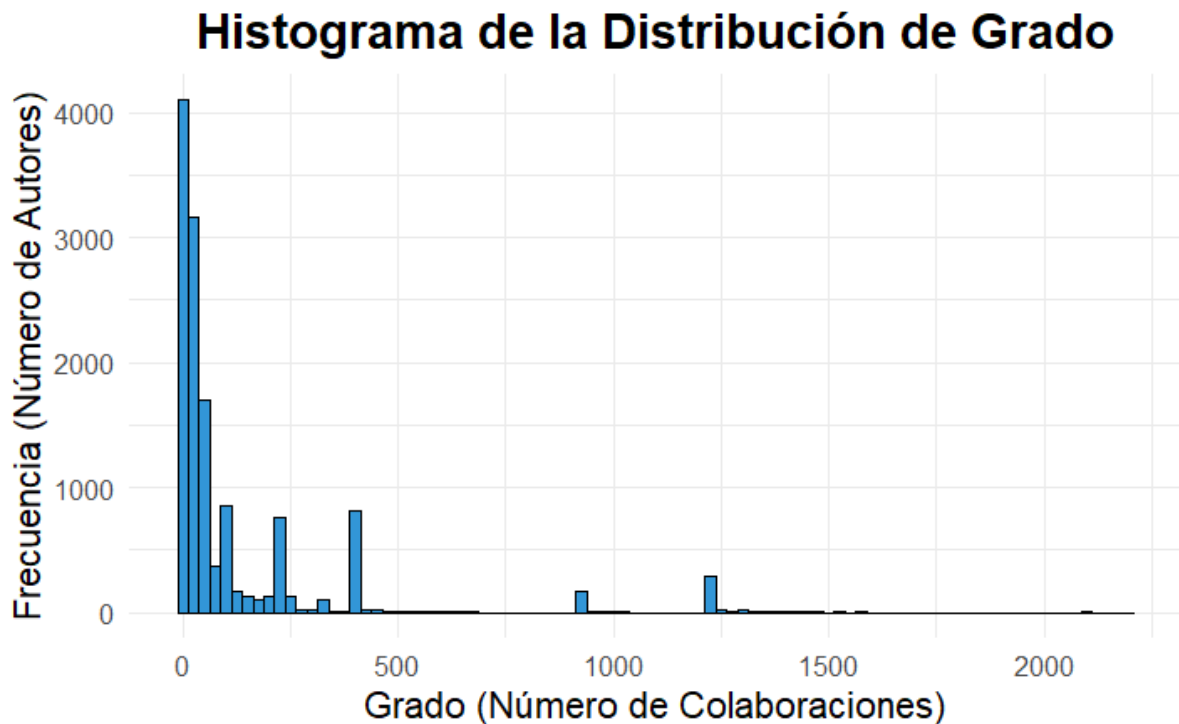


La red de colaboración analizada fue construida aplicando criterios de filtrado para asegurar la pertinencia de los actores y la robustez de los vínculos. Se consideraron únicamente las co-autorías repetidas, estableciendo un umbral de peso mínimo de dos, y se incluyeron solo autores de afiliaciones con al menos cinco miembros. Tras eliminar los nodos que quedaron aislados bajo estos criterios el análisis se centra en la red resultante, conformada por 1.307 nodos (autores) y 865.051 vínculos (colaboraciones). A pesar del elevado número de aristas, la red es globalmente dispersa, con una densidad de 0,0098 (0,98%), lo que implica que las conexiones son selectivas y representan menos del 1% de todos los posibles vínculos de colaboración.

La red exhibe propiedades estructurales complejas, comenzando con una alta cohesión local. El coeficiente de clusterización medio es de 0,843, y el global es de 0,554, lo que indica que los autores forman comunidades muy cerradas donde más de la mitad de las tríadas abiertas tienden a cerrarse. Esta tendencia a la cohesión no se limita al nivel local, sino que se extiende a los actores más centrales, como lo revela el coeficiente de asortatividad por grado de 0,1028. Este valor positivo indica que la red es asortativa, es decir, que los autores con un alto número de colaboraciones tienden a conectarse preferentemente entre sí. Este hallazgo sugiere la existencia de un núcleo de élite académica que no solo centraliza la red, sino que también colabora intensamente dentro de ese mismo círculo. Por otro lado, la escala global de la red se refleja en una longitud de camino medio de 12,59 y un diámetro de 101, valores relativamente altos que se explican por la existencia de actores periféricos, lejanos a este núcleo central.

