

## Modelos Epidemiológicos y COVID-19

Atocha Aliseda

Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM

**Resumen:** A partir de la conceptualización de lo que significa un modelo --de la importancia de sus presupuestos y datos-- se revisan diversos modelos epidemiológicos utilizados para analizar la pandemia del COVID-19 en México, tales como los modelos SIR y AMA, así como el modelo desarrollado por el *Departamento de Salud Pública* de la Facultad de Medicina de la UNAM. Se concluye que los modelos no son oráculos ni ficciones. No existe un modelo capaz de responder cualquier pregunta; cada modelo tiene sus alcances y limitaciones.

**Palabras clave:** COVID-19, modelos epidemiológicos, México.

### ¿Qué es un modelo?

A grandes rasgos, un modelo es una representación abstracta de aspectos seleccionados de la realidad. Se aíslan ciertos parámetros y se estudian sus relaciones, con la finalidad de capturar el patrón de un fenómeno de la naturaleza, sobre el cual se pretende, entre otras cosas, hacer pronósticos. Un ejemplo de modelación de un fenómeno es la evolución de una epidemia.

Hay muchos tipos de modelos. Un sencillo ejemplo es el tipo escala, como el plano de una casa. El mapa de una ciudad es otro modelo que representa la distribución urbana del espacio; como el ideado por John Snow a mediados del siglo XIX para modelar la geografía del contagio de la epidemia del cólera en Londres. La concentración de decesos aparece cerca de las llaves de agua de proveedores que se surtían de fuentes contaminadas del drenaje de la ciudad. Este mapa apoyó su hipótesis: el cólera se transmite por el agua (contrario a la teoría de transmisión de enfermedades miasmática de esa época).<sup>1</sup>

Algunos estudiosos han descrito a los modelos como aproximaciones a la realidad; aunque otros han defendido que son meramente ficciones, buenas narrativas de un fenómeno. Las siguientes son algunas preguntas claves que distinguen a los modelos abstractos:<sup>2</sup>

1. ¿Cuál es su propósito y período útil?
2. ¿Cuáles son sus supuestos?
3. ¿Cuáles son los datos?

Cada modelo sirve para un propósito particular en un período específico; a partir de ciertos supuestos y con base en un conjunto de datos, ofrece un resultado con un cierto grado de confianza. Los modelos no son una *tabula rasa*, hay información que se asume como (aproximadamente) verdadera y que no siempre se hace explícita. Por ejemplo, la tasa de transmisión o el periodo de inmunidad son supuestos cuando no se conocen.

Los datos son los insumos, ingredientes principales de los modelos, por lo que entre mejor calidad tengan, mejores resultados se pueden reportar. Por ejemplo, los registros de decesos de hospitalizados por COVID-19 son más precisos que los de decesos por (probable) COVID-19, pues en el primer caso los registros van uno a uno con la realidad, mientras que en el segundo caso hay --al menos-- un subregistro de quienes murieron en sus casas sin prueba alguna.

Además de contestar a las preguntas claves que hemos indicado, los modelos epidemiológicos deben ponerse a prueba. Todo modelo se evalúa antes de ponerse en marcha, podemos decir que el éxito de un modelo se mide por su *adecuación empírica*: los buenos modelos son aquellos que hacen predicciones reales, digamos que las más cercanas a la realidad.

### Modelos Epidemiológicos

Hoy día, los modelos científicos son mucho más robustos que planos y mapas porque, entre otras cosas, no son estáticos, muchos de ellos pretenden modelar

# El contenido de los artículos es responsabilidad de sus autores y no necesariamente refleja la postura de la Facultad de Medicina.

