

Real Academia de Ingeniería

*Enfoques y aportaciones de la Ingeniería ante la
COVID19. Una contribución al debate y al
planteamiento de posibles soluciones*



MMXX

Real Academia de Ingeniería

*Enfoques y aportaciones de la Ingeniería ante la
COVID19. Una contribución al debate y al
planteamiento de posibles soluciones*



MMXX

© Real Academia de Ingeniería

© De los textos los autores

ISBN: 978-84-95662-78-1

Depósito Legal:

ÍNDICE

Presentación	7
Sección de Estudios y Dictámenes de la RAI	
Cómo construir modelos bayesianos de inteligencia artificial para gestionar una pandemia	9
Enrique Castillo	
Ahorro en las campañas de pruebas PCR y de anticuerpos mediante mezclas	17
Enrique Castillo Francisco Javier Girón. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales	
España en los tiempos de la COVID-19	25
César Dopazo	
Un modelo simplificado de propagación del COVID-19 en España	45
César Dopazo J. Blasco, N. Fueyo	
Sobre el estornudo: aspectos mecánicos de la transmisión del COVID-19	59
Javier Jiménez	
Las Ciencias de Datos en la lucha contra el SARS-CoV-2: la experiencia en la Comunidad Valenciana	67
Nuria Oliver Xavier Barber, Francisco Escolano, Antonio Falcó, Juan Camilo Gómez, Joaquín Huerta, Miguel Angel Lozano, Marina Martínez-García, Alejandro Rabasa, Miguel Rebollo, Kristof Roomp, Emilio Sansano, Juan Carlos Trujillo (Grupo de Ciencias de Datos en la lucha contra la COVID-19 de la Generalitat Valenciana)	
COVID en la industria agroalimentaria: respuestas desde la ingeniería de alimentos	87
Daniel Ramón Vidal	

Presentación

Sección de Estudios y Dictámenes de la Real Academia de Ingeniería

La pandemia de la COVID-19 está teniendo numerosos efectos. El más evidente es el de las implicaciones sobre la salud y los fallecimientos de muchas personas, pero también tiene múltiples implicaciones sanitarias y socioeconómicas, algunas de ellas particularmente graves.

Frente a esta pandemia, la sociedad ha tenido que reaccionar y la ciencia, y la ingeniería, están tomando iniciativas para minimizar sus consecuencias. Ciencia e ingeniería son imprescindibles y se necesitan mutuamente. En esta pandemia, todas las ramas de la ingeniería han desempeñado, en mayor o menor grado, un papel fundamental.

Indudablemente el personal sanitario, los virólogos, epidemiólogos, genéticos, inmunólogos, biólogos moleculares, etc. están liderando la lucha contra el SARS-CoV-2, pero no debemos olvidar el papel de los ingenieros que también está siendo destacable.

La secuenciación del virus se pudo llevar a cabo en pocas semanas gracias al esfuerzo de virólogos y biólogos moleculares utilizando métodos y equipamientos desarrollados por ingenieros electrónicos, mecánicos e informáticos.

Por otra parte, los aparatos médicos de control, monitorización, soporte vital y diagnóstico por la imagen se basan en desarrollos de la ingeniería biomédica.

Los estudios epidemiológicos y las estrategias de rastreo de contactos se ven potenciados por el desarrollo de modelos matemáticos complejos, por aplicaciones y equipos informáticos y por la ingeniería de datos.

Los virólogos e inmunólogos están desarrollando nuevas vacunas y terapias. Una vez que tengan éxito y se aprueben, la producción y distribución a nivel global de millones de dosis será todo un desafío que será responsabilidad a la que contribuirán con soluciones las distintas especialidades o ramas de la ingeniería.

El desarrollo de nuevas técnicas y equipos de diagnóstico, así como el aumento en la capacidad de las pruebas, ha exigido un trabajo coordinado de numerosos científicos e ingenieros. Una vez operativas, la velocidad y automatización de las pruebas se ha incrementado enormemente gracias al control de procesos y a la automatización. Todos los procesos de diagnóstico y desarrollo de terapias y vacunas se han visto, sin duda, potenciados por la inteligencia artificial y el aprendizaje automático.

No menos importante ha sido el papel de la ingeniería y de los ingenieros en otros ámbitos de actuación. Durante los meses de confinamiento. La producción, transformación y distribución de alimentos y otros productos básicos; la operación y el mantenimiento de las redes eléctricas, de gas y de suministros de productos petrolíferos; los sistemas de telecomunicaciones; y el transporte entre otros, han sido posibles, en gran medida, gracias a las infraestructuras y a los sistemas basados en la ingeniería y en el trabajo de los ingenieros de todas las ramas.

En estos meses, las formas de trabajar han cambiado significativamente. Gracias al desarrollo de redes telefónicas de alta velocidad, a las infraestructuras de banda ancha, y a otros tipos de conexiones inalámbricas, el teletrabajo ha permitido que el coste económico para la sociedad en su conjunto haya sido menor. El teletrabajo no sólo ha facilitado la actividad durante el confinamiento. Sin duda, tiene implicaciones para el futuro de la actividad laboral. Análogamente todos los niveles de la educación también se han transformado significativamente, introduciendo cambios que perdurarán en el tiempo.

Los ingenieros trabajan buscando soluciones a problemas en sistemas complejos, como lo es la propia pandemia. La ingeniería resuelve problemas aportando soluciones y creando productos, procesos y sistemas que abordan necesidades sociales concretas.

En el contexto preocupante y desafiante de la pandemia, varios académicos de la Real Academia de Ingeniería han propuesto aportar sus conocimientos y experiencias en relación con algunos de los campos relacionados con la pandemia. De acuerdo con esta iniciativa se ha elaborado este documento que trata de contribuir con enfoques y aportaciones de la ingeniería ante la COVID-19, contribuyendo al debate y al planteamiento de posibles soluciones. Se incluyen aquí siete trabajos de académicos, en varios casos con otros autores no académicos, que abordan asuntos diversos relacionados con la pandemia.

Este documento va dirigido a profesionales e ingenieros, con un estilo que pretende combinar el rigor con la divulgación, de tal modo que el conjunto de los trabajos se pueda presentar y difundir en los ámbitos de los canales y medios habituales de la RAI tratando, además, de llegar al público en general.

