La vacuna solidaria

Ana Granados y Ana Portilla, Dept. Matemáticas, Saint Louis University, Madrid Campus.

Las matemáticas demuestran la solidaridad de las vacunas, porque 93 = 100%

Introducción

Hasta hace un par de años, cuando pensábamos en niños sin vacunar, casi sin querer nos imaginábamos un niño africano, o algún miembro de un pueblo aislado en mitad de la selva o las montañas. Quizás teníamos algún amigo que no había vacunado a sus hijos, y que supuestamente lo había hecho de manera informada, asegurándose (decía) de que esa decisión era la mejor. Pero en cuestión de pocos meses empezamos a leer noticias relacionadas con muertes por sarampión (¡Sarampión! pero si de pequeños lo pasábamos muchos…y morían algunos): un niño italiano con leucemia que había sido contagiado por sus hermanos no vacunados[1]; o más recientemente la joven francesa que no podía ser vacunada debido a su inmunodepresión[2]. Hay más: un brote que se originó en Disneylandia (California) y que en cuestión de un mes se había extendido a 125 casos repartidos en ocho Estados, correspondiendo más de la mitad de ellos a personas sin vacunar, casi todas por elección[3].

En muchas de estas noticias, además, se habla de un mágico umbral del «95%», que no se puede cruzar hacia abajo sin que haya peligro de propagación del sarampión, afirman.

Comenzamos a *googlear* y encontramos que el sarampión está volviendo al primer mundo en general, y a Europa en particular, de manera alarmante (hemos pasado de 1346 casos en 2008 a 19 570 en 2017 y la situación es crítica en varios países[4]; Véase Fig. 1); descubrimos el movimiento antivacunas, que en las redes es bastante activo y puede dar la falsa sensación de tener gran número de seguidores; descubrimos el esfuerzo de médicos e investigadores (hay otro *científicos* aquí al lado) que, con argumentos científicos y números en la mano, defienden la necesidad de la vacunación (aunque ellos son menos visibles en la red). [5]-[6]

Vamos a intentar contestar dos preguntas, siempre desde nuestro punto de vista matemático: 1) ¿Por qué algunas personas del primer mundo han decidido no vacunar(se)? ¿Es tan numeroso como ruidoso el movimiento antivacunas?; y 2), ¿pueden decirnos las matemáticas cómo erradicar los casos de sarampión del mapa y por qué ese 92-95% de vacunados parece dar un 100% de seguridad?

Vamos a centrarnos en Europa, donde hay suficientes vacunas de sarampión para todos y donde, además, son gratuitas. Aunque antes de seguir debemos decir que cuando estábamos pensando sobre esto, leímos un libro delicioso que nos sirvió como guía y que queremos recomendar desde ya a cualquier persona interesada en profundizar más en este tema[7].

¿Por qué algunas personas han decidido no vacunarse o no vacunar a sus hijos?

Tenemos a nuestro bebé sano en nuestros brazos, queremos lo mejor para él, y lo mejor es que ese niño siga lo más sano posible. Es decir, queremos tomar las decisiones que minimicen el riesgo de que a ese bebé le pase algo malo.

Vamos a plantearnos este problema desde el punto de vista de la teoría de juegos, donde los jugadores (en este caso los padres) somos seres *racionales* que tomamos las *mejores decisiones* a partir de la *información* que tenemos en ese momento. ¿Cómo podemos perder en este juego? Pues perdemos bien si nuestro bebé se contagia de la enfermedad para la que no le hemos vacunado, bien si la vacuna que le hemos puesto le provoca efectos secundarios. Queremos minimizar la pérdida del juego. Si traducimos esta situación en una ecuación, que a los matemáticos es lo primero que nos sale, diríamos algo así: *Pérdida = riesgo contagio + riesgo efectos secundarios*. O para ponerlo más matemático aún,

$P = RC + RES$

La pregunta real es cómo de grande es cada sumando. Cuando nos paramos a pensarlo y miramos a nuestro alrededor, normalmente no conocemos a tantos niños que en los últimos años hayan enfermado de sarampión (incluso la mayor parte de nosotros no conocerá a ninguno… porque las vacunas cumplen su misión). Así que, la ecuación anterior ya se ha convertido en

$P = {\scriptstyle RC} + RES$

Y parece obvio que la mejor decisión para la salud de nuestro hijo es no vacunarlo. Si además en junio del 2017 fuimos uno del millón de oyentes que escuchó el programa de radio «Levántate y Cárdenas», de Javier Cárdenas[8], o uno de los más de diez millones que vio a Donald Trump en el tercer debate durante las elecciones primarias del Partido Republicano en septiembre del 2015[9]-[10], *habremos sido informados* de que la vacuna del sarampión puede provocar autismo. Si ante la duda suscitada buscamos por la red, veremos que una investigación del médico inglés Andrew Wakefield publicada en 1999 por la prestigiosa revista *The Lancet* prueba esta afirmación[11]. Entonces, la lectura de la ecuación se parecerá más a algo como

$P = {\scriptstyle RC} + \mathbf{RES}$ **!!!!**

Y no vacunar a nuestro bebé sano parecerá no sólo la mejor decisión, sino casi la única sensata.

¿Por qué RES parece grande o por qué si te casas en Kentucky matas a un pescador?

