

Modelización del impacto epidemiológico de la existencia de un grupo conductual preventivo

Modeling the epidemiological impact of a preventive behavioral group

Fernando Córdova-Lepe^a, Maritza Cabrera Hernández^b, Juan Pablo Gutiérrez-Jara^a

^a Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Católica del Maule, Región del Maule, Chile

^b Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Universidad Católica del Maule, Región del Maule, Chile

*Autor correspondiente fcordovalepe@gmail.com

Citación Córdova-Lepe F, Cabrera Hernández M, Gutiérrez-Jara JP. Modeling the epidemiological impact of a preventive behavioral group. *Medwave* 2018;18(8):e7396

Doi 10.5867/medwave.2018.08.7396

Fecha de envío 4/10/2018

Fecha de aceptación 6/12/2018

Fecha de publicación 28/12/2018

Origen no solicitado

Tipo de revisión con revisión por tres pares revisores externos, a doble ciego

Palabras clave prevention & control, prevalence, mathematical epidemiology

Resumen

En lo que concierne a salud, la experiencia indica que en toda población humana existe un porcentaje de individuos que se comporta en forma consciente ante la presencia de enfermedades infectocontagiosas. Esto implica que existen grupos con una orientación hacia la prevención en sus actividades para atenuar el riesgo, mientras que en general la mayoría lo hace distraídamente. La excepción la constituyen los casos de orden catastrófico. Asumiendo el marco teórico y metodológico que otorga la epidemiología matemática, se evaluaron los factores tamaño e intensidad de la conducta del grupo cuidadoso en la determinación del número reproductivo básico, basándose en un modelo tipo SIR (susceptibles - infecciosos - recuperados). Es decir, se midió la reducción en la cantidad de casos secundarios que produciría un primer caso infeccioso. Junto con estos indicadores, se procedió a evaluar la prevalencia evitada total e individual por cada sujeto cuidadoso en diferentes escenarios paramétricos. Finalmente, se plantea la necesidad de integrar en futuros estudios la variable distancia y el contacto interpersonal como factores asociados al potencial de transmisión.

Abstract

Concerning health, experience indicates that in all human groups a percentage of individuals behave conscientiously when facing contagious diseases. This aware group responds with activities to prevent disease transmission and to minimize risk. In contrast, other individuals tend to behave with less engagement except in catastrophic cases. Assuming the theoretical and methodological framework provided by mathematical epidemiology, and based on a Susceptible – Infectious - Recovered (SIR) model, we evaluated the factors of size and intensity of the behaviours in the aware group to determine the basic reproduction number. This number is the reduction in the number of secondary cases that would be produced by a first infectious individual. Additionally, we calculated the total and individual prevented prevalence for each aware individual for different parametric scenarios. Lastly, we suggest that distance and interpersonal contact should be included as factors associated to the potential of transmission.

Ideas claves

Una fracción de la sociedad tiene consciencia respecto del impacto que puede llegar a significar el mantener conductas de cuidado ante enfermedades infectocontagiosas.

La novedad de este trabajo es cuantificar el impacto de un hipotético grupo conductual cuidadoso mediante un modelo matemático.

Se logra medir la prevalencia evitada total e individual por cada sujeto cuidadoso.

Su principal limitante en lo práctico es lo generalista del enfoque.

Introducción

Las nuevas realidades, ritmos y movimientos en la dinámica social exigen la incorporación en los modelos epidemiológicos de enfermedades infectocontagiosas humanas de escenarios más realistas. Un aspecto a considerar es que estos modelos sean capaces de capturar la diversidad de conductas de los individuos para luego, desde el modelo mismo, conocer las consecuencias en las predicciones^{1,2}. Sin embargo es necesario, en términos del tránsito del análisis a la síntesis, incorporar primero los diversos aspectos por separado y posteriormente intentar mayor complejidad mediante la integración de dichos fenómenos.

Según expertos, las formas de comportamiento humano para evitar el riesgo en salud están condicionadas por un extenso número de factores, entre los que destacan creencias religiosas, culturales y nivel socioeconómico, entre otros^{1,3}. De allí que en todo grupo social existan niveles individuales que responden a circunstancias muy personales con respecto a sus patrones de conducta, según se plantea en los mencionados trabajos.

De acuerdo a la lógica natural, ante riesgos de infección, algunos individuos se comportan distraídamente o cambian en forma muy parcial sus actividades; mientras que otros, más conscientes, prefieren las actividades claramente orientadas a la prevención y el control del contagio¹. Es decir, las personas nos dividimos en al menos dos patrones de conducta ante algún indicio de epidemia. Podemos afirmar que la dinámica general de desarrollo de las enfermedades es bastante sensible al comportamiento individual y a la dimensión que alcanzan estos como grupos sociales.

En aras de mejorar los índices, el llevar personas de un grupo a otro implica lograr cambios de estilos de vida en individuos (sanos y/o enfermos) que están enmarcados dentro de una variedad de modos de vida. Se requieren cambios de paradigma social y psíquico que van más allá de aspectos meramente biológicos, sociales o culturales, ya que involucran aspectos de personalidad y grados de equilibrio psicosociales. No obstante, todo cambio social requiere alcanzar cierto número umbral de personas en la conducta adecuada. Por otro lado, aunque una persona en su actuar esté consciente de la buena o mala conducta en salud, quizás no siempre está instalada en ella una más definida visión del alcance (consecuencias) de sus acciones.

Tener ciudadanos educados y responsables en sus costumbres sanitarias es de vital importancia para el sistema de salud de las comunidades, en particular en lo referente a la prevención y mitigación de

enfermedades. Sin embargo, no siempre es posible encontrar en la literatura argumentos que intenten cuantificar cómo un grupo poblacional conductual hace la diferencia al respecto. Por ejemplo, en lo relativo al efecto que tiene en la propagación de enfermedades infectocontagiosas una conducta estándar versus una particularmente cuidadosa. En principio, hay dos formas (conjugables) para introducir cierto nivel de cuantificación de las consecuencias:

- a) Modelo estadístico: que recurre a los datos (existentes o por experimentar), con situaciones con y sin conducta específica. Verbigracia, un trabajo conducido en China sobre patrones sociales mixtos en zonas urbanas y rurales⁴ o modelado del espacio personal⁵ a través de una función Gaussiana Bidimensional.
- b) Modelo matemático: mediante la introducción de hipótesis relativas a la conducta sobre el modelo epidemiológico base de una enfermedad infectocontagiosa, realiza análisis y/o simulaciones del mismo. En este caso, un trabajo sobre modelos matemáticos de patrones de contacto en grupos de edades⁶ o más recientemente un modelo epidémico susceptible- infeccioso-susceptible con población cuidadosa, donde se investiga el retardo en la respuesta de cuidado por parte de la población susceptible⁷.