La topología de la red se caracteriza por una marcada heterogeneidad en la conectividad de sus nodos. El análisis de la distribución de grado revela una fuerte asimetría positiva, una propiedad distintiva de las redes complejas. Mientras que el grado mediano es de 33, el grado promedio asciende a 130,01, y una desviación estándar de 258,44 confirma la alta dispersión. Esta disparidad es impulsada por la existencia de un pequeño número de nodos con una conectividad excepcionalmente alta, alcanzando un grado máximo de 2.196.

Como se observa en la Figura 1, la distribución presenta una "cola larga". La gran mayoría de los autores posee un número bajo o moderado de colaboraciones, mientras que una fracción muy pequeña de autores actúa como *hubs* o centros de alta conectividad. Esta estructura, si nos guiamos por la visualización, se aleja de la topología de un modelo de red aleatoria, donde los grados se agruparían de forma normal en torno al promedio.



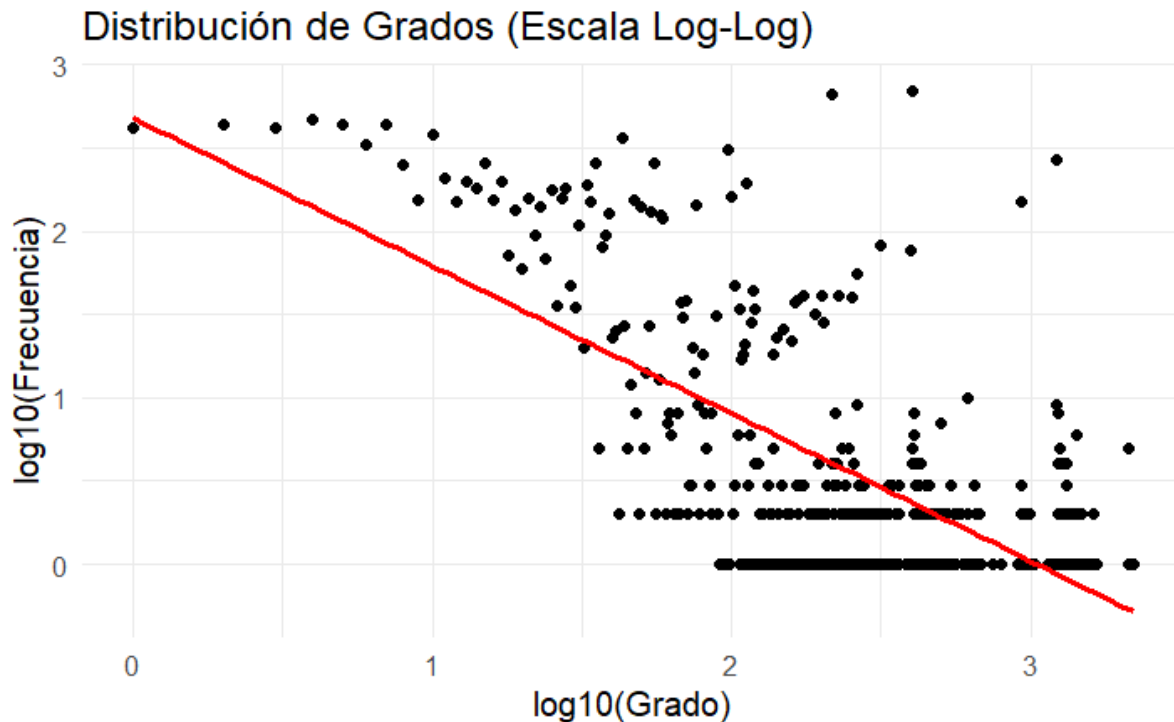


Fig 2. Distribución de grado en escala log-og. Representación de la distribución de grado en ejes logarítmicos. La tendencia lineal observada, resaltada por la línea de ajuste de regresión (roja), es la firma característica de una distribución de ley de potencias. Este hallazgo constituye una fuerte evidencia de que la red es libre de escala.