La historia del fraude de Wakefield, que proclamó haber descubierto una conexión entre la vacuna triple vírica (sarampión, paperas y rubeola) y el desarrollo de autismo es bien conocida y está muy bien documentada[12]-[13]. De hecho, la historia termina como el rosario de la aurora: *The Lancet* tiene que retirar el artículo por carecer de base científica y Wakefield es expulsado de la medicina en Inglaterra y acusado por el Consejo General de Medicina del Reino Unido de, entre otras cosas, haber sometido a niños con problemas de desarrollo infantil a pruebas agresivas innecesarias.

El autor del artículo periodístico donde se destapó este fraude, Brian Deer, publicó un libro sobre su investigación[14]. Se supieron algunas cosas muy feas, como que en 7 de los 12 casos estudiados los trastornos habían aparecido **antes** de que los niños hubieran sido vacunados, y no después; o que un estudio de abogados había pagado a Wakefield para crear pruebas e iniciar una demanda contra las compañías que fabricaban la vacuna. El ex doctor Wakefield sigue muy activo en el movimiento antivacunas de Estados Unidos. De hecho, y junto a otros tres prominentes miembros de este movimiento, se reunió con Donald Trump en un acto para recaudar fondos para el Partido Republicano, meses antes de las declaraciones del candidato durante el debate de las primarias de dicho partido.[15]

Una investigación desarrollada en EE.UU. demostró rotundamente hace dos años que la vacuna del sarampión, las paperas y la rubéola no es la responsable de los casos autismo. Se trata de las conclusiones de un estudio realizado en más de 95 000 niños norteamericanos y que confirmó ***QUE DICHAS VACUNAS NO SE ASOCIAN A UN MAYOR RIESGO DE TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA***, ni siquiera en aquellos menores cuyos hermanos sufren esta patología.[16]

Volvamos a las matemáticas para intentar entender por qué el sumando RES está tan magnificado por el movimiento antivacunas y por qué se difunde más el bulo de que la vacuna produce autismo que la información real que lo desmiente.

Para empezar, la conexión vacuna-autismo no parece tan descabellada: es común que conozcamos a alguien que tenga un trastorno del espectro autista (la incidencia del TEA se estima en 1 de cada 100 nacimientos), y casi con seguridad le fue diagnosticado durante el segundo o tercer año de vida[17]. En la mayoría de los países europeos y en Estados Unidos, la vacuna triple vírica se administra durante este mismo periodo[18], así que si hacemos un gráfico mental entre la edad en la que los niños *desarrollaron* autismo y aquella a la que fueron vacunados, posiblemente nos salga una correlación altísima. Y entonces es fácil que caigamos en la trampa de pensar que, si están *correlacionados*, es porque una debe *causar* la otra.

Si comparamos el número de gente que se ahoga tras caerse de un barquito de pesca con el número de matrimonios en el estado de Kentucky, veremos que están altamente correlacionados[19] (¡con un índice del 95%!, una barbaridad en matemáticas). Sin embargo, y para tranquilidad de los kentuckianos que estén pensando en el matrimonio, es obvio que el hecho de que sean más propensos a pasar por la vicaría no provoca, de ninguna manera, que se ahoguen más pescadores.

Es decir, ***correlación no implica causalidad***. Incluso aunque la edad de detección del TEA y la de vacunación estuvieran altamente correlacionadas, una no tendría por qué ser causa de la otra, y eso es justamente lo que ocurre, como todos los trabajos científicos realizados hasta el momento afirman.

En esta época del *Big Data*, no es difícil establecer correlaciones entre situaciones bien dispares. A veces estas correlaciones tienen una finalidad simpática, como las que propone Tyler Vigen. Pero otras veces, la finalidad puede ser algo más siniestra, como cuando nos presentan datos (o no, a veces una afirmación sin más vale[20]) de aumento de inmigración en una zona correlacionados con datos de aumento de peligrosidad, e intentan producir la conclusión falaz de que el segundo seguro es causa del primero, a pesar de muchos estudios que evidencian la falsedad de esta relación[21]-[22].

Vale, no existe relación alguna, pero muchos de nosotros hemos oído este argumento, el movimiento antivacunas parece seguir creciendo, y el número de personas que decide no vacunar a sus hijos del sarampión parece ir en aumento, tal y como muestra el mapa del comienzo. ¿Nos dicen algo las matemáticas al respecto?

Pensemos en algunos nombres asociados al movimiento antivacunas que defienden que la triple vírica produce autismo: Jim Carrey, Jenny McCarthy, Alicia Silverstone, congresistas norteamericanos como Dan Burton, además de los ya mencionados Trump y Cárdenas. Se trata de personas muy famosas, con capacidad para hacerse oír en distintos foros (no solamente en canales dedicados a hablar de vacunas o autismo)

El movimiento antivacunas es bastante activo en las redes y puede dar la falsa sensación de tener gran número de seguidores.