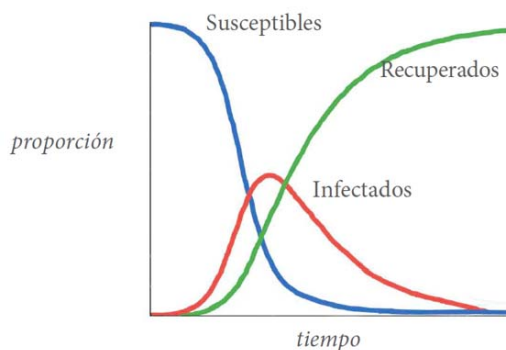
la evolución de un fenómeno a lo largo del tiempo. Dos son los tipos de modelos epidemiológicos: *de pronóstico* y *mecanísticos*. Los primeros son en general estadísticos, hacen pronósticos para un período corto de tiempo y responden a preguntas como la siguiente: ¿cuál es el número de camas de hospitales que se requerirán dentro de dos semanas? Los segundos sirven para periodos más largos y capturan la transmisión de la enfermedad con el objetivo de simular diversos escenarios sobre los parámetros que gobiernan esta transmisión, a partir de supuestos sobre la enfermedad y la inmunidad.

## El modelo SIR

Pasemos ahora a revisar, aunque someramente, el modelo epidemiológico por excelencia, el modelo SIR, el cual se remonta a 1917 y sigue siendo la base de la mayoría de los modelos actuales (esta sección está basada en una introducción amigable a los modelos epidemiológicos).<sup>3</sup> Es un modelo donde la población de estudio se divide entre: *Susceptibles*, *Infectados* y *Recuperados*, como sus siglas sugieren. La idea intuitiva de este modelo es que se representa la dinámica con la que se mueven los individuos de esta población de un estado a otro; por esta característica se le conoce también como *modelo de compartimento*: susceptibles pasan a infectados e infectados a recuperados:



Este modelo tiene implícitas dos suposiciones: la población es estable y los infectados y los contagiosos son los mismos. Esto es, no hay ni decesos ni nacimientos ni tampoco movilidad de la población; tampoco se considera un período latente, el tiempo que transcurre entre que alguien se infecta y es contagioso. Una gráfica simple que muestra cómo cada uno de los compartimentos se comporta a lo largo de una pandemia es la siguiente:



## ¿Qué podemos producir con este modelo?

Por ejemplo, para conocer el número (promedio) diario de nuevos infectados por una persona ( $b$ ), necesitamos dos parámetros: la probabilidad de infección durante el contacto ( $t$ ) y el número de encuentros que esa persona tiene en un día ( $h$ ). Así tenemos la siguiente sencilla ecuación:

$$th = b$$

Si la probabilidad de contagio en cada encuentro es de  $\frac{1}{4}$  ( $t = .25$ ) y se reportan 8 encuentros en ese día con individuos susceptibles ( $h = 8$ ), entonces habrá dos nuevos infectados, esto es,  $b = 2$ . Estos parámetros capturan aspectos tanto biológicos como sociales, ya que, por ejemplo, aunque  $t$  depende del grado de infección de la enfermedad en cuestión, también puede manipularse con acciones humanas, las llamadas *intervenciones no farmacéuticas*: la probabilidad de contagio es menor cuando las personas en interacción llevan cubrebocas que cuando no lo llevan.

Por otro lado, la cuarentena reduce naturalmente el número de encuentros que una persona tiene en un día, lo que incide sobre el valor de  $h$ . Algunos modelos manipulan combinaciones numéricas de estos parámetros con el fin de simular diversos escenarios de acuerdo con las intervenciones que se modelen.

Pasemos ahora a revisar otro parámetro hoy día muy famoso, la reproducción de la enfermedad ( $R_0$ ). Presentamos este parámetro de una manera intuitiva. (Para una definición formal con ecuaciones diferenciales, véase este texto)<sup>3</sup>. Si asumimos que toda la población es susceptible y  $D$  representa la duración del período de infección, podemos describir este parámetro como sigue:

$$R_0 = bD$$

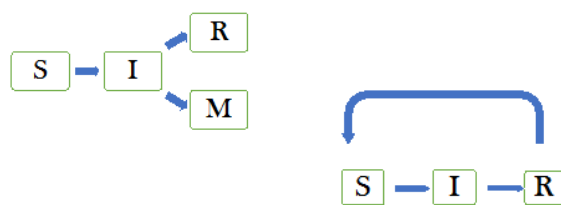
$R_0$  representa el número total de infectados por un contagioso antes de que pase al compartimento de los recuperados (o de muertos, como veremos más adelante). Por ejemplo, si  $b$  es  $\frac{2}{3}$  y  $D$  es 3 días, el contagioso habrá infectado a 2 personas antes de convertirse en recuperado. En este ejemplo, el crecimiento de la epidemia es exponencial (1,2,4,8,...) por lo que se requeriría de intervenciones para dis-

