

---

# Análisis comparativo entre redes sociales y biológicas a través de grafos

---

Agustín Herrera

Daniel Kolodziejczyk

Rosana Daisy Mendez

María Eugenia Villegas

## Abstract

Este estudio investiga las propiedades estructurales, la detección de comunidades y la robustez de tres redes distintas: la red social de Facebook, la red neuronal de *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) y la red de comunicación de una organización terrorista. Utilizando teoría de grafos y herramientas de análisis de redes, se examinan las medidas de centralidad, detección de comunidades y la robustez de cada red ante la eliminación aleatoria y dirigida de nodos.

Los resultados revelaron que la red de Facebook, caracterizada por una estructura altamente centralizada, muestra una pronunciada vulnerabilidad a los ataques dirigidos a nodos importantes. En contraste, la red neuronal de *C. elegans* y la red de comunicación terrorista exhiben una mayor robustez y una distribución más uniforme de la centralidad.

Así mismo, el estudio de comunidades reveló una estructura jerárquica para Facebook con grandes comunidades (*Louvain*) hiperconectadas internamente, pero con menor conexión entre ellas, mientras que *C. elegans* y *Terroristas* presentan una configuración más direccionada hacia los nodos principales quienes son los que explican la mayor cantidad de conexiones.

## 1. Introducción

Este trabajo se origina en el interés por comprender el funcionamiento de diferentes tipos de redes: redes sociales abiertas como Facebook, grupos terroristas y redes biológicas, como el sistema nervioso del nematodo *C. elegans*. La intención es explorar cómo estas redes, aunque variadas en propósito y estructura, exhiben patrones de interacción que pueden ser modelados y analizados a través de la teoría de grafos.[1]

A priori se piensa que la red de terroristas, debido a su estructura oculta y su necesidad de eficacia operativa, poseerá unos pocos líderes influyentes, contrastando con la estructura de Facebook, donde se espera una amplia manifestación de comunidades interconectadas. Esta suposición se basa en la robustez que se asume de la red terrorista, influenciada por el número de integrantes y la naturaleza de sus operaciones. También se anticipa que Facebook y las redes de terroristas, al ser ambas redes sociales, tendrán un punto en común en sus comportamientos, en contraste con *C. elegans* que al ser una red biológica se espera encontrar un comportamiento distinto. Por ejemplo, se espera que Facebook sea una red asortativa y la red de *C. elegans* sea disortativa.

Dado que las redes sociales, los grupos de terroristas, y el sistema nervioso se comportan como una red compleja, se analizarán mediante la teoría de grafos, comparando con prototipos de redes, análisis de comunidades, robustez y centralidad.

El terrorista es quien comete actos de terrorismo, y esto último se define de la siguiente manera:

“En la actualidad el terrorismo se presenta como una de las más peligrosas amenazas a nivel global, donde las interpretaciones van desde un acto de terror en la cual el planificador y/o ejecutor de la acción, se convierte en terrorista y otra donde ese mismo planificador y/o ejecutor se convierte en un combatiente por la libertad. Bajo esta doble óptica, hay autores que definen al terrorismo como actos que tienen por finalidad producir terror; otros especialistas sobre el tema consideran que el terror es el fin o más bien el medio para lograr objetivos de carácter político.” [8]

El *dataset* utilizado en el presente trabajo, se enmarca en un grupo de terroristas involucrados en el atentado del tren de Madrid del 11 de Marzo de 2004. En el siguiente *paper* se ha percibido un entendimiento acerca de cómo se comporta una red de terroristas, ya ha sido de interés de estudio.

“Por último, el caso del 11-M demuestra la importancia que pueden tener determinados individuos a la hora de movilizar, liderar e intermediar entre las redes preexistentes. En nuestro caso de estudio la acción de tres o cuatro personas produjo cambios cualitativos y cuantitativos sobre el conjunto. Se generaron nuevos recursos humanos y materiales, y se dotó de una misión a la estructura social resultante. A causa de ellos el proceso se aceleró, y en pocos meses, un conjunto de grupos separados dio lugar a una red terrorista que segó la vida de casi dos centenares de personas.”[5]

En lo que respecta a la red biológica, utilizando un *dataset* de *C. elegans*, este nematodo ha sido estudiado y contribuyó al estudio de redes *small-world* [2] [7].

“La conectividad ha sido descrita previamente para secciones del sistema nervioso de *C. elegans* que abarcan los principales centros nerviosos, incluyendo las regiones anterior y posterior del cuerpo y la faringe del hermafrodita adulto y la región posterior del macho adulto. Estos datos han sido la base no solo de la investigación en neurociencia de *C. elegans*, sino también de investigaciones sobre la estructura de la red y sus posibles propiedades dinámicas y de control, estudios que han contribuido al desarrollo de conceptos de red como ‘mundo pequeño’, ‘motivos de red’, ‘módulos’ y ‘clubes de ricos’.”[3]

En cuanto a Facebook, y en lo que respecta a las redes sociales en general, se ha afirmado lo siguiente.