Para complementar el análisis de la distribución de grado, se evaluó la centralización de la red, que indica si la importancia estructural está concentrada en unos pocos nodos o distribuida de manera más equitativa. Los resultados revelan una topología compleja y jerárquica. La centralización de grado, con un valor de 0,155, es relativamente baja. Esto indica que, a pesar de la existencia de autores que operan como *hubs*, la red no está dominada por un único centro, sugiriendo una estructura policéntrica en lugar de una estructura de estrella.

La centralización de intermediación con un valor estimado de 0,026, es baja. Es importante destacar que, debido a la gran escala de la red, se utilizó una estimación de la intermediación de los nodos, calculada al restringir el análisis a los caminos más cortos con una longitud máxima de 5. El valor de centralización resultante se normalizó dividiendo la suma de las diferencias de intermediación por su máximo teórico posible en una red del mismo tamaño.. Este hallazgo implica que el rol de “puente” entre diferentes grupos de investigación no solo corresponde a un pequeño grupo, sino que esta capacidad de conexión está ampliamente distribuida a través de la red. La eliminación de nodos individuales, incluso aquellos con alto grado, probablemente no fragmentaría la red debido a la existencia de múltiples rutas alternativas para la colaboración.

En marcado contraste con las dos métricas anteriores, la centralización de vector propio arroja un valor de 0,937, un resultado extremadamente alto y cercano al máximo teórico. Esta medida, sensible a la influencia de un nodo (estar conectado a otros nodos bien

conectados), indica la existencia de una pronunciada estructura de núcleo-periferia (core-periphery). Es decir, existe un núcleo de "élite" de autores altamente influyentes y densamente conectados entre sí, mientras que la gran mayoría de los nodos ocupa una posición periférica, con conexiones que en última instancia conducen a este núcleo dominante.

En síntesis, la red de colaboración analizada no apunta a ser una estructura aleatoria ni una red centralizada en un único actor. La red se caracteriza por una baja centralización de conectividad, pero simultáneamente exhibe una jerarquía de influencia extremadamente alta. Esto la perfila como una red libre de escala, donde mecanismos de conexión preferencial conducen a la formación de un núcleo cohesivo y prestigioso. Este hallazgo justifica sólidamente la formulación de hipótesis comparativas con modelos de red que incorporen dicho mecanismo, como el modelo de Barabási-Albert.

Dos fenómenos principales parecen estar detrás de la estructura de la red:

- Cierre triádico: El altísimo coeficiente de clusterización (0,843) sugiere que los autores operan en comunidades de investigación cohesivas; si un autor A colabora con B y con C, existe una alta probabilidad de que B y C terminen colaborando entre sí.
- *Preferential attachment* (Efecto Matthews): La distribución de grado libre de escala y el valor de eigenvector (0,937) apuntan a un mecanismo de conexión preferencial. Los nuevos investigadores o aquellos que buscan nuevas colaboraciones tienden a conectarse con autores ya establecidos y altamente conectados, reforzando así la centralidad de estos *hubs* en un ciclo de retroalimentación positiva.

Para responder a la pregunta respecto al tipo de estructura de red a la que corresponde el conjunto de datos, se contrastará la red empírica con dos modelos nulos. Cada modelo representa una hipótesis sobre el principal mecanismo generador de la red.

- H₀: La red se formó por un proceso aleatorio. La red de colaboración no presenta diferencias estructurales significativas con una red aleatoria de Erdős-Rényi (ER) que tenga el mismo número de nodos y aristas.
- H₁: La red se formó principalmente por un mecanismo de retroalimentación positiva constante de los nodos centrales. La distribución de grado heterogénea y la estructura núcleo-periferia de la red son consistentes con las generadas por un modelo de Barabási-Albert (BA).

El modelo ER representa la hipótesis de que las colaboraciones científicas ocurren al azar, sin que influyan factores como el prestigio del autor, la especialización temática o la pertenencia a un grupo de investigación. Probar que la red real se desvía significativamente de un modelo ER demuestra que la estructura está gobernada por procesos sociales y no por la aleatoriedad.