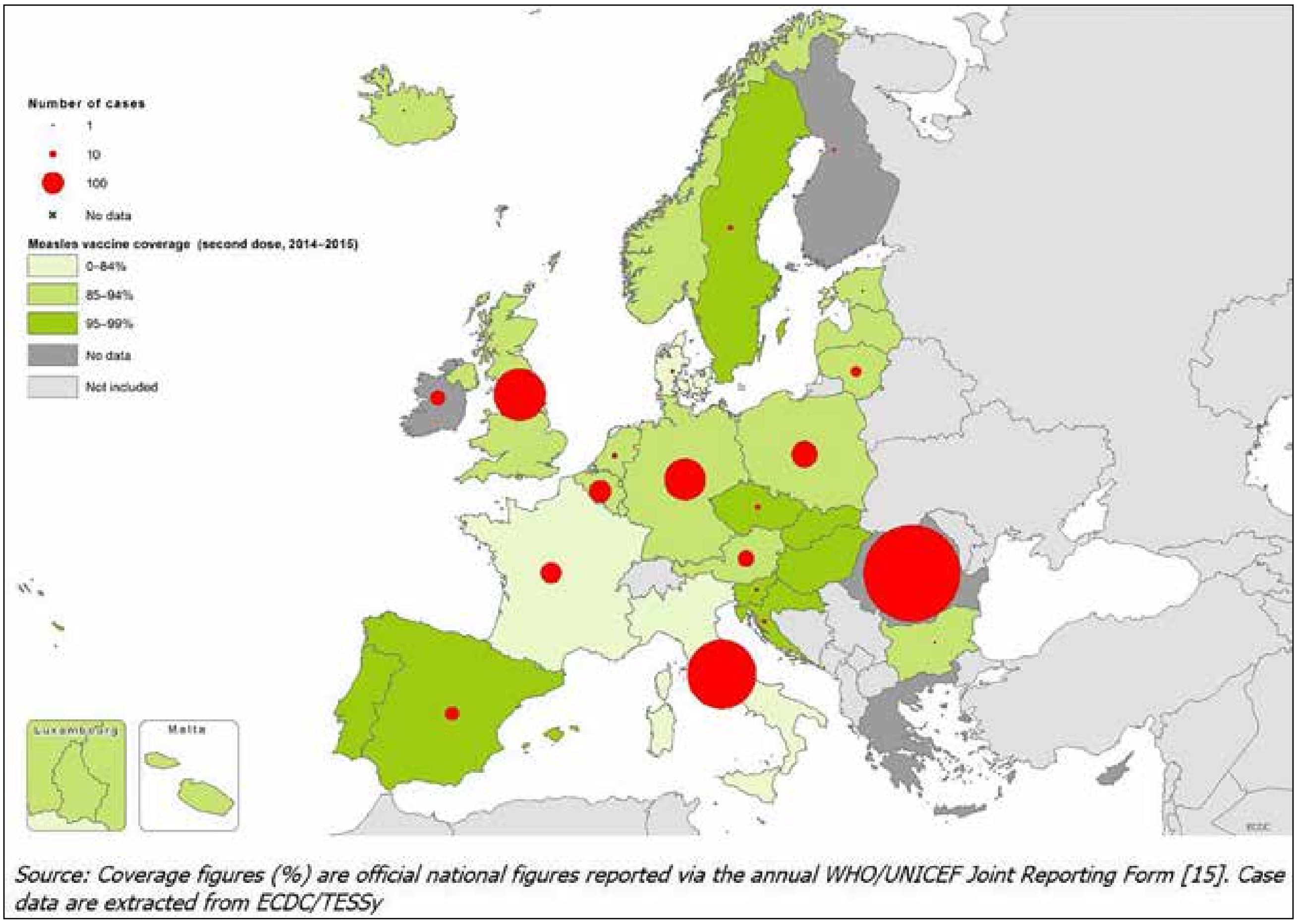

Fig. 1. Número de casos de sarampión en la UE entre el 1 de febrero de 2016 y el 31 de enero de 2017 (puntos rojos) y % de población vacunada (en tonos de verde). Figura: European Center for Disease Prevention and Control, pág. 2., https://ecdc.europa.eu/sites/portal/files/media/en/publications/Publications/27-02-2017-RRA-Measles-Romania,%20European%20Union%20countries.pdf

y expresar sus ideas. Son *influencers* del movimiento, por así decirlo. El caso concreto de Trump fue desmentido por expertos en TEA[23], pero no tuvo tanta repercusión.

No solo eso. Antes, cuando queríamos información sobre salud (u otras cosas), preguntábamos al médico. Ahora, y cada vez con mayor frecuencia, también buscaremos en internet. Un estudio[24] introdujo los términos «*vaccination*» e «*immunisation*» en Google y observó que los primeros diez resultados devolvieron páginas antivacunas (vamos, estupendo). Un análisis de vídeos de YouTube sobre vacunación encontró que el 32% se oponía a ella y que estaban mejor clasificados y tenían un mayor número de visitas que los provacuna[25]; el 43% de blogs en MySpace sobre vacunación la evaluaba de manera negativa, y refería a organizaciones críticas con las vacunas que, además, contenían información incorrecta.

El hecho de que la mayoría de la población siga vacunada indica que los antivacunas son muy pocos, pero tienen mucha voz, y pueden hacernos pensar a los demás que sus *creencias son mayoritarias* cuando están bien lejos de serlo. Estamos ante lo que se conoce como *el espejismo de la mayoría*[26], y queda muy bien explicado en el siguiente ejemplo[27]:

En la Figura 2 modelizamos una red de relaciones, por ejemplo, de un pequeño pueblo. Cada círculo representa una persona, y dos personas que se conocen están unidas por una línea. Los círculos azules simbolizan personas que piensan que la vacuna del sarampión produce autismo (*causalistas*, para abreviar); los círculos naranjas, a personas que no opinan así. Si un individuo se pregunta cuántos *causalistas* hay, lo razonable es que mire primero si sus amigos lo son. En el ejemplo concreto del pueblo de nuestro gráfico, se puede observar que la mayoría de los habitantes va a pensar que hay muchos, si únicamente se basa en su red de amistades para responder a esta pregunta. Pero esto es algo chocante, porque nosotros estamos viendo que, de hecho, la mayoría de los círculos son naranjas, es decir, *no causalistas.* La razón que explica este hecho es que los azules son *influencers*, es decir, individuos muy populares conocidos por todos los naranjas. La opinión de una minoría termina dando voz a la mayoría, y en algunas redes, la información sesgada a la que accedemos puede llevarnos a la con-