“Una red social se compone de todas las personas - familiares, amigos y otros - con quien se comparte una relación social. A nivel macro, una red social se muestra cómo un grupo grande de personas que están conectadas entre sí.”.[6]

El propósito de este trabajo es estudiar en detalle las redes de los *datasets* mencionados, para obtener conclusiones, aprovechando lo analizado hasta el momento sobre los *datasets* elegidos, la teoría de grafos, y las herramientas utilizadas, detalladas en sección de Métodos.

## 2. Métodos

Para poder investigar y contrastar nuestras hipótesis se emplearon tres *datasets* diferentes:

- *Terroristas*: Una red conectada, no dirigida y pesada que representa la red de contactos entre los supuestos terroristas involucrados en el atentado al tren de Madrid del 11 de marzo de 2004, reconstruida a partir de las noticias de los diarios. Cada nodo representa a un terrorista, cada enlace un contacto entre ellos, y el peso indica el número de veces que se contactaron.
- *C. elegans*: Una red conectada, no dirigida y pesada que representa la red neuronal, el “conectoma”, del gusano nemátodo *Caenorhabditis elegans*. Los nodos representan los somas neuronales, y los enlaces las sinapsis, significando el peso la intensidad o la fuerza de dichas sinapsis.
- *Facebook*: Una red conectada, no dirigida y no pesada de círculos de *Facebook*. Los datos fueron obtenidos de una encuesta realizada a través de la aplicación. Cada nodo representa un perfil de *Facebook*, y cada enlace implica una relación de amistad en dicha red social.

A continuación se detallan los análisis conducidos y las librerías empleadas para realizarlos.

Para todos los análisis se empleó el paquete **networkx** 3.3 [4] en un entorno del lenguaje **Python** versión 3.12.2.

### 2.1. Descripción de los grafos

En primer lugar, se calcularon algunas variables topológicas relevantes de los grafos:

1. Grado medio  $\langle k \rangle$  a partir de la función **degree**.
2. Coeficiente de *clustering* medio  $\langle C_i \rangle$  empleando la función **average\_clustering** teniendo en cuenta los pesos y sin considerarlos.
3. Asortatividad de grado, empleando **degree\_assortativity\_coefficient**.
4. Coeficiente de *clustering* global empleando la función **transitivity**.
5. Densidad de enlaces empleando **density**.

## 2.2. Comparación con prototipos

En segundo lugar, se realizaron comparaciones de los grafos (no pesados) estudiados con prototipos equivalentes. Se realizaron simulaciones de 1000 repeticiones de los modelos de *Erdos-Renyi*, *Watts-Strogatz*, *Barabasi-Albert* y *Holme-Kim*, empleando las funciones **gnm\_random\_graph**, **watts\_strogatz\_graph**, **barabasi\_albert\_graph** y **powerlaw\_cluster\_graph**, respectivamente. El parámetro  $p$  empleado para el modelo de *Holme-Kim*, fue de 1 para el grafo de *Terroristas* y *Facebook*, y de 0,6 para *C. elegans*.

## 2.3. Análisis de centralidad de los nodos

Seguidamente, se realizaron gráficos de medidas de centralidad de los nodos, de grado y de intermediación (*betweenness*), para todos los grafos estudiados, empleando las funciones **betweenness centrality** y **degree centrality**. En el caso del grafo correspondiente a *Terroristas*, se empleó además la centralidad de autovector (función **eigenvector centrality numpy**).

## 2.4. Análisis de robustez de los grafos

A continuación, se realizaron análisis de robustez de los grafos estudiados, en dos escenarios distintos. En el primero, los ataques son dirigidos, es decir que se borran los nodos con mayor centralidad primero. Las medidas de centralidad empleadas fueron la de grado, la de intermediación y la de autovector. En el segundo escenario, los nodos son borrados al azar. Para medir la respuesta de los grafos a la eliminación progresiva de los nodos, o a la eliminación de la totalidad de sus enlaces, se emplearon dos métodos distintos, basados en el cálculo de:

1. El tamaño relativo de la componente gigante ( $N_g/N$ )
2. La eficiencia global del grafo. Para el grafo de *Facebook*, se realizó un muestreo de 1000 enlaces del total de enlaces, a fin de reducir el costo computacional.

## 2.5. Análisis de comunidades en los grafos

Se realizó un análisis de detección de comunidades para los tres grafos estudiados. Para este propósito se emplearon los algoritmos de *Girvan-Newman* y de *Louvain*. En el caso del algoritmo de *Louvain*, se registraron los valores que reflejan el valor óptimo (con mayor modularidad) de los resultados de aplicar el algoritmo 100 veces, puesto que éste presentaba una variaciones inherentes la elección azarosa de nodos en uno de sus pasos. No fue éste el caso del algoritmo de *Girvan-Newman*, que es determinístico. Para el algoritmo de *Girvan-Newman* se empleó un máximo de 1000 iteraciones. Luego se calculó el índice de *Rand* ajustado a fin de comparar las particiones óptimas obtenidas por *Girvan-Newman* y por *Louvain*, para cada *dataset*. Se emplearon las funciones **community.girvan\_newman** del paquete **networkx** y **community\_louvain** del paquete **python\_louvain** versión 0.16.