Como el lector podrá advertir, no se aborda el conjunto de temas, sobre los que la ingeniería puede aportar soluciones, y por el enfoque de este documento, no se ha elegido un tema único.

Con todo, se piensa que la iniciativa y el esfuerzo merece la pena, y se espera que permita propiciar debates y reflexiones sobre la contribución de la ingeniería ante la COVID-19.

Madrid, 9 de octubre de 2020

Cómo construir modelos bayesianos de inteligencia artificial para gestionar una pandemia

Enrique Castillo^{1,2}

¹Real Academia de Ingeniería

²Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen. Se describen, paso a paso, todas las etapas necesarias para construir el modelo, incluyendo selección de estados, transiciones entre estados, definición de tasas de paso entre estados, obtención de las ecuaciones diferenciales y funcionales, estimación de parámetros a partir de las observaciones y conversión del modelo en uno aleatorio bayesiano. Se presenta un sencillo estudio de análisis de sensibilidad con respecto a las tasas, que permite analizar diferentes estrategias para controlar la pandemia. Para ello, se considera que todos los parámetros (tasas) son variables aleatorias. Finalmente se comentan las diferencias y ventajas de los modelos bayesianos.

1. Introducción y motivación

Comenzamos indicando que a este escrito acompaña un vídeo, al que puede accederse mediante el enlace [\(vídeo completo\)](#).

Sobre modelos matemáticos para pandemias hay una extensísima bibliografía. Citamos aquí sólo algunos de los libros clásicos más conocidos, como [1], [2], [3], [8] y [9]. Este trabajo pretende sólo dar una idea de cómo se construyen algunos de estos modelos.

En este trabajo utilizaremos un caso particular muy sencillo de un modelo algo más complicado que los del tipo SEIR, que describiremos paso a paso.

Lo primero que hay que hacer para construir un modelo es conocer profundamente el proceso que trata de reproducirse. Por ello, es necesario dedicar un tiempo al estudio de dicho proceso y entender su dinámica, lo que implica conocer su evolución temporal. Una forma muy interesante de construirlo es suponiendo que las diferentes personas de la población pueden estar en uno y sólo uno de un conjunto de estados, evolucionando y pasando por algunos de ellos durante el proceso.

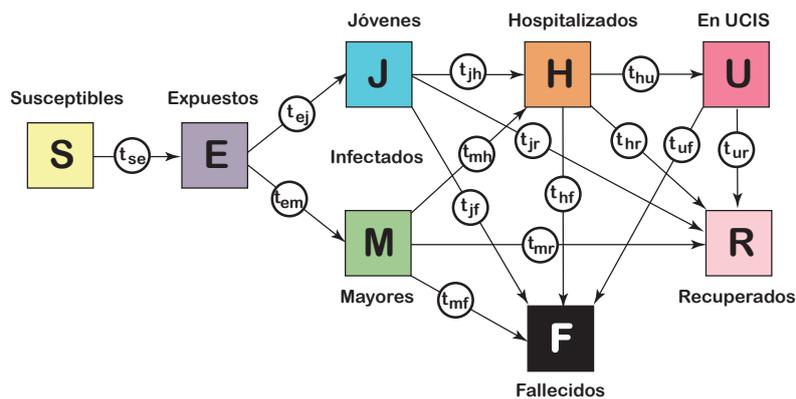


Fig. 1: Estados, transiciones permitidas entre ellos y tasas de paso correspondientes.

Para simplificar y concentrarnos en el análisis de los principales estados, hemos particionado o dividido la población en partes mutuamente excluyentes y exhaustivas, lo que implica que las diferentes personas de la población pueden estar en uno y sólo uno de un conjunto de estados, en un instante dado, cuyo significado se indica a continuación y se ilustra en la figura [\(vídeo: estados\)](#):

1. **Inmunes.** Contiene las personas que no pueden contagiarse frente al virus y no se incluye en el modelo, porque las personas en este estado no cambian durante el proceso,

2. **Susceptibles.** Son las personas que, pudiendo contagiarse, no están expuestas al contagio.
3. **Expuestos.** Es el conjunto de personas que, no habiéndose contagiado, están expuestas al contagio con personas infectadas, de ahí el nombre. Por tanto, una vez que pasan por este estado, ya pueden contagiarse.
4. **Jóvenes infectados.** Los infectados de bajo riesgo son personas infectadas, pero con una baja probabilidad de sufrir consecuencias serias. Puesto que se trata principalmente de personas jóvenes, las denominaremos, jóvenes infectados.
5. **Mayores infectados.** Son las personas infectadas con una alta probabilidad de sufrir consecuencias serias. Puesto que se trata principalmente de personas mayores, las denominaremos, mayores infectados
6. **Hospitalizados.** Incluye las personas infectadas que han sido ingresadas en el hospital pero que no ocupan las UCIS.
7. **UCIS.** Incluye a las personas en unidades de vigilancia intensiva o UCIS, que tienen unos tratamientos especiales con unos medios también especiales.
8. **Recuperados.** Incluye las personas que han superado la enfermedad y que poseen anticuerpos. Simplificando, suponemos que adquieren inmunidad total a partir de ese momento.
9. **Fallecidos.** Incluye a las personas que fallecen a consecuencia del virus, incluyendo su procedencia de cualquier estado.

Hay que señalar que esta selección de estados condiciona mucho el posterior desarrollo del modelo y que hay que hacerla con sumo cuidado y teniendo en cuenta los datos que puedan observarse. En principio, habría que observar una buena parte de los estados del modelo para que podamos construir un modelo con capacidad de hacer predicciones fiables.

Una vez conocidos los estados del modelo, es importante indicar las transiciones, es decir, a qué estados puede migrarse desde cada uno de ellos y cuáles son los estados iniciales y los finales. El estado de las personas susceptibles es el estado inicial, en el que suponemos están todas las personas al comienzo del periodo de estudio, pues se han excluido los inmunes.

Los estados finales son los de fallecidos y recuperados, pues se supone que cuando una persona entra en estos estados permanece en ellos para siempre. Los demás son estados de paso o intermedios. Así, los susceptibles sólo pueden permanecer en ese estado o pasar al estado de expuestos. Éstos sólo pueden permanecer en este estado o pasar al de infectados jóvenes o infectados mayores, tal como indican las flechas de la figura. Los infectados pueden permanecer en él o pasar a hospitalizados, recuperados o fallecidos. Los hospitalizados pueden pasar a la Uci, si empeoran mucho, recuperarse o fallecer. Finalmente, los que están en la UCI pueden recuperarse o fallecer.

