Entender una epidemia

El coronavirus en España, situación y escenarios

Antonio Guirao Piñera

El estudio de la dinámica de las epidemias permite comprender su crecimiento, en buena parte exponencial. La ciencia ofrece la base para diseñar las medidas de contención adecuadas frente a estos fenómenos de avalancha que sin control adquieren enormes dimensiones.

Las epidemias crecen de forma exponencial en gran parte de su desarrollo, y si no se controlan pueden alcanzar dimensiones enormes. Conocer la dinámica de una epidemia permite anticipar su evolución y diseñar adecuadamente las medidas de contención. Se estudian los parámetros de crecimiento exponencial y la fase de saturación, y se explica el número reproductivo como parámetro de control. El modelo matemático Susceptibles-Infectados-Recuperados (SIR) permite obtener las curvas epidemiológicas y cuantificar el tamaño de la epidemia. Se presenta la situación de la epidemia de coronavirus en España y se aplica el modelo para hacer predicciones.

1. Introducción

La epidemia del nuevo virus SARS-CoV-2, que produce la enfermedad llamada COVID-19, nos ha traído un nuevo repertorio de conceptos y términos: pico, aplanar la curva, número reproductivo, crecimiento exponencial, infectados, inmunidad, vacunas, medidas de contención… El objetivo de este artículo es presentar de forma divulgativa algunas nociones sobre los mecanismos de propagación y contención de una epidemia. En particular, nos acercamos a la situación de la epidemia de coronavirus en España a partir de los datos reales y de algunas simulaciones.

Una epidemia es un fenómeno de avalancha, que se autoamplifica pudiendo llegar a dimensiones exageradas. Hay muchos fenómenos similares, como la propagación de un incendio voraz por el bosque, que también crecen de forma exponencial, al menos en sus inicios. Esto ayudará a entender, sobre una base científica, los límites en los cuales se desarrolla una epidemia o una pandemia a nivel global.

Una epidemia puede controlarse, pero hay que entender sus mecanismos para poder hacerlo de forma efectiva. El crecimiento es una cuestión de ganancias y pérdidas. Para extinguir la epidemia conviene reducir sus ganancias y aumentar sus pérdidas, lo que se consigue actuando de forma combinada con medidas de distanciamiento social, higiene, rastreo y detección rápida de enfermos. Cuantitativamente, ello se traduce en reducir por debajo de la unidad el "número reproductivo", que definiremos después.

Un gran problema frente a una epidemia es que la estudiamos con datos en diferido. Nunca sabemos el número real de enfermos que hay en la población en un cierto instante, porque muchos aún están incubando el virus. Además, se desconoce el número de enfermos asintomáticos, y por ello los casos confirmados podrían ser sólo la punta del iceberg.

Los modelos permiten realizar predicciones en posibles escenarios. Para ello es muy útil el conocimiento de cómo se ha comportado la epidemia en otros países donde ha brotado antes. Las estrategias de otros países también ayudan al diseño de medidas de control más eficaces. Lógicamente, las medidas que cada país adopta también tienen en cuenta su idiosincrasia de acuerdo a las consecuencias sociales y económicas derivadas de dichas medidas.

2. Crecimientos exponenciales y epidemias

Crecimiento lineal y exponencial

Cuando una magnitud crece de forma lineal se suma algo en cada paso. En un crecimiento exponencial la magnitud se multiplica por algo en cada paso, lo que implica que crece cada vez más rápido. Por ejemplo, si cada mes guardo en la hucha 100 € mis ahorros crecen de forma lineal y al cabo de un año tendré 1.200 €. Sin embargo, si una empresa, partiendo de 1 €, obtiene un beneficio mensual del 100 %, sus ganancias al final de cada mes (2 €, 4 €, 8 €… y 4.096 € al final del

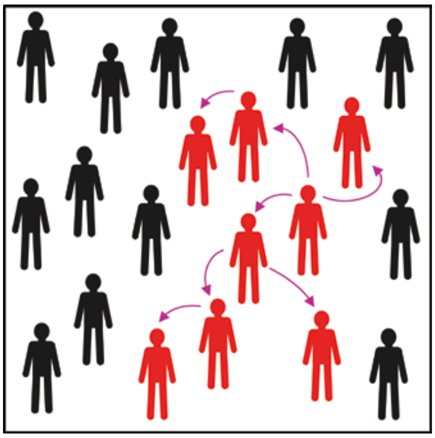


Fig. 1. Crecimiento de los contagios en una población.

año) habrán crecido exponencialmente. El crecimiento lineal sigue una progresión aritmética y el exponencial sigue una progresión geométrica. El tipo de crecimiento que se produce en las epidemias como la del coronavirus es de tipo exponencial.

En la naturaleza y en la sociedad encontramos muchos fenómenos donde las magnitudes crecen con el tiempo de forma exponencial. En biología son exponenciales: el crecimiento del número de bacterias en un cultivo, la división celular a partir del embrión o el crecimiento de un tumor. En física: las reacciones nucleares en cadena y la amplificación de la luz en un láser. En ciencias sociales, ejemplos clásicos son: el aumento de la población humana y el crecimiento económico de un país.

Fase exponencial. Tasa de crecimiento y tiempo de duplicación

Supongamos que cada persona infectada por un patógeno contagia a otra persona cada día. La progresión diaria de infectados sería: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64… Cada día se duplicaría el número de infectados. A partir de un solo enfermo (*paciente 0*), tras n días habría 2^n contagiados. A ese ritmo, los 47 millones de españoles habríamos caído enfermos en 25 días, y el planeta entero en poco más de un mes.