# 3. Resultados y discusión

## 3.1. Descripción de los grafos

Del análisis de las variables topológicas (Cuadro 1), se puede afirmar que las características de los grafos estudiados son distintivas.

En primer lugar, el tamaño de los grafos es muy diverso, representando cada uno un orden de magnitud diferente. El grafo *Terroristas*, siendo el más pequeño, es el que presenta la densidad de enlaces más

Cuadro 1: Variables topológicas principales de los grafos estudiados

Variable	Grafo		
	<i>C. elegans</i>	<i>Terroristas</i>	<i>Facebook</i>
Número de nodos (N)	297	64	4039
Número de enlaces (L)	2148	243	88 234
Densidad de enlaces	0,049	0,12	0,011
Grado medio (no pesado)	14,46	7,59	43,7
Grado medio (pesado)	59,4	8,8	
Coef. de <i>clustering</i> promedio (no pesado)	0,29	0,62	0,61
Coef. de <i>clustering</i> promedio (pesado)	0,019	0,18	
Transitividad	0,18	0,56	0,52
Asortatividad	-0,16	0,029	0,064

elevada, esto significa que está fuertemente conectada, y por ende más cohesionada. En *Facebook* puede indicar gran cantidad de nodos que estén conectados, pero que sean más inactivos.

El grado medio es más alto para *Facebook* que para *Terroristas*, indicando que, en promedio, los individuos de *Facebook* tienen más contactos que los de *Terroristas*. Esto cobra sentido al tratarse de una red social, en donde tiene como objetivo que la gente se conecte, por otro lado, los *Terroristas* al tratarse de una red clandestina son más selectivos. El coeficiente de *clustering* promedio (pesado), que es una medida de densidad local, fue más alto para *Terroristas* que para *C. elegans*, indicando que la red humana estaba más interconectada a nivel local, en promedio, que la red biológica. Si se observa el coeficiente de *clustering* promedio no pesado, es similar para *Facebook* y *Terroristas*, pero es muy probable que los pesos de los enlaces, de poder contarse con esta información, sean mucho más altos para *Terroristas* que para *Facebook*. La transitividad sigue la misma tendencia que el coeficiente de *clustering*, esto indica mayor tendencia a agruparse, lo social muestra un comportamiento similar, en comparación con la red biológica. En lo que respecta a la assortatividad, los grafos de *Terroristas* y *Facebook* pueden considerarse neutros, y *C. elegans* presenta un valor negativo, aunque bajo, por lo cual podría considerarse neutro o ligeramente disortativo o no selectivo. Estos resultados no son compatibles, en términos generales, con los supuestos que asumimos.

### 3.2. Comparación con prototipos

A la hora de encontrar modelos que ayuden a explicar las redes estudiadas, son varios los prototipos de los que se puede sacar provecho para entender la configuración que adopta cada una. Como se aprecia en la Figura 1, donde se intenta explicar los parámetros básicos de las redes, como *clustering* y camino mínimo medio, a partir de los conocidos modelos de *Erdos-Renyi* (ER), *Watts-Strogatz* (WS) y *Barabasi-Albert* (BA) o *Holme-Kim* (HK) en su defecto, es que se logran derivaciones interesantes de los *datasets* analizados.

Para *Terroristas* (Figura 1a), el modelo de BA, o en este caso HK, es el que mejor explica este sistema, dándole prioridad a los hubs de la red, corazón de este modelo, y que es consecuente con cómo opera esta organización donde la distribución de grado de su grafo correspondiente (Figura 2a) se describe muy bien con una ley de potencias. Algo similar ocurre con *C. elegans*, con una distribución de grado con potencia algo menor que *Terroristas* (Figura 2b) y con una particularidad que el prototipo WS modela mejor los parámetros de *Terroristas* que de *C. elegans*, aún sin ser el modelo que mejor predice en ambos casos. Quizás esto nos permita modelar a *Terroristas* como un conjunto de grupos muy conectados dentro de cada uno (*clustering* alto) y con menor cantidad de enlaces entre los grupos, emulando los recableados del modelo de *small-worldy* bajando así la distancia media. El hecho de que unos pocos nodos carguen con los grados mayores (como lo indica su distribución) creando “*superhubs*” que representan a los cargos más altos de la organización, termina inclinando la balanza a favor de HK.

*C. elegans*, tiene un *clustering* mucho menor (0,29, Cuadro 1 1), lo que lo aleja más del prototipo WS, e incluso es mejor aproximado por ER, al menos en su distancia mínima media. Para el *dataset* de *Facebook* (Figura 1c) el modelo WS es el que mejor lo describe. *Facebook* tiene altos valores para grado promedio y *clustering*, generándose grandes grupos con mejor definición que en *Terroristas* mucho más numerosos y a su vez conectados con unos pocos enlaces (recableado). Si bien es

notoria la presencia de *hubs* en la red, como se verá posteriormente en los análisis de centralidad y detección de comunidades, estos *hubs* están dentro de esos grupos aminorando sus distancias medias y haciéndolos más cohesivos, pero no se registran *hubs* enlazando dos agrupaciones cualesquiera. Asimismo, cabe señalar que el grafo de *Facebook* sigue la tendencia de una ley de potencias, como se puede apreciar en la Figura 2c, en el cual los puntos se encuentran considerablemente alineados.

