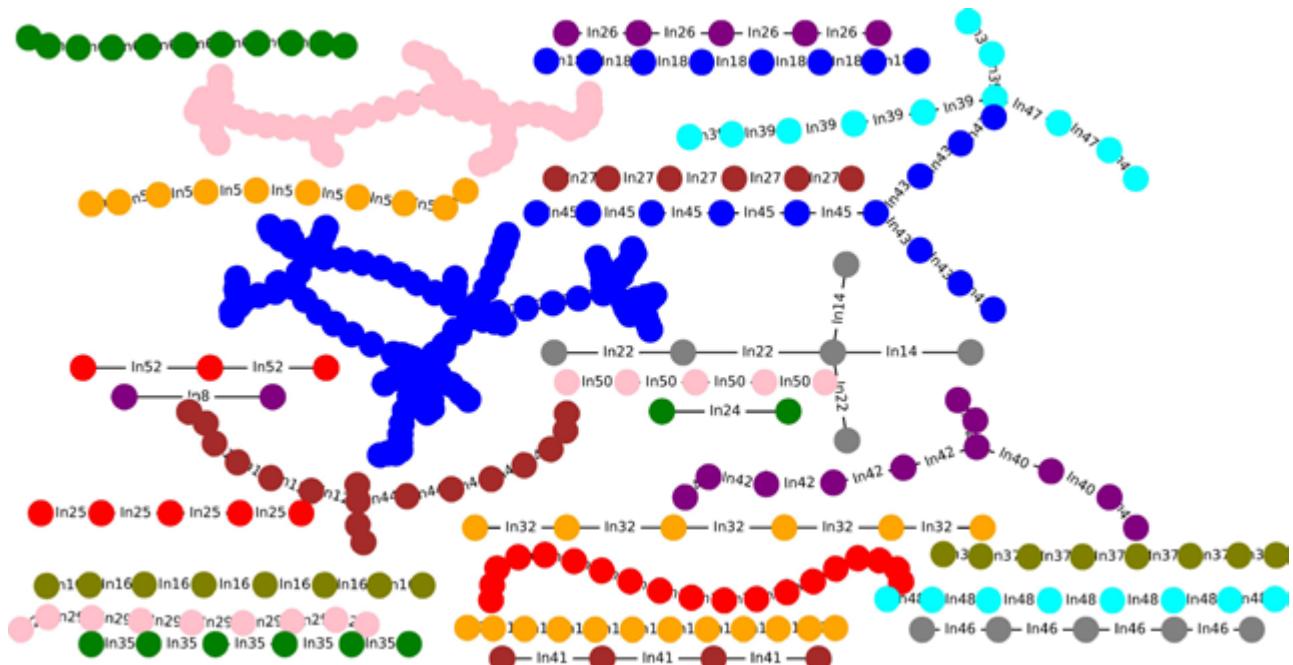


Figura 7. Red de palabras clave dividida en subgrafos



Figura 8. Sub red del nodo Quindío y sus conexiones

Fuente: Elaboración propia

El nodo más importante y mejor conectado de la red [Figura 7](#), es el nodo Quindío como se ilustra en la [Figura 8](#). Este nodo es abordado por 13 investigadores de la red de investigadores mostrado en la [Figura 1](#), convirtiéndose en el tema más recurrente abordado por los profesionales.

El nodo Quindío mostrado en la [Figura 8](#), hace referencia al departamento del Quindío en Colombia. Este tema es el más recurrente y el más relacionado por otros investigadores, presentando conexiones con temas como extensión, capital humano, estudio de casos, etc. Los diferentes temas que hacen incidencia sobre este nodo, muestran que en la institución se hace investigación aplicada al departamento donde está ubicada la misma. Este nodo hace parte de la comunidad más grande de la red de palabras clave mostrada en la [Figura 7](#), como se puede apreciar en la [Figura 9](#), ésta comunidad abarca diferentes temas y es abordada por gran parte de los investigadores.