En este sentido, con la idea de introducir medibles, la dinámica del comportamiento humano y sus consecuencias epidemiológicas, podría estar mejor representada desde la perspectiva metodológica de los modelos matemáticos⁶⁻⁸. En particular los compartimentados y las leyes de variación del tamaño de los mismos, con una definición clara que incluya características o tipos conductuales y las reglas específicas de transferencia para los individuos que conforman cada grupo^{1,2,6}. En consecuencia, el desafío clave es establecer las líneas bases de conducta para su incorporación al modelo. Notemos que estos tipos de conductas se traducen en mayor o menor probabilidad de traspaso del agente infeccioso a un nuevo hospedero.

El propósito del presente artículo es poner en relieve, a través de un modelo matemático (sistema dinámico determinista) y posterior construcción de indicadores específicos, la importancia que tiene la existencia y tamaño de los grupos conductuales en el desarrollo de modelos epidemiológicos para enfermedades infectocontagiosas. Para ello se cuantifica el impacto epidemiológico que tiene dicha heterogeneidad sobre la condición susceptible o infecciosa de los individuos, con proyección en la prevalencia. Una vez identificados y cuantificados estos aspectos, podría convertirse en una herramienta útil, *grosso modo*, para guiar políticas públicas sanitarias destinadas a mitigar los efectos en salud a través de cambios conductuales humanos.

Objetivos

En el contexto específico de una enfermedad infectocontagiosa con potencial para una rápida propagación, que pudiera generar un no despreciable brote (pulso) epidémico, como podría ser el caso de una gripe; esta investigación se orienta a responder las siguientes incógnitas:

- ¿Cuánto y cómo impacta en la magnitud de la prevalencia final (alguna vez enfermos) la existencia de un grupo de personas en la población con conductas cuidadosas, ante una enfermedad transmisible?
- ¿Cuál es la ganancia o pérdida, es decir menor o mayor prevalencia, al aumentar o disminuir el número de personas con conductas preventivas, en términos relativos respecto al total poblacional?
- ¿Entre sociedades con características ambientales similares (asociadas con la enfermedad), existen diferencias significativas entre la existencia de individuos levemente cuidadosos o por el contrario individuos altamente cuidadosos?
- ¿Qué tipo de persona cuidadosa impacta más positivamente, el susceptible de enfermar o el sujeto como agente infeccioso?

Tipos conductuales

En toda sociedad existe un grupo de ciudadanos conscientes que toman medidas preventivas sanitarias, tanto a favor de ellos mismos (cuando aún no han sido infectados) como con respecto a sus pares o círculos de contacto (cuando ellos cargan con la condición infecciosa). Este conjunto lo hemos denominado como “grupo cuidadoso”, y por simple complemento el resto de la población se ubica en el “grupo estándar”. Es importante destacar que, para efectos de gestión preventiva, resulta lógico esperar que sea favorable el conocer cuál es el impacto que tiene en la salud de la población (respecto a un grupo u otro) el ganar más ciudadanos en la condición de conciencia cuidadosa como medida sanitaria; sin embargo, nuestro objetivo es cuantificarlo.

La identificación de un grupo cuidadoso se relaciona con el conocimiento, conciencia y actitud epidemiológica permanente de un sector de la población frente a las prácticas básicas destinadas al control y prevención de enfermedades infecciosas transmisibles. En este sentido, aspectos como los descritos en documentos tales como el Manual de Control y Prevención de Infecciones⁹, podrían ayudar a delimitar la pertenencia o no de un sujeto a este grupo. Más precisamente, nos referimos a cierto nivel de cumplimiento observable de estándares de elementos como higiene de las manos, aislamiento, higiene respiratoria, normas educativas al toser, desinfección y lavado de utensilios personales u otras.

Ante una enfermedad infectocontagiosa junto a dos zonas similares en lo ambiental y demográfico, nos preguntamos las razones por las cuales podrían existir diferencias sustanciales en el tamaño final de una infección. Un factor social explicativo, pudiera ser la existencia de mayor masa de individuos que mantienen y/o activan conductas de cuidado permanentemente o más específicamente ante la aparición de brotes epidémicos. Sin embargo, para saber hasta dónde resiste esta hipótesis, es necesario medir cuán grande puede ser esta diferencia. Por razones obvias, en el presente estudio no se aborda un escenario experimental, sino uno simulado. De allí que se requiere la construcción de un modelo matemático que permita, en

términos de una realidad simplificada con bordes definidos, efectuar los análisis requeridos. Para ello consideraremos como base un modelo matemático clásico de compartimentación (susceptible - infeccioso - removido), ampliamente usado en el análisis epidemiológico¹⁰, sobre los cuales alojaremos algunos supuestos:

- La población, además de estar compartimentada según los estados de la enfermedad, también lo está según el tipo de conducta del conjunto al que pertenecen los individuos que la conforman, siendo ellos: grupo estándar (E) o grupo cuidadoso (C).
- Los grupos E y C representan un porcentaje dentro del total poblacional, denotados respectivamente por $Q_E\%$ y $Q_C\%$, donde $Q_E\% + Q_C\% = 100\%$. Estos porcentajes en el curso de la enfermedad se considerarán fijos.
- La probabilidad de encuentro o contacto inter e intragrupal será la misma. La diferencia estriba en la probabilidad de que estos contactos sean efectivos o no para que ocurra el contagio. Además, asumiremos que un cuidadoso (C) disminuye dicha probabilidad en un factor que denotamos respectivamente por f_S y f_I , con $f_S, f_I \in [0,1]$, según el cuidadoso actúe como susceptible o infeccioso.

Dinámica de la enfermedad

Aunque intentaremos evitar en lo posible el tecnicismo matemático, los detalles argumentativos y cálculos formales propios de esta disciplina se exhiben en la sección final. En este contexto, la argumentación estará basada en diagramas, tablas y algunas gráficas producto de simulaciones numéricas.