Con esto, queda definida la estructura del modelo que incluye, por un lado, los estados y, por otro, los posibles flujos entre ellos.

Por último, queda la cuantificación de los flujos del modelo, es decir con qué frecuencia se produce cada cambio de estado. Los flujos de personas entre estados se definen mediante las llamadas tasas de flujo, que son números comprendidos entre 0 y 1, que indican la proporción de personas que fluyen cada día desde un estado origen a cada uno de sus posibles estados destino. Así, si la tasa es $1/7$ por día, esto implica que una persona tarda una media de 7 días en cambiar de estado, y si es $1/5$ por día, significa que tardará una media de 5 días. Entender el significado de estas tasas o parámetros es muy importante para escribir las ecuaciones del modelo y para fijar sus valores, pues los expertos conocen bien estos tiempos medios de cambio de estado y pueden decirnos si los valores resultantes son razonables o no lo son.

Con ello, podemos ya pasar a construir el sistema de ecuaciones del modelo. Este modelo puede ser planteado en forma de ecuaciones diferenciales, en forma de una ecuación en diferencias o

como una ecuación funcional. Este modelo nos dice cómo evoluciona el proceso desde que el virus infecta a la primera persona hasta que se propaga por toda la población.

2. Ecuaciones diferenciales del modelo

Las ecuaciones diferenciales del modelo, que resultan son [\(vídeo: ecuaciones\)](#):

$$\begin{aligned}
 S'(t) &= -t_{se}S(t)(J(t) + M(t))/N \\
 E'(t) &= t_{se}S(t)(J(t) + M(t))/N - (t_{ej} + t_{em})E(t) \\
 J'(t) &= t_{ej}E(t) - (t_{jh} + t_{jr} + t_{jf})J(t) \\
 M'(t) &= t_{em}E(t) - (t_{mh} + t_{mr} + t_{mf})M(t) \\
 H'(t) &= t_{jh}J(t) + t_{mh}M(t) - (t_{hu} + t_{hr} + t_{hf})H(t) \\
 U'(t) &= t_{hu}H(t) - (t_{ur} + t_{uf})U(t) \\
 R'(t) &= t_{ur}U(t) + t_{hr}H(t) + t_{jr}J(t) + t_{mr}M(t) \\
 F'(t) &= t_{mf}M(t) + t_{jf}J(t) + t_{hf}H(t) + t_{uf}U(t)
 \end{aligned}$$

con los valores iniciales

$$\begin{aligned}
 S(0) &= N - 1, E(0) = 1 \\
 J(0) &= M(0) = H(0) = U(0) = R(0) = F(0) = 0.
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones diferenciales nos dicen cómo cambian los números de personas que se encuentran en cada instante, t , en cada uno de los estados y constituye cada una de ellas un balance del flujo de personas entre estados. Estableciendo que el número de personas en cada estado es el que hay en un instante t más las que entran en el estado procedente de otros, menos las que salen de ese estado con dirección a otros, se obtiene una ecuación funcional en diferencias finitas de balance. Por tanto, basta elegir uno a uno los estados, observar qué flechas entran y qué flechas salen de ese estado e identificar los estados origen y destino, sumando las que entran y restando las que salen para conocer el cambio de personas producido.

Por ejemplo, el balance del estado UCI requiere sumar las personas procedentes del estado H y restar las que salen de la UCI, usando sus respectivas tasas con el signo más cuando entran y el signo menos cuando salen. El observador debe comprobar que efectivamente esto es lo que está escrito en la sexta ecuación.

En el caso de la ecuación segunda, que corresponde al estado E, aparte del flujo de las personas que salen de dicho estado, que llevan el signo menos, y las tasas de flujo hacia los estados M y J, que llevan el signo más, aparece un primer término que merece una explicación especial. Dicho término o sumando corresponde a las personas que pasan de susceptibles a expuestas, es decir, a las que no estando en contacto con personas infectadas, pasan a estarlo. Como el contagio suponemos que se produce por contacto entre infectados y susceptibles, en vez de multiplicar la tasa correspondiente, t_{se} , por $S(t)$, se utiliza el producto $S(t)(J(t) + M(t))$, siendo éste último la suma de todos los infectados, ya sean jóvenes o mayores, es decir, formamos todas las parejas de los susceptibles por los infectados, pero dividida por la población total N . Por tanto, esta tasa tiene una interpretación diferente a las demás del modelo, pues se refiere a número de parejas por unidad de población y no, a personas en el estado S. Considerando los signos adecuados, puede por tanto comprobarse que la ecuación segunda expresa el balance en el estado E.

Dejamos al lector que compruebe que las demás ecuaciones también resultan del balance de sus correspondiente estados.

Al sistema de estas 8 ecuaciones diferenciales, hay que añadirle las condiciones iniciales, que se muestran en las dos líneas finales. La primera indica que inicialmente, para $t = 0$, es decir,

el instante inicial, el número de personas susceptibles es $N - 1$, es decir, el tamaño total de la población menos una, y el de personas expuestas es una sola, precisamente ésta que no está incluida en el grupo anterior. Esto es así para permitir que se inicie la propagación, ya que, si ninguna de ellas está expuesta, ninguna puede infectarse.

Mientras que el método de las ecuaciones diferenciales requiere el uso de métodos numéricos especiales, por ser no lineales las dos primeras ecuaciones, éste último método nos da la solución directamente, independientemente de su linealidad o no. Además, permite implementar no linealidades, retrasos o desfases, límites de las variables, acciones correctoras para el control de la pandemia, etc. mucho más fácilmente. Por ello, recomendamos su utilización.