Si el día n hay una población de P_n individuos y cada uno genera otros α individuos diarios, al día siguiente habrá $P_{n+1} = P_n + \alpha\, P_n$. En general, si partimos de P_0 individuos, el día n hay

$$P_n = P_0\,(1+\alpha)^n \tag{1}$$

que es la expresión de una progresión geométrica de *razón* $1+\alpha$.

Por tanto, $\alpha = (P_{n+1} - P_n)/P_n$ es una *tasa de crecimiento poblacional* que nos dice cuánto ha crecido (si es positiva) o decrecido (si es negativa) la población respecto al valor previo. En el ejemplo anterior $\alpha = 1$ y, en términos porcentuales, la población de infectados crece diariamente un 100 %. Esta definición se aplica a cualquier crecimiento exponencial, no sólo a las epidemias. Por ejemplo, si en España el crecimiento demográfico en 2020 es del 0,5 %, en 2021 habría $(1 + 0{,}005)\cdot 47$ M = 47,235 M (235 mil personas más).

Si planteamos las ecuaciones con variables continuas, el crecimiento de la población en función del tiempo t viene dado por

$$\frac{dP(t)}{dt} = \lambda P(t) \rightarrow P(t) = P_0 \exp(\lambda t) \tag{2}$$

donde λ es la *tasa de crecimiento exponencial*, que tiene dimensiones de tiempo inverso y que puede calcularse como

$$\lambda = \ln \frac{P(t+1)}{P(t)} \tag{3}$$

El *tiempo de duplicación* es el tiempo necesario para que la población se duplique, y se calcula a partir de la tasa:

$$t_d = \frac{\ln 2}{\lambda} \tag{4}$$

En la fase exponencial de una epidemia, las Ecs. 2 y 3 pueden aplicarse indistintamente al número de casos acumulados (total de personas afectadas) o al número de nuevos casos diarios (nuevos contagios), pues ambas magnitudes crecen exponencialmente. Pero en la fase de decrecimiento la Ec. 3 para calcular la tasa (que sería negativa) se aplica considerando que $P(t)$ son los nuevos contagios.

Por ejemplo, el 10 de marzo hubo en España 2.308 casos confirmados de coronavirus, y al día siguiente 3.284 casos [1]. Utilizando la Ec. 3, con el tiempo expresado en días, la tasa de crecimiento resulta $\lambda = 0{,}35$ días^{-1} (un 42 % en términos porcentuales, ya que $\alpha = 0{,}42$; nótese que $\lambda = \ln\,(1+\alpha)$). Los casos se doblaban en aproximadamente 2 días durante esa semana previa al estado de alarma. Más adelante, por ejemplo del 2 al 3 de abril, los nuevos contagios bajaron de 7.591 a 7.280 y, por tanto, la tasa pasó a ser negativa: $\lambda = -0{,}04$ días^{-1} y los nuevos casos se reducían a la mitad cada 17 días.

Saturación del sistema y curva logística

En el mundo real el crecimiento exponencial no puede ocurrir indefinidamente, debido al agotamiento de recursos (por ejemplo, las bacterias en una charca dejan de multiplicarse cuando ya no hay bastantes nutrientes). En un sistema finito, tras una fase de crecimiento exponencial se llega a la *saturación* del sistema y se alcanza una situación de equilibrio o estacionaria donde la magnitud deja de crecer. En la dinámica del sistema, ello se refleja en que el número de nuevos individuos que surgen no es proporcional a los existentes $P(t)$, sino proporcional a dicho número multiplicado por la *capacidad del sistema*:

$$P(t)\cdot\left(\frac{P_{max} - P(t)}{P_{max}}\right) \tag{5}$$

donde P_{max} es el número máximo de individuos que podrían alcanzarse en un cierto ecosistema. El factor de la derecha es la capacidad del sistema. El crecimiento está gobernado por la llamada *ecuación logística*:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \lambda P(t)\left(\frac{P_{max} - P(t)}{P_{max}}\right) \tag{6}$$

cuya solución es un caso particular de función sigmoidea:

$$P(t) = \frac{P_0\,P_{max}}{P_0 + (P_{max} - P_0)\exp(-\lambda t)} \tag{7}$$

En una epidemia llamamos *susceptibles* a las personas no inmunes ni vacunadas que todavía no han enfermado. Así, la capacidad del sistema en un tiempo dado es el número $S(t)$ de personas susceptibles relativo a la población total N, es decir $S(t)/N$. En el caso de la COVID-19, como aún no existe una vacuna, la capacidad del sistema es el porcentaje de la población que aún no ha enfermado. Cuantas menos personas sanas quedan, menos contagios se producen (el sistema se autolimita). El crecimiento puramente exponencial sólo se da en la primera etapa de una epidemia, después se va ralentizando. La curva que describe el número total de personas afectadas es una función sigmoidea (Figura 2).

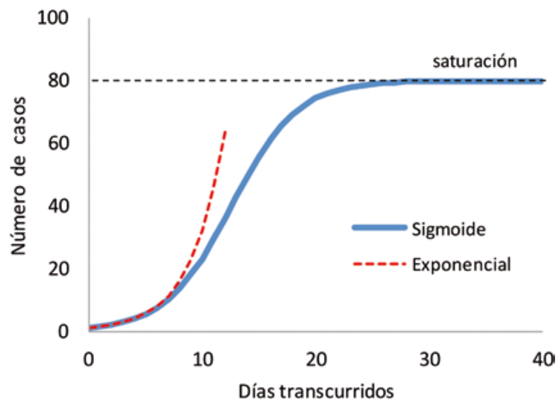


Fig. 2. Curva logística para una población total de 100 individuos con 20 vacunados. La curva satura en 80 casos. Se muestra también el comportamiento puramente exponencial.