Bajo supuestos epidemiológicos de uniformidad espacial y etaria, uno de los clásicos modelos matemáticos de enfermedades infectocontagiosas, asume tres grandes grupos de individuos: susceptibles, infecciosos y recuperados⁶. Vistos sus tamaños como variables dependientes del tiempo, al t -ésimo día de la enfermedad a partir de la llegada al sistema de un número inicial de infecciosos (día cero), su representación se denotará por $S(t)$, $I(t)$ y $R(t)$ respectivamente.

En relación con la distancia que mantienen dos o más personas (variable discutida en detalle en la siguiente sección “distancia y contacto interpersonal”), se puede definir un criterio para discriminar si estas personas se encontraron (contactaron) o no. Para ello, notemos que la cantidad de encuentros factibles entre un individuo del grupo susceptible y otro del grupo infeccioso está representada por el producto $S(t)I(t)$. Efectivamente, solo una fracción de estos encuentros ocurre realmente. Más aún, ocurren solo en una fracción de esta última, cuando exista una distancia adecuada que permita la posibilidad que el agente patógeno cambie de hospedero. A su vez, esta situación se da solo con cierta probabilidad, la cual depende de muchas variables, entre ellas cuán prolongado es el encuentro para que llegue a ocurrir el contagio. En definitiva, solo en una pequeña fracción de los encuentros factibles entre susceptibles e infeccioso, el susceptible termina siendo infectado. Notemos que una limitante de estos modelos (susceptible - infeccioso - recuperado), es la no existencia de un periodo de latencia. Esto es, de haber contagio, instantáneamente se pasa a la condición de infeccioso.

Como ha sido dicho implícitamente, un modelo susceptible - infeccioso - recuperado asume dos flujos básicos: el de infección ($S \rightarrow I$) y el de recuperación ($I \rightarrow R$). Para el flujo de infección supondremos que por unidad de tiempo (un día) cambia de compartimento la

suma de $B\%S(t)I(t)$ susceptibles (un infeccioso infecta el $B\%$ del grupo susceptible). En cuanto al de recuperación, si el tiempo promedio de permanencia es de T -días, por unidad de tiempo se recuperan $(1/T)I(t)$ individuos infecciosos. Más detalle pueden ser encontrados en Córdova-Lepe, 2018¹⁰.

En la Tabla 1 se ilustran los tipos de encuentros posibles. Es decir, se consideran las posibilidades de perfiles que puede tener una persona al cruzar los tipos infecciosos $\{S, I, R\}$ con los tipos conductuales $\{E, C\}$.

Tabla 1. Perfiles de los individuos según su condición hacia la enfermedad y tipo conductual.

	S	I	R
E	$[SE]$	$[IE]$	$[RE]$
C	$[SC]$	$[IC]$	$[RC]$

Compartimientos posibles en que se puede ubicar un individuo.

De este modo, si las expresiones $[XY]$ de la tabla anterior indican el número de individuos en dicha condición, entonces los encuentros

posibles entre personas susceptibles e infecciosas quedan representadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Interacción entre individuos susceptibles e infecciosos.

*	$[IE]$	$[IC]$
$[SE]$	$[SE][IE]$	$[SE][IC]$
$[SC]$	$[SC][IE]$	$[SC][IC]$

Se presentan los cuatro casos de interacción entre individuos susceptibles e infecciosos.

La Tabla 3 muestra los cuatro componentes del flujo $S \rightarrow I$, es decir, el número de nuevos infecciosos por unidad de tiempo. Estos valores

se expresan según la Tabla 2 y en términos de la tasa de contagio $B\%$ corregida por los factores de reducción asociados al grupo cuidadoso.

Tabla 3. Flujo de susceptibles a infecciosos.

*	$[IE]$	$[IC]$
$[SE]$	$B\%[SE][IE]$	$f_i B\%[SE][IC]$
$[SC]$	$f_s B\%[SC][IE]$	$f_s f_i B\%[SC][IC]$

Dinámica del flujo $S \rightarrow I$ expresando explícitamente cómo los factores de reducción (f_s, f_i) afectan la tasa de contagio ($B\%$).

Notemos que hemos supuesto que una persona al infectarse no cambia su tipo de conducta, por lo que si era del tipo $[SX]$, cualquier X entre los dos posibles casos ($X \in \{E, C\}$) y se infecta, este se integrará al grupo $[IX]$. Es decir, el mismo X con el mismo tipo conductual. Así, genéricamente X -fila indica cómo los susceptibles tipo X se infectan con los distintos tipos infecciosos. O sea, el flujo hacia infecciosos estándar y cuidadoso son respectivamente:

$$(B\%[SE][IE] + f_i B\%[SC][IC]) \rightarrow [IE]$$

y

$$(f_s B\%[SE][IE] + f_s f_i B\%[SC][IC]) \rightarrow [IC].$$

Factorizando, resulta:

$$B\%([SE][IE] + f_i [SC][IC]) \rightarrow [IE]$$

y

$$f_s B\%([SE][IE] + f_i [SC][IC]) \rightarrow [IC].$$

El flujo se completa considerando la recuperación $[IX] \rightarrow [RX]$ para cada tipo conductual $X \in \{E, C\}$. El tiempo de recuperación supuesto (independiente al tipo conductual), es de $(1/T)[IX]$ personas por unidad de tiempo. Como los removidos no participan más en la dinámica del contagio, podemos pensar en un solo grupo de removidos $[R] = [RE] + [RC]$.

Estos dos flujos determinan la ley de desarrollo de la enfermedad infectocontagiosa, la cual se expresa matemáticamente como ley diferencial según la ecuación planteada en la sección “elementos matemáticos”.

Distancia y contacto interpersonal

Los factores f_S y f_I , llamados de reducción de la tasa de contagio, están asociados a la probabilidad de transmisión del agente patógeno. El número de contagios es sensible a los patrones de aproximación y contacto humano¹⁶. En relación a la neumonía, por ejemplo, un estudio histórico con datos de las epidemias de peste neumónica (Manchurian, años 1910-11 y 1920-21), muestra que al toser existe riesgo epidemiológico para distancias entre cinco centímetros a dos metros¹¹. Consabidas recomendaciones para evitar la exposición a las gotas de saliva que genera un enfermo al toser o estornudar, son el taparse la boca y también el uso de mascarillas¹².