Otra forma de expresar el modelo es mediante el sistema de ecuaciones funcionales en diferencias ([vídeo: ecuaciones funcionales](#)):

$$\begin{aligned}
 S(t+1) &= S(t) - t_{se}S(t)(J(t) + M(t))/N \\
 E(t+1) &= E(t) + t_{se}S(t)(J(t) + M(t))/N - (t_{ej} + t_{em})E(t) \\
 J(t+1) &= J(t) + t_{ej}E(t) - (t_{jh} + t_{jr} + t_{jf})J(t) \\
 M(t+1) &= M(t) + t_{em}E(t) - (t_{mh} + t_{mr} + t_{mf})M(t) \\
 H(t+1) &= H(t) + t_{jh}J(t) + t_{mh}M(t) - (t_{hu} + t_{hr} + t_{hf})H(t) \\
 U(t+1) &= U(t) + t_{hu}H(t) - (t_{ur} + t_{uf})U(t) \\
 R(t+1) &= R(t) + t_{ur}U(t) + t_{hr}H(t) + t_{jr}J(t) + t_{mr}M(t) \\
 F(t+1) &= F(t) + t_{mf}M(t) + t_{jf}J(t) + t_{hf}H(t) + t_{uf}U(t)
 \end{aligned}$$

con los valores iniciales

$$\begin{aligned}
 S(0) &= N - 1, E(0) = 1 \\
 J(0) &= M(0) = H(0) = U(0) = R(0) = F(0) = 0.
 \end{aligned}$$

que nos dan el número de personas en cada uno de los estados el día $t + 1$, como el número de ellas el día anterior, t , más el número de personas que entran menos las que salen. Nótese que las expresiones de las personas que entran y salen de cada uno de los estados son precisamente las mismas que en el caso anterior. Aunque este sistema se puede interpretar como un sistema en diferencias finitas, es decir, como una aproximación del anterior, tiene una interpretación alternativa como sistema exacto. Además, al no aparecer derivadas, es más fácil de entender.

Este modelo se ha implementado en Mathematica (véase la figura [2](#)) para poder hacer un análisis de sensibilidad, es decir, analizar cómo influyen los cambios en las diferentes tasas y cómo puede controlarse la pandemia. Remitimos al lector al vídeo que acompaña este artículo, para ver más en detalle este análisis ([vídeo: Análisis de sensibilidad](#)).

3. Modelos aleatorios bayesianos

Hemos visto que, al cambiar los valores de las diferentes tasas, cambian las curvas que muestran la evolución entre los diferentes estados. Por tanto, existen tantos modelos diferentes como combinaciones posibles de los valores de las tasas, es decir, infinitos.

La pregunta que nos hacemos ahora es: ¿Cuáles son las tasas que corresponden, o mejor se aproximan, a la realidad? Para ello, lo que hacemos es observar esta realidad y tomar nota del número de personas que hay en algunos de estos estados durante un número de días lo más grande posible.

Si representamos en un gráfico las curvas correspondientes a algunos casos de valores de las tasas, que sean razonables, obtenemos una nube o un haz de curvas, que indican las posibles soluciones a nuestro problema. Para elegir una de ellas, que es lo que se hace en Estadística clásica, elegimos

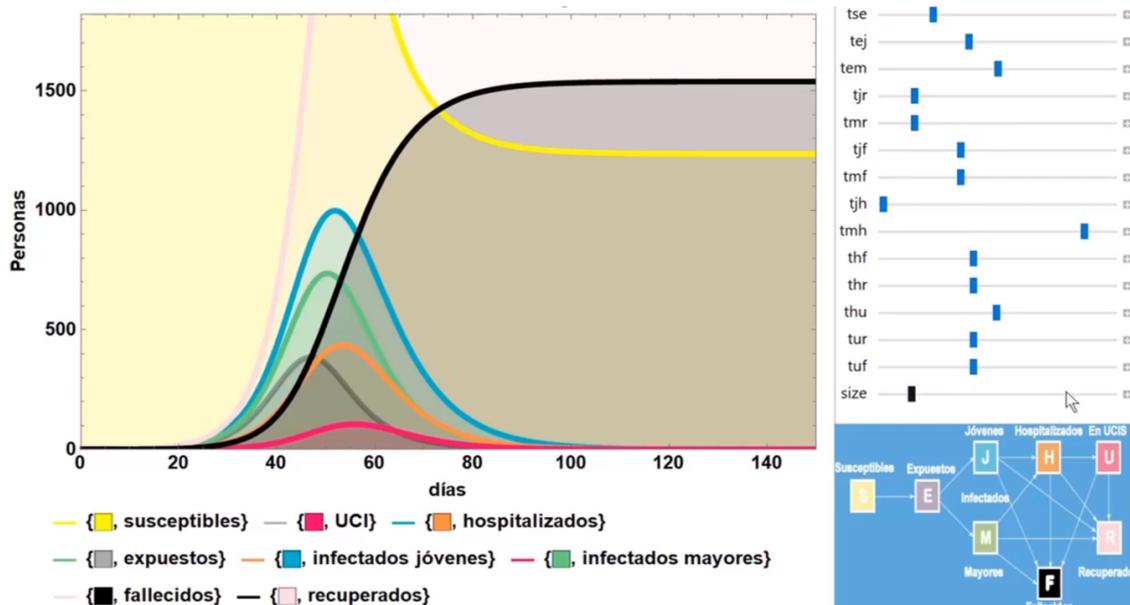


Fig. 2: Ilustración de la implementación en Mathematica.

la que mejor coincidencia tenga con los datos observados, de una o varias curvas, que pueden ser dibujados en el mismo gráfico de las curvas, tal como se ve en la figura 3.

A este proceso, para obtener los valores de las tasas, se le llama estimación de los parámetros, que puede hacerse usando diferentes criterios, como el de los mínimos cuadrados que elige el que está más cercano a los datos, en el sentido de que minimiza la suma de los cuadrados de los errores, aunque pueden utilizarse otros métodos. Por ejemplo, para esto, en la estadística clásica, se usa principalmente el método de la máxima verosimilitud, que elige el modelo más creíble (probable). Por tanto, en estos modelos se elige un modelo de los de la familia de partida y se excluyen otros posibles modelos. Es por esto que es muy importante dedicar un tiempo a analizar cuál es el modelo más conveniente y cuáles deben ser los estados a incluir en dicho modelo.