3. El número reproductivo

Tasas de contagio y de retirada

- *Tasa de infección* o de contagio, a. Es el número medio de individuos contagiados por otro individuo ya infectado, por unidad de tiempo, en una población totalmente susceptible. Depende de la infectividad del virus, del número medio de contactos interpersonales y de las medidas higiénicas en una determinada población.
- *Tasa efectiva de infección*. Es la tasa de infección multiplicada por la proporción de individuos susceptibles respecto a la población total: aS/N. Da cuenta de que la probabilidad de contagio se reduce a medida que quedan menos individuos susceptibles en el entorno.
- *Periodo infeccioso*, τ. Es el tiempo medio durante el cual un infectado puede contagiar a otros. Tras este periodo, el infeccioso deja de ser activo porque queda en cuarentena, se ha curado o ha fallecido. Si este periodo es muy largo la epidemia crecerá más fuerte, porque una misma persona seguirá transmitiendo la infección durante más tiempo.
- *Tasa de retirada*, b. Es la inversa del periodo infeccioso: $b = 1/\tau$.

Supongamos una población de 100 personas de las cuales 50 están inicialmente infectadas y 50 sanas (susceptibles), y que la tasa de infección es a = 0,4 personas/día. Tomamos variables discretas por simplicidad en este ejemplo. Así, los 50 infectados transmiten la enfermedad a 10 nuevos ese día. Por otro lado, supongamos que las personas que han enfermado son infecciosas durante un promedio de 10 días. La tasa de retirada será $b = 1/10 = 0{,}1$ personas/día y, así, de los 50 infecciosos abandonarán el grupo 5 individuos ese día. Al día siguiente habrá 55 infectados activos y 40 sanos (Figura 3).

El grupo de personas infecciosas por un lado crece y por otro decrece. Entonces, la tasa de crecimiento durante la fase exponencial es igual a la tasa efectiva de infección menos la tasa de retirada: $\lambda = aS/N - b$. Si la tasa de retirada es mayor que la de infección, el crecimiento será negativo y la epidemia se extinguirá.

Estas definiciones ayudan a entender la tasa de crecimiento como un balance de factores. Por ejemplo, en el crecimiento demográfico juegan a favor los nacimientos y la inmigración; y juegan en contra los fallecimientos y la emigración. Ocurre algo similar con el efecto de los zorros sobre una población de conejos, cuyo crecimiento se frena por la saturación de recursos y por la depredación. En una epidemia juegan a su favor la capacidad infectiva del virus y el contacto humano; y juegan en su contra la vacunación, la detección rápida de enfermos con su consiguiente cuarentena y el distanciamiento social. Este balance entre ganancias y pérdidas nos lleva a definir el número reproductivo.

El número reproductivo

El *número reproductivo básico*, r_0, se define como el número medio de infecciones generadas por un único individuo infectado, durante el período infeccioso de dicho individuo, introducido en una población totalmente susceptible. Matemáticamente es el cociente entre la tasa de infección y la tasa de retirada:

$$r_0 = \frac{a}{b} = a\tau \tag{8}$$

Dicho de otro modo, r_0 indica cuántas personas son contagiadas en total por una persona infectada. Por ejemplo, el sarampión es altamente contagioso y tiene un valor de r_0 en torno a 15. En la viruela r_0 es aproximadamente 6, y en la gripe 1,5. Para el nuevo coronavirus $r_0 \approx 2{,}5$, aunque en algunos países ha alcanzado valores de 4 o más [2].

En general, cuando la epidemia ya ha avanzado y el número S de personas susceptibles es menor

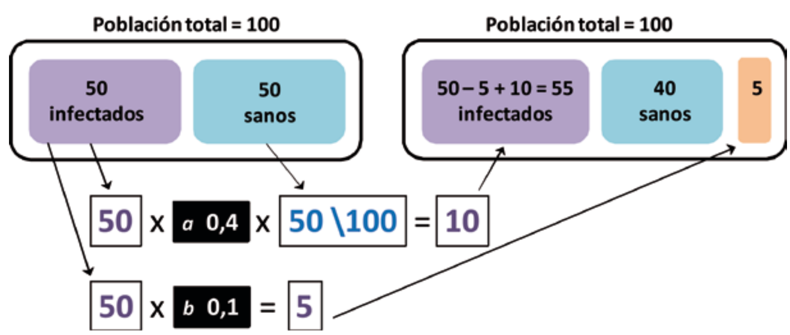


Fig. 3. Esquema de cómo el grupo de infecciosos activos de una población aumenta con la tasa de infección y disminuye con la tasa de retirada. Para ilustrar mejor el ejemplo, hemos utilizado variables discretas con incremento temporal de un día.

que el total N, o bien cuando hay un porcentaje de la población vacunada, se define el *número reproductivo efectivo*, r, como

$$r = \frac{S}{N} r_0 \tag{9}$$

El número reproductivo establece un umbral a partir del cual no puede crecer la epidemia:

- $r > 1$, la infección se propaga (hay epidemia).
- $r = 1$, el número de infectados activos se mantiene constante (enfermedad endémica).
- $r < 1$, la infección no puede extenderse y decrece.