La [Figura 9](#) muestra el subgrafo completo donde se encuentra el nodo Quindío. En el mismo subgrafo aparecen los otros nodos que también tienen frecuencias más altas. Dichos temas son Quindío, minimercados, tiendas detallistas, estudio de casos y transformación digital como se ve en la [Figura 10](#).

Otro de los subgrafos más importantes en la red es el presentado en la [Figura 11](#). En él se aprecia los temas relacionados con la Facultad de Ciencias Médicas, donde aparecen temas como PCR, dengue, péptidos, glucosa y tripanosoma entre otros. Los principales investigadores en esta subred son ln13, ln31, ln15, ln33 y ln34 entre otros.

En cuanto a la distribución de grado la red de palabras clave [Figura 6](#), al menos el 70% de los nodos tienen grado dos, lo que muestra que la mayoría de las palabras clave están relacionadas en los proyectos de dos investigadores como lo ilustra la [Figura 12](#).

Cerca del 94% de las palabras clave analizadas en la investigación se encuentran relacionadas con máximo dos investigadores de la CUEAvH. Además, poco más del 20% de los nodos son terminales, es decir se encuentran al final de uno de los subgrafos mostrados en las Figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11. Dichos nodos dan razón de los temas que son tratados por un sólo autor, es decir, son los temas que sólo son abordados por ellos en la institución. La [Figura 12](#) muestra que los nodos con mayor grado son menos frecuentes, así por ejemplo sólo existe un nodo de grado 13 (Nodo Quindío).



Figura 9. Subgrafo más grande de la red con el nodo Quindío
Fuente: Elaboración propia

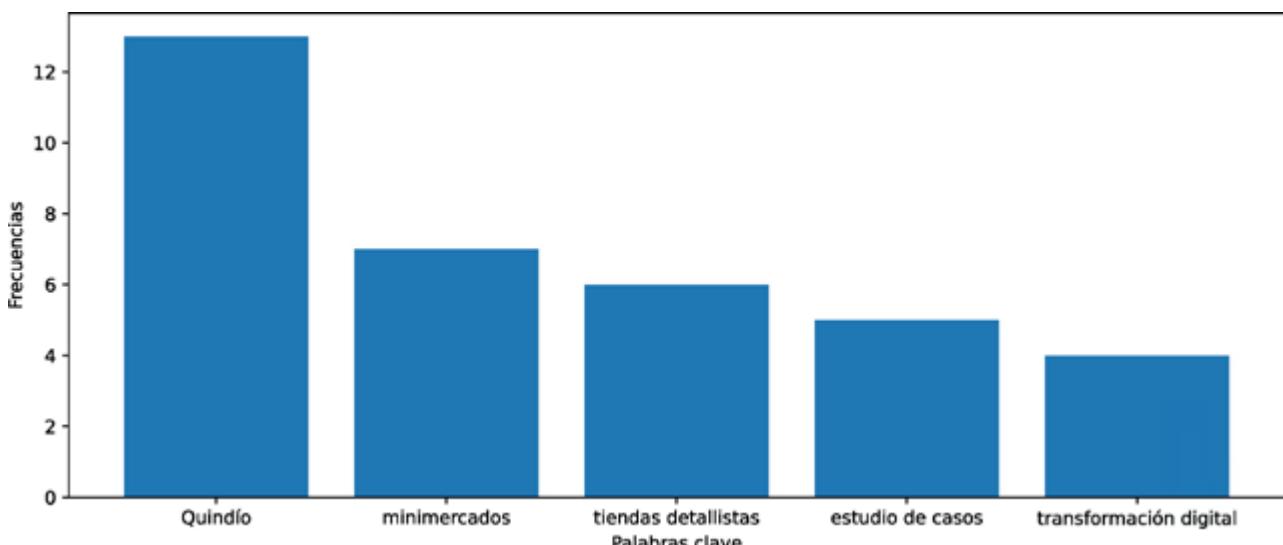


Figura 10. Diagrama de frecuencias de las palabras clave de la red
Fuente: Elaboración propia