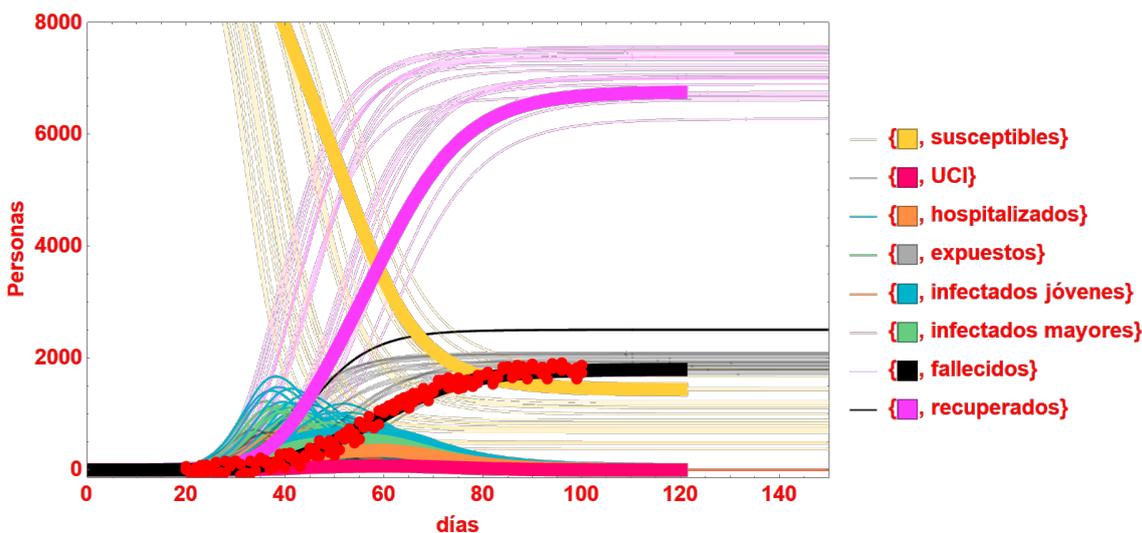


Fig. 3: Ilustración de la estimación basada en los datos observados.

Una vez estimadas las tasas, podemos ya utilizar el modelo para predecir la evolución de la pandemia en el futuro. No obstante, hay que señalar que el método de las ecuaciones diferenciales que hemos descrito es un método determinista, que sólo predice un único valor de la ocupación de los

estados en cada instante, pero no dice nada de la incertidumbre asociada, que debería analizarse, ya que nadie discute que el proceso no es un proceso determinista sino aleatorio.

Por tanto, el modelo determinista predice la media o mediana de la ocupación de los estados solamente, por lo que debemos mejorar el modelo añadiendo medidas de la incertidumbre asociada a cada una de las predicciones.

Una forma de hacerlo es añadir la componente aleatoria, con unas variables aleatorias que aumentan y disminuyen estas medias dotando de un carácter aleatorio a las predicciones. De esta forma, en vez de dar una sola curva, la de la media, podríamos dar las curvas percentiles, que nos marcan los límites entre los que estarían las predicciones con ciertas probabilidades, por ejemplo, 0.01, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 0.95, 0.99, etc. En el gráfico, veríamos en este caso 7 curvas en vez de una por cada estado, como muestra la figura 4, lo que nos daría una estimación mucho mejor.

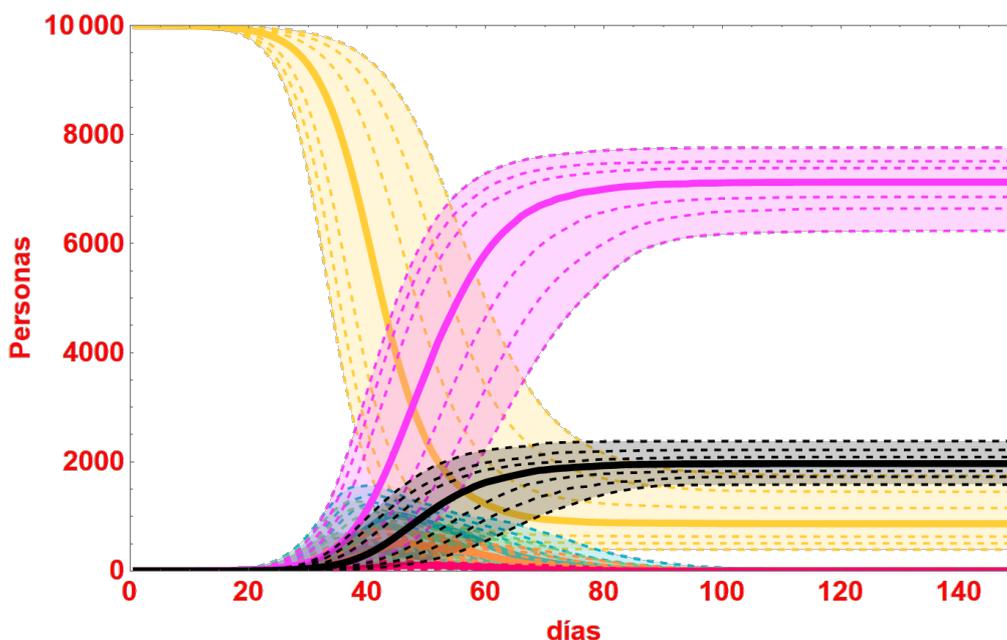


Fig. 4: Ilustración de las curvas de percentiles que permiten obtener la función de densidad de la ocupación de cada estado en cada instante.

Otra forma de convertir el modelo determinista en aleatorio es suponer que las tasas, en vez de ser números fijos, aunque desconocidos, son variables aleatorias. Si fuéramos capaces de conocer cómo son estas variables aleatorias, podríamos obtener estas curvas para cada estado sin más que hacer una simple simulación. Esto es precisamente lo que hacen los métodos bayesianos.

En principio, si no tenemos datos, podemos consultar a los expertos para que nos den una idea de los valores que toman las diferentes tasas de paso entre estados y, con ellas, obtener las curvas. Esto es lo que se llama modelo “a priori”, ya que es el que se usa cuando no hay datos, y se trata de un modelo subjetivo, puesto que los expertos son los que lo definen.

Sin embargo, como normalmente tendremos datos, podremos incorporar la información que éstos nos dan sobre las tasas y modificar éstas incorporando esa información. De esta manera obtendríamos el modelo “a posteriori”, que puede obtenerse mediante el uso del teorema de Bayes, haciendo muchas simulaciones. Tal como hemos dicho, el modelo original, es decir, el “a priori”, se combina con los datos, para dar el modelo “a posteriori”. Si los datos no existen o son reducidos, el peso del modelo “a priori” es muy grande, pero si el número de datos aumenta, llegará un momento en que el efecto de los expertos será casi nulo, obteniéndose un modelo objetivo, ya que serán los datos los que definan dicho modelo.