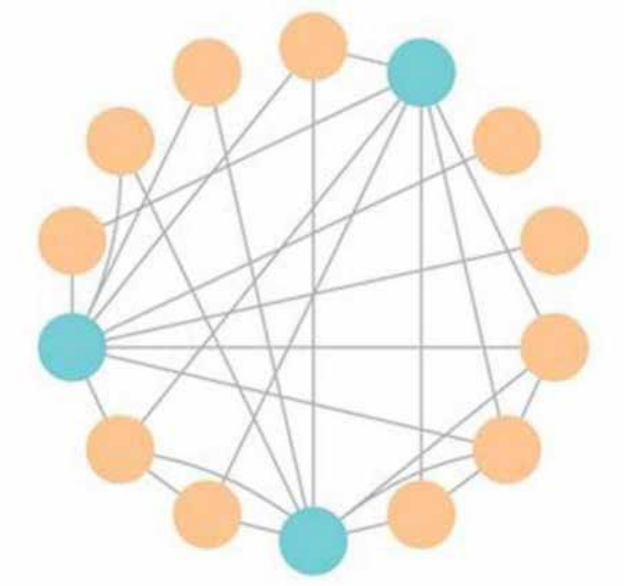

Fig. 2. Modelización de una red de relaciones entre habitantes de un pequeño pueblo.

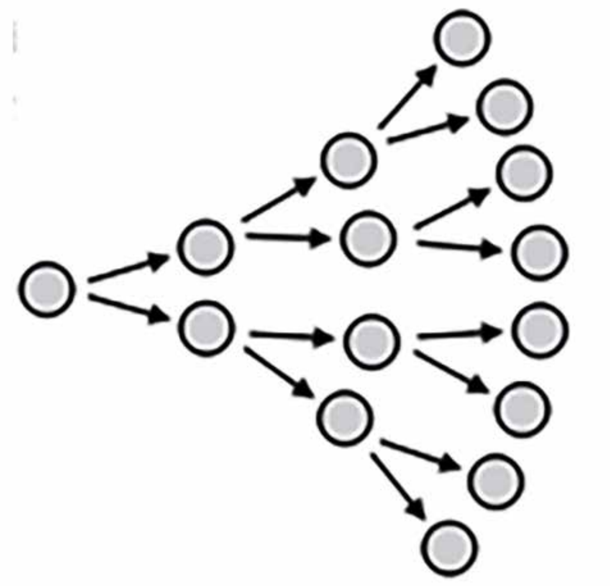

Fig. 3. Representación de la expansión de un hecho que sigue una función exponencial 2^m.

clusión errónea. En las redes sociales, la mayoría de las páginas están conectadas con páginas de opiniones similares, y las páginas más visitadas son también las más sugeridas. Por tanto, es posible pensar que nuestro pequeño pueblo del ejemplo anterior modeliza, en cierto sentido, las relaciones que se establecen en internet.

Mirando el tamaño de RC (Riesgo de Contagio) con las gafas correctas

Cuando al mirar la fórmula vemos un RC tan pequeñito, es porque estamos siendo víctimas de la *racionalidad miope*. Es decir, obviamos el hecho de que la mayor parte de la gente de nuestro entorno está vacunada, y justamente por ello percibimos el RC de la ecuación así de pequeño. Si, basándonos en eso, todos tomáramos la decisión de no vacunar, comenzaría a haber mucha gente en nuestro entorno susceptible de contraer el virus y el riesgo de ser contagiados por uno de los infectados aumentaría. Es posible incluso que el tamaño de ese primer sumando no solo volviera al que le corresponde de verdad en la ecuación inicial, sino que se podría incluso hacer subjetivamente mucho más grande. Esto es lo que el mapa que hemos visto al principio parece sugerir, y esto es lo que las matemáticas van a demostrar.

Para contestar a la pregunta de qué puede pasar si dejamos de vacunarnos, lo único que tenemos que hacer es predecir el futuro. Es decir, utilizar lo que ya sabemos para pronosticar la respuesta. Esto es justamente lo que hace un buen modelo matemático[28].

Cada mañana laboral tenemos que elegir la ropa que nos pondremos. Para ello, cada uno tiene en cuenta la información que ha acumulado hasta el momento (qué tipo de ropa hay en el armario, si va a desplazarse en transporte público o privado, si se experimentan grandes diferencias de temperatura entre el transporte y la calle, etc.); decide qué variables va a priorizar (se puede valorar mucho la comodidad y no dar tanta importancia a la diferencia de temperatura, por ejemplo). Además, también puede tener en cuenta otras cosas a la hora de decidir qué ropa ponerse, como si hoy habrá una reunión importante o si a la salida del

Las vacunas no se asocian a un mayor riesgo de trastorno del espectro autista, ni siquiera en aquellos menores cuyos hermanos sufren esta patología.

