

Estrategias para la prevención de transmisión de enfermedades infecciosas en la red temporal de estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes

Strategies for the prevention of transmission of infectious diseases in the temporary network of students of the Faculty of Engineering of the University of Los Andes

Rodríguez, Armando^{1*}; Herrera, José².

¹ Facultad de Ingeniería, Departamento de Calculo Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela

² Departamen of integrative Biology, University of Texas at Austin, Texas-USA

*armandorodriguez@ula.ve

Resumen

El trabajo realizado plantea el estudio de distintas estrategias para la prevención de enfermedades en un modelo clásico epidemiológico susceptible-infeccioso-recuperado (SIR), utilizando el novedoso concepto de redes temporales sociales, las cuales están basadas en grafos dinámicos, donde los nodos representan los individuos y las conexiones entre ellos representan las interrelaciones sociales capaces de transmitir enfermedades. Para este caso de estudio, se utilizó la red temporal de interacción de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, durante el semestre B-2008 donde se precedió a propagar la enfermedad mediante simulación, aplicar dos estrategias de inmunización, comparar y determinar según los resultados, la estrategia óptima que reduzca la cantidad de infectados en el sistema.

Palabras clave: *Redes temporales, Inmunización, Grafos, Nodos.*

Abstract

The realized work (SIR) raises the study of different strategies for the prevention of diseases in a classic epidemiological capable model - infeccioso-recuperado, using the new concept of temporary social networks, which are based in grafos dynamic, where the individuals represent the nodes and the connections between them represent the social interrelationships capable of transmitting diseases. For this case of study, I use the temporary network of interaction of the students of the Faculty of Engineering of the University of The Andes, during the semester B-2008 where it was preceded to spreading the disease by means of simulation, applying two strategies of immunization, comparing and determining according to the results, the ideal strategy that reduces the quantity of infected in the system.

Keywords: *Temporary networks, Immunization, Grafos, Nodos.*

Introducción

En las décadas de **1980** y **1990**, el área de la epidemiología matemática de enfermedades infecciosas vivió procesos significativos. A lo largo de estos años, los modelos propuestos avanzaron, desde aquellos donde todos los individuos en una población interactúan entre ellos con igual probabilidad, a modelos donde se incluye redes de interacción, donde las personas (nodos) se consideran conectados (hay un enlace entre ellos) si una de ellas pueden infectar a otras. Este nuevo conjunto de teorías, epidemiología de redes de contacto (Giesecke 2001; Morris 2004; Keeling y col., 2005) ha alterado de manera profunda nuestro entendimiento acerca de cómo se propagan las enfermedades en las poblaciones.

Ahora bien, una red temporal se considera un grafo donde los enlaces entre nodos se encuentran continuamente activos, es decir, las conexiones entre nodos se mantienen por periodos de tiempo relativamente cortos. Como topología de la red, la estructura temporal de las interacciones entre nodos, pueden afectar la dinámica de sistemas que interactúan a través de la red (Holme y col., 2012).

La epidemiología sobre redes se basa en muchas simplificaciones, siendo tal vez la más grande el hecho de que usualmente no se modelan de manera explícita, los aspectos dinámicos de los patrones de contacto entre individuo. Si consideramos dos individuos, y asumimos que uno de ellos está infectado por un patógeno (y que por lo tanto puede transmitir la infección), la probabilidad de contagio entre estos dos individuos no es constante en el tiempo. Los cambios en las probabilidades de contagio ocurren en diferentes escalas temporales (desde el orden de décadas, considerando aspectos demográficos; a minutos, cuando diferentes personas entran y salen del rango necesario para la infección de un patógeno). Es por esta razón que la inclusión del componente temporal, al estudiar la transmisión de una enfermedad en una población, se hace necesario (Holme 2013). Anteriormente, los estudiantes de la Facultad de Ingeniería han experimentado brotes de enfermedades infecciosas dentro de las instalaciones, llevando consigo la decisión de cerrar y suspender clases por periodos de tiempo prolongados, lo que acarrea pérdidas para la Universidad y pérdida de tiempo para sus estudiantes. Al ser una población, que posee las características para ser modelada como una red temporal (cada individuo está en contacto con diferentes personas a lo largo del día) se quiere construir este tipo de grafos, observar su comportamiento cuando se propaga una enfermedad y estudiar estrategias de prevención que controlen la epidemiología.

2 Preliminares

2.1 Grafos

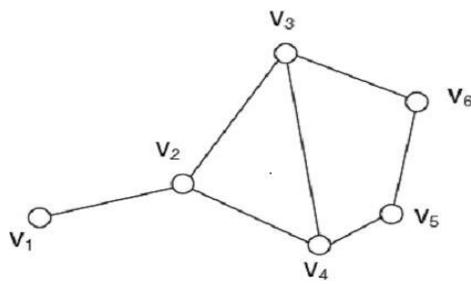
Un grafo es una representación gráfica de diversos puntos que se conocen como nodos o vértices, los cuales se encuentran unidos a través de líneas que reciben el nombre de aristas (Lagos S/F) como se muestra en la figura **1(a)**. Al analizar los grafos, se logra observar cómo se desarrollan las relaciones recíprocas entre aquellas unidades que mantienen algún tipo de interacción. Por lo general, los nodos son entes de procesamiento, o estructuras que contienen algún tipo de información y se representan generalmente mediante círculos equidistantes, conectados mediante líneas o flechas que suponen las interacciones entre ellos. Si se utilizan flechas para conectar los nodos como en la figura **1(b)** decimos que el grafo es dirigido (también llamado dígrafo) porque las relaciones entre los nodos tienen una dirección. En cualquiera de los dos casos, bien sea que se utilicen líneas o flechas, a estas relaciones se les puede llamar simplemente aristas. Frecuentemente las aristas también tienen algún tipo de información asociada (distancia, costo, confiabilidad, etc.), en cuyo caso estamos en presencia de un grafo pesado. (Coto 2003)