Una propiedad de los modelos bayesianos es que no se limitan a elegir un modelo de la familia de partida, sino que además de esa familia permiten elegir los modelos que pueden obtenerse mediante mezclas o combinaciones de los modelos de la familia de partida. Esta es una diferencia muy notable a favor de los modelos bayesianos, ya que trabajan con colecciones de modelos mucho más completas, que podrían ser incluso independientes de la familia de partida.

Una interpretación a estas mezclas es que representan diferentes modelos en diferentes poblaciones que tienen probabilidades asociadas diferentes, es decir, diferentes pesos. Esto, en el caso de representar datos de una región amplia o un país entero, tiene mucho sentido, pues habrá grupos de muchos tamaños y comportamientos frente a la pandemia diferentes.

En realidad, el modelo propuesto es una red bayesiana que incorpora una capa de 8 variables por día, que se conectan, es decir, son hija de las 8 del día anterior y de las 14 variables que representan las tasas entre estados. La figura 5 ilustra gráficamente esta red, dando su grafo dirigido acíclico [\(vídeo: Red bayesiana\)](#).

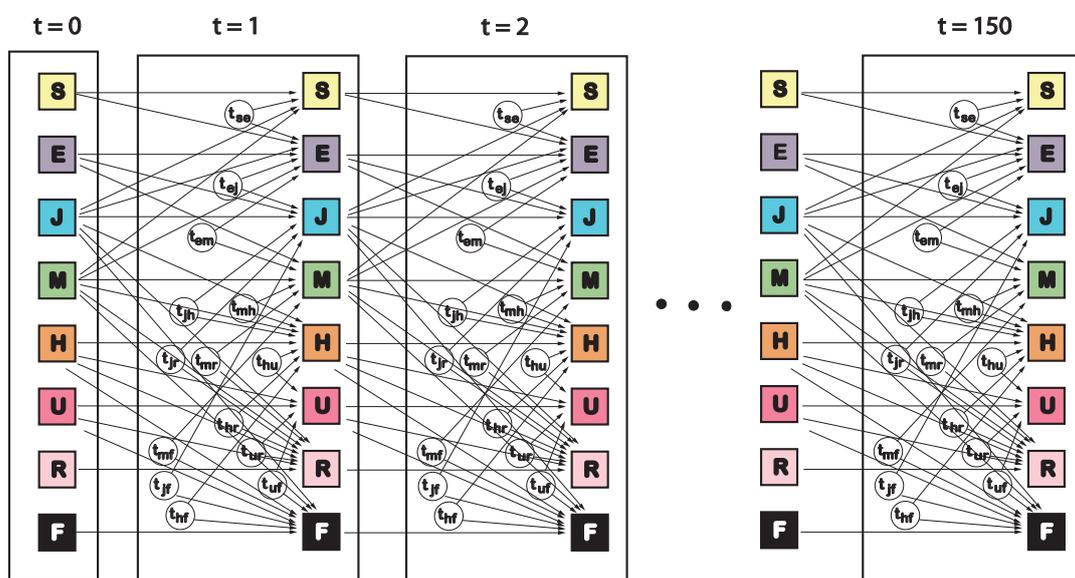


Fig. 5: Ilustración del grafo acíclico de la red bayesiana que muestra las dependencias directas padres-hijos.

Finalmente, hay que señalar que los modelos aleatorios, especialmente los bayesianos, son mucho mejores que los deterministas, que sólo constituyen una parte, aunque importante, de los aleatorios. Por ello, recomendamos el uso de los modelos aleatorios.

4. Conclusiones

Las conclusiones más importantes son las siguientes [\(vídeo: conclusiones\)](#):

1. Antes de desarrollar un modelo para analizar y gestionar una pandemia hay que dedicar un tiempo a su estudio en profundidad y consultar a los expertos de las diferentes disciplinas ligadas a este problema.
2. La decisión sobre los estados que deben incluirse en el modelo condiciona mucho su utilización posterior, por lo que debe hacerse con sumo cuidado. En ella hay que tener también en cuenta los estados que se observan y los que no serán observados. El modelo presentado es sólo un simple modelo utilizado para ilustrar las diferentes etapas del proceso y algunos conceptos importantes.
3. La calidad y veracidad de los datos juega un papel primordial en la utilidad posterior del

modelo. Datos de mala calidad o manipulados influirán muy negativamente en la fiabilidad del modelo resultante.

4. La parte determinista es la indicada para definir la dinámica del sistema en sus valores medios. Las ecuaciones diferenciales son una buena herramienta para representar la dinámica del sistema. Sin embargo, al haber estados con retrasos o componente no lineales, acotación de variables y acciones de control a incorporar, los modelos de las ecuaciones funcionales en diferencias, considerados como ecuaciones exactas para representar el problema, tienen la ventaja de poder aplicarse directamente, sin necesidad de hacer aproximaciones numéricas.
5. Para convertir un modelo determinista paramétrico en aleatorio, lo más conveniente es convertir los parámetros en variables aleatorias. Si los diagramas de partida son acíclicos, estaremos en presencia de una red bayesiana, [7, 5, 4, 6] donde además de las variables regulares, los estados, aparecerán las variables que representan los parámetros, las tasas, con lo que se dispone de un modelo muy claro en su significado físico y sin cajas negras ininteligibles, que no aportan claridad a los modelos. Además, al trabajar con redes bayesianas, se heredan todos los métodos de explicación de resultados correspondientes, que son inmediatamente implementables.
6. La consideración de las tasas como variables aleatorias hace que el modelo que resulta sea una mezcla de los incluidos en la familia determinista elegida, con pesos dados por la distribución 'a posteriori' de las tasas. Esto significa que no sólo se puede elegir un modelo de la familia de partida, sino cualquier mezcla, lo que enriquece notablemente los modelos posibles, pudiendo no limitarlos si la familia inicial es elegida adecuadamente.
7. Estos modelos bayesianos son mucho mejores y más completos que los deterministas y contestan a la pregunta ¿Cuál es el número de personas que están en un cierto estado en un instante dado?, mediante su función de densidad, que va mucho más allá que los estimadores puntuales de los modelos deterministas y que los estimadores por intervalos de confianza de los modelos aleatorios tradicionales.