Un método manual para entender el número reproductivo

Supongamos una epidemia (epidemia A) en que:

a) Cada infectado contagia en promedio a una persona cada día.

b) Se tardan dos días en detectar y aislar a un infectado mientras es contagioso.

c) Estamos en los primeros días de la epidemia (fase exponencial), cuando las personas susceptibles son prácticamente la totalidad de la población.

Como cada persona infectada contagia a una persona al día durante dos días, el número reproductivo es $r_0 = 2$.

La Figura 4 muestra esquemáticamente la progresión de la epidemia. Los contagios se indican con las fechas. Los números en rojo son los nuevos contagios cada día. Partimos del día 0 con un solo infectado. Este paciente 0 contagia a una persona el día 1 y a otra persona el día 2, pero el día 3 es aislado y deja de contagiar. El que fue infectado el día 1 contagiará a una persona el día 2 y a otra el día 3. Por eso, el día 2 ya habrá dos nuevos infectados. Etcétera.

En la epidemia B, la tasa de contagio es 2 días^{-1} y el periodo infeccioso es de 3 días. Esta epidemia es mucho más fuerte que la otra. Tiene número reproductivo $r_0 = 6$, porque cada persona contagia en total a seis personas.

4. Modelo epidemiológico SIR: Susceptibles-Infectados-Recuperados

El modelo SIR es un modelo matemático relativamente sencillo, desarrollado por Kermack y McKendrick en la primera mitad del siglo pasado [3, 4]. Es un modelo muy útil que pone de manifiesto aspectos importantes de la dinámica de las enfermedades de transmisión. SIR es un acrónimo formado por las siglas de las palabras Susceptibles, Infectados y Recuperados. El modelo SIR divide a la población en tres subconjuntos o compartimentos:

- *Susceptibles*: Los individuos que pueden contagiarse. Este grupo, al principio de una epidemia, suele ser el total de la población (a no ser que haya personas previamente vacunadas).
- *Infectados*: Los individuos infectados que pueden contagiar a otros mientras no se curan, o mientras no se les detecta la enfermedad y se les aísla. Al pasar a este grupo dejan de estar en el grupo de susceptibles.
- *Recuperados*: Este grupo está formado por los enfermos detectados que pasan a aislamiento, los recuperados inmunizados y los fallecidos. Estos individuos pasan a este grupo provenientes del grupo de infectados. En ocasiones, este grupo también recibe el nombre de *removidos*.

Ecuaciones y curvas del modelo SIR

Si llamamos S, I y R al número de individuos de cada grupo, y N es la población total ($S + I + R = N$), la dinámica de la epidemia está descrita por las ecuaciones diferenciales

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= a\,I\,\frac{S}{N} - b\,I \\ \frac{dR}{dt} &= b\,I \\ \frac{dS}{dt} &= -\,a\,I\,\frac{S}{N} \end{aligned} \tag{10}$$

La Figura 5 muestra un ejemplo con la evolución de las curvas de los tres grupos obtenidas con el modelo SIR para el número reproductivo medio,

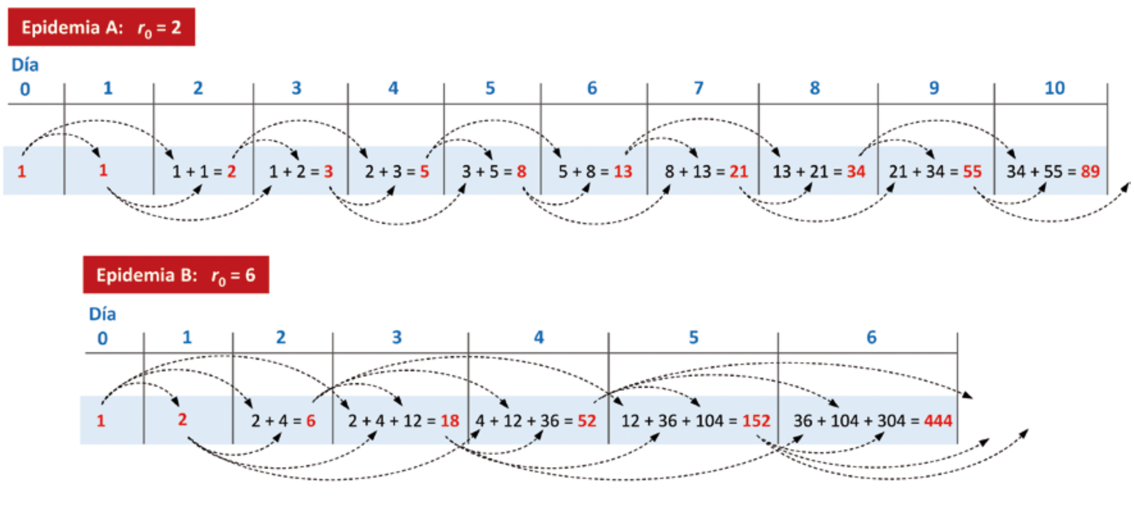


Fig. 4. Epidemia A: $r_0 = 2$ ($a = 1$ días^{-1}, $\tau = 2$ días). Epidemia B: $r_0 = 6$ ($a = 2$ días^{-1}, $\tau = 3$ días).

$r_0 =$ 2,5, que tuvo la epidemia en España. La curva del grupo R da cuenta de los casos totales de enfermos afectados.