Campaña de vacunación del HPV en colegios de Sao Paulo Brazil March 2014 (Foto: Pan American Health Organization PAHO)

trabajo irá al gimnasio. Este es el modelo informal de cada uno, y está ajustado a nuestra experiencia pasada y los datos que tenemos. No le valdría, por ejemplo, a nuestro sobrino de cinco años. Además, cada día evaluamos el éxito de la elección de vestuario en función de lo cómodos que nos hemos encontrado o de cuánto frío hemos pasado, y esto permite ajustar y mejorar el modelo. Seguramente, tras más de veinte años con mañanas laborales, tendremos el modelo bastante perfeccionado.

Un modelo matemático es un proceso que usa matemáticas para representar, analizar y hacer predicciones sobre fenómenos del mundo real. Como en todo modelo científico, observamos lo que ocurre en la realidad, recogemos datos, encontramos relaciones entre ellos, traducimos esas relaciones a ecuaciones matemáticas, predecimos lo que ocurrirá solucionando esas ecuaciones, y finalmente validamos el modelo comparando la realidad con los resultados predichos, para poder ir ajustando el modelo hasta que el resultado sea satisfactorio. Es un modelo científico, así que cualquiera podrá reproducirlo.

Por ejemplo, en una fiesta que organiza nuestra hija en casa, observamos que durante el primer minuto hay 1 persona morena vestida de azul; en el segundo minuto, 2 personas, una morena y otra pelirroja, vestidas ambas de azul; en el tercer minuto, 6 personas, 3 morenas, 2 rubias y 1 pelirroja, todas vestidas de azul; y el cuarto minuto, 8 personas, todas morenas y todas vestidas de azul. Si estamos interesados en saber si vamos a tener que pedirle a algún vecino que nos deje trasladar la mitad de la fiesta a su casa, nos interesa predecir el número de personas que habrá el décimo minuto o el vigésimo; solo la información relativa al número de personas es relevante, y en cambio descartaremos el color de pelo o ropa. En estado de pánico, notamos que el número de invitados varía con el tiempo de manera que en el minuto m hay $2m$ personas. En lenguaje matemático, nuestro modelo propuesto es $N(m) = 2m$. Ahora observaríamos qué ocurre durante los siguientes minutos y en el caso de que esta relación se siga *casi siempre* diremos que el modelo es válido y que, por tanto, en dos horas habrá 120 invitados y, definitivamente, necesitaremos varias casas vecinas. En otro caso, iremos ajustando el modelo. Obviamente, cuanto más datos tenga para validar mi modelo o más observaciones pueda hacer, más fiable será.

Casi siempre, los fenómenos que observamos están en cambio continuo, y lo que medimos es justamente ese cambio. Por ejemplo, si volvemos al caso del sarampión, más que cuánta gente infectada hay en un momento concreto, nos puede interesar *cómo está cambiando* ese número de infectados, es decir, si está aumentando o no (y a qué ritmo), pues esto nos dará más información a la hora de valorar si, por ejemplo, podemos estar ante un peligro de epidemia y sabremos mejor cómo actuar. En matemáticas, la herramienta que nos permite estudiar cómo cambia un sistema es la conocida *derivada.*

Un modelo de juguete y una poda de árboles

Si en lugar de una fiesta razonable como la de arriba hubiéramos organizado otra con la condición un poco loca de que el primer minuto llegara un invitado, el segundo viniera un amigo del invitado que ya estaba, el tercer minuto viniera un amigo nuevo por cada invitado que ya estuviera, y así sucesivamente, en 32 minutos tendríamos en casa a toda la población mundial, y la amistad con los vecinos se habría perdido en el minuto 5 o 6, más o menos. Resulta que lo que está pasando es que, cada minuto, el número de invitados se va *doblando*. Mi modelo ahora sería $N(m) = 2^m$, es decir, está representado por la conocida función exponencial.

Pues así se comportaría nuestro sarampión, solo que multiplicando por 18 cada vez en lugar de por 2. Vamos a jugar un poco con un modelo muy simplificado de cómo se propaga una enfermedad contagiosa, así, como para andar por casa[29].

Cada enfermedad tiene asociado un ***número básico de reproducción*** denotado por R_0 , que estima el número promedio de casos nuevos que genera un caso dado a lo largo de un periodo infeccioso[30]. En el caso de nuestra fiesta loca, $R_0=2$; en el caso del sarampión, R_0 varía entre 12 y 18.

Una manera muy visual de ver cómo está aumentando el número de invitados en mi fiesta es usando un arbolito como el de la figura 3. Cada nodo da lugar a dos nuevas ramas y, como vemos, el árbol se hace rápidamente muy frondoso.

Simplificando mucho las cosas, de cada nodo del *árbol del sarampión* brotarían 12 ramas en el mejor de los casos, y 18 en el peor (básicamente cierto, porque la probabilidad de contagio a personas no protegidas es del 90%). Si quisiéramos evitar que el número de ramas creciera descontroladamente, es decir, si quisiéramos evitar que el sarampión se propagara, de cada nodo deberíamos podar 11 en el primer caso y 17 en el segundo (ya hemos visto que, aunque dejásemos solo dos ramas, los números se irían de madre y se infectaría toda la población del planeta en un pispás). Claro, puestos a podar, ganas dan de podar todas las ramas y terminar de manera radical con el sarampión, ¿verdad? Sin embargo, aquí, *podar* equivale a vacunar y, desgraciadamente, no todo el mundo puede ser vacunado (niños inmunodeprimidos, personas con cáncer, embarazadas, etc.), así que nuestro modelo debe también reflejar esta realidad y para ello hay que dejar siempre una rama sin podar.