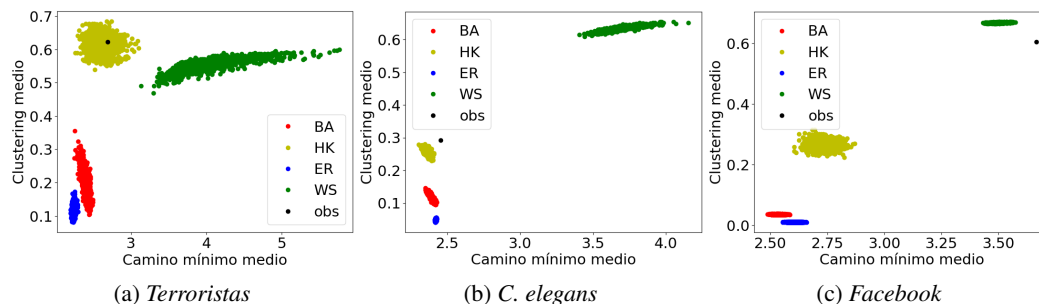


Figura 1: Análisis de comparación de los grafos de *Terroristas*, *C. elegans* y *Facebook* con prototipos equivalentes de *Erdos-Renyi* (ER), *Watts-Strogatz* (WS), *Barabasi-Albert* (BA) y *Holme-Kim* (HK)

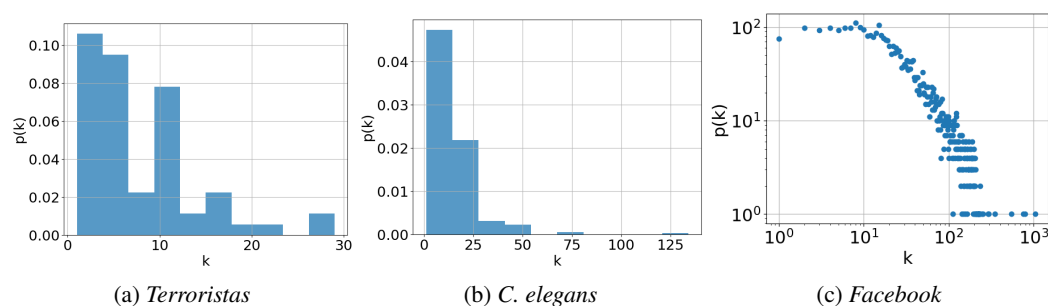


Figura 2: Distribución de grado de los grafos de *Terroristas*, *C. elegans* y *Facebook*. *Facebook* se muestra en escala log-log.

### 3.3. Análisis de centralidad de los nodos

En el caso de *Terroristas* (Figura 3), las distintas medidas de centralidad arrojaron resultados diferentes: la centralidad de grado muestra que los nodos más centrales son el 0 y el 2, y la centralidad de intermediación indica que el nodo más central es el 48. Para el caso de *C. elegans* y *Facebook*, cabe destacar que la centralidad de intermediación (Figuras 4b y 5b) fue la que resultó visualmente más informativa. Esta medida permite analizar los grafos en términos de flujo, y es particularmente útil para redes como *Facebook*, donde la información se propaga a través de los distintos círculos, y también para redes biológicas, ya que los impulsos nerviosos se transmiten de una neurona a otra. En el caso de *Facebook* (Figura 5b), se observan nodos con alta centralidad de intermediación en el centro de los distintos núcleos que se observan en la visualización, pero además, esta medida de centralidad, realza la importancia de los nodos que se encuentran en el medio de los haces que conectan estos núcleos. Constituye un ejemplo de la fuerza de los enlaces débiles, que conectan centros muy interconectados. En el caso de *C. elegans* (Figura 4), se observa un subconjunto de nodos con alta centralidad, ubicados en una zona bastante central (según la visualización elegida, que no es la anatómica). Estos nodos podrían corresponderse con los somas neuronales presentes en el anillo nervioso que rodea el esófago. El análisis de la centralidad de nodos permite adentrarnos en la estructura interna de los grafos de cada *dataset* y lograr una comprensión más cercana al funcionamiento de cada uno.