minuir  $b$ . El parámetro  $R_0$  nos informa la tasa de crecimiento de una epidemia; para que disminuya se apela a la *regla del declive*:  $R_0 < 1$ ; lo que quiere decir que el contagioso infecta a menos de una persona – en promedio – en el transcurso del periodo de infección. Comparemos algunas enfermedades: el sarampión es altamente infeccioso; su tasa de reproducción oscila entre 12 y 18, mientras que la viruela se calcula debajo de 6; la tasa de la COVID-19 se estima entre 2 y 3; mayor que la de la gripe estacional, calculada entre 1 y 2.

Sin embargo, esta tasa  $R_0$  puede ser distinta por regiones, debido al comportamiento social y aspectos ambientales. Otro de los supuestos de este modelo que concierne a este parámetro es que la interacción entre los individuos de la población es homogénea, lo cual puede no ser el caso. Sabemos que la COVID-19 se ha diseminado de manera feroz en zonas metropolitanas con altas densidades de población.

Asimismo, el modelo SIR no toma en cuenta que algunos de los infectados mueren en lugar de recuperarse, aspecto esencial para modelar epidemias como la que nos azota actualmente. Más aún, estudios recientes sugieren que la inmunidad del sujeto recuperado puede ser corta; por tanto, un modelo más aproximado a la realidad debiera capturar que los recuperados pueden regresar al compartimento de los susceptibles. Los siguientes diagramas representan estas consideraciones adicionales:

### Modelos y Estrategias



Una característica maravillosa de los modelos epidemiológicos es que no son solamente constructos abstractos para consumo de científicos --y de filósofos de la ciencia-- sino que pretenden ser útiles para quienes implementan las estrategias de gobierno. Los modelos informan a los tomadores de decisiones, aunque hay que subrayar que no son la estrategia

ante una epidemia, aunque algunos de ellos están diseñados precisamente para analizar escenarios de acuerdo con diversas acciones.

Ahora que no contamos con vacuna para el SARS-CoV-2, las estrategias para enfrentar una pandemia son dos: *supresión* y *mitigación*, las cuales pueden aplicarse por separado o en combinación. La primera pretende erradicar la enfermedad cortando lo más posible su transmisión a través de acciones como la cuarentena y la aplicación amplia y sistemática de pruebas, rastreo y vigilancia de casos. En la segunda estrategia se asume que el virus estará presente en el mediano y tal vez largo plazo y en lugar de buscar su erradicación, se busca mitigar sus peores efectos, esto es, el contagio de los individuos más vulnerables: ancianos y personas con factores de riesgo. Ejemplos de seguidores de la primera estrategia son algunos países asiáticos y del segundo algunos escandinavos. En relación con el parámetro de reproducción de la enfermedad  $R_0$ , la estrategia de supresión apunta a disminuir  $R_0$  por debajo de 1, mientras que en la de mitigación, solo se pretende disminuirlo.

### El modelo del DSP

Desde inicios de marzo, el Departamento de Salud Pública (DSP) de la Facultad de Medicina está utilizando el modelo SIR para modelar la epidemia en México. Los modelos son cotejados diariamente con la realidad y han sido muy acertados. Para modelar el efecto de la intervención del gobierno federal vía “la jornada nacional de sana distancia”, se corrieron dos modelos en paralelo —con y sin intervención— para determinar el momento en que el efecto de la intervención se manifiesta.

El lector interesado puede consultar los detalles de este modelo en dos artículos publicados en este *Boletín sobre COVID-19: Salud Pública y Epidemiología*.<sup>4,5</sup> En particular, en uno de ellos se representan los dos modelos y se puede apreciar que el pico de la epidemia se reduce en 70% en el número de casos resultantes de la intervención.<sup>5</sup> Otra virtud de estas investigaciones es su disponibilidad de manera didáctica para toda la comunidad universitaria y público interesado.