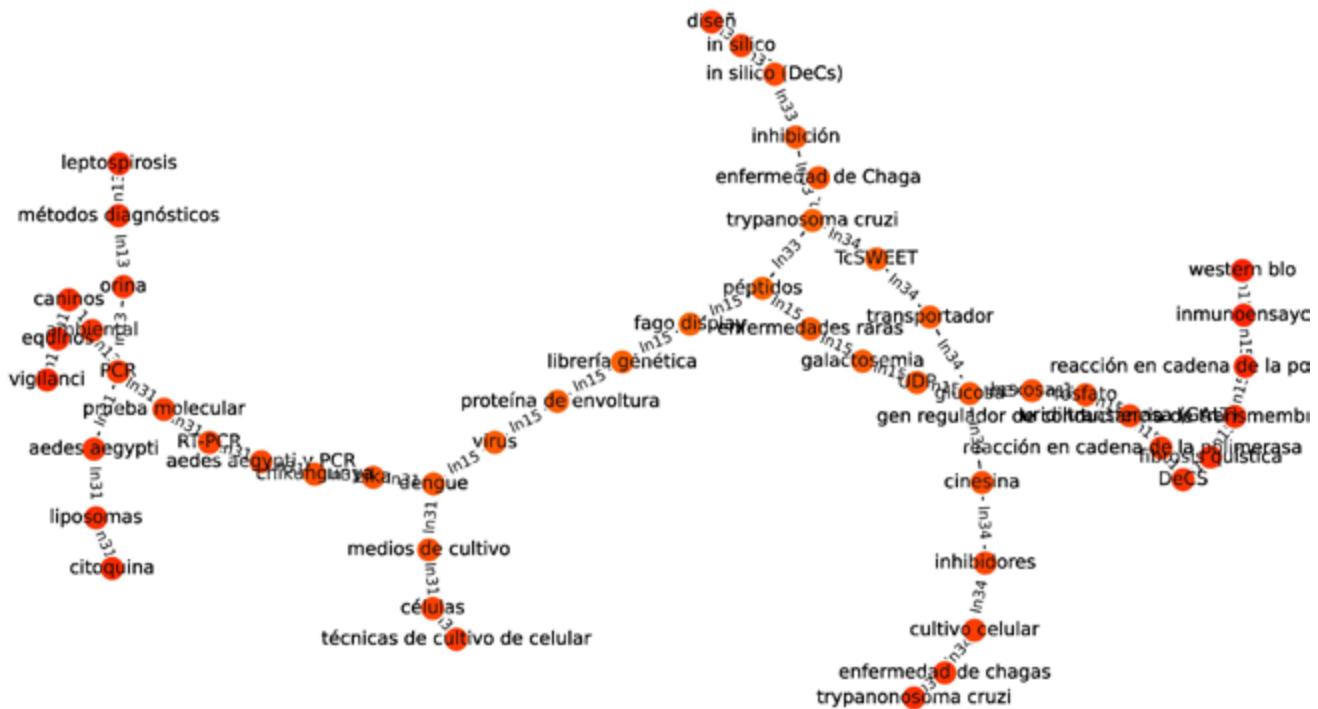


Figura 11. Subgrafo con las palabras clave de la facultad de Ciencias Médicas

Fuente: Elaboración propia

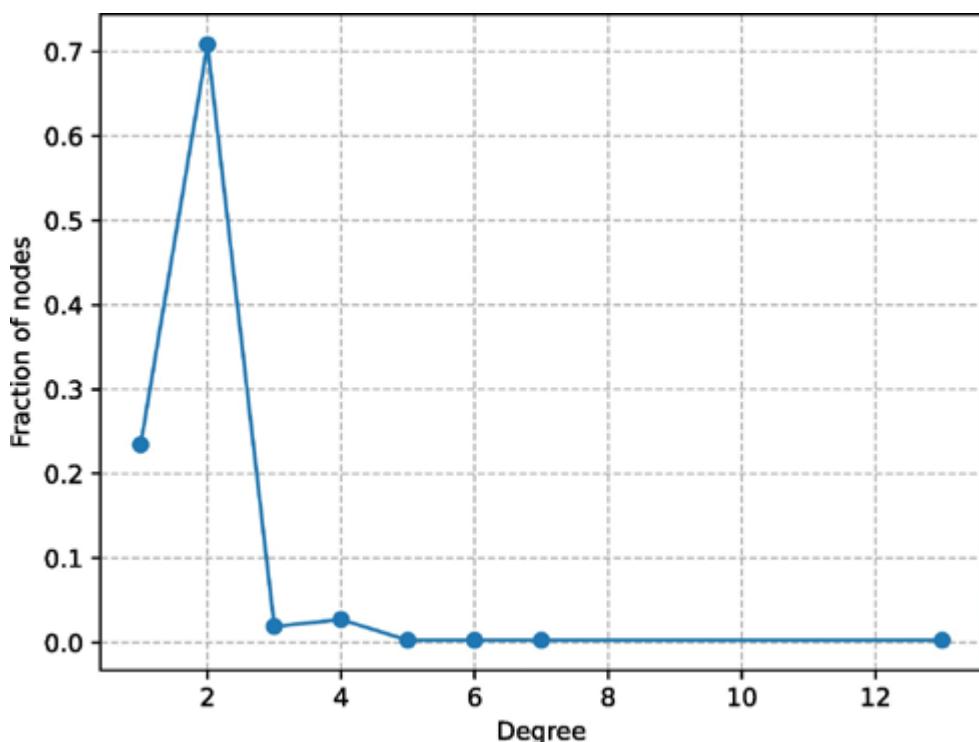


Figura 12. Gráfico de Centralidad del grafo palabras clave.
Fuente: Elaboración propia

5. Discusión de los resultados

La vigilancia científico-tecnológica se encuentra en una posición única para aprovechar el potencial de las redes complejas en beneficio de la sociedad y el avance científico. Estas redes ofrecen una plataforma valiosa para la recopilación, análisis y visualización de datos interconectados, lo que permite identificar patrones emergentes, tendencias y relaciones que pueden impulsar la toma de decisiones en el ámbito de la investigación y la innovación. Al utilizar las redes complejas de manera estratégica, la vigilancia científico-tecnológica puede contribuir no solo a la detección temprana de avances científicos y tecnológicos, sino también a la identificación de oportunidades de colaboración, el mapeo de actores clave y la promoción de la innovación, lo que, en última instancia, fortalece el progreso en la ciencia y la tecnología.

Teniendo en cuenta lo anterior, el trabajo presentado por [Ostos, Rentería-Ramos y Cala \(2021\)](#), el cual es el más similar en cuanto a la herramienta y a los objetivos planteados, resaltando que estos autores presentan resultados de forma global y enfocado en universidades o instituciones educativas teniendo en cuenta artículos y otros tipos de publicaciones. Mientras que en el trabajo presentado en este artículo se centra en un caso particular de la institución CUEAvH y en específico para diagnosticar los procesos de investigación en la institución.

Sin embargo, en ambos casos las redes complejas fueron una herramienta que permitió encontrar muchos aspectos que a simple vista no se pueden evidenciar con sólo tener las publicaciones de los proyectos de investigación o los informes finales de los mismos. En ambos casos se pudo ver aspectos como los temas y las tendencias en investigación que en más o menos medida están presentes en una institución, haciendo que uno de los objetivos principales de la vigilancia científico tecnológico, la autoevaluación continua, se lleva a cabo de una forma más eficaz.