Para los tres casos, la mayoría de los nodos tienen centralidades bajas y unos pocos son los que destacan para cada estructura. En particular, para *Terroristas* donde un pequeño grupo tiene una alta centralidad tanto de *betweenness* como de autovector (y que también se corresponden con altos grados

de conectividad), la riqueza de la comparación reside en destacar las pequeñas diferencias que se dan entre los distintos tipos de centralidad para estos nodos. El nodo de máxima centralidad de autovector es el segundo en *betweenness*, y viceversa, denotando quizás la diferencia entre el autor ideológico y el que lleva a cabo la maniobra. Es esperable que unos pocos sean los líderes de la organización (alta centralidad de autovector) y algunos más se agreguen cuando se analiza la *betweenness*, incluso sólo tengan alto valor en ésta última métrica por responder a una tarea en particular. Para el caso de *Facebook*, las altas centralidades tanto de grado como de intermediación residen dentro de los diferentes grupos que se forman, que después podrán identificarse como comunidades. Si bien algunos nodos conectores de estos grupos tienen una *betweenness* considerable, las mayores se encuentran en el interior de cada *cluster*. Esto da idea de que la fortaleza de unión de cada grupo está en su estructura interna y que la conectividad con otros grupos sólo depende de que unos pocos nodos (personas) sean parte de más de un grupo, sin necesidad de ser centrales.

En *C. elegans* se tienen algunos nodos de muy alto grado que estarán involucrados en diferentes y variadas señalizaciones, mientras que hay bastantes más nodos que destacan en la red por su *betweenness*, que si bien toman valores más bajos que en las redes anteriores, marcan la relevancia de la conectividad y el flujo de información.

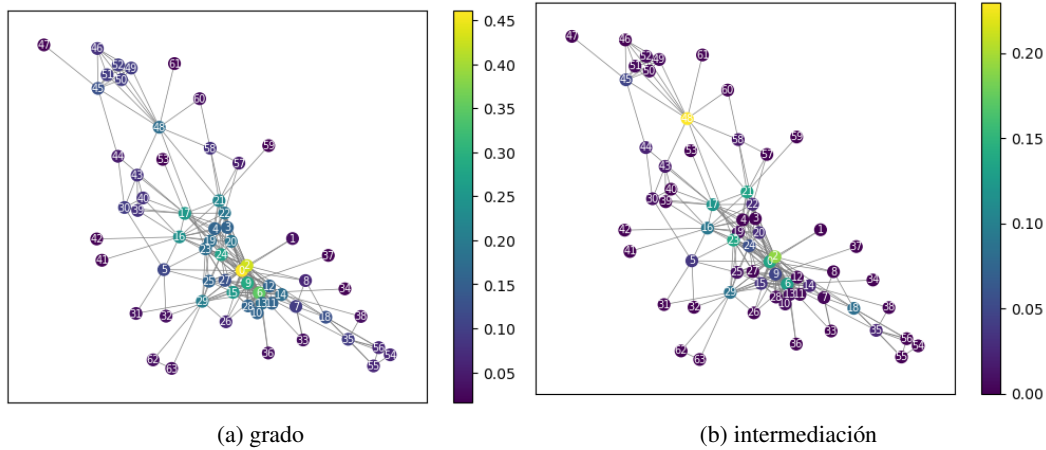


Figura 3: Centralidad de grado (3a) y de intermediación (3b) para el grafo de *Terroristas*.

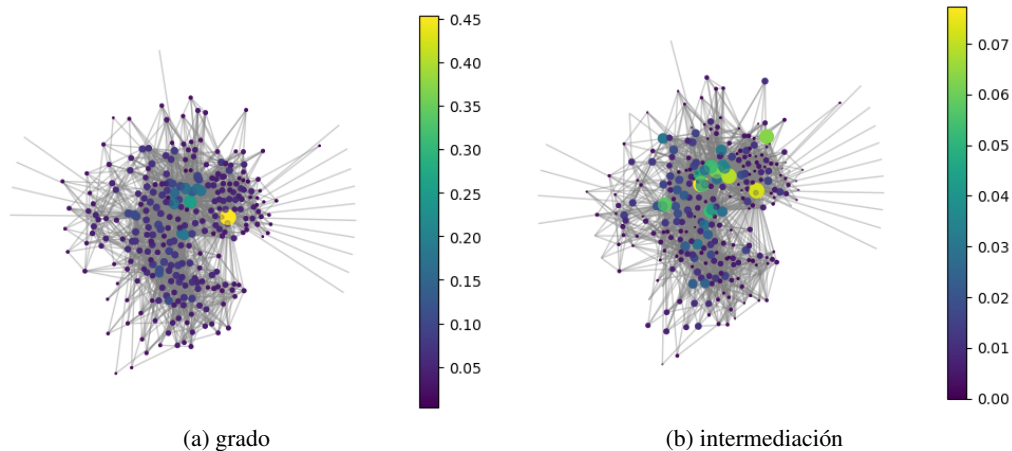


Figura 4: Centralidad de grado (4a) y de intermediación (4b) para el grafo de *C. elegans*.