Las distancias que empleamos en nuestro diario vivir, en relación con otros sujetos y objetos son materia de estudio de la proxémica (Edward Hall, 1968¹³). El espacio personal (burbuja alrededor del cuerpo humano) que una persona mantiene respecto a otra en sus relaciones diarias, tiene importancia epidemiológica y determinantes tan diversos como personalidad, edad, género, condición social, tipo de relación entre pares⁵ y contextos culturales^{13,14}.

Dicho espacio personal está configurado por varias capas, según ciertas distancias (íntima de 0 a 0,45 metros; personal de 0,45 a 1,2 metros; social de 1,2 a 3,5 metros y pública a más de 3,5 metros) de acuerdo con el tipo de interacción con otros⁵. Según se observa, algunas capas están dentro de la zona de riesgo para la peste neumónica. Por lo que se espera que una persona cuidadosa, interactúe con el medio a través de capas con promedios de distancia mayores, lo que determinaría valores de f_S y f_I menores.

En este sentido, la proxémica advierte que el diámetro de las capas cambia según la cultura, lo que podría ser un factor para explicar diferencias entre procesos de transmisión de enfermedades infectocontagiosas. Los angloamericanos por ejemplo, tienden a interactuar socialmente con distancias mayores que la de los latinos; estos últimos además incluyen el contacto físico¹⁴. Adicionalmente, según el mencionado trabajo, existen diferencias de contacto y acercamiento social entre miembros de países latinos y entre encuentros de géneros. De allí que no habría un índice único (universal) de contacto humano común para todas las culturas, ni dentro de las mismas^{13,14}.

Existen evidencias que para muchas infecciones, la transmisión del agente patógeno ocurre en relación con la distancia que mantienen los sujetos entre sí^{4,11}. En un estudio conducido en Gran Bretaña¹⁵, se registró un trabajo con enfoque estadístico en el cual la probabilidad de contagio entre susceptibles e infecciosos disminuye con la distancia, de acuerdo con la formulación de la Ley de Potencia. Más precisamente, se determinó para contagio de la fiebre aftosa entre granjas, que la probabilidad de contacto escalaba según la lejanía. En consecuencia, la transmisión del contagio entre el ganado resultó inversamente proporcional a la distancia entre granjas.

Otro estudio reciente conducido en Bangladesh, con datos de Chikungunya, incorporó una distribución exponencial para caracterizar la probabilidad de transmisión entre comunidades y su distancia de separación. En esta investigación se analiza cómo las estructuras sociales, espaciales y la dinámica conductual de los individuos, pueden ser incorporadas en los modelos epidemiológicos modernos¹⁶.

Finalmente, desde una perspectiva epidemiológica, el factor distancia y la frecuencia de contactos físicos es un aspecto que deberá ser incorporado en los modelos matemáticos de precisión. Dichos enfoques estarán destinados a conocer la dinámica real de las enfermedades infectocontagiosas, con el fin de elaborar formas efectivas de intervención sanitaria, más cónsonas con el mundo real⁴. Nosotros, en nuestro afán meramente explicativo, marcamos el precedente de que la distancia (o frecuencia de contactos) es una variable que tiene una correlación negativa (o positiva) respecto a los factores f_S y f_I considerados en nuestro modelo.

Resultados

Deducción del número reproductivo básico

Notemos que un cálculo directo nos permite afirmar que el número reproductivo básico (casos secundarios generados por un primer infectado en una población libre de infección) está dado por:

$$R_0^* = [Q_E\% + Q_C\%f_Sf_I]B\%T,$$

Expresión que cuando no existe diferencia conductual con consecuencias en la tasa de contagio ($f_S = f_I = 1$), se reduce a $R_0 = B\%T$. Como es sabido, corresponde al número reproductivo básico del clásico modelo susceptible - infeccioso - recuperado ($Q_C = 0$).

Detalles de deducción de R_0^* se pueden encontrar en la sección “elementos matemáticos”. De modo que la reducción porcentual $i_{\%}$ en la cantidad de casos secundarios que produce un primer infectado en una población libre de enfermedad, debido a la existencia del grupo cuidadoso, es:

$$i_{\%} = (R_0 - R_0^*)/R_0 = [1 - f_Sf_I]Q_C\%.$$

Se trata de un porcentaje que crece con una mayor representación del grupo cuidadoso Q_C o con el aumento de los niveles de cuidado, esto es, la disminución de los factores f_S y f_I . A modo de ejemplo, si una de cada 10 personas es capaz de reducir en un 50% sus encuentros infecciosos (como susceptibles o infecciosos), entonces la reducción porcentual en casos secundarios es de un 7,5%.

Advirtamos que si el grupo cuidadoso es absolutamente óptimo al bajar la tasa de infección, sea como susceptible o en rol de infeccioso ($f_S = 0$ o $f_I = 0$), tenemos que $R_0^* = (1 - Q_C\%)R_0$. Es decir, rebaja a lo más el número reproductivo en todo el porcentaje que representa en la población. En general, si $R_0 > 1$, entonces $R_0^* < 1$, si:

$$Q_c \% > \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_0 - 1}{1 - f_s f_i}$$

Al suponer $f_s = f_i = f$, entonces los pares $(f, Q_c \%)$ que logran bajar R_0^* a menor que uno, son los tal que $Q_c > G(f)$, con $G(f) = (1 - R_0^{-1})/(1 - f^2)$. Esto es, la zona achurada de la Figura 1.

Figura 1. Condiciones paramétricas de control de la infección.