¿Cuándo surge la epidemia? Pico y tamaño de la epidemia

Si al inicio, cuando surge un brote de infectados, hay una población S_0 de susceptibles, se desprende de la Ec. 10 que comenzará una epidemia si $dI/dt > 0$:

$$\left.\frac{dI}{dt}\right|_0 > 0 \rightarrow a\,\frac{S_0}{N} > b \rightarrow r_0 > \frac{N}{S_0} \qquad (11)$$

(si $r_0 > 1$, en el caso en que $S_0 = N$).

Conforme avanza la epidemia, disminuye la población de susceptibles y el número reproductivo efectivo, $r = r_0\, S/N$, se hace cada vez menor hasta que se alcanza un máximo en la población de infectados. Este es el *pico* de la curva, y ocurre cuando

$$\frac{dI}{dt} = 0 \rightarrow \frac{S}{N} = \frac{1}{r_0} \qquad (12)$$

Combinando las ecuaciones del modelo SIR e integrando, se obtiene una relación entre las poblaciones de susceptibles e infectados [5]:

$$\frac{I}{N} = 1 - \frac{S}{N} + \frac{1}{r_0}\ln\frac{S}{S_0} \qquad (13)$$

Así, el pico de incidencia I_{max} es

$$\frac{I_{max}}{N} = 1 - \frac{1 + \ln(r_0\, S_0/N)}{r_0} \qquad (14)$$

Tras pasar el pico, el número de infectados disminuye progresivamente ($dI/dt < 0$).

En las curvas de la Figura 5 se comprueba que el pico de infectados es el 23 % de la población (Ec. 14) y ocurre cuando la población susceptible es el 40 % (Ec. 12).

Curva de nuevos casos: incidencia

Con el modelo SIR también podemos obtener la *incidencia*, es decir, la curva nuevos casos diarios, a partir de la variación de la población del grupo R entre dos días consecutivos. La Figura 6 muestra esta curva para tres grados de intensidad de una epidemia. El área de las curvas es igual al número total de casos al final de la epidemia (valor asintótico de R).

Si r_0 es grande, el pico de incidencia es abrupto y llega antes. La epidemia es más intensa. Por ello, en esta situación hay menos tiempo para gestionar la crisis y adoptar medidas. Para números reproductivos menores las curvas de incidencia son más planas, aunque eso no significa que la epidemia afecte a menos casos (de hecho, en los ejemplos de la Figura 6 el número final de afectados es similar). Si una enfermedad tiene una mortalidad alta, como la COVID-19, no basta con que la curva sea de por sí más o menos plana, sino que hay que tomar medidas especiales de control.

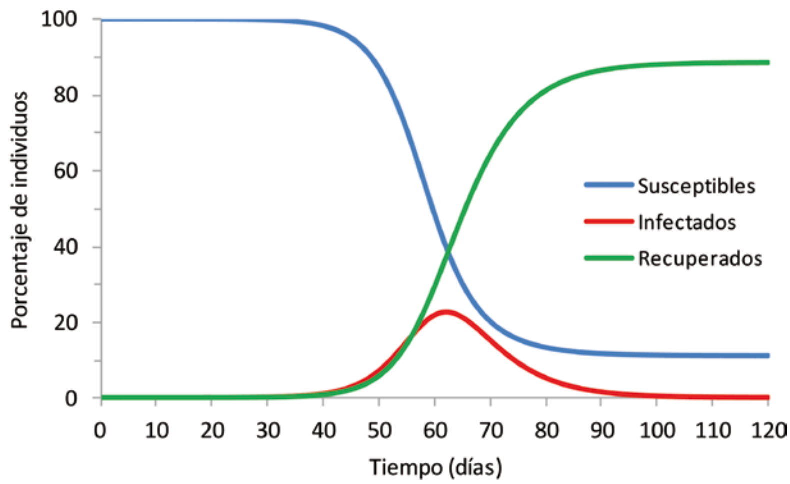


Fig. 5. Curvas del modelo SIR para $r_0 = 2{,}5$ y $S_0 = N$.

5. Control de una epidemia

Una cuestión probabilística. Infectividad y exposición a un virus

El contagio por un virus es una cuestión de probabilidad, que depende de las características del virus y del grado de exposición. La *infectividad* es la capacidad de un patógeno para provocar una infección. Si el virus es altamente contagioso pero todas las personas están aisladas, no habrá contagios. Por contra, aunque el virus tenga poca infectividad, el número de contagios será grande si las personas interaccionan mucho. La infectividad de un virus viene dada, y no cambia a no ser que se aplique una vacuna, que la población se vaya inmunizando o que determinadas condiciones ambientales (como la temperatura) debiliten al virus. Dejando aparte esas posibilidades, lo que podemos cambiar es nuestro grado de exposición al virus.

El combustible y el motor de la epidemia

Según hemos explicado, el número de nuevos contagios es proporcional a dos cantidades: 1) el número de personas infecciosas, y 2) el número de personas restantes susceptibles de contagio. Así, una epidemia se "alimenta" de las personas

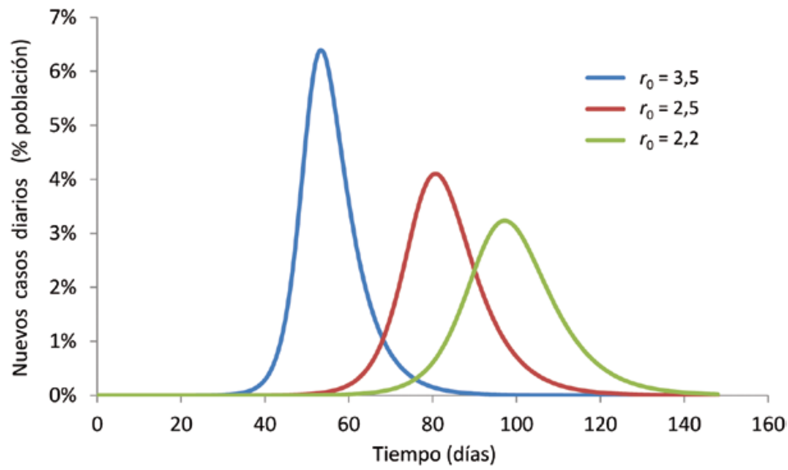


Fig. 6. Simulación de las curvas de nuevos casos diarios para tres números reproductivos dentro del rango de la epidemia de COVID-19 en España si no se hubieran adoptado medidas de confinamiento.