2.2 Red temporal

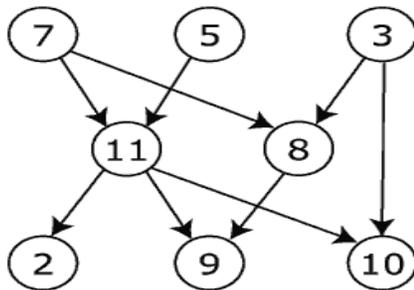
Una red temporal es un tipo de grafo, donde los enlaces entre nodos no son constantes en el tiempo. La figura **(2)** muestra los nodos de una red en una línea de tiempo, donde las líneas verticales representan el contacto entre dos individuos en el tiempo, el cual está dado por la última línea horizontal y se puede observar como los enlaces van cambiando con el paso del tiempo.

Este tipo de grafo, se puede representar también como una secuencia de redes estáticas en evolución, es decir, que para cada valor de tiempo, se tienen una red estática distinta.

Las redes temporales son un campo emergente, que en la actualidad no han tenido mucha aplicación y son una extensión de las redes estáticas (grafos estáticos, donde los enlaces entre nodos son constantes en el tiempo), sin embargo, hay profundas diferencias, tanto en la historia de los campos, los métodos utilizados y las preguntas formuladas. Para las redes estáticas, muchos de los conceptos centrales fueron desarrollados para estudiar redes sociales, detección de la comunidad, medidas de similitud, etc. todos provienen de la Sociología de la red. Las redes temporales son un campo multidisciplinario. Los Informáticos, Matemáticos, Ingenieros, Científicos Sociales, Investigadores y algunos Biólogos hacen uso de esto (Holme 2015).



1(a) Grafo



1(b) Digrafos o grafos dirigidos

Figura 1: Tipos de grafos

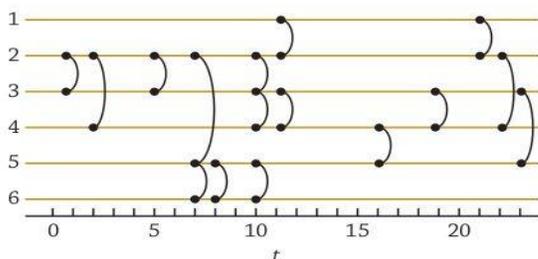


Figura 2: Evolución de una red temporal en el tiempo y el comportamiento de los enlaces

De acuerdo con el estudio realizado por (Holme y col.,2012) algunos tipos de redes temporales o modelos a los cuales puede adaptarse la red temporal son:

- **Comunicación de persona a persona,**
- **Redes de proximidad humana (se refiere a cuando dos personas han estado cerca uno al otro, en tiempo y espacio)**
- **Redes de proximidad animal**
- **Redes económicas**
- **Redes ecológicas**
- **Redes neuronales y cerebrales**
- **Redes de transporte y viaje**
- **Entre otros sistemas.**

2.3 Epidemia

Se define como la propagación de una enfermedad, por un cierto periodo de tiempo considerable y que ya existe en una región o población determinada. Se trata de una noción utilizada por la salud comunitaria para hacer referencia al hecho de que la enfermedad llega a una cantidad de gente superior a la esperada (Olivero 2013).

2.3.1 Número reproductivo básico R_0

Es el número esperado de contactos que un individuo infeccioso tiene durante su período completo de infección, definiendo un contacto como cualquier actividad que pueda causar la infección de un susceptible (Montesinos y col., 2007).

El valor de R_0 determina cuando una enfermedad infecciosa puede llegar a niveles de desatar un brote epidémico, cuando $R_0 < 1$ la infección desaparece durante un largo periodo, pero si $R_0 > 1$ la infección puede llegar a propagarse ampliamente entre la población. Este valor depende de la cantidad de población total donde se propaga la enfermedad y la probabilidad de transmisión de la enfermedad.

2.3.2 Tamaño de la epidemia

Cuando hablamos del tamaño de la epidemia nos referimos al número total de infectados al final de la misma; por ende, esta medida pudiera permitir diversos estudios acerca de la enfermedad, incluso estimar los costos que la transmisión de la enfermedad acarrea.

2.4 Modelo tipo SIR

Al igual que el modelo tipo SIS el individuo pasa por tres fases, pero la diferencia radica en que en su tercera fase, el individuo pasa a estar en un estado de recuperado, es decir, el agente no puede volver a contraer la enfermedad; por eso sus siglas: Susceptible Infectado y Recuperado SIR.

3 Descripción y construcción de la red temporal

3.1 Descripción de la red temporal

Los enlaces entre nodos de la red temporal de la Facultad de Ingeniería cambian cada hora, estas horas representan el tiempo de clases presenciales que tienen los estudiantes y permanecen en contacto o interacción con otros. Al transcurrir cada hora, muchos estudiantes deberán cambiarse de salón para acudir a las clases correspondientes a otras materias, ésta acción involucra un nuevo contacto, es decir, la interacción con otros estudiantes, es allí donde la dinámica de la red temporal ocurre, sin embargo hay estudiantes que permanecen en la misma materia durante dos o tres horas, es por ello que no todos los enlaces cambian

durante cada hora.