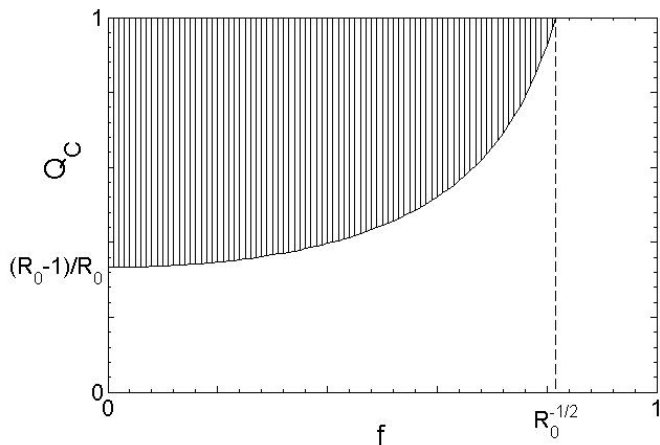
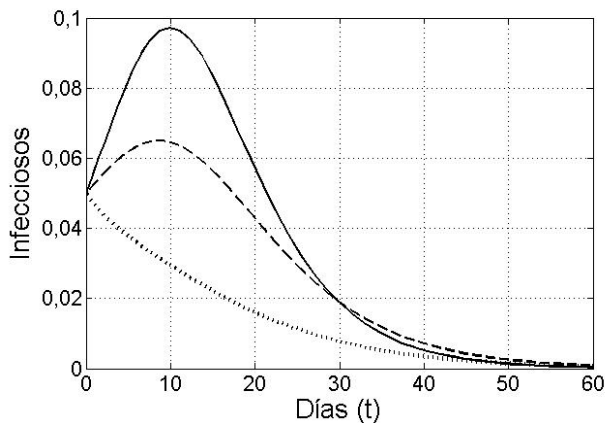


Gráfico de los pares $(f, Q_c \%)$, zona achurada, para los que $Q_c \% > G(f)$, es decir, $R_0^* < 1$. Paso de la situación de brote a la no instalación de la enfermedad en la población.
Fuente: software MATLAB.

La Figura 2 muestra tres escenarios para la evolución de los infecciosos en el tiempo, con grupo cuidadoso y sin él, en este último caso con R_0^* mayor o menor que uno.

Figura 2. Dinámica del grupo infeccioso para tres tipos de conductas cuidadosas.



Infecciosos, $[I] = [IE] + [IC]$, versus tiempo.
(a) Línea continua: sin grupo cuidadoso y $R_0 = 1,5$.
(b) Línea segmentada: $Q_c = 40\%$, $f_s = f_i = 0,8$ y $R_0^* = 1,284 > 1$.
(c) Línea punteada: $Q_c = 40\%$, $f_s = f_i = 0,4$ y $R_0^* = 0,996 < 1$.
Fuente: software MATLAB.

Relación prevalencia - tamaño grupo preventivo

La lectura de i_0 es importante en cuanto a casos secundarios menos, es decir, en la eliminación de algunas cadenas de propagación. Sin

embargo, para conocer la prevalencia que es posible evitar, introducimos otros dos indicadores que pasan por realizar (simular) la dinámica de la infección.

Prevalencia evitada: denotaremos por $[R]_*(Q_C)$ la suma de los grupos de recuperados estándar y cuidadoso ($[RE] + [RC]$) tras “muchos” días del comienzo de la infección y paso del brote, suponiendo que la gente cuidadosa es un $Q_C\%$. Así la prevalencia evitada como fracción de la que podría haber sido (sin la existencia del grupo cuidadoso) al final del brote, es:

$$i(Q_C) = ([R]_*(0) - [R]_*(Q_C)) / [R]_*(0).$$

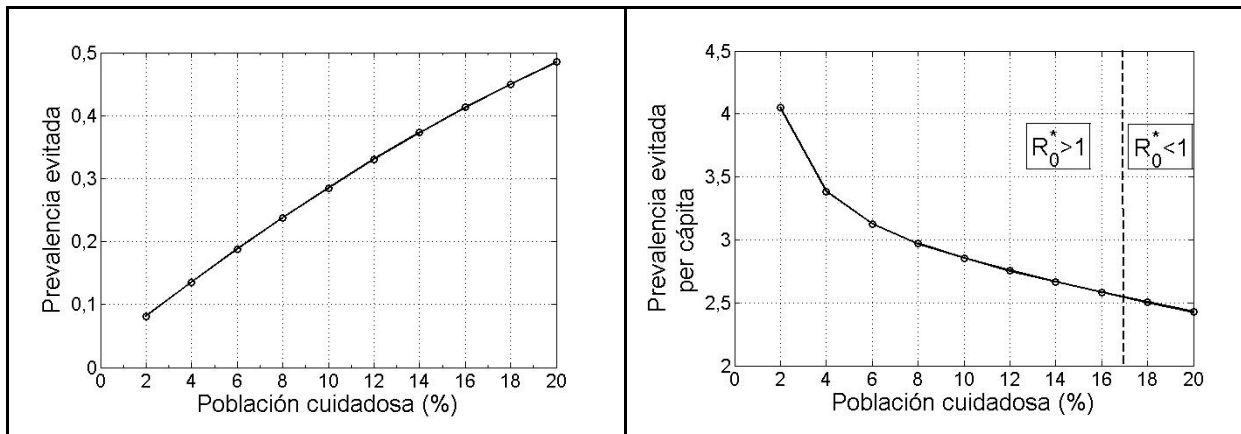
Se espera que este valor aumente con el tamaño del grupo cuidadoso, en términos marginales. Esto es, $i'(Q_C) > 0$.

Tabla 4. Valores de los indicadores de prevalencia para distintos tamaños del grupo cuidadoso.

$Q_C\%$	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%
$i(Q_C)$	0,08	0,13	0,19	0,24	0,29	0,33	0,37	0,41	0,45	0,49
$i_*(Q_C)$	4,05	3,38	3,13	2,97	2,85	2,76	2,67	2,58	2,50	2,43

Variación de los indicadores de prevalencia evitada (total y per cápita) a distintos porcentajes de la población cuidadosa.

Figura 3. Prevalencia evitada (total y per cápita) versus población cuidadosa.



Prevalencia evitada $i(Q_C)$ y prevalencia evitada per cápita $i_*(Q_C)$. Se marca el nivel $Q_C\% \sim 17\%$ umbral entre R_0^* mayor o menor a uno. Fuente: software MATLAB.

Relación prevalencia - intensidad preventiva

Entre los parámetros f_S y f_I una disminución en f_I tiene más efecto en bajar el número de infectados que una en f_S . Consideramos, para distintos $Q_C\%$ (5%, 10%, 15%, 20%), los siguientes casos para el par (f_S, f_I) :

- (a) (0,2; 0,8).
- (b) (0,4; 0,4) y
- (c) (0,8; 0,2).