En este trabajo, la integración de la vigilancia científico-tecnológica junto con el análisis de redes complejas desempeña un papel esencial en la supervisión de los procesos de investigación en la CUEAvH. Esta combinación de enfoques nos permite obtener una visión profunda y detallada de la dinámica investigativa en la institución. La vigilancia científico-tecnológica nos ayuda a identificar las últimas tendencias y avances en temas de estudio, lo que, a su vez, permite tomar decisiones más informadas sobre la asignación de recursos y la promoción de la innovación. Por su parte, el análisis de redes complejas nos brinda una representación visual de las conexiones y colaboraciones entre investigadores y proyectos, lo que facilita la identificación de áreas de fortaleza y oportunidades de colaboración interdisciplinaria. En conjunto, estas herramientas permiten elevar la calidad y el impacto de la investigación en la CUEAvH.

6. Conclusiones

Las redes complejas se han convertido en una herramienta esencial para visualizar y analizar las interacciones en el ámbito de la investigación de una Institución de Educación Superior (IES). Mediante estas redes, es posible identificar subgrafos que arrojan luz sobre los investigadores más destacados y los temas de investigación más prominentes en la institución. Esta capacidad de visualización es de gran utilidad para la vigilancia científico-tecnológica, ya que facilita la toma de decisiones estratégicas en el campo de la investigación y el desarrollo tecnológico. Gracias a las visualizaciones y las medidas de centralidad, un director o vicerrector de investigación puede identificar con mayor facilidad grupos interdisciplinarios de investigadores y destacar líneas de investigación en la institución.

Este trabajo ha presentado una herramienta basada en redes complejas para la vigilancia científico-tecnológica de los procesos de investigación en CUEAvH. Esta herramienta ha permitido identificar relaciones entre los temas de investigación y la red de investigadores y coinvestigadores que trabajan en esos mismos temas. Además, ha facilitado la identificación de los docentes que tienen un mayor número de trabajos presentados y cómo estos se relacionan con otros trabajos.

La herramienta también ofrece la posibilidad de visualizar los temas de investigación más relevantes y su relación con los docentes que los abordan. Las redes proporcionan una representación de los temas de mayor impacto en la institución y destacan a los docentes que pueden contribuir de manera significativa a estos esfuerzos investigativos. Los resultados evidencian la existencia de un grupo de docentes que fomentan la colaboración interdisciplinaria. Por otro lado, las redes revelan a investigadores cuyos temas de investigación no están vinculados a otros proyectos o grupos, lo que resulta en su aislamiento en el entorno de investigación. Aunque estos investigadores aportan al proceso investigativo de la institución, su influencia y relevancia se ven limitadas debido a su falta de interconexión con el trabajo interdisciplinario de otros docentes.

En resumen, el uso de redes complejas como herramienta de visualización y análisis en el campo de la investigación en una Institución de Educación Superior (IES), en específico la CUEAvH, ha proporcionado valiosas percepciones. Estas visualizaciones han revelado que muchos investigadores trabajan en temas aislados (ver [Figura 1](#)), lo que se traduce en su representación como nodos aislados en la red (nodo color rojo), indicando una falta de conexiones interdisciplinarias. Sin embargo, se observa que existen subgrafos ([Figura 2](#)) que representan grupos de investigadores que comparten intereses comunes y colaboran en áreas específicas. Esto demuestra que, aunque hay una tendencia hacia la investigación individual, también hay instancias de trabajo colaborativo y enfoque en temas recurrentes, como se evidencia en la red de palabras clave. La importancia de fomentar la interdisciplinariedad y la colaboración entre investigadores se destaca como una conclusión clave, ya que esto puede enriquecer la producción de investigación en la institución y promover un enfoque más cohesionado en la investigación y el desarrollo tecnológico.