Existen muchas maneras de representar la red temporal; particularmente para este caso de estudio, y a conveniencia por la información extraída de la base de datos utilizada, la interacción entre los estudiantes está dada en forma de pares. Los mismos están identificados por números que van desde el número **1** hasta el **4634**; cuando dos de ellos se encuentran asistiendo a la misma clase, el par expresado por los números que los representan es colocado en un archivo de texto plano en la misma línea y separados por un espacio. Para obtener cuáles estudiantes están viendo clases juntos, se debe tener información de los horarios correspondientes a las diversas secciones de materias dictadas en el semestre, y la lista de estudiantes inscritos en cada una de ellas, para proceder a crear los enlaces que representan la interacción entre esos estudiantes.

3.2 Construcción de la red temporal

La red temporal de interacción de estudiantes, se implementó con una precisión Δt de una hora. Para este caso de estudio, sólo se tomó en cuenta la interacción de estudiantes en los salones de clase y no lo que ocurre fuera de ellos. El proceso se inició dividiendo los estudiantes que estuviesen en contacto (que asistan conjuntamente a las mismas clases) en forma de pares los cuales fueron guardados en un archivo, para luego repartirlos y organizarlos por horas del día, quedando la red representada en **72** archivos diferentes, cada uno identificado por una hora y día de la semana, cuyo contenido son pares de nodos. Esto se logró combinando dos bases de datos, una contiene sólo los horarios de las materias y la otra posee la información de la materia y sección que cursa cada estudiante.

3.2.1. Manipulación de la Base de Datos

Considerando el horario del semestre B2008, el cual se muestra en la tabla 1, y utilizando un convertidor gratuito que se encuentra en internet llamado *OnlineConverter*, obtenemos un nuevo archivo en formato de texto plano el cual se muestra en la tabla 2. Seguidamente se organizó de manera que las líneas representen cada una de las materias con sus respectivos horarios, en la tabla 3 se puede apreciar el resultado. Este paso fue desarrollado de manera manual y eliminando los espacios en blanco del archivo, donde la primera columna representa el código de la materia, y las siguientes el horario de la misma, indicando primero el día de clase y luego la hora del día en que se dicta. Las horas están indicadas por un número de longitud de dos, tres o cuatro dígitos, que se explican a continuación:

- **78: 7am a 8am.**
- **89: 8am a 9am.**

- **910: 9am a 10am.**
- **1011: 10am a 11am.**
- **1112: 11am a 12m.**
- **121: 12m a 1pm.**
- **12: 1pm a 2pm.**
- **23: 2pm a 3pm.**
- **34: 3pm a 4pm.**
- **45: 4pm a 5pm.**
- **56: 5pm a 6pm.**
- **67: 6pm a 7pm.**
- **78n: 7pm a 8pm.**

 Universidad de Los Andes Sistema Integrado de Registros Estudiantiles Listado Horarios por Asignatura		ULA-SIRE (C) DSIA Página 1 de 95 Fecha: 26/10/2009				
Facultad/Núcleo: Ingeniería		Periodo: B2009				
Asignatura 1000 - QUIMICA 11						
Sección: 01 Profesor: V010159904 Zambrano Garcia, Alexis José		Total Horas: 6				
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
8am-9am	02_SO_ES03	02_SO_ES03			02_SO_ES03	
9am-10am	02_SO_ES03	02_SO_ES03			02_SO_ES03	
Sección: 02 Profesor: V011959528 Sanchez, Ledys Yeliza		Total Horas: 6				
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
8am-9am	02_SO_ES02	02_SO_OS08	02_SO_OS03			
9am-10am	02_SO_ES02	02_SO_OS08	02_SO_OS03			
Sección: 03 Profesor: V003681324 Jatem, Alicia		Total Horas: 6				
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
8am-9am		02_01_1013	02_SO_ES03	02_SO_ES03		
9am-10am		02_01_1013	02_SO_ES03	02_SO_ES03		
Sección: 04 Profesor: V011425880 VALENZUELA DELPHIN, HANS LEROY		Total Horas: 6				
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
9am-10am			02_SO_NS08	02_SO_NS08		
10am-11am			02_SO_NS08	02_SO_NS08		
11am-12m			02_SO_NS08	02_SO_NS08		
Sección: 05 Profesor: V003297821 BARRIOS RINCÓN, NESTOR LUIS		Total Horas: 6				
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
10am-11am	02_01_1014	02_01_1014	02_01_1014			
11am-12m	02_01_1014	02_01_1014	02_01_1014			
Sección: 06 Profesor: V008572366 LOPEZ MONTILLA, JUAN CARLOS		Total Horas: 6				
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado

Tabla 1. Muestra del horario en formato PDF.