Prevalencia evitada per cápita: respecto a cuál es la prevalencia evitada por unidad porcentual, es decir en términos per cápita, el indicador es:

$$i_*(Q_C) = i(Q_C) / Q_C.$$

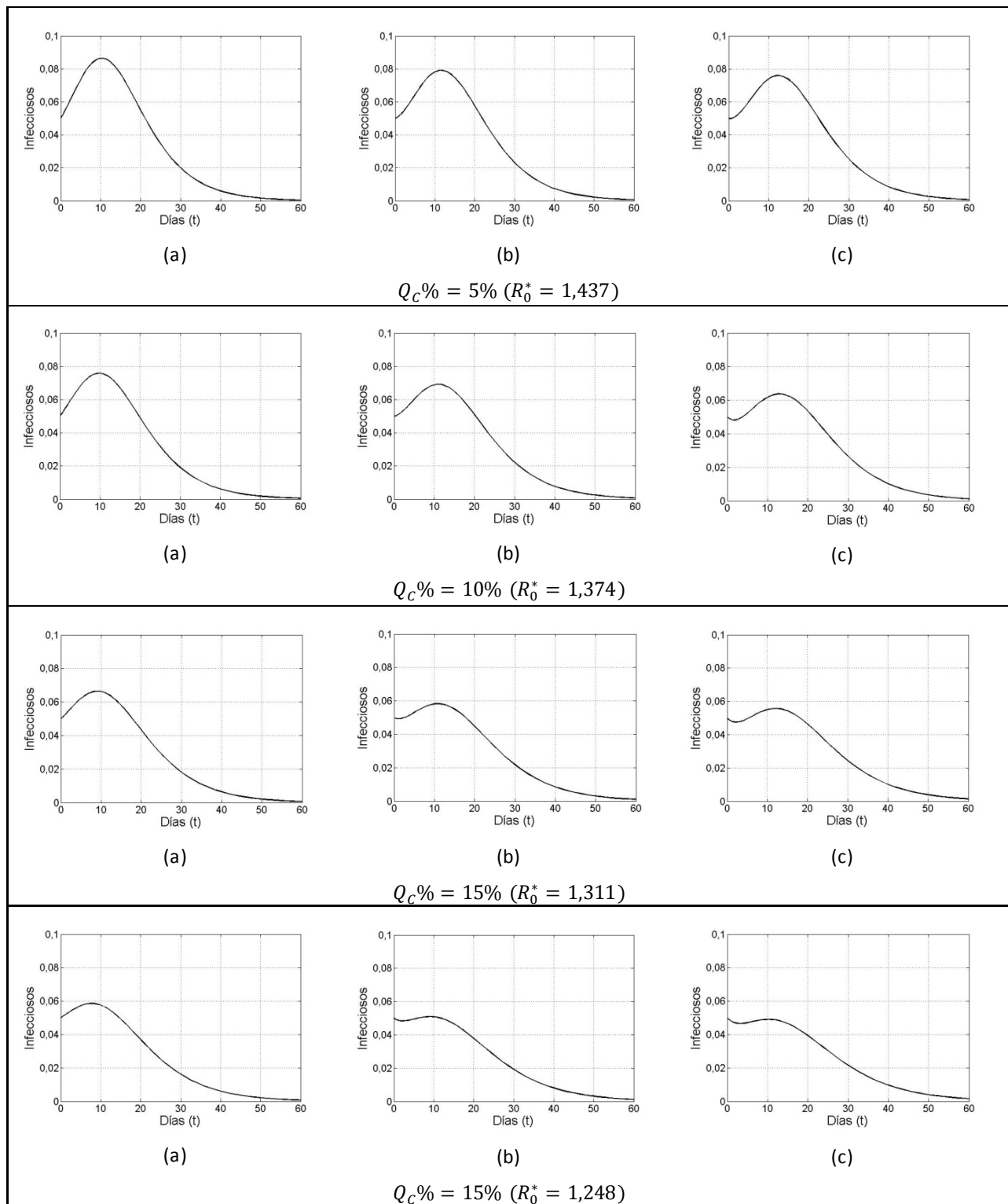
Notemos que se prueba que $i_*(Q_C)$ disminuye su valor con el tamaño del grupo cuidadoso. Esto es, el efecto de cada unidad porcentual es menor al crecer el grupo cuidadoso. En términos matemáticos se conjetura que $i'_*(Q_C) < 0$.

Para efecto de simulaciones y gráficas, se considera que $f_S = f_I = 0,1$ y $R_0 = 1,2$. Variamos el grupo cuidadoso en porcentajes que van entre el 2 y el 20%. Se corre el modelo con estos valores y luego se registran en la Tabla 4 los indicadores $i(Q_C)$ y $i_*(Q_C)$.

Como en todos los casos $f_S f_I = 0,16$, tenemos que $R_0^* = (1 - 0,84 Q_C\%) R_0$, con $R_0 = 1,5$. Esto es, por cada valor de Q_C , en los tres casos (a-c) se mantiene el R_0^* .

Aunque dado Q_C , R_0^* es el mismo en todos los casos (a-c), se observa que la prevalencia baja más para una disminución de f_I que la misma en f_S . Ahora, fijando (a), (b) o (c), al variar Q_C al alza, el tamaño del brote disminuye, como ya lo habíamos observado. Adviértase también el caso $Q_C\% = 20\%$ y (c), en que al principio (primeros días) el número de infectados tiende a la baja, pero siendo el número reproductivo básico mayor que uno luego hace un pulso suave.

Figura 4. Sensibilidad del brote a la distribución de la intensidad de la conducta cuidadosa entre susceptibles e infecciosos.



Simulación de los brotes para $Q_C \in \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$, con $R_0 = 1,5$ y $f_S, f_I \in \{0,2; 0,4; 0,8\}$, donde $f_S f_I = 0,16$.
Fuente: software MATLAB.