Basado en los resultados y conclusiones de este trabajo, se pueden proponer algunas áreas de enfoque para investigaciones futuras. En primer lugar, sería beneficioso continuar refinando y mejorando la herramienta basada en redes complejas para la vigilancia científico-tecnológica, asegurando que sea aún más eficaz en la identificación y visualización de temas de investigación, conexiones interdisciplinarias y tendencias emergentes. Además, se podría crear otras redes como las de coinvestigadores, redes de productos, etc., que permitan identificar otros aspectos importantes para los procesos de investigación en la CUEAvH.

Además, sería valioso explorar en mayor profundidad cómo estas herramientas pueden ser utilizadas en la toma de decisiones estratégicas en el ámbito de la investigación y el desarrollo tecnológico en una Institución de Educación Superior. Se podría investigar cómo estas visualizaciones pueden informar políticas de investigación, asignación de recursos y promoción de la colaboración interdisciplinaria. Adicionalmente, sería interesante estudiar las barreras y desafíos que enfrentan los investigadores cuyos temas no están relacionados con otros proyectos o grupos, y cómo se podrían promover conexiones y colaboraciones más efectivas en el entorno de investigación. ■

Conflictos de intereses

Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

- BOCCALETTI, Stefano; LATORA, Vito; MORENO, Yamir; CHAVEZ, Mario; HWANG, Dong-Uk. Complex networks: Structure and dynamics. In: *Physics Reports*. 2006. vol. 424, no. 4. p. 175–308. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>
- BONDY, Jhon Adrian; MURTY, M. Ram. *Graph Theory* (Graduate Texts in Mathematics). Springer New York. 2008. <https://www.zib.de/groetschel/teaching/WS1314/BondyMurtyGTWA.pdf>
- BOYACK, Kevin W.; KLVANS, Richard. Creation and analysis of large-scale bibliometric networks. In: *Springer Handbook of science and Technology Indicators*. 2019, p. 187-212. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02511-3_8
- CARRILLO-ZAMBRANO, Eduardo; PÁEZ-LEAL, María Carolina; SUÁREZ, Jina Mayerly; LUNA-GONZÁLEZ, María Lucrecia. Modelo de vigilancia tecnológica para la gestión de un grupo de investigación en salud. En: *MedUNAB*. 2018. vol.21. no. I p. 84-99. <https://doi.org/10.29375/01237047.2746>
- COLOMBIA. CONSEJO NACIONAL DE ACREDITACIÓN REPÚBLICA DE COLOMBIA. Lineamientos y aspectos por evaluar para la acreditación en alta calidad de las instituciones de educación superior. Bogotá: Consejo Nacional de Acreditación República de Colombia. 2021. https://www.cna.gov.co/1779/articles-404751_norma.pdf
- COLOMBIA. CONSEJO NACIONAL DE ACREDITACIÓN REPÚBLICA DE COLOMBIA. Lineamientos y aspectos por evaluar para la acreditación en alta calidad de programas académicos. Bogotá: Consejo Nacional de Acreditación República de Colombia. 2021. https://www.cna.gov.co/1779/articles-404750_norma.pdf
- COLOMBIA. MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL DE COLOMBIA. Lineamientos para solicitud, otorgamiento y renovación de registro calificado. Programas de pregrado y posgrado. Bogotá: Ministerio de Educación Nacional de Colombia. 2013. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-338177_archivo_pdf.pdf
- DIESTEL, Reinhard. *Graph Theory*. Graduate Texts in Mathematics. In: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53622-3>
- DI BELLA, Enrico; GANDULLIA, Luca; PRETI, Sara. Analysis of scientific collaboration network of Italian Institute of Technology. In: *Scientometrics*. 2021. vol. 126. no 10, p. 8517-8539. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-04120-9>
- ENA, Oleg; MIKOVA, Nadezhda; SARITAS, Ozcan; SOKOLOVA, Anna. A methodology for technology trend monitoring: the case of semantic technologies. In: *Scientometrics*. 2016. vol. 108. p. 1013-1041. <https://doi.org/10.1007/s11192-016-2024-0>
- ESTRADA, Ernesto. *The Structure of Complex Networks: Theory and Applications*. Oxford University Press, 2012.