Universidad de Los Andes Sistema Integrado de Registros Estudiantiles Listado Horarios por Asignatura							ULA-SIRE (C) DSIA Página 1 de 95							
Fecha: 26/10/2009							#ID	Carrera	Opcion	Pensum	Año	Periodo	Materia	Seccion
Facultad/Núcleo: Ingeniería							5	26	1	2	2008	3	7003	1
Asignatura 1000 - QUIMICA 11							5	26	1	2	2008	3	7202	1
Sección: 01 Profesor: V010159904 Zambrano Garcia, Alexis José							5	26	1	2	2008	3	1054	5
Total Horas: 6							12	25	1	0	2008	3	6025	1
Hora							19	22	1	1	2008	3	1018	5
Lunes							19	22	1	1	2008	3	1150	1
Martes							19	22	1	1	2008	3	1020	10
Miércoles							19	22	1	1	2008	3	1029	1
Jueves							19	22	1	1	2008	3	1028	1
Viernes							19	22	1	1	2008	3	1028	1
Sábado							21	26	3	2	2008	3	7202	2
8an-9an							21	26	3	2	2008	3	1038	2
9an-10an							21	26	3	2	2008	3	1020	4
Sección: 02 Profesor: V011959528 Sanchez, Ledys Yelitza							21	26	3	2	2008	3	1052	3
Total Horas: 6							22	26	3	2	2008	3	1012	5
Hora							22	26	3	2	2008	3	1011	1
Lunes							23	26	1	2	2008	3	1054	2
Martes							23	26	1	2	2008	3	1012	7
Miércoles							25	25	1	2	2008	3	6002	1
Jueves							25	25	1	2	2008	3	6003	2
Viernes							25	25	1	2	2008	3	6101	2
Sábado							25	25	1	2	2008	3	1052	2
8an-9an							26	24	1	2	2008	3	1020	2
9an-10an							26	24	1	2	2008	3	1012	6
Sección: 03 Profesor: V003681324 Jaten, Alicia							26	24	1	2	2008	3	1150	4
Total Horas: 6							26	24	1	2	2008	3	1011	1
Hora							27	24	1	1	2008	3	5013	2
Lunes							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Martes							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Miércoles							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Jueves							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Viernes							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Sábado							27	24	1	1	2008	3	5000	2
8an-9an							27	24	1	1	2008	3	5000	2
9an-10an							27	24	1	1	2008	3	5000	2
10an-11an							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Sección: 04 Profesor: V011425880 VALENZUELA DELPHIN, HANS LEROY							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Total Horas: 6							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Hora							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Lunes							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Martes							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Miércoles							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Jueves							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Viernes							27	24	1	1	2008	3	5000	2
Sábado							27	24	1	1	2008	3	5000	2
8an-9an							27	24	1	1	2008	3	5000	2
9an-10an							27	24	1	1	2008	3	5000	2
10an-11an							27	24	1	1	2008	3	5000	2

Tabla 4: Muestra de la base de datos de la información de cada estudiante

Tabla 2. Muestra del resultado del horario en formato TXT.

```

1000 1 Lunes 89 Lunes 910 Martes 89 Martes 910 Viernes 89 Viernes 910
1000 2 Lunes 89 Lunes 910 Martes 89 Martes 910 Miércoles 89 Miércoles 910
1000 3 Martes 89 Martes 910 Miércoles 89 Miércoles 910 Jueves 89 Jueves 910
1000 4 Miércoles 910 Miércoles 1011 Miércoles 1112 Jueves 910 Jueves 1011 Jueves 1112
1000 5 Lunes 1011 Lunes 1112 Martes 1011 Martes 1112 Miércoles 1011 Miércoles 1112
1000 6 Lunes 1011 Lunes 1112 Lunes 121 Miércoles 1011 Miércoles 1112 Miércoles 121
1000 7 Lunes 23 Lunes 34 Miércoles 23 Miércoles 34 Jueves 23 Jueves 34
1000 8 Martes 23 Martes 34 Miércoles 23 Miércoles 34 Jueves 23 Jueves 34
1000 9 Lunes 23 Lunes 34 Miércoles 23 Miércoles 34 Viernes 23 Viernes 34
1000 10 Martes 45 Martes 56 Miércoles 45 Miércoles 56 Jueves 45 Jueves 56
1000 11 Martes 23 Martes 34 Miércoles 23 Miércoles 34 Jueves
1000 12 Martes 45 Martes 56 Miércoles 45 Miércoles 56 Jueves 45 Jueves 56
1004 1 Lunes 78 Lunes 89 Lunes 910 Martes 78 Martes 89 Martes 910
1004 2 Lunes 89 Lunes 910 Martes 89 Martes 910 Jueves 89 Jueves 910
1004 3 Martes 78 Martes 89 Miércoles 78 Miércoles 89 Viernes 78 Viernes 89
1004 4 Lunes 1011 Lunes 1112 Martes 1011 Martes 1112 Miércoles 1011 Miércoles 1112
1004 5 Martes 1011 Martes 1112 Miércoles 1011 Miércoles 1112 Jueves 1011 Jueves 1112
1004 6 Martes 1011 Martes 1011 Miércoles 1011 Miércoles 1112 Viernes 1011 Viernes 1112
1004 7 Lunes 1011 Lunes 1112 Martes 1011 Martes 1112 Jueves 1011 Jueves 1112
1004 8 Lunes 23 Lunes 34 Martes 23 Martes 34 Jueves 23 Jueves 34
1004 9 Lunes 23 Lunes 34 Martes 23 Martes 34 Jueves 23 Jueves 34
1004 10 Lunes 23 Lunes 34 Miércoles 23 Miércoles 34 Jueves 23 Jueves 34
1004 11 Lunes 45 Lunes 56 Miércoles 45 Miércoles 56 Jueves 45 Jueves 56
1004 12 Lunes 45 Lunes 45 Martes 45 Martes 56 Jueves 45 Jueves 56
1004 13 Lunes 45 Lunes 45 Martes 45 Martes 56 Jueves 45 Jueves 56
1004 14 Lunes 45 Lunes 45 Martes 45 Martes 56 Jueves 45 Jueves 56
1006 1 Martes 78 Martes 89 Martes 910 Jueves 78 Jueves 89 Jueves 910
1006 2 Lunes 78 Lunes 89 Lunes 910 Miércoles 78 Miércoles 89 Miércoles 910
1006 3 Lunes 78 Lunes 89 Lunes 910 Jueves 78 Jueves 89 Jueves 910
1006 4 Lunes 78 Lunes 89 Lunes 910 Miércoles 78 Miércoles 89 Miércoles 910

```

Tabla 3 Muestra de la versión final del archivo, el cual se usó para crear las redes.