Bibliografía

- [1] Anderson, R. M. and May, R. M. (1991). *Infectious Diseases of Humans*. Oxford University Press, Oxford.
- [2] Bailey, N. T. J. (1975). *The mathematical theory of infectious diseases and its applications*. Griffin, London, second edition.
- [3] Brauer, F. and Castillo-Chávez, C. (2001). *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer, New York.
- [4] Castillo, E., Bouckaert, R. R., Sarabia, J. M., and Solares, C. (1995a). Error estimation in approximate Bayesian belief network inference. In *Proceedings of the UAI'95*, pages 55–62, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann Publishers.
- [5] Castillo, E., Gutiérrez, J. M., and Hadi, A. S. (1995b). Parametric structure of probabilities in Bayesian networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 946:89–98.
- [6] Castillo, E., Gutiérrez, J. M., and Hadi, A. S. (1995c). Parametric structure of probabilities in Bayesian networks. In *Proceedings of the ECSQARU*, volume 946 of *LNAI*, pages 89–98, Berlin. Springer Verlag.
- [7] Castillo, E., Gutiérrez, J. M., and Hadi, A. S. (1997). *Expert Systems and Probabilistic Network Models*. Springer, New York, 1 edition.
- [8] Daley, D. J. and Gani, J. (2005). *Epidemic Modeling and Introduction*. Cambridge University Press, New York.
- [9] Hethcote, H. W. (2000). The mathematics of infectious diseases. *SIAM Review*, 42(4):599–653.

Ahorro en las campañas de pruebas PCR y de anticuerpos mediante mezclas

Enrique Castillo^{1,2}
Francisco Javier Girón²

¹Real Academia de Ingeniería

²Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen. Se describe cómo la mezcla de muestras, por ejemplo las naso-faríngeas utilizadas en las pruebas PCR o las que se utilizan para detectar anticuerpos, puede conducir a ahorros importantes en el número de pruebas necesarias para luchar contra la propagación de la pandemia Covid-19. La idea básica consiste en mezclar las muestras de varias personas y hacer el test con la muestra mezclada, y si el resultado es negativo, concluir que resultaría negativo para cada una de ellas. En caso de ser positivo, se indica cómo proceder para reducir el número total de pruebas a realizar.

1. Introducción y motivación

La aparición de la pandemia global del covid-19, aparte de los enormes cambios que ha provocado en todas las actividades sociales y económicas, ha tenido también como importante consecuencia la incentivación de los científicos de todo el mundo para la búsqueda de soluciones a los múltiples problemas que está ocasionando.

Mientras se espera la aparición de una o varias, vacunas contra el virus, la comunidad científica, incluidos en ella los matemáticos e ingenieros, está intentando contribuir a mejorar los recursos y los métodos disponibles para luchar contra la pandemia.

Para el control de los rebrotes, resulta muy importante poder realizar muchos tests que permitan una detección precoz. Una visita a cualquier laboratorio que realiza estos tests, pone de manifiesto que muchos de ellos se saturan impidiendo un estudio masivo. Por ello, tenemos la obligación de detectar los cuellos de botella y ver cómo podemos evitarlos. Esta es una labor muy conocida de los profesionales mencionados, que se esfuerzan en optimizar las cadenas de montaje y los procesos de fabricación, habiendo conseguido resultados muy notables.

Desde esta perspectiva, tiene sentido tratar de identificar dónde están los puntos críticos de todo el proceso. Uno de los problemas se suele producir en la recepción de las muestras, muchas veces en bolsas de plástico individuales que hay que manipular, reetiquetar, etc. Este proceso en muchos casos se hace manualmente, lleva mucho tiempo e implica unos riesgos de error importantes. Puede decirse, puesto que ellos nos muestran sus dificultades en este sentido, que es esta fase una de las grandes preocupaciones de los laboratorios, que, por un lado disponen de robots muy efectivos para realizar y manipular muestras en la fase de ensayo, pero carecen de una infraestructura adecuada en la fase previa. Un trabajo en esta línea tendría mucho interés. Sin embargo, en este trabajo proponemos cambios en otra dirección.

Hay que indicar también que, ante una situación de emergencia, como la actual, lo primero es utilizar lo que ya existe y se ha experimentado, y en caso de que esto no fuera suficiente o mejorable, ponerse a la búsqueda de nuevas formas más satisfactorias de enfrentarse al problema.

En este trabajo nos centramos en un método ya existente, pero que parece que no se le da la importancia que realmente tiene. Por ello, tratamos de justificarlo y animar a los responsables de la salud pública a que lo implementen como uno de los que deben ser utilizados.

Uno de los problemas más acuciantes en este momento es obtener instrumentos eficaces para la detección de la enfermedad, para lo cual se han diseñado varios tipos de pruebas, que pueden clasificarse inicialmente como pruebas virales y pruebas de detección de anticuerpos.

Con el fin de tener una descripción global de la pandemia del Covid-19, se está hablando mucho de hacer este tipo de pruebas en toda la población mundial, lo que supone un esfuerzo logístico y económico imposible, de modo que hay que restringir la aplicación de los tests a ciertos grupos poblacionales.

Hasta ahora, normalmente, se están haciendo, en su mayoría, tests individuales, a pesar de que existen metodologías por grupos cuya eficiencia estadística ha sido fehacientemente probada, e incluso utilizada previamente en ensayos clínicos para detectar otras enfermedades similares.

Concretamente, en Cantabria y en otros lugares, se están analizando y utilizando ya métodos para reducir el número de tests necesarios para determinar si una persona tiene el virus o si tiene anticuerpos, dos problemas muy diferentes.

2. Descripción de la metodología propuesta

La idea del método que se sugiere utilizar para optimizar tiempos y recursos es la siguiente: Aunque hasta ahora se está haciendo mayoritariamente un test individual a cada persona, lo que se propone, a cambio, basándose en conocimientos de probabilidad y estadísticos y también en experiencias previas, es utilizar técnicas de mezclado de muestras, ya sean las existentes u otras nuevas, que permitan reducir significativamente el número de ensayos a realizar.

Esta propuesta de ensayos alternativos es muy efectiva cuando la prevalencia, es decir, la proporción de personas que padecen la enfermedad en la población es muy pequeña, aunque deja de ser tan efectiva cuando la prevalencia toma valores altos.