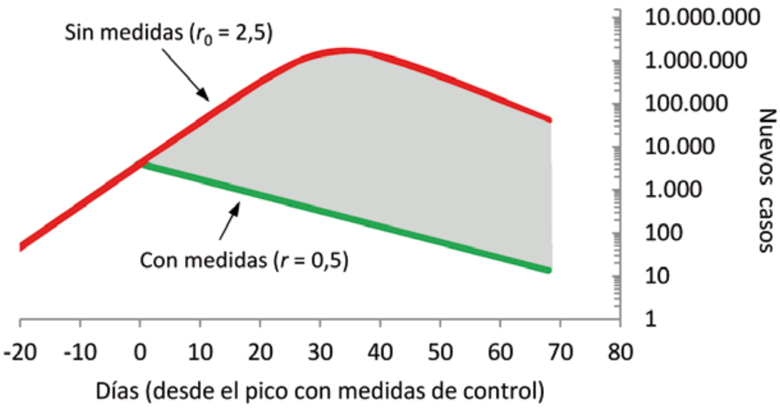


Fig. 7. En rojo: curva de nuevos casos según la tendencia inicial de la epidemia en España. En verde: curva para un número reproductivo de 0,5 tras las medidas de supresión.

que todavía quedan sanas (no aisladas ni vacunadas), que serían como el combustible. Mientras que el motor de la epidemia serían las personas infecciosas activas y la cantidad de contactos que realizan. De forma similar, un incendio sigue avanzando mientras queda bosque por quemar y tanto más rápido avanza cuanto más frentes activos hay. Por tanto, para controlar una epidemia hay que intentar sacar personas infectadas del sistema y reducir la exposición, es decir, limitar la potencia del motor y quitar combustible.

Medidas de control sobre una base científica

El número reproductivo es considerado por los epidemiólogos como uno de los parámetros decisivos para determinar si una epidemia puede ser controlada [6]. A partir de su expresión matemática (Ecs. 8-9) concluimos que podemos actuar sobre tres factores, de la siguiente manera:

1. Disminuyendo el período de infección. Esto puede lograrse mediante el rastreo eficaz de enfermos y el aumento de pruebas diagnósticas, lo que ayudará a la detección precoz de los infectados y a su inmediato aislamiento.
2. Confinamiento, distanciamiento social e higiene. Estas medidas reducirán la tasa de infección.
3. Reducción del número de personas susceptibles, por ejemplo mediante la vacunación de la población (cuando exista una vacuna) o mediante el aislamiento total de regiones donde aún no ha entrado el virus.

La estrategia óptima será la combinación de todas las anteriores, para así actuar tanto en el numerador como en el denominador del número reproductivo.

Mitigación. Inmunidad de grupo (herd immunity)

Si las personas que han pasado la enfermedad quedaran inmunizadas, entonces el grupo de susceptibles en la población sería cada vez menor y el crecimiento de la epidemia se autolimitaría según hemos dicho antes. Las propias personas inmunes harían de cortafuegos (lo mismo que si estuvieran vacunados desde el principio). Se habla así de *inmunidad de grupo*. Si se introducen medidas de control suaves, se puede reducir un poco el número reproductivo aunque su valor siga por encima de la unidad, lográndose así aplanar la curva de contagios (Figura 6), de forma que el sistema sanitario no colapsase. A esta estrategia se le llama *mitigación*. La población afectada es grande pero los contagios ocurren más lentamente. Sin embargo, si la mortalidad es alta esta estrategia es inviable.

Supresión

Las medidas de *supresión* son más fuertes que las de mitigación, con el objetivo de reducir el número reproductivo por debajo de 1. En la Figura 7 se muestra la curva de incidencia según la tendencia inicial de la epidemia en España, sin haber adoptado medidas, y la curva en el caso muy favorable de reducir el número reproductivo a 0,5 tras adoptar medidas de supresión. El área gris entre ambas curvas representa el número de personas que ya no enfermarían por el hecho de adoptar las medidas. Con todo, incluso en este escenario deseable, la magnitud de la epidemia es enorme. Aunque el número de casos sea decreciente, los contagios no cesan de inmediato, y durante bastante tiempo siguen acumulándose casos en la curva de casos totales.

Estrategias en distintos países

En Corea del Sur se realizaron pruebas de forma masiva que permitieron aislar cuanto antes a los enfermos.

China utilizó una estrategia combinada, con confinamiento y restricción de movimientos, además del uso de datos para encontrar cada foco y rastrear enfermos.

Reino Unido optó en primera instancia por la inmunidad de grupo: protección sólo de las personas más vulnerables y autolimitación de la expansión del virus para el resto de personas (que irían enfermando e inmunizándose). En una fase posterior tuvo que adoptar medidas intermedias de confinamiento.