Así, este modelo tan de juguete nos dice que, para tener controlado el sarampión, deberíamos vacunar (inmunizar, podar) 11 de cada 12 ramas o 17 de cada 18, es decir, entre el 92% y el 95% de la población.

Es matemático: **la vacuna es solidaria**. Y esto es válido para todas las enfermedades para las que existe vacuna; el porcentaje de gente que necesita ser vacunada para que **todos** estemos protegidos dependerá de lo grande que sea R_0 , pero siempre podemos calcularlo, y, por tanto, erradicar enfermedades contagiosas para las que se disponga de vacuna. Este fenómeno se conoce como *efecto rebaño*, y la idea que hay detrás es que cuando llueve, si hay un número suficiente de personas con sus paraguas abiertos, podremos caminar sin mojarnos aunque nosotros no dispongamos de uno. Pero como en alguna zona haya poca densidad de paraguas, ahí, sin duda nos mojaremos.

Es verdad, todo esto lo estamos deduciendo de un modelo de juguete. ¡Vamos con el de verdad!

Modelo SIR-v, o cómo las matemáticas demuestran la solidaridad de la vacuna

El modelo SIR se propuso por primera vez en 1927[31], y se ajusta muy bien a una enfermedad como el sarampión. Antes de seguir, queremos volver a referir al lector al capítulo 5 de [8] para una explicación más detallada y muy clara de las matemáticas tras el modelo.

Dividimos la población de un determinado lugar (o de todo el mundo, da igual) en tres grupos: personas *susceptibles* de contagiarse de sarampión, personas *infectadas* y personas *recuperadas* (de ahí el imagi-

Un estudio introdujo los términos «*vaccination*» e «*immunisation*» en Google y observó que los primeros diez resultados devolvieron páginas antivacunas.

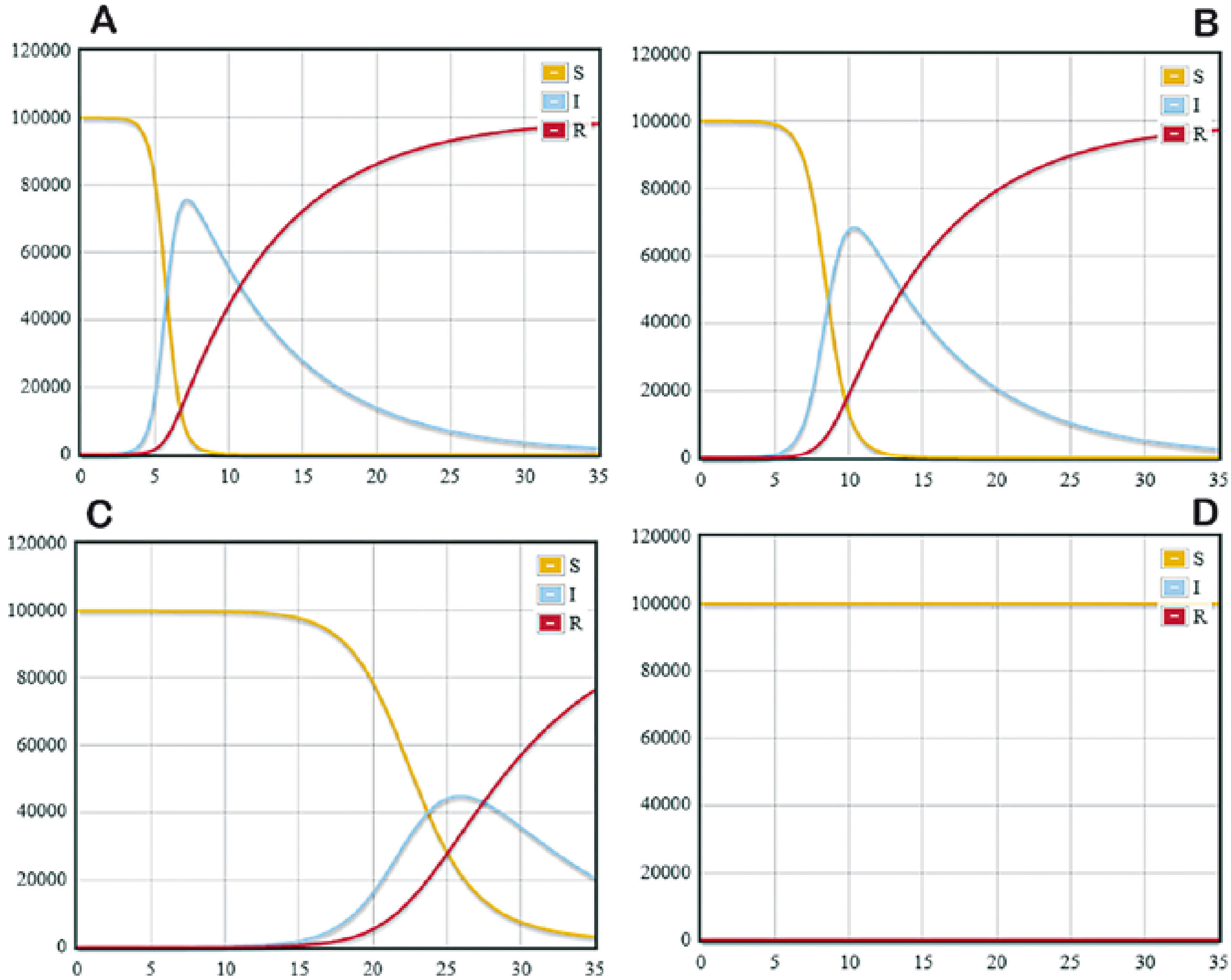

Fig. 4. Resultados del modelo para porcentajes de vacunación del 0% (A), 30% (B), 70% (C) y 93% (D), en una población de 100 000 personas. S: Personas susceptibles; I: Personas infectadas; R: Personas recuperadas.