3.2.2 Determinación de enlaces de interacción entre estudiantes

Para determinar qué estudiantes estaban conectados en cada una de las horas durante cada día del semestre B2008, se crearon las redes de interacción de los estudiantes para cada hora. Para realizarlos, se hizo uso de la base de datos suministrada por la Oficina de Registro Estudiantil Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes (OREFI) sobre la información de cada estudiante del semestre B2008 y el archivo de los horarios anteriormente explicado. Esta base de datos está dividida en 8 columnas como se muestra en la tabla 4 y 4634 líneas explicado en la sección anterior, que representa el total de los estudiantes activos durante ese semestre. La primera columna indica el número con el cual se identifica al estudiante; la segunda el número de la carrera que cursa, definidas como: 21 Ingeniería Civil, 22 Ingeniería Eléctrica, 23 Ingeniería Geológica, 24 Ingeniería Mecánica, 25 Ingeniería Química, 26 Ingeniería de Sistemas; la tercera columna representa la opción de la carrera, este caso se da, por ejemplo en Ingeniería de Sistemas que posee tres opciones: Investigación de Operaciones, Control y Automatización y Sistemas Computacionales; la cuarta columna representa el pensum de estudio de la carrera que cursa; la quinta columna indica el año y la sexta el periodo que para este caso particular será 3, porque es el tercer periodo del año 2008 (primer periodo A-2008, segundo periodo I-2008); la séptima columna muestra la materia que está cursando, y la octava la sección de la misma.

Ahora bien, de esta base de datos, las columnas de interés para el estudio son: columna uno, columna siete y columna ocho, comparándolas con las columnas uno y dos de la tabla 3. En un primer paso, se agruparon los estudiantes por hora del día con su respectiva materia, este proceso fue realizado desarrollando en JAVA.

Teniendo todos los ficheros creados con su contenido organizado de acuerdo al identificador del estudiante y su respectivo horario, se procedió a tomar cada uno de estos archivos y comparar todos los estudiantes del mismo, es decir, comparar líneas dentro del fichero. Si en ese horario (lunes de 7am a 8am por ejemplo) dos estudiantes cursan la misma materia, se procede a colocar los números que identifican a esos estudiantes en forma de pares en un archivo con el mismo nombre del que se está leyendo. Si el archivo ya existe, se crea una nueva línea en el mismo y se ingresan los respectivos pares. Esto se repite hasta organizar y leer los 72 documentos de textos que identifican las horas de clases de cada día de la semana.

En la tabla 5 se muestran algunos archivos de los horarios y la tabla 6 permite apreciar el contenido del fichero *Jueves78*. Como su nombre lo indica este archivo contiene todos los estudiantes que mantienen interacción, separados por secciones, los días jueves durante el intervalo de tiempo comprendido entre 7am y 8am.

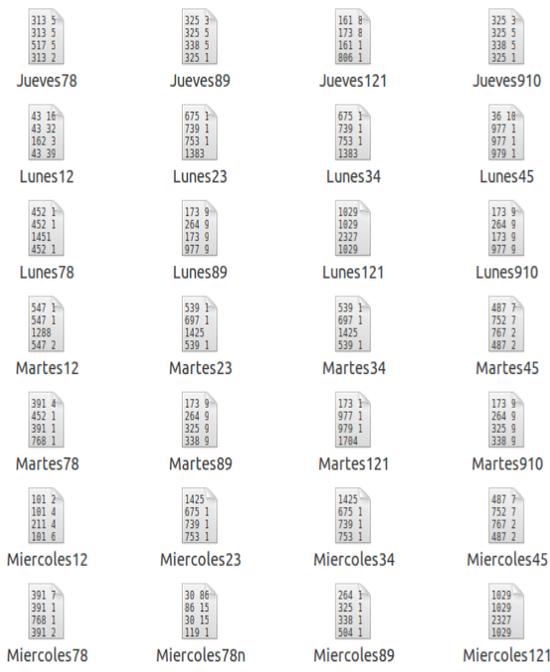


Tabla 5: Algunos de los ficheros de la red temporal

4 Implementación del modelo SIR en la red temporal

A la red temporal ya creada y anteriormente explicada se procedió a propagar una enfermedad siguiendo el patrón del modelo tipo SIR. Para ello se usó un valor beta (β), que se define como la probabilidad de que una persona susceptible se contagie de la enfermedad en cuestión. Se realizaron pruebas, con la finalidad de sondear un valor de β que garantice la existencia de una epidemia en la Facultad de Ingeniería, infectando a más del 60 % de la población y que hiciera a R_0 mayor a 1. Para este proceso, se escogieron 25 valores de β entre el 1% y 3%, considerando que entre estos valores se encontrara aquel que cumpliera con los requerimientos determinados.

```

313 517
313 545
517 545
313 2327
517 2327
545 2327
739 2327
1383 2327
313 2428
517 2428
545 2428
2327 2428
739 2428
1383 2428
313 2456
517 2456
545 2456
2327 2456
2428 2456
739 2456
1383 2456
313 2597
517 2597
    
```

Tabla 6: Algunos pares de estudiantes que interactúan los jueves de 7am a 8 am.