En España las medidas de contención se han basado en un confinamiento fuerte, salvo para actividades esenciales y urgencias. En una segunda etapa se aumentaron los test diagnósticos.

Portugal actuó con mucha antelación.

En Italia las medidas fueron similares a las de España.

Se puede actuar sólo con medidas de confinamiento, que sirven para reducir la tasa de contagio (España e Italia). También se puede reducir el periodo de infección, aumentando la tasa con que se retiran enfermos del sistema (Corea del Sur). De las dos maneras se reduce el número reproductivo y se frena el crecimiento de una epidemia. Pero la estrategia más efectiva es actuar sobre los dos factores a la vez, disminuyendo ambos simultáneamente (China).

Cuando exista una vacuna, la vacunación disminuirá el número de personas susceptibles y será más difícil que rebrote la epidemia.

Problemas, incertidumbres y evidencias

Uno de los hándicaps frente a una epidemia es que no sabemos en tiempo real cuál es el número de personas infectadas que están contagiando a otras. Este número sólo da la cara días después. En ocasiones ni siquiera eso, pues pueden existir personas asintomáticas que transmiten la enfermedad ("infectados invisibles"). Por eso siempre hay un riesgo de infravalorar la epidemia. Los casos detectados podrían ser la punta del iceberg.

Otro factor de incertidumbre es el período de incubación del virus, que hace que exista un tiempo de latencia durante el cual las personas contagiadas todavía no han empezado a transmitir la enfermedad, pero permanecen como infecciosos latentes. También ocurre que muchos enfermos son contagiosos incluso antes de presentar síntomas. Por eso, desde que se aplican medidas de control, o desde que éstas se relajan, hasta que se observan los efectos en las curvas epidémicas transcurre un período largo de tiempo, que puede ser de hasta dos semanas.

¿Cuándo actuar? Desde el punto de vista matemático (sin otros condicionantes), la respuesta es clara: se debe actuar tan pronto se detecta la enfermedad y con todas las medidas posibles. Conocer la evolución de la epidemia en otros países en los que el brote surgió antes ayudará a anticipar mejor la epidemia y a adoptar las medidas adecuadas. Por ejemplo, la epidemia en España iba retrasada unos seis días respecto a la de Italia durante la primera quincena de marzo, con una progresión muy similar. Cuando en España se declaró el estado de alarma ya había el mismo número de casos que cuando Italia adoptó las medidas una semana antes (Figura 10).

6. La evolución de la epidemia de coronavirus en España

Fase exponencial y posibles escenarios tras el estado de alarma

El número reproductivo de la epidemia en España estuvo en un rango de 2 a 3,5 con un valor medio de 2,5 desde el inicio del brote hasta que se adoptaron las medidas de contención. El 27 de febrero se superaron los 10 casos confirmados, el 2 de marzo los 100 casos, y el 8 de marzo los 1.000 casos. El estado de alarma se declaró el 14 de marzo con unos 7.000 casos. Con el modelo SIR realizamos el 25 de marzo simulaciones de la progresión de la epidemia en distintos escenarios dependiendo de la efectividad que pudiera tener el confinamiento. A priori es muy difícil estimar cuánto se reducirán los contagios, pero se puede contemplar una horquilla razonable con efectividades entre el 60 % y el 80 %. De forma naíf, esto podría corresponder a estas situaciones:

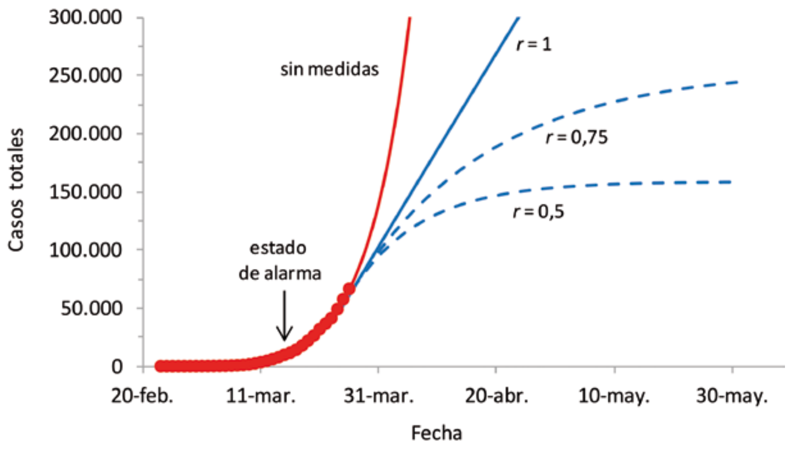


Fig. 8. Simulación con el modelo SIR de la progresión de la epidemia en varios escenarios tras el estado de alarma.

- Escenario A: 1/3 de la población en aislamiento total, 1/3 aislada al 50 %, y 1/3 aislada al 30 %.
- Escenario B: 1/3 en aislamiento total, 1/3 al 70 %, y 1/3 al 40 %.
- Escenario C: 1/3 en aislamiento total, 1/3 al 80 %, y 1/3 al 60 %.