Por otra parte, la pertinencia del modelo BS es alta para una red académica como la revisada. El mecanismo de conexión preferencial es un análogo directo del efecto

Matthews, donde los investigadores ya establecidos y con alto grado tienen una probabilidad mucho mayor de atraer nuevas colaboraciones. Los académicos emergentes, a su vez, buscan activamente colaborar con estos centros de prestigio para aumentar su capital científico. Este modelo representa una dinámica social fundamental y bien documentada en el estudio de comunidades académicas.

Para evaluar las hipótesis sobre los mecanismos de formación de la red, se implementó un proceso de simulación *bootstrapping*. Esto se realizó con el objetivo de generar modelos nuevos que sirvieran como puntos de referencia contra los cuales comparar las métricas de la red empírica. Se generaron 500 redes para el modelo ER y 500 redes para el modelo BA.

El análisis comparativo de la red empírica frente a los modelos nulos de Erdős-Rényi (ER) y Barabási-Albert (BA) permite identificar con claridad los mecanismos generativos que subyacen a su estructura. La evidencia se presenta tanto a nivel de la distribución de grado global como a través de métricas estructurales clave.

La prueba visual más contundente de la topología de la red se encuentra en la comparación de su distribución de grado en una escala log-log (Figura 3). Esta visualización revela diferencias cualitativas fundamentales entre los modelos: La distribución del modelo de Erdős-Rényi (curva azul) muestra una caída parabólica y rápida, confirmando que las redes aleatorias no siguen una ley de potencias y son, por tanto, un mal descriptor de la red observada.

En cambio, tanto el modelo de Barabási-Albert (curva roja) como la red observada (curva verde) exhiben una tendencia lineal descendente en la cola de su distribución. Este comportamiento lineal es la firma característica de una red libre de escala (scale-free). Este hallazgo confirma que la estructura de la red es incompatible con un proceso de formación aleatoria y valida el modelo de Barabási-Albert como un análogo teórico adecuado.