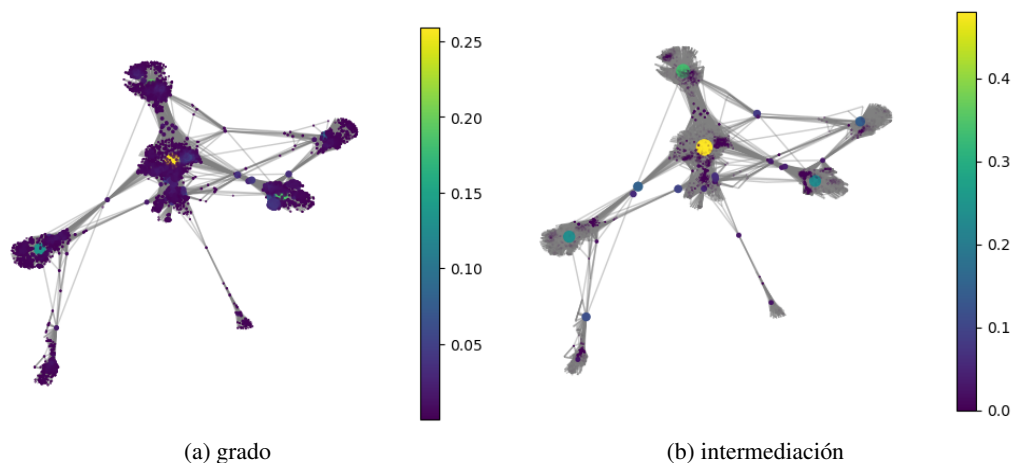


Figura 5: Centralidad de grado (5a) y de intermediación (5b) para el grafo de *Facebook*.

### 3.4. Análisis de robustez de los grafos

La robustez de las redes de *C. elegans*, *Terroristas* y *Facebook* revela características notables sobre su dependencia en nodos críticos y cómo responden ante eliminaciones dirigidas y aleatorias. Cada red exhibe grados de vulnerabilidad y robustez que reflejan sus estructuras y funciones específicas (Figuras 6 y 7).

Bajo condiciones de eliminaciones aleatorias de nodos, las tres redes muestran un comportamiento más uniforme, necesitando la eliminación de poco más del 40 % de sus nodos para disminuir a la mitad el tamaño de sus componentes gigantes. Este resultado indica una cierta base de robustez contra perturbaciones no dirigidas en todas las redes analizadas.

En ataques dirigidos por la centralidad de nodos, las redes de *Terroristas* y *C. elegans* son particularmente vulnerables, requiriendo la eliminación de sólo un 12 % (8 nodos de 64) y un 13 % (40 nodos de 297) de sus nodos (Figura 6a y Figura 6b), respectivamente, para reducir a la mitad el tamaño del componente gigante. Por otro lado, *Facebook* demuestra una extrema vulnerabilidad, con menos del 2.5 % (aproximadamente 100 nodos de un total de 4039, Figura 6c) de sus nodos eliminados necesarios para lograr un efecto similar, lo que subraya una estructura altamente centralizada donde unos pocos nodos sostienen la mayor parte de la conectividad de la red. La eficiencia global de cada red acompaña el mismo detrimento que el tamaño de la red gigante (Figura 7).

Por otro lado, cabe destacar que cuando los ataques estuvieron dirigidos a los nodos de mayor centralidad de intermediación, el impacto sobre el tamaño relativo de la componente gigante y la eficiencia global fue el más alto, tendencia que se observó con particular énfasis en el caso del grafo de *Facebook* (Figura 7c).

*C. elegans* y la red de *Terroristas* muestran similitudes en su dependencia de nodos críticos para mantener la cohesión de la red. En contraste, *Facebook* presenta una alta centralización, con sus nodos más importantes agrupados en grandes *clusters*. Estos nodos no contribuyen significativamente a la conectividad entre diferentes grupos, como se observó en los análisis de centralidad previos. Esta estructura hace que los ataques dirigidos sean especialmente devastadores para *Facebook*, afectando rápidamente la integridad de la red, a diferencia de los impactos más graduales observados en las otras redes.

### 3.5. Análisis de comunidades en los grafos

En todos los *datasets* estudiados se verifica la presencia de comunidades claramente definidas tanto mediante el método jerárquico de *Girvan-Newman* como con el de *Louvain*, observándose diferencias en los parámetros de modularidad y la cantidad de comunidades detectadas (ver Cuadro 2).

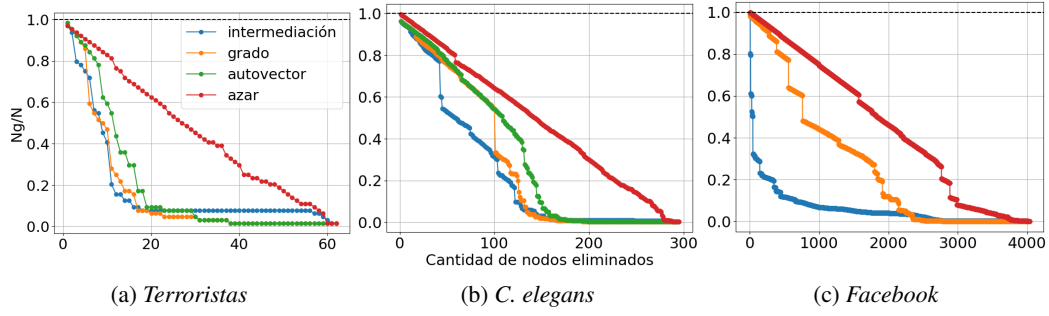


Figura 6: Análisis de robustez de los grafos de *Terroristas*, *C. elegans* y *Facebook* mostrando el tamaño relativo de la componente gigante en función de los nodos borrados según la máxima centralidad de intermediación, grado y autovector, y en forma azarosa.