4.1 Algoritmo de implementación del modelo SRI

1. Se crea una lista de 4634 nodos sin enlaces, donde sólo uno estaba infectado.
2. Se avanza con un tamaño de paso Δt de una hora, que representa el tiempo que pasan los estudiantes en contacto dentro de las aulas de clase. Como en cada hora los nodos cambian de enlaces, entonces al transcurrir un paso de tiempo, se lee el archivo de esa hora, cuyo contenido son los nodos en forma de pares, que para ese instante de tiempo se encuentran interactuando y se procede a crear los enlaces existentes. Se toma un nodo de este grafo creado recientemente, si está infectado, entonces se busca entre sus vecinos, si alguno es susceptible, pasará al estado infectado con probabilidad β y se procede a registrar ese nodo. Luego de transcurrido el tiempo establecido de la duración de la enfermedad, el individuo pasa de estar infectado a recuperado. Los estados de los individuos se guardan identificándolos con una etiqueta; si es 0 es susceptible, si está infectado su estado pasa a ser 1, y -1 si es recuperado. En el caso de los individuos infectados, se aumenta el valor de su estado (1) hasta alcanzar el tiempo de recuperación, lo

que quiere decir, que si se encuentra a un nodo con estado mayor que cero, entonces este individuo está infectado.

3. Al transcurrir el siguiente paso de tiempo, se borran todos los enlaces creados en la iteración anterior y se procede a leer un nuevo archivo de conexiones distintas o en su defecto la incorporación de nuevos nodos con sus respectivos enlaces para repetir el procedimiento de infección (paso número 2).

4. De esta forma el paso 2 y el paso 3 se repiten sucesivamente hasta que el número de nodos en el estado infectado sea igual a cero, cumpliendo con la condición establecida para terminar la simulación, posicionando a la red social de interacción de estudiantes en un estado estacionario.

4.2. Descripción de las estrategias de Vacunación.

4.2.1. Estrategia de Inmunización aleatoria

Este método consiste en seleccionar aleatoriamente una cierta cantidad del total de individuos dentro de la red e inmunizarla. Existen muchos métodos de inmunización, se puede mencionar algunos como la vacuna contra una enfermedad, la aislación completa del infectado, la toma de medicamentos recetados por un especialista, entre otros. Para el estudio de la estrategia de vacunación planteada, resulta indiferente cual sea el método de inmunización aplicado. Dentro del contexto de esta primera estrategia se inmunizaron entre el 0 y 30% de la población, escogiendo 20 valores de este rango con 20 simulaciones para cada fracción. Para desarrollar esta estrategia se aplica el siguiente algoritmo en el simulador ISYS:

1. Se selecciona un nodo aleatoriamente entre 0 y $n - 1$, donde n representa el total de nodos existentes para la red (4634 estudiantes).
2. Si el nodo es susceptible y no ha sido vacunado se pasa a el estado inmunizado mediante una etiqueta (-3), de lo contrario se escoge otro nodo y se inmuniza.
3. Este procedimiento se repite hasta lograr inmunizar a la fracción que se estableció para la simulación.

4.2.2. Estrategia de Inmunización por secciones

Consiste en ir inmunizando a todos los estudiantes pertenecientes a las secciones de materias más pobladas. Primero, se vacunó sólo a la sección más poblada de la facultad, se simuló, se observaron los resultados calculando la fracción de la población representada por los estudiantes inmunizados al final de la simulación; posteriormente se procede a inmunizar las dos secciones más pobladas,

repetiendo el procedimiento que implica el análisis de resultados obteniendo la cantidad de vacunados en cada una de las simulaciones; seguidamente se ejecuta el proceso descrito con las tres secciones más grandes y así sucesivamente hasta alcanzar un 30% de inmunizados del total de estudiantes.

Para realizar lo anteriormente explicado dentro de la herramienta de simulación, se creó el siguiente algoritmo:

1. Crear un contador e inicializarlo en 1.
2. Repetir mientras el contador sea menor o igual a veinte
 - 2.1 Inmunizar a los estudiantes que se encuentren dentro del archivo identificado con el valor del contador.
 - 2.2 Simular la enfermedad tipo SIR.
 - 2.3 Incrementar el contador en 1.

Fin

5 Análisis de los resultados

5.1 Determinación del β_{\min} y β_c

Para que exista una epidemia dentro del sistema se estudiaron 25 valores diferentes comprendidos en el rango de 0 y 0.30, de manera sistemática a través de simulaciones se encontró el valor mínimo donde el sistema experimenta la transición de un estado asintótico sin epidemia a uno donde ocurre una gran epidemia. Se realizaron 20 simulaciones para cada uno de estos 25 valores de β , usando como parámetro 72 unidades de tiempo que dura la infección y asumiendo que en el sistema hay un solo infectado.

La figura 3 indica los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas, donde el promedio de la fracción de la población que corresponde al número de agentes infectados en función del valor de probabilidad β es representado a través de los puntos azules, mostrando el rango de variación en el que se mueve dicho punto. A través de esta gráfica se puede observar que el valor de probabilidad mínimo para que se pueda propagar la enfermedad corresponde a un $\beta_{\min} \approx 0,0009$. Pudiéndose observar gráficamente que a partir de este valor, la fracción de agentes infectados comienza a ser mayor a 0.

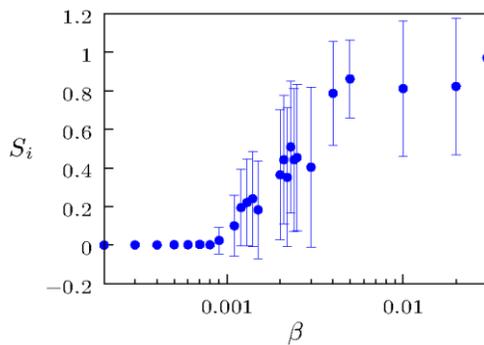


Figura 3: Número de agentes infectados en el sistema en función de β . Se puede observar que el valor β_c , donde el sistema experimenta la transición de un estado asintótico sin epidemia a uno donde ocurre una gran epidemia es de $\beta_c \approx 0.001$.