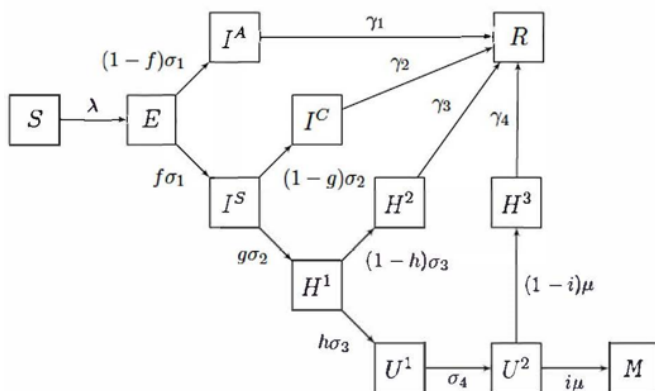
## El modelo AMA

El modelo AMA ha sido utilizado por el gobierno de México y forma parte de los esfuerzos de grupos de investigadores pertenecientes al grupo de respuesta CONACYT COVID-19. Es un modelo más robusto que el SIR. A continuación se presentan algunas de sus principales características.<sup>6</sup>

Este modelo tiene como propósito principal representar la dinámica hospitalaria con el fin de inferir la necesidad en la atención, tanto de camas en piso como de unidades de cuidado intensivo (UCI). Es un modelo de pronóstico a mediano plazo (varias semanas) y es híbrido: por un lado, usa una estructura más sofisticada que la de SIR (SEIRD) y por el otro, echa mano de la inferencia Bayesiana.

Como sugieren sus siglas, considera además de los susceptibles (S) y los recuperados (R), tanto a los muertos (D) (abajo representado por M) como a los expuestos (E), esos individuos latentes que ya mencionamos. Los datos suministrados son los registros hospitalarios tanto de casos confirmados de la COVID-19 (incluye casos ambulatorios), como de decesos.

Por tanto, además de lo anterior, se consideran otros compartimentos: Infectados ( $I^A$  asintomáticos,  $I^S$  sintomáticos,  $I^C$  por salir del hospital), Hospitalizados ( $H^1$  recién admitidos,  $H^2$  por recuperarse tras hospitalización en cama piso,  $H^3$  por recuperarse tras hospitalización en UCI) y aquellos que están en la UCI ( $U^1$  y  $U^2$  en estado crítico). La idea esquemática de este modelo, que incluye otros parámetros que no explicamos aquí, se muestra a continuación:<sup>6</sup>



Uno de sus supuestos consiste en que la tasa de contacto es constante a lo largo del periodo del pronóstico. Este modelo puede también medir la efectividad de acciones de distanciamiento social, pero con ciertas limitaciones. Los autores reportan que aún cuando pudieran hacerse análisis de escenarios para administrar la salida de la cuarentena, la capacidad de pronóstico es muy limitada dada la falta de datos sobre el total de infectados con COVID-19. Todos sabemos que en México hay escasos datos sobre los asintomáticos. Otro resultado reportado es que desde abril fue claro que en nuestro país hay tantos brotes epidémicos como regiones metropolitanas, cada uno corriendo a su propia velocidad, lo que naturalmente sugiere que las estrategias deban ser regionalizadas.

## Otros Modelos

En el caso de la actual pandemia, el gobierno del Reino Unido cambió su estrategia a consecuencia de un estudio científico. Un grupo de investigadores del *Imperial College*, dio a conocer en marzo un informe en el que propone que acciones óptimas de mitigación podrían reducir el pico de la demanda hospitalaria en dos terceras partes y las muertes a la mitad.<sup>7</sup>

Las acciones propuestas fueron el aislamiento de los casos sospechosos, además del aislamiento de aquellos infectados junto con quienes comparten casa, así como el distanciamiento social de los individuos vulnerables. El mensaje del informe era muy claro: o se cambiaba la estrategia o el país tendría más de un cuarto de millón de decesos a causa de la COVID-19. El escéptico primer ministro, Boris Johnson, ante tal pieza de información científica, cambió su estrategia de mitigación a una más estricta.