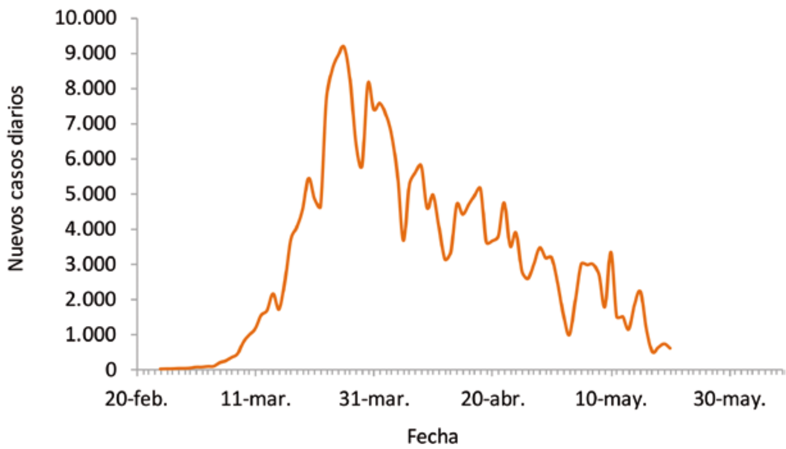
Los números reproductivos en estos tres escenarios valdrían 1 (escenario A, el más desfavorable), 0,75 (escenario B) y 0,5 (escenario C, el más favorable).

Las simulaciones de las curvas de casos totales para estos tres escenarios se muestran en la Figura 8. La curva roja corresponde a la evolución exponencial de la epidemia con la tendencia antes de las medidas de control. Sólo si el número reproductivo baja por debajo de 1 la epidemia empieza a decrecer. La efectividad media del escenario B (con r = 0,75) equivale a la situación que se dio en China durante la aplicación de la cuarentena [7].

Evolución de la incidencia y de la curva de casos totales

La Figura 9 muestra la evolución de los nuevos casos confirmados de COVID-19 detectados en España (tanto por pruebas PCR como de anticuerpos) desde el inicio de la epidemia. Y la Figura 10 muestra la curva de casos totales en España e Italia, y la predicción con el modelo SIR en España.

Fig. 9. Evolución de la incidencia (nuevos casos diarios) de la epidemia en España.



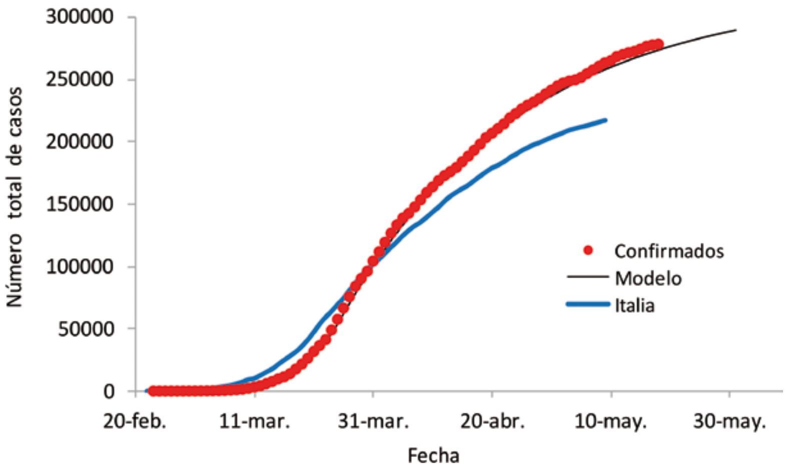


Fig. 10. Curva de casos totales de COVID-19 confirmados en España (mediante test PCR y de anticuerpos) [1], y predicción con el modelo SIR. También se muestra la curva de Italia.

El pico de incidencia se produjo el 27 de marzo, casi dos semanas después de la declaración del estado de alarma. A partir de esa fecha, el número de nuevos casos diarios fue disminuyendo con una tasa de crecimiento exponencial negativa y un número reproductivo de aproximadamente 0,8. La efectividad del confinamiento se ha situado algo por encima del escenario B indicado antes y, a finales de mayo, la epidemia ha quedado prácticamente estabilizada. Sin embargo, a partir de la relajación de las medidas de confinamiento, el número reproductivo puede volver a crecer y producirse un rebrote.

Agradecimientos

El autor agradece al Instituto de Salud Carlos III la financiación a través del Fondo-COVID19 (proyecto COV20/00736), y a J. A. Manzanares (Universitat de València) y M. A. F. Sanjuán (Universidad Rey Juan Carlos) por sus comentarios críticos del artículo.

Bibliografía

[1] Ministerio de Sanidad, Gobierno de España: https://cnecovid.isciii.es/covid19/.

[2] World Health Organization (WHO): https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/.

[3] W. O. Kermack y A. G. McKendrick, "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics", *Proceedings of the Royal Society of London A* 115 (1927), 700-721.

[4] F. Brauer, C. Castillo-Chávez, D. P. Elmer *et al.*, "*Modelos de la Propagación de Enfermedades Infecciosas*", Universidad Autónoma de Occidente (2015). DOI: 10.13140/2.1.4882.5929.

[5] S. Galindo Uribarri, M. A. Rodríguez Meza y J. L. Cervantes Cota, "Las matemáticas de las epidemias: caso México 2009 y otros", *Ciencia ergo-sum* UAEMex (nov2013-feb2014) 20:3, 238-246.

[6] B. Ridenhour, J. M. Kowalik y D. K. Shay, "Unraveling R0: Considerations for Public Health Applications", *American Journal of Public Health* 104 (2014), 32-41.

[7] Q. Lin, S. Zhao, D. Gao *et al.*, "A Conceptual Model for the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in Wuhan, China with Individual Reaction and Governmental Action", *International Journal of Infectious Diseases* 93 (2020), 211-216.

Antonio Guirao Piñera
Dpto. de Física, Universidad de Murcia