12. GIMÉNEZ-TOLEDO, Elea; ROMÁN, ROMÁN, Adelaida. Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva: Conceptos, Profesionales, Servicios y Fuentes de Información. En: El Profesional de La Información. Mayo, 2001. vol.10, no. 5. p.11-20. <https://digital.csic.es/handle/10261/4369>
13. GÜEMES-CASTORENA, David; PONCE-JARAMILLO, Idalia E. University-industry linkage framework to identify opportunity Areas. En: Review of Policy Research. 2019. vol. 36, no 5, p. 660-682. <https://doi.org/10.1111/ropr.12355>
14. HARJU, Tero. Lecture notes on graph theory (FIN-20014). Turku, Finland: University of Turku, 2007. <http://users.utu.fi/harju/graphtheory/graphtheory.pdf>
15. JUNGNICKEL, Dieter. Graphs, networks and algorithms. Berlin: Springer, 2005. https://doc.lagout.org/science/0_Computer%20Science/2_Algorithms/Graphs%2C%20Networks%20and%20Algorithms%20%284th%20ed.%29%20%5Bjungnickel%202012-11-09%5D.pdf
16. LUBANGO, Louis Mitondo. The effect of co-inventor's reputation and network ties on the diffusion of scientific and technical knowledge from academia to industry in South Africa. In: World Patent Information. 2015. vol. 43. p. 5-11. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2015.10.002>
17. MALTSEVA, Daria; BATAGELJ, Vladimir. Social network analysis as a field of invasions: bibliographic approach to study SNA development. In: Scientometrics. 2019. vol. 121, no 2. p. 1085-1128. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03193-x>
18. MAYO, Michael; ABDELZAHER, Ahmed; GHOSH, Preetam. Long-range degree correlations in complex networks. In: Computational Social Networks. 2015. vol. 2, no 1. p. 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40649-015-0011-x>
19. MARULANDA, Carlos E.; HERNÁNDEZ, Albeiro; LÓPEZ, Marcelo. Vigilancia tecnológica para estudiantes universitarios: El caso de la universidad nacional de Colombia, sede Manizales. En: Formación universitaria. 2016. vol. 9, no 2. p. 17-28. <https://www.scielo.cl/pdf/formuniv/v9n2/art03.pdf>
20. MESA ANGULO, José Gabriel; OSTOS ORTIZ, Olga Lucía; RENTERÍA, Rafael Ricardo. Modelo de Vigilancia Tecnológica E Inteligencia Estratégica: Evaluación de Nuevos Programas Académicos de La Universidad Santo Tomás." Bogotá: Ediciones USTA. 2020. 248 p. <https://doi.org/10.15332/li.lib.2020.00255>
21. MIYASHITA, Shuto; SENGOKU, Shintaro. Scientometrics for management of science: Collaboration and knowledge structures and complexities in an interdisciplinary research project. In: Scientometrics. 2021. vol. 126, no 9, p. 7419-7444. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-04080-0>
22. MUÑOZ DURÁN, Javier; MARÍN MARTÍNEZ, María; VALLEJO TRIANO, José. La vigilancia tecnológica en la gestión de proyectos de I+ D+ i: recursos y herramientas. En: El profesional de la información. 2006. vol. 15, no 5. p. 411-419. <http://eprints.rclis.org/940/>
23. NEWMAN, Mark. Networks: An Introduction. Oxford University Press Inc, 2010. https://math.bme.hu/~gabor/oktatas/SztoM/Newman_Networks.pdf
24. NEWMAN, Mark; BARABASI, Albert-Laszlo; WATTS, Duncan J. The Structure and Dynamics of Networks. Princeton University Press, 2011. <https://www.jstor.org/stable/j.ctt7ssgv>