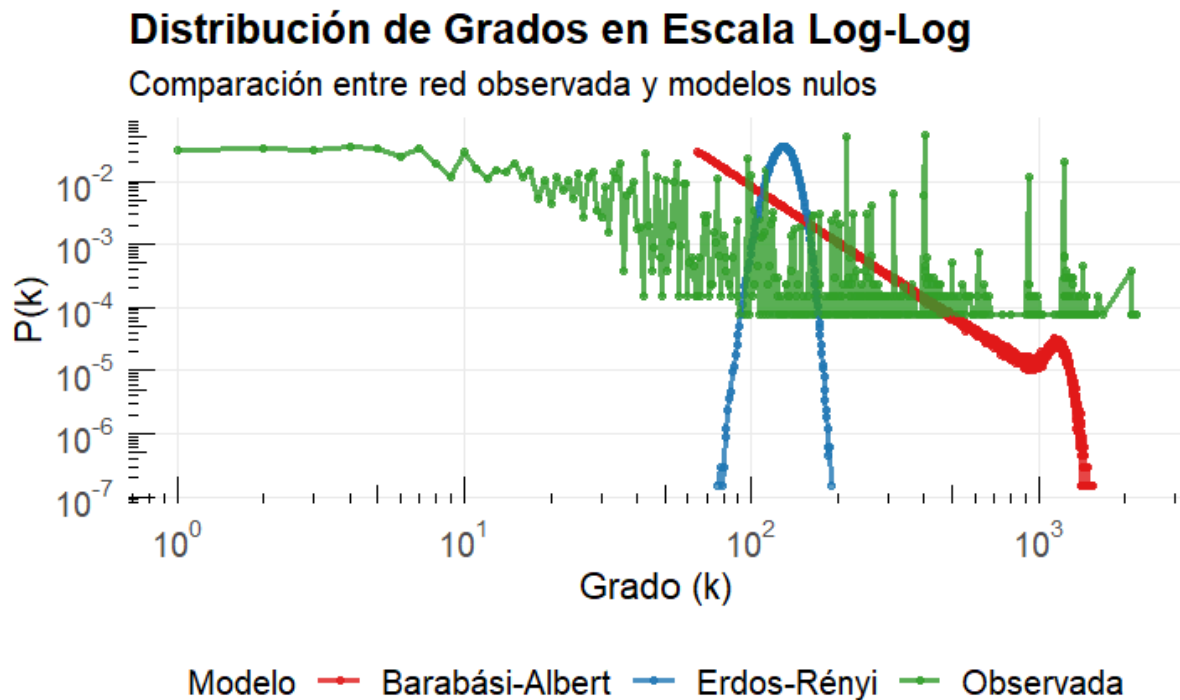


Fig 3. Distribución de grado en escala Log-Log de comparación con modelos nulos. El gráfico representa la probabilidad $P(k)$ del grado (k) para la red observada (verde), el modelo de Erdős-Rényi (azul) y el modelo de Barabási-Albert (rojo). La rápida caída curvilínea del modelo ER descarta una ley de potencias. En contraste, la tendencia lineal en la distribución observada es cualitativamente similar a la del modelo BA, lo que constituye la firma característica de una red libre de escala.

La evidencia más fuerte a favor del modelo BA proviene del análisis de la centralización. La red real presenta una centralización eigenvector de 0,937, indicando una estructura de núcleo-periferia muy distintiva y marcada. El modelo BA replica esta característica, con un promedio de 0,908, mientras que el modelo ER (promedio de 0,266) es incapaz de generar dicha jerarquía.

De manera similar, la centralización de grado de la red real (0,155) es drásticamente superior a la del modelo ER (0,003). El modelo BA se aproxima razonablemente (0,094), capturando la esencia de la desigualdad en la conectividad, aunque subestima su magnitud real. Esto sugiere que el proceso de conexión preferencial en el mundo académico podría ser incluso más intenso que el de los modelos simulados. En conjunto, estas métricas confirman que la emergencia de un núcleo influyente es una consecuencia predecible de un mecanismo de conexión preferencial.

A pesar del éxito del modelo BA en describir la jerarquía global, el análisis de la cohesión local revela una importante discrepancia. La red real presenta un coeficiente de clusterización global de 0,553, un valor extremadamente alto. En contraste, tanto el modelo ER (promedio de 0,009) como el modelo BA (promedio de 0,037) no replican esta estructura.

Este hallazgo apunta a que la conexión preferencial por sí sola no es suficiente para explicar la red. Lo observado podría interpretarse considerando el mecanismo de cierre triádico local: los colaboradores de un mismo autor tienen una alta probabilidad de colaborar entre sí, formando las comunidades densas observadas.

Los resultados demuestran que el modelo de Barabási-Albert es un descriptor potente pero incompleto de la red de colaboración pues permite explicar la estructura global libre de escala y la jerarquía de influencia pero es limitada para explicar los mecanismos de cohesión local. A partir de ello, se concluye que la red observada nace a partir de procesos híbridos; la estructura global está gobernada por mecanismos de conexión preferencial mientras que la localidad se determina por cierres triádicos.

Por lo tanto, la conclusión principal es que la red observada es el producto de un proceso de formación híbrido. Su estructura global está gobernada por un mecanismo de conexión preferencial, mientras que su estructura local está determinada por un mecanismo de cierre triádico. Esta dualidad de fuerzas es característica de muchas redes sociales complejas, donde la popularidad global coexiste con la formación de comunidades locales y cerradas.

Para futuras investigaciones, es crucial incorporar los atributos de los nodos para explicar la génesis de dicha estructura. Una primera línea de profundización se centraría en la homofilia temática como motor de la alta clusterización local. Se hipotetiza que las comunidades densamente conectadas se corresponden con especializaciones temáticas, donde el cierre triádico es impulsado por la similitud en los objetos de estudio. Una segunda línea abordaría la dinámica global, postulando que los hubs de la red no solo son los autores más productivos, sino que actúan como puentes interdisciplinarios. Su alta centralidad se derivaría de su capacidad para integrar y conectar diversas comunidades temáticas, funcionando como *brokers* de conocimiento que articulan el campo de investigación en su conjunto.