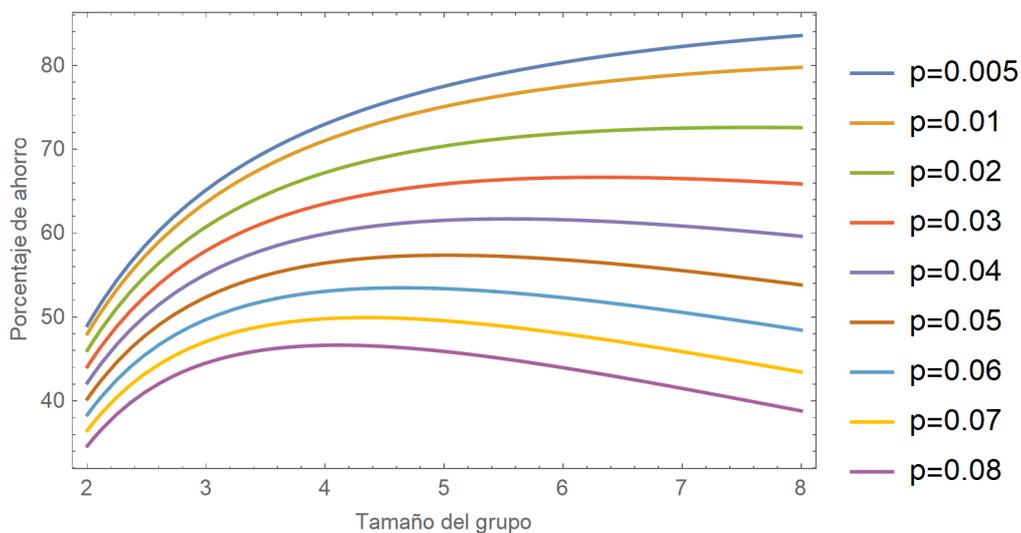


Fig. 1: Ahorros conseguidos por el método de Dorfman para diferentes prevalencias y tamaños de grupo.

Hay que señalar que desde hace ya mucho tiempo, el conocimiento de la estadística y la probabilidad han aportado soluciones basadas en mezclar las muestras para reducir sustancialmente el número de pruebas necesarias para detectar los resultados individuales. Ya en 1943, Robert Dorfman [1] publicó un artículo en el que proponía reducir el número de muestras simplemente mezclándolas, realizando el ensayo con la mezcla de n de ellas y si saliera negativo, concluyendo que todas las muestras mezcladas eran negativas. En caso contrario, este investigador proponía hacer el ensayo con cada muestra individual. De esta forma se concluía con un único ensayo todas las muestras mezcladas, en el primer caso, y con $n + 1$ ensayos cada una, en el segundo. La eficiencia de este método para diferentes prevalencias y tamaños de grupo puede verse en la figura 1, donde las curvas muestran cómo varían los ahorros conseguidos para diferentes tamaños

de mezcla y prevalencias p .

Puede comprobarse que hay unos tamaños óptimos que conducen al máximo ahorro y que por debajo y por encima de ellos se reducen éstos. Por ejemplo, para el caso de una prevalencia del 5 %, el tamaño óptimo se consigue mezclando 5 muestras, lo que conduce a un ahorro del 57,37 % de las pruebas, que podría alcanzar el 80 % si la prevalencia fuera 0,5 % y se mezclaran las muestras de 8 personas, o bajar al 45 % para una prevalencia del 8 % con muestras de 4 personas.

Como la probabilidad de que al aplicar el test a una persona, el resultado salga positivo es muy pequeña (del orden de 5 % en toda la población), se propone mezclar las muestras de un grupo de n de ellas y hacer primero un único test, con lo que, si sale negativo, —lo que ocurrirá en la gran mayoría de las mezclas si n no es muy grande—, puede concluirse que todos los integrantes del grupo dan negativo con un único test. En caso contrario se procede por partes o individualmente.

3. Una propuesta mejorada

Sin embargo, este método puede mejorarse, como muestran los ejemplos de las figuras 2 y 3.

En la primera se dan los protocolos que se proponen para trabajar con grupos de $n = 2$ y $n = 3$, es decir, para grupos de 2 y 3 personas.

En el caso de dos personas hay tres fases como máximo. Si la primera fase, en la que se analiza la muestra mezclada, sale resultado negativo, se concluye que a las dos personas les corresponde resultado negativo, concluyendo el proceso. Si sale negativo, en la fase 2, se hace el test con la muestra de la primera persona lo que nos permite conocer el resultado para esta persona. Si sale negativo, se concluye, también, que el de la segunda es positivo. Finalmente, sólo si sale positivo el test de la segunda fase, habrá que realizar el test con la muestra de la segunda persona y concluir lo que resulte. Quiere esto decir, que pueden ser necesarios 1, 2 ó 3 tests, con las probabilidades indicadas en la segunda columna de la tabla, pero como suponemos una prevalencia baja, la probabilidad de realizar un único test es mucho mayor que las demás, lo que nos lleva a un importante ahorro.

La tabla de la figura 2 nos explica todos los casos posibles. En su primera columna se muestran los 4 casos posibles, donde 0 y 1 se refieren a negativo y positivo, respectivamente, la columna segunda nos da las probabilidades de que cada combinación ocurra en función de la prevalencia p , la tercera, cuarta y quinta columnas nos indican, con un uno, si en esos casos se llegaría a la fase correspondiente o, con un cero, si no se llegaría. Finalmente, la última columna nos indica el total de fases a las que hay que recurrir para cada combinación posible.

En la parte baja de la tabla se dan las fórmulas que dan la media o el número esperado de pruebas en función de la prevalencia p .

La parte baja de la figura 2 nos muestra el protocolo a seguir en el caso de 3 personas, que consta también de tres posibles fases y, en la tabla correspondiente, nos da la misma información que la tabla anterior, pero para este caso.

Análogamente, la figura 3 nos explica cómo proceder para el caso de $n = 4$ personas, y la misma información que en los casos anteriores. Por supuesto, hay protocolos desarrollados para grupos de mezcla mayores, que no podemos incluir aquí, por falta de espacio.

Todo este proceso conduce a ahorros muy importantes, como los que se indican en la figura 4 en la que a los resultados de la figura 1 se han añadido, mediante pequeños círculos, las mejoras que se consiguen en los ahorros a medida que crece el tamaño del grupo. La tabla 1 ilustra también estas mejoras.

Esta propuesta metodológica hay que analizarla previamente y validarla en laboratorio, lo que se ha hecho ya en el hospital de Valdecilla y en otros hospitales españoles y no españoles.