Discusión

Transformar el modo de vida (actividades vitales destinadas a satisfacer las necesidades grupales) de nuestras sociedades es una de las prioridades en salud pública³. Sin embargo, todo cambio debe partir

desde el ser individual, esto es desde el estilo de vida propio (auto-regulación para comprender mejor el entorno social y cultural al que pertenecemos). En este trabajo, a través de un modelo matemático de transmisión de una infección genérica, analizamos cuantitativamente el efecto epidemiológico de la existencia de grupos con conducta cuidadosa en salud. Los resultados demuestran que el

grupo que aplica acciones preventivas para su propio cuidado y el de los demás, es un factor nada despreciable para la disminución del riesgo sanitario en la población total. De allí la importancia de dirigir acciones educativas desde las entidades sanitarias, con el fin de promover en las personas este tipo de conducta, tanto en cantidad como en calidad. Un estudio reciente, que usa la metodología del modelamiento matemático, incorpora la presencia de comportamientos humanos adaptativos destinados a reducir el riesgo de enfermedades infectocontagiosas⁸.

Lograr articular una adecuada intervención social, orientada a mantener distanciamientos sociales (bajar la probabilidad de contacto contagioso) para reducir los riesgos de propagación de enfermedades infecciosas, sobre todo del estamento infeccioso, es el gran reto para la epidemiología moderna y la gestión en salud pública. Las poblaciones en general parecieran mostrar buena disposición a contribuir con las autoridades, siempre que exista convencimiento que ello repercute en un mejor estado de salud personal y general^{2,3}, por lo que sumar argumentos científicos, en nuestro caso de base matemática, siempre será un aporte a la sociedad.

En este trabajo se analizó la dinámica epidemiológica a través de una estructura que cruzó estados respecto a la enfermedad (susceptible - infeccioso - recuperado) con una compartimentación conductual entre ciudadanos cuidadosos y ciudadanos estándar (distráidos) frente al riesgo. Esto, bajo el supuesto de que toda persona cuidadosa interactúa con el medio a través de factores (f_S y f_I) de reducción de la tasa de contagio $B\%$, según si su condición sea susceptible o infeccioso. En orden a comparar o medir variación en el potencial infeccioso, esencialmente se calculó el número de casos secundarios que produciría la llegada de un primer infectado, para dos casos con (R_0^*) o sin (R_0) de grupo conductual cuidadoso. Así al suponer $f_S = f_I = f$, se detectan los pares ($f, Q_C\%$) que logran bajar R_0^* a un valor de no reemplazo de los infecciosos en la cadena de transmisión.

En la práctica, lo anterior se podría lograr interviniendo a través de programas educativos sobre los parámetros sociales Q_C y f presentes en R_0^* . Esto es, si hay condiciones para la propagación, $R_0^* > 1$ (zona no achurada en Figura 1), estas intervenciones deberían ser capaces en forma permanente de aumentar el tamaño del grupo cuidadoso y a la vez disminuir la probabilidad de contactos contagiosos (es decir, ir a la zona achurada de la gráfica). En general, según Fenichel y colaboradores², el implementar políticas públicas que motiven a la población para adquirir conciencia con respecto al distanciamiento epidemiológico interpersonal, es uno de los mayores retos para las autoridades en salud pública.

Conclusión

Para cuantificar la importancia del tamaño del tipo social cuidadoso, se definió un indicador de la prevalencia evitada ($i(Q_C)$). En este sentido, se observa un aumento de este indicador a medida que crece el tamaño del grupo cuidadoso. En contraste, un segundo indicador muestra que la prevalencia evitada per cápita ($i_*(Q_C)$), produce un patrón contrario al anterior. Esto lleva a concluir que cada individuo

cuidadoso, a menos número de conciudadanos del mismo tipo conductual, más contribuye en términos per cápita a evitar contagios futuros.

Finalmente, se exhiben evidencias bibliográficas que evidencian que para muchas enfermedades infectocontagiosas, la transmisión del agente patógeno ocurre en relación con la distancia que se mantiene de persona a persona en las relaciones sociales^{4,11}. Desde una perspectiva epidemiológica, el factor distancia y la frecuencia de contactos físicos es un aspecto que pudiera ser incorporado en los modelos matemáticos para introducir más realismo. Por ejemplo, en nuestro modelo los factores f_S y f_I permitirían elaborar en forma efectiva medidas de intervención sanitaria⁴.

En la sección Ideas claves, reconocemos que lo generalista del modelo es una limitante, y que aspectos tales como estructura etaria, tipos de inmunidad, mecanismos de transmisión, virulencia entre otros, no han sido incorporados. Sin embargo, estos aspectos merecen atención, aunque su incorporación en la modelización implica una mayor complejidad matemática e interpretativa que pudiera motivar nuevos estudios.

En relación con los objetivos propuestos, el modelo presentado es suficiente para entender el efecto general del grupo de comportamiento cuidadoso sobre la dinámica epidemiológica.

Elementos matemáticos

Ecuación diferencial modeladora

Se asume la población total igual a uno (normalización) para hacer las lecturas porcentualmente. Notemos que para cada $X \in \{E, C\}$ tenemos $[SX] + [IX] + [RX] = Q_X\%$ y además $Q_E + Q_C = 1$. La ecuación diferencial que modela el proceso es:

$$\begin{cases} [SE]' = -B\%[SE]([IE] + f_I[IC]) \\ [IE]' = +B\%[SE]([IE] + f_I[IC]) - [IE]/T \\ [RE]' = +[IE]/T \\ [SC]' = -f_S B\%[SC]([IE] + f_I[IC]) \\ [IC]' = +f_S B\%[SC]([IE] + f_I[IC]) - [IC]/T \\ [RC]' = +[IC]/T \end{cases} \quad (1)$$

Si introducimos las variables $[Y]$ definidas por $[Y] = [YE] + [YC]$, $Y \in \{S, I, R\}$, tenemos:

$$\begin{cases} [S]' = -B\%([SE] + f_S[SC])([IE] + f_I[IC]) \\ [I]' = +B\%([SE] + f_S[SC])([IE] + f_I[IC]) - [I]/T \\ [R]' = +[I]/T \end{cases}$$

Este sistema se transforma en el modelo susceptible - infeccioso - recuperado de siempre cuando $f_S = f_I = 1$, el que es coherente para que el grupo cuidadoso no haga diferencia en la tasa de contagio.

Cálculo del número reproductivo básico

Para el cálculo del número reproductivo básico, se utilizaron las técnicas y notaciones propuestas por P. Van der Driessche y Watmough¹⁷.