25. OSTOS, Olga Lucía; RENTERÍA-RAMOS, Rafael; CALA, Fabio. Construction of a Complex Network Using Technological Surveillance for the Strategic Management of Science, Technology, and Research in Higher Education Institutions in Colombia. In: Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). 2021. vol. 12, no. 14. p. 1185-1197. <https://turcomat.org/index.php/turkibilmat/article/view/10407>
26. PEI, Sen; MORONE, Flaviano; MAKSE, Hernán A. Theories for influencer identification in complex networks. In: Complex spreading phenomena in social systems: Influence and contagion in real-world social networks, 2018, p. 125-148. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.01594>
27. PLATT, Edward L. Network science with Python and NetworkX quick start guide: explore and visualize network data effectively. Packt Publishing Ltd, 2019.
28. PROVAN, Keith G; VEAZIE, Mark A; STATEN, Lisa K; TEUFEL-SHONE, Nicolette I. The use of network analysis to strengthen community partnerships. In: Public administration review, 2005, vol. 65, no 5, p. 603-613. <http://www.jstor.org/stable/3542526>
29. RAHMAN, Md Saidur. Basic Graph Theory. Springer, Cham, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49475-3>.
30. ROMERO HILLER, Grisel; LAVARCA, Avilio; PÉREZ, Naistha. Prospectiva y vigilancia científica tecnológica. En: Observador del Conocimiento, 2019, vol. 4, no 3, p. 49-56. <https://revistaoc.oncti.gob.ve/index.php/odc/article/view/237>
31. SAN JUAN, Yelena Islen; RODRÍGUEZ ROMERO, Felix Ivan. Modelos y herramientas para la vigilancia tecnológica. En: Ciencias de la Información. 2016. vol. 47, no 2. p. 11-18. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181452083002>
32. SERGIOU, Charalampos; LESTAS, Marios; ANTONIOU, Pavlos; LIASKOS, Christos; PITSELLIDES, Andreas. Complex systems: A communication networks perspective towards 6G. In: IEEE Access. 2020. vol. 8. p. 89007-89030. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993527>
33. TURNBULL, Laura; HÜTT, Marc-Thorsten; IOANNIDES, Andreas A; KININMONTH, Stuart; POEPLI, Ronald; TOCKNER, Klement; BRACKEN, Louise; KEESTRA, Saskia; LIU, Lichan; MASSELINK, Rens y PARSONS, Anthony J. Connectivity and complex systems: learning from a multi-disciplinary perspective. In: Applied Network Science. 2018. vol. 3, no 1. p. 1-49. <https://doi.org/10.1007/s41109-018-0067-2>
34. VASEASHTA, Ashok. Advanced sciences convergence-based methods for surveillance of emerging trends in science, technology, and intelligence. In: Foresight. 2014. vol. 16, no 1. p. 17-36. <https://doi.org/10.1108/FS-10-2012-0074>
35. VELASCO, Carlos A; GARCÍA, Cristina. Inteligencia competitiva, prospectiva e innovación. La norma UE 166006 EX sobre el sistema de vigilancia tecnológica. En: Boletín económico de ICE. 2006. no 2896. https://www.researchgate.net/publication/28167269_Inteligencia_competitiva_prospectiva_e_innovacion_la_norma UE_166006_EX_sobre_el_sistema_de_vigilancia_tecnologica http://www.metalonia.com/w/documents/BICE_2896_Norma%20UNE-166006%20EX.pdf
36. WEST, Douglas B. Introduction to Graph Theory. 2nd ed. Prentice Hall, 2001.
37. WILSON, Robin J. An Introduction to Graph Theory. Pearson Education India, 1970.
38. ZHANG, Junlong; LUO, Yu. Degree centrality, betweenness centrality, and closeness centrality in social networks. En 2017 2nd international conference on modeling, simulation and applied mathematics (MSAM2017). Atlantis Press, 2017. p. 300-303. <https://doi.org/10.2991/msam-17.2017.68>