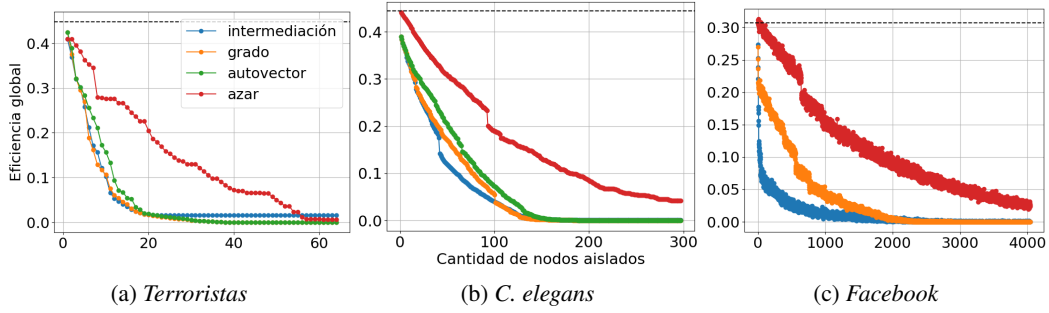


Figura 7: Análisis de robustez de los grafos de *Terroristas*, *C. elegans* y *Facebook* mostrando la eficiencia en función de los nodos aislados según la máxima centralidad de intermediación, grado y autovector, y en forma azarosa.

Para *C. elegans*, la densidad de enlaces es relativamente baja, con un coeficiente de *clustering* aún más reducido (ver Cuadro 1). Esto hace que el método de *Girvan-Newman* identifique un mayor número de comunidades, realizando cortes que aíslan grupos más pequeños, en contraste con el método de *Louvain* que optimiza la modularidad y agrupa nodos en comunidades más grandes y densamente conectadas. Esto podría indicar una direccionalidad en los enlaces hacia determinados *hubs* mientras que los nodos periféricos presentan menor conectividad, sugiriendo una regulación independiente y menos integrada de las conexiones neuronales de este organismo.

La red de *Terroristas* presenta una mayor densidad que la de *C. elegans*, pero con un grado medio menor, lo que indica una mayor concentración de enlaces en unos pocos nodos altamente conectados (*hubs*). Aunque el método de *Girvan-Newman* detecta más comunidades que *Louvain*, la diferencia es menos pronunciada que en *C. elegans*. Esto sugiere que la red de *Terroristas* tiene una estructura algo más jerárquica y las comunidades detectadas por ambos métodos podrían reflejar subestructuras que colaboran para objetivos comunes, pero desde roles y responsabilidades distintas.

Por otra parte, en *Facebook*, ambos métodos registran altos valores de modularidad, encontrando particiones que maximizan la densidad de enlaces dentro de las comunidades en comparación con los enlaces entre comunidades. La similitud en los valores de modularidad obtenidos con ambos métodos sugiere que las particiones representan de manera efectiva la estructura interna de la red. Mientras *Girvan-Newman* revela muchas comunidades pequeñas, indicando una estructura más detallada y jerárquica con múltiples niveles de subcomunidades, *Louvain* describe una estructura más global y menos fragmentada, lo que podría indicar la presencia de comunidades anidadas dentro de la red social.

La mayor modularidad obtenida con *Louvain* en las redes analizadas sugiere que este método es especialmente eficaz en encontrar particiones con comunidades internamente densas y bien definidas, lo que es altamente deseable para el análisis de redes en diversos contextos.



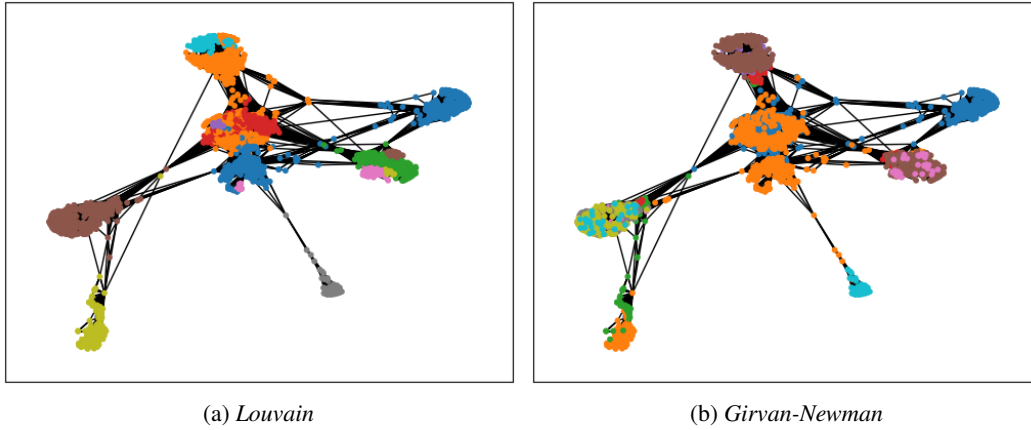


Figura 8: Comunidades de la partición óptima correspondientes al grafo de *Facebook* según los métodos de *Louvain* (8a) y *Girvan-Newman* (8b)