Se ordena el sistema (1) de modo que en las primeras ecuaciones aparezcan los grupos infecciosos, es decir, el vector de las variables del sistema con el nuevo orden queda:

$$([IE], [IC], [SE], [SC], [RD], [RC])^t,$$

Donde t significa trasposición.

El equilibrio libre de enfermedad está dado por $X^* = (0, 0, Q_E\%, Q_C\%, 0, 0)$, y las matrices F y V^{-1} evaluadas en X^* están dadas por:

$$F = \begin{pmatrix} B\%Q_E\% & f_I B\%Q_E\% \\ f_S B\%Q_C\% & f_S f_I B\%Q_C\% \end{pmatrix},$$

$$V^{-1} = \begin{pmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{pmatrix}.$$

La matriz de la siguiente generación está dada por FV^{-1} y se define el número reproductivo básico (R_0^*) como el valor del radio espectral de dicha matriz. En donde tenemos que:

$$FV^{-1} = B\%T \begin{pmatrix} Q_E\% & f_I Q_E\% \\ f_S Q_C\% & f_S f_I Q_C\% \end{pmatrix},$$

Notemos que el determinante de esta matriz es nulo y, por lo tanto, el valor propio dominante es:

$$R_0^* = [Q_E\% + f_S f_I Q_C\%] B\%T.$$

Notas

Roles y contribuciones de autoría

FCL: conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, redacción (revisiones y ediciones), supervisión, administración del proyecto. MCH: conceptualización, investigación, redacción (revisiones y ediciones). JPGJ: metodología, investigación, gestión de datos, presentación de datos, preparación de manuscrito (desarrollo del borrador original), visualización.

Fuentes de financiamiento

Los autores declaran que no hubo fuentes de financiación externas.

Declaración de conflictos de interés

Los autores han completado el formulario de declaración de conflictos de intereses del ICMJE, y declaran no haber recibido financiamiento para la realización del reporte; no tener relaciones financieras con organizaciones que podrían tener intereses en el artículo publicado, en los últimos tres años; y no tener otras relaciones o actividades que podrían influir sobre el artículo publicado. Los formularios pueden ser solicitados contactando al autor responsable o a la dirección editorial de la *Revista*.

Agradecimientos

Agradecemos a la Línea de Análisis Epidemiológico del programa de Doctorado en Modelamiento Matemático Aplicado, Universidad Católica del Maule.

Referencias

1. Funk S, Bansal S, Bauch CT, Eames KT, Edmunds WJ, Galvani AP, et al. Nine challenges in incorporating the dynamics of behaviour in infectious diseases models. *Epidemics*. 2015 Mar;10:21-5. | CrossRef | PubMed |
2. Fenichel EP, Castillo-Chavez C, Ceddia MG, Chowell G, Parra PA, Hickling GJ, et al. Adaptive human behavior in epidemiological models. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2011 Apr 12;108(15):6306-11. | CrossRef | PubMed |
3. González Pérez U. El modo de vida en la comunidad y la conducta cotidiana de las personas. *Rev Cuba Salud Pública*. 2015;31(2). | Link |
4. Read JM, Lessler J, Riley S, Wang S, Tan LJ, Kwok KO, et al. Social mixing patterns in rural and urban areas of southern China. *Proc Biol Sci*. 2014 Apr 30;281(1785):20140268. | CrossRef | PubMed |
5. Amaoka T, Laga H, Nakajima M. Modeling the Personal Space of Virtual Agents for Behavior Simulation. en: 2009 International Conference on CyberWorlds. IEEE; 2009:364-70. | Link |
6. Del Valle SY, Hyman JM, Chitnis N. Mathematical models of contact patterns between age groups for predicting the spread of infectious diseases. *Math Biosci Eng*. 2013 Oct-Dec;10(5-6):1475-97. | CrossRef | PubMed |
7. Agaba GO, Kyrychko YN, Blyuss KB. Time-delayed SIS epidemic model with population awareness. *Ecol Complex*. 2017 Sep;31:50-6. | Link |
8. Pharaon J, Bauch CT. The influence of social behaviour on competition between virulent pathogen strains. *J Theor Biol*. 2018 Oct 14;455:47-53. | CrossRef | PubMed |
9. Ibrahim AA, Elshafie SS. Knowledge, awareness, and attitude regarding infection prevention and control among medical students: a call for educational intervention. *Adv Med Educ Pract*. 2016 Aug 22;7:505-10. | CrossRef | PubMed |
10. Córdova-Lepe FD, Gutiérrez Jara JP, Muñoz Quezada MT. An index to quantify individual social responsibility in the decision to be vaccinated. *Medwave*. 2018 Aug 29;18(4):e7237. | CrossRef | PubMed |
11. Kool JL. Risk of person-to-person transmission of pneumonic plague. *Clin Infect Dis*. 2005 Apr 15;40(8):1166-72. | PubMed |
12. Gobierno de Chile, Ministerio de Salud. Guía para el Diagnóstico y Manejo Clínico de Casos de Influenza. Santiago, Chile: MINSAL; 2014. | Link |
13. Hall ET, Birdwhistell RL, Bock B, Bohannon P, Diebold, AR, Durbin M, et al. Proxemics [and Comments and Replies]. *Curr Anthropol*. 1968 Apr;9(2/3):83-108. | Link |
14. Shuter R. Proxemics and tactility in Latin America. *J Commun*. 1976 Summer;26(3):46-52. | PubMed |
15. Chis Ster I, Ferguson NM. Transmission parameters of the 2001 foot and mouth epidemic in Great Britain. *PLoS One*. 2007 Jun 6;2(6):e502. | PubMed |
16. Salje H, Lessler J, Paul KK, Azman AS, Rahman MW, Rahman M, et al. How social structures, space, and behaviors shape the spread of infectious diseases using chikungunya as a case study. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2016 Nov 22;113(47):13420-13425. | PubMed |
17. van den Driessche P, Watmough J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Math Biosci*. 2002 Nov;180(1-2):29-48. | CrossRef |

Correspondencia a

Universidad Católica del Maule
Avenida San Miguel 3605
Talca
Región del Maule
Chile
CP: 3480112



Esta obra de Medwave está bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 3.0 Unported. Esta licencia permite el uso, distribución y reproducción del artículo en cualquier medio, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente al autor del artículo y al medio en que se publica, en este caso, Medwave.