nativo nombre de SIR). Por *personas recuperadas* vamos a entender aquellas personas que ya han pasado el sarampión y, o bien han salido de la enfermedad, o bien se han muerto (es una acepción algo morbosa de la palabra *recuperado*, es cierto). Lo que este modelo nos propone es algo bien razonable, y hace hincapié en cómo la población de estos tres grupos cambia con el tiempo (es decir, estamos hablando de derivadas). El número de recuperados aumentará solo con el de infectados; por otro lado, cada vez que un susceptible y un enfermo se encuentren, el primero podrá contagiarse, así que estos encuentros hacen que la población de susceptibles crezca; finalmente, la población de infectados aumentará tanto como la de susceptibles disminuya, y disminuirá tanto como aumente el grupo de recuperados.

Si traducimos este párrafo a lenguaje matemático y hacemos unos cuantos cálculos, estos nos dicen que la única forma que tenemos para controlar el aumento en el número de infectados (vamos, de controlar una epidemia) es reducir al máximo el número de personas susceptibles *antes de que llegue el virus.* No existe otra forma. Y la única manera de conseguirlo es vacunando.

Y, además, al igual que hacíamos en el modelo de juguete con la poda de árboles, en este modelo de verdad, muy ajustado al sarampión, podemos cuantificar *qué porcentaje* tenemos que vacunar: al menos

$$\frac{R_0-1}{R_0}$$

¡justo lo que nos decía nuestro modelo de juguete!

Cómo conseguir que 95% = 100%. Y matemáticamente probado

Como una imagen vale más que mil palabras, ilustramos los resultados que predice el modelo expuesto arriba con cuatro gráficos[32] (FIG. 4). Vamos a considerar una población de 100 000 habitantes, donde al principio no hay más que un infectado. En cada gráfico vemos tres curvas, y cada una de ellas va a representar la población de susceptibles, infectados y recuperados según van pasando los días. Lo que diferencia un gráfico de otro es el porcentaje de población vacunada al principio: 0%; 30%; 70% y 93% respectivamente.

Es interesante observar cómo no solo el máximo número de infectados (el *pico* de la gráfica azul) va siendo más bajo según aumenta el porcentaje de vacunados, sino que además tarda más tiempo en producirse (con lo cual permite una reacción mayor ante epidemia) y que en el último gráfico no hay infectado alguno. Con una tasa de vacunación del 93%, **todos estamos protegidos**, incluso ese 7% que no se vacunó.

Conclusión

El modelo SIR-v lleva años de datos recogidos, mejoras, ajustes, y validaciones con resultados de vacunaciones sistemáticas de población[33]. Vamos, que es un buen modelo, nos podemos fiar de él.

Los gráficos de la Figura 4 nos ilustran qué ocurrirá si dejamos de vacunar. El brote de sarampión que crece en Europa (o en Estados Unidos, o Australia, o…) no es sino el «te lo dije» que las matemáticas nos están echando en cara. Y es que hemos demostrado que la vacuna es solidaria y que gracias a ella, 93 es igual a 100 (y… ¿en qué otras situaciones ganamos siete así, por la cara?).

Referencias:

(enlaces verificados a enero de 2019)

1 https://www.elespanol.com/mundo/europa/20170623/225977935_0.html, también https://www.redaccionmedica.com/secciones/sanidad-hoy/muere-un-nino-por-sarampion-contagiado-por-sus-hermanos-sin-vacunar-5093

2 https://www.elperiodico.com/es/sanidad/20180711/muerte-marine-eraville-sarampion-francia-antivacunas-6936401

3 Measles outbreak--California, December 2014 - February 2015. Zipprich J, Winter K, Hacker J, et al. https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm6406a5.htm. MMWR Morb Mortal Wkly Rep. 2015;64:153–154.

4 https://ecdc.europa.eu/en/measles?bid=PvfemqWxAAQYOzosPJvnsosDnuaebV_7PlQZ1XBTokM&items_per_page=5&nid=20411&pager_type=infinite_scroll&sort_by=title&sort_order=ASC&tid%5B0%5D%5Btarget_id%5D=83&type%5B1439%5D=1439&page=2

5 Comité Vacunas –AEP, @CAV_AEP¶

6 Lucía, mi Pediatra, @luciapediatra, www.luciamipediatra.com

7 Clara Grima Ruiz, Enrique Fernández Borja (2017) *Las Matemáticas vigilan tu salud: Modelos sobre epidemias y vacunas*. El Café Cajal.