5.2 Propagación de la enfermedad en el sistema

En primera instancia se simuló utilizando el crítico, **10000000** como tiempo máximo de simulación, **4634** como el número máximo de nodos en la red, latencia **0.72** unidades de tiempo de infección y asumiendo que hay un solo infectado en el sistema cuyos resultados se muestran en la figura 4.

Se puede observar que el número máximo de infectados dentro de una simulación para el beta crítico corresponde a una fracción aproximada del **80%** de la población, alcanzado alrededor de las **200** unidades de tiempo, que equivaldría a quince días de transcurrido el semestre sin tomar en cuenta los domingos ni considerar las horas fuera de los salones de clase. De esta manera, cada día transcurrido corresponde a doce unidades de tiempo. A partir de cien unidades de tiempo la infección comienza a expandirse de forma acelerada, pudiendo observarse gráficamente que la cantidad de infectados al inicio es prácticamente nula. Después de alcanzar el valor máximo de infección, la población infectada comienza a decrecer con un comportamiento similar al mostrado antes de llegar a ese punto, desapareciendo por completo aproximadamente en las **400** unidades de tiempo, es decir, cerca del primer mes después del inicio del semestre.

Con el objetivo de apreciar la variabilidad que puede existir en relación con la utilización de los diferentes valores de β , se ejecutaron diferentes simulaciones. Entre las destacadas se encuentran las mostradas en la figura 5 donde se aprecia una curva de color rojo, la cual representa la simulación realizada con un valor de $\beta > \beta_c$ establecido en **0.03**, al mismo tiempo una curva verde mostrando el resultado de la simulación para un $\beta < \beta_c$ asignado como **0.0020**.

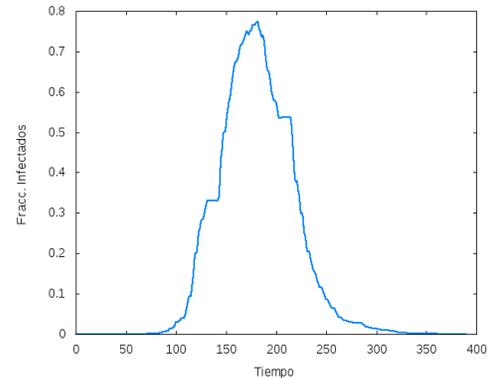


Figura 4: Prevalencia de agentes infectados en función del tiempo para el valor de β crítico.

5.3 Aplicación de Estrategias de Vacunación

5.3.1 Inmunización aleatoria

Se decidió aplicar una estrategia de vacunación de forma aleatoria que fuera tomada como base, de tal manera que pudiera compararse con otras que ameriten un conocimiento más profundo de la red en cuestión, cuyas diferencias también radican en los costos que acarrearán cada una de ellas.

A partir de la simulación donde se aplicó la estrategia planteada, es posible comparar la cantidad de individuos infectados en relación a la población que permanece susceptible, con respecto a la variabilidad de la fracción de individuos vacunados. Inicialmente cuando esta fracción toma valores muy pequeños, la población infectada alcanza un valor mayor al **80%** de la población total, a medida que se incrementa dicha fracción la cantidad de individuos infectados se ve disminuida. El valor máximo probado corresponde a la vacunación del **30%** de la población, reflejando un tamaño de la epidemia situada cerca del **60%** de la misma. Este límite fue establecido puesto que para fracciones más altas no son funcionales para el estudio realizado y resultaría muy costoso si se planea aplicar en el sistema real.

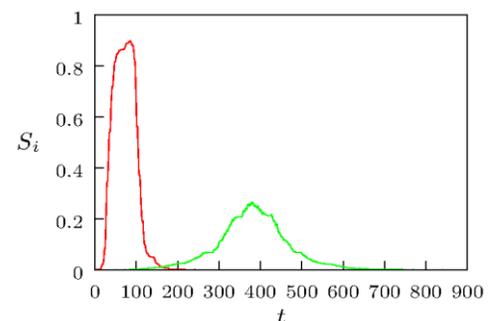


Figura 5: Prevalencia del sistema en función del tiempo, para dos valores de β : La curva roja es para un $\beta > \beta_c$, mientras que la curva verde es para un $\beta < \beta_c$.

En la figura 6 se evidencia los resultados obtenidos de la simulación ya evaluados.

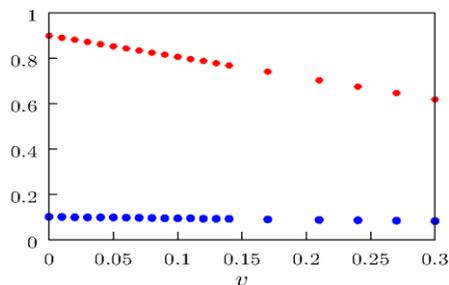


Figura 6: Fracción de agentes infectados (rojos) y susceptibles (azul) en función de la fracción de inmunizados en el sistema, usando la estrategia de inmunización aleatoria.

5.3.2. Inmunización por Secciones

El planteamiento de esta estrategia surge en relación a la información con que se cuenta, puesto que es posible determinar cuáles son las secciones con mayor número de estudiantes inscritos, suponiendo que al vacunar estos individuos exista una barrera que controle el brote de la epidemia en la red. El costo de aplicación de esta estrategia se considera un tanto mayor a la inmunización aleatoria.

Para el análisis de esta estrategia se procedió a graficar los resultados obtenidos como se muestra en la figura 7, donde se observa que al vacunar un **25%** de la población total los individuos infectados se reducen a un poco más del **60%**, cuando inicialmente la cantidad de estos se posicionaba en un valor cercano al **90%**.