Otro modelo, propuesto por físicos chilenos, es un modelo que extiende el SIR para simular la densidad de transmisión y con ello pretende responder a preguntas del tipo: ¿cuántas personas pueden compartir un espacio para evitar el contagio? Incorpora variables como la movilidad de las personas y el radio de contagio. Este modelo está basado en la *materia activa*, área de la física que estudia el movimiento de partículas. Parece que vale la pena revisar sus detalles e investigar si con este modelo se consigue alguna aplicación en el mundo real.<sup>8</sup>

## Conclusión

Los modelos no son oráculos ni ficciones. No hay modelo alguno que responda cualquier pregunta; cada uno cuenta con aportaciones conceptuales y potencial de aplicación. Con todas las reservas que merecen, los modelos epidemiológicos son herramientas de intervención sobre la realidad.

“Conocer el futuro para modificar el presente” es el atractivo título de un texto de Rafael Lozano, director de los sistemas de salud del IHME, que sintetiza las ideas centrales de este artículo.

## Referencias

1. Tulchinsky TH. John Snow, Cholera, the Broad Street Pump; Waterborne Diseases Then and Now. Case Studies in Public Health. 2018:77-99. Disponible en: <https://buff.ly/2HRfJkY>.
2. Holmdahl I, Buckee C. Wrong but Useful — What Covid-19 Epidemiologic Models Can and Cannot Tell Us. 2020;383(4):303-5. Disponible en: <https://buff.ly/2TDGuM0>.
3. Bird, A. Layperson’s guide to epidemiological modelling. [Internet]. Portal Philosophy and Medicine del King’s College, consultado el 25 de julio del 2020. Disponible en: <https://buff.ly/37XWJvH>.
4. Pantoja-Meléndez CA. Los modelos epidemiológicos y el “Humanware”. Boletín COVID-19: Salud Pública y Epidemiología. 2020;1(3):3-5. Disponible en: <https://buff.ly/2HOybdN>.
5. Pantoja-Meléndez CA. Modelos epidemiológicos e inteligencia epidemiológica. Boletín COVID-19: Salud Pública y Epidemiología. 2020;1(4):3-6. Disponible en: <https://buff.ly/37XWQaB>.
6. Capistrán, M.A., Capella, A., Christen, A. Forecasting hospital demand during COVID-19 pandemic outbreaks. arXiv: 2006.01873v2 [q-bio.PE] Preprint Quantitative Biology [Internet]. Disponible en: <https://buff.ly/2HQtlwI>.
7. Ferguson, N.M. et al. Report 9 - Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. [Internet] 16.03.20. Disponible en: <https://buff.ly/2LfKLku>.
8. Ramírez, L. Físicos chilenos crean un modelo que permite predecir propagación de COVID-19 en espacios públicos y privados. [Internet]. 31 de julio del 2020. Disponible en: <https://buff.ly/2JqDiBB>.
9. Lozano, R. Conocer el futuro para modificar el presente. [Internet]. El Economista. 10 de julio de 2020. Disponible en: <https://buff.ly/3eejBIn>.

Facultad de Medicina  
Sistema Bibliotecario

RECURSOS ELECTRÓNICOS LIBROS ELECTRÓNICOS ENLACES IMPORTANTES

**BIBLIOTECA MÉDICA DIGITAL**

Como parte del Sistema Bibliotecario, ofrece el acceso a una gran variedad de recursos electrónicos seleccionados por la Facultad de Medicina de la UNAM.  
#LaUNAMnoseDetiene

**BIBLIOTECA MÉDICA DIGITAL**  
Dudas o aclaraciones generales sobre la BMD: [bmd@facmed.unam.mx](mailto:bmd@facmed.unam.mx)  
Dudas o aclaraciones con el acceso remoto: [ar:fm@facmed.unam.mx](mailto:ar:fm@facmed.unam.mx)

**ACCESO REMOTO A LA BIBLIOTECA MÉDICA DIGITAL**  
Conozca las respuestas a las preguntas más frecuentes  
LEER MÁS