8 El País, junio 2017, «Javier Cárdenas propaga el bulo de que las vacunas causan autismo», https://elpais.com/elpais/2017/06/07/hechos/1496855559_006331.html

9 GOP Debate USA, September 2015, https://www.washingtonpost.com/video/politics/carson-trump-paul-debate-vaccines-and-autism/2015/09/17/1f117b78-5d4c-11e5-8475-781cc9851652_video.html?utm_term=.939d95530db1

10 Tom Huddleston Jr, Octubre 2015, "The Republican debate completely smashed CNBC's ratings record", http://fortune.com/2015/10/29/cnbc-gop-debate/

11 A.J.Wakefield et al., 1998, RETRACTED: "Ileal-lymphoid-nodular hyperplasia, non-specific colitis, and pervasive developmental disorder in children", *The Lancet*, Vol. 351, issue 9103, P637-641.

12 S.H.Murch et al, 2004, "Retraction of an interpretation", *The Lancet*, Vol. 363, issue 9411, P750.

13 Autism Speaks, 2015, "No MMR-Autism Link in Large Study of Vaccinated vs. Unvaccinated Kids", https://www.autismspeaks.org/science-news/no-mmr-autism-link-large-study-vaccinated-vs-unvaccinated-kids

14 https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/periodista-destapo-fraude-cientifico-intento-vincular-una-vacuna-autismo/388605/

15 Artículo de Andrew Buncombe, mayo 2018, "Trump claims vaccines and autism are liked but his own experts vehemently disagree", *The Independent*, https://www.independent.co.uk/news/world/americas/trump-vaccines-autism-links-anti-vaxxer-us-president-false-vaccine-a8331836.html

16 A. Jain, J. Marshall, A. Buikema et al, 2015, "Autism Occurrence by MMR Vaccine Status Among US Children With Other Siblings With and Without Autism", *JAMA*, 313(15), P1534-1540, https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2275444

17 Confederación Autismo España, http://www.autismo.org.es/sobre-los-TEA/trastorno-del-especto-del-autismo

El brote de sarampión que crece en Europa (o en Estados Unidos, o Australia, o...) no es sino el «te lo dije» que las matemáticas nos están echando en cara.

Foto:Johnny Silvercloud, https://www.flickr.com/photos/johnnysilvercloud/32666033382/in/photolist-RLzXE7-Uka1NX/

y Autism Europe, http://www.autismeurope.org/about-autism/prevalence-rate-of-autism/

18 Measles, Mumps and Rubella (MMR) Vaccination, Centers for Disease Control and Prevention, https://www.cdc.gov/vaccines/vpd/mmr/public/index.html

19 Spurious correlations, http://www.tylervigen.com/spurious-correlations. Más en el libro de Tyler Vigen, *Spurious Correlations*, 2015, Hachette Books.

20 Véase, por ejemplo https://www.eldiario.es/andalucia/NovusOrbis/delincuencia-inmigracion-fenomenos-relacion_6_737086321.html, o también https://www.larazon.es/historico/el-76-de-los-madrilenos-cree-que-la-inmigracion-aumenta-la-delincuencia-PJLA_RAZON_36419

21 «¿Han disparado los inmigrantes la delicuencia en Alemania?» https://www.elconfidencial.com/mundo/2018-08-29/alemania-inmigrantes-ultraderecha-delincuencia_1609203/

22 https://www.factcheck.org/2018/06/is-illegal-immigration-linked-to-more-or-less-crime/ o también, https://www.eldiario.es/andalucia/NovusOrbis/delincuencia-inmigracion-fenomenos-relacion_6_737086321.html

23 Autistic Self Advocacy Network, September 2015, ASAN Statement on GOP Primary Debate Comments on Autism and Vaccination, https://autisticadvocacy.org/2015/09/asan-statement-on-gop-primary-debate-comments-on-autism-and-vaccination/

24 P. Davies, S. Chapman, J. Leask, 2002, "Antivaccination activists on the world wide web", *Arch Dis Child*; vol 87, 22-25

25 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6122668/#REF38, sección Technology and its effects on anti-vaccination movement

26 K. Lerman, X. Yan, X. Wu, (2015), "The Majority Illusion in Social Networks", https://arxiv.org/abs/1506.03022

27 K. Schaul, October 2015, "Majority Illusion: a quick puzzle to tell whether you know what people are thinking", *Independent*, science section, https://www.independent.co.uk/news/science/majority-illusion-a-quick-puzzle-to-tell-whether-you-know-what-people-are-thinking-a6689636.html

28 Cathy O'Neil, 2017, *Armas de destrucción matemática: cómo el big data aumenta la desigualdad y amenaza la democracia* (capítulo 1), Capitan Swing Libros S.L

29 J. Gog, A. Conlan, "Life saving maths: How does vaccination work?" *Motivate, maths enrichment for schools*, University of Cambridge, https://motivate.maths.org/content/MathsHealth/Vaccination/

30 https://es.wikipedia.org/wiki/Ritmo_reproductivo_b%C3%A1sico

31 https://en.wikipedia.org/wiki/Kermack%E2%80%93McKendrick_theory

32 Gráficos generados en http://www.public.asu.edu/~hnesse/classes/sir.html?Alpha=2.14&Beta=0.14&initialS=100000&initialI=1&initialR=0&iters=30 cambiando los parámetros de manera necesaria. https://ibmathsresources.com/2014/05/17/modelling-infectious-diseases/

33 F. Brauer, P. van den Driessche, J. Wu (Eds.), 2008, *Mathematical Epidemiology*, chapter 2, https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783540789109-c1.pdf?SGWID=0-0-45-532715-p173817706. O también https://mspace.lib.umanitoba.ca/bitstream/handle/1993/32615/allotey_clifford.pdf?sequence=1