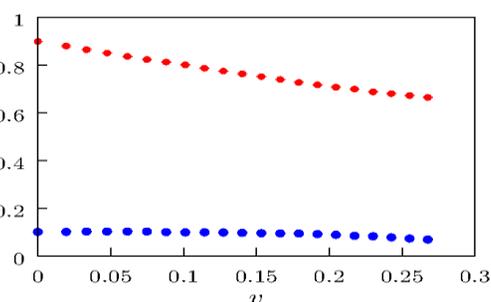


Figura 7: Fracción de agentes infectados (rojos) y susceptibles (azul) en función de la fracción de inmunizados en el sistema, usando la estrategia de inmunización por secciones.

Una vez realizadas las simulaciones correspondientes a cada una de las estrategias de vacunación, se puede determinar que ambas se comportan de manera similar para este tipo de red. Limitando la posibilidad de establecer cuál de ellas es óptima refiriéndose a el efecto causado en el

tamaño de la epidemia, puesto que, en ambos casos, la reducción de la cantidad de individuos infectados se presenta relativamente igual en proporción al aumento de la fracción de vacunados. Sin embargo, la funcionalidad de ambas estrategias es efectiva presentando una mejora entre el **15%** y **20%** a medida que aumenta la fracción de vacunados y manteniendo la misma cantidad de individuos susceptibles.

La semejanza presentada en los resultados de ambas estrategias de vacunación puede deberse a la topología de la red trabajada. En la inmunización aleatoria se presenta el riesgo de inmunizar agentes que no sean de interés debido a la baja conectividad que poseen. De igual manera se presenta el mismo problema en la vacunación por secciones, aunque se procede a inmunizar las secciones más grandes lo que involucra aquellas que poseen la mayor cantidad de conexiones entre estudiantes, no quiere decir que estos individuos sean los nodos con mayor número de enlaces.

6 Conclusiones

El producto obtenido del proyecto de investigación es una red temporal de interacción social de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería, construida basándose en la teoría de grafos dinámicos.

Se realizaron diferentes estudios sobre la propagación de enfermedades y el alcance de epidemias que pudiesen afectar una población. Se logró implementar un modelo epidemiológico tipo SIR en la red temporal creada, pudiendo estudiar el efecto de ocurrencia de una enfermedad en la misma. La llamada probabilidad de contagio β es considerada uno de los componentes de mayor importancia de las enfermedades infecciosas. Para efectos de este estudio fue encontrado el valor crítico de ésta que asegurara la existencia de una epidemia en la población.

Se implementaron estrategias de inmunización, estudiando en un primer plano la vacunación aleatoria, considerada como punto de partida para el estudio de nuevas estrategias. Seguidamente se estudió el efecto de inmunización por secciones de materias dictadas dentro del sistema, proponiendo, en la medida de lo posible, un método innovador que pudiese representar una solución al momento de existir un brote epidemiológico.

Como resultado del estudio se pudo observar las reducciones en la cantidad de población infectada por la enfermedad introducida en la red, debido a la aplicación de las estrategias de vacunación, presentando una mejora entre el **15%** y **20%** para fracciones de vacunados comprendidas en un rango entre el **0%** y el **30%** en ambos casos, es por ello que se considera la similitud entre ellas, lo que impide la diferenciación entre ambas estrategias y por ende la selección de la estrategia óptima.

Referencias

- Coto, E. (2003). *Algoritmos básicos de grafos*, Universidad Central de Venezuela Facultad de Ciencias Escuela de Computación 1-26.
- Giesecke, J. (2001). *Modern infectious disease epidemiology*.
- Holme, P., Saramaki, J. (2012) *Temporal network*, *Physics reports* 519, 97-125.
- Holme, P. (2013). *Epidemiologically optimal static networks from temporal network data*, *PLoS computational biology* 9, e1003142.
- Holme, P. (2015). *Modern temporal network theory: a colloquium*, *The European Physical Journal B* 88, 1-30.
- Olivero, J. (2013). *Manual básico de epidemiología en alimentación y nutrición*, San Luis: Nueva editorial Universitaria. *Las preguntas durante la encuesta le parecen incómodas, tiene usted el derecho de hacérselo saber al investigador o de no responderlas*.
- Keeling, M.J., & Eames, K.T. (2005). *Network and epidemic models*, *Journal of the Royal Society Interface* 2 295-307.
- Lagos P.S., *El léxico disponible en geometría de alumnos de concepción chile. Análisis cualitativo por medio de grafos*. *Actas del VII CIBES* ISSN 2301.
- Montesinos-López, O.A., Hernández-Suárez, C.M.. (2007) *Modelos Matemáticos para enfermedades infecciosas, salud pública de México* 49, 218-226.
- Morris, M. (2004). *Network epidemiology: A handbook for survey design and data collection*, Oxford University Press.

Recibido: 15 de febrero de 2023

Aceptado: 25 de mayo de 2023

Rodríguez Rodríguez, Armando: MSc en Matemáticas, 2013, Universidad de Los Andes. Profesor Agregado del Departamento de Cálculo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes.

 <https://orcid.org/0009-0008-1544-9288>

Herrera José: Dr. En Física Fundamental desde 2012. Herrera trabaja en modelos y simulaciones que permiten obtener un mejor entendimiento en problemas de formación de opinión, propagación de enfermedades, redes complejas y análisis de series de tiempo. También hace investigación en el Departamen of integrative Biology, University of Texas at Austin, Texas-USA Correo electrónico: jherrera@ula.ve

 <https://orcid.org/0000-0002-1688-3704>