Cuadro 2: Comunidades			
Partición óptima según algoritmo	Grafo		
	<i>C. elegans</i>	<i>Terroristas</i>	<i>Facebook</i>
<i>Louvain</i>			
Modularidad	0,50	0,44	0,84
Número de comunidades	6	5	17
<i>Girvan-Newman</i>			
Modularidad	0,28	0,38	0,77
Número de comunidades	33	15	789
Índice de <i>Rand</i> ajustado	0,026	0,13	0,006

#### 4. Conclusiones

Después de un análisis exhaustivo de dos redes sociales como *Facebook* y *Terroristas* y de una red biológica como *C. elegans*, se pretende generalizar los resultados obtenidos en comparación una con otra con el fin de confrontar sus diferencias y similitudes para poder dilucidar el funcionamiento de cada una.

Es así, como *C. elegans* y *Terroristas* parecen comulgar en algún sentido de la funcionalidad de sus redes (contrariamente a lo esperado inicialmente); el mejor modelo que las explica es el de *Barabasi-Albert/Holme-Kim*, sus centralidades son comparables, y consecuentemente lo es la robustez de ambas ante la remoción dirigida de nodos. Si bien existen ciertas diferencias, éstas yacen en la constitución intrínseca de estas redes, como que *C. elegans* sea la mitad de densa que *Terroristas* y con un coeficiente de *clustering* menor, dándole cierta direccionalidad más exclusiva hacia los *hubs* a las conexiones de *C. elegans*, hecho que se marca con las diferencias de comunidades generadas en los métodos de *Girvan-Newman* y *Louvain*, donde con el primero es más efectivo aislar comunidades desde *C. elegans*, como si los nodos de menor grado tuvieran los enlaces justos y necesarios para lograr la máxima conectividad hacia los *hubs*. También por ello, el modelo de *Watts-Strogatz* sea más efectivo en segunda instancia para explicar *Terroristas* que *C. elegans*, pues en este último la dominancia de los *hubs* hacia la red es mayor, disminuyendo así la aleatoriedad en los enlaces.

En contraste con lo afirmado en [2], donde se sostiene que *C. elegans* contribuyó a los estudios de redes de “mundo pequeño”, en el presente trabajo, se ha observado que el modelo que mejor explica es el *Holme-Kim*.

Por otra parte, *Facebook*, con otras características topológicas como un muy alto grado promedio de los nodos y muy baja densidad de enlaces, esgrime su estructura a partir de nodos hiperconectados en el seno de sus comunidades, pero con una conectividad baja entre ellas. La alta modularidad obtenida con *Girvan-Newman* delata su estructura jerárquica anidada, la cual se replica en todas las comunidades detectadas. No parece haber una dirección o un sentido más que el de aumentar la conectividad pero dentro de cada comunidad de *Louvain*, esto termina determinando su fragilidad a la hora de evaluar su robustez, con un decaimiento rápido cuando se direccionan los ataques a sus *hubs*.

Con todo esto, se analiza la constitución de *Terroristas* y *C. elegans* bajo una necesidad compartida de eficiencia y funcionalidad en sus estructuras de red, como si los nodos se constituyeran en pos de un fin común: un atentado o lograr una señalización. *Facebook* refleja una naturaleza más heterogénea y como si el único fin fuera aumentar los enlaces dentro de cada comunidad, simplemente conectarse, socializar.

## Referencias

- [1] A. L. Barabási. «Network science. Cambridge university press». En: (2018).
- [2] JW Clark y AT Eggebrecht. «The small world of the nobel nematode *Caenorhabditis elegans*». En: *Condensed Matter Theories* 18 (2003), págs. 389-406.
- [3] Steven J Cook et al. «Whole-animal connectomes of both *Caenorhabditis elegans* sexes». En: *Nature* 571.7763 (2019), págs. 63-71.
- [4] Aric Hagberg, Pieter Swart y Daniel S Chult. *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX*. Inf. téc. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2008.
- [5] Javier Jordán y Fernando M Mañas. «La naturaleza cambiante de las organizaciones terroristas. Una aportación desde el análisis de redes sociales». En: *Revista UNISCI* 20 (2009), págs. 100-124.
- [6] José-Federico Medrano, José-Luis Alonso-Berrocal y Carlos Figuerola. «Visualización de grafos Web». En: *Avances en Informática y Automática: quinto Workshop*. Citeseer. 2011, págs. 167-190.
- [7] Duncan J Watts y Steven H Strogatz. «Collective dynamics of ‘small-world’ networks». En: *nature* 393.6684 (1998), págs. 440-442.
- [8] Soraya Zuinaga. «EL TERRORISMO, UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA EN CUANTO A SU DEFINICIÓN». En: *Revista Venezolana de Análisis de Coyuntura* 17.2 (dic. de 2012), págs. 11-26. URL: [http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_ac/article/view/3233](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_ac/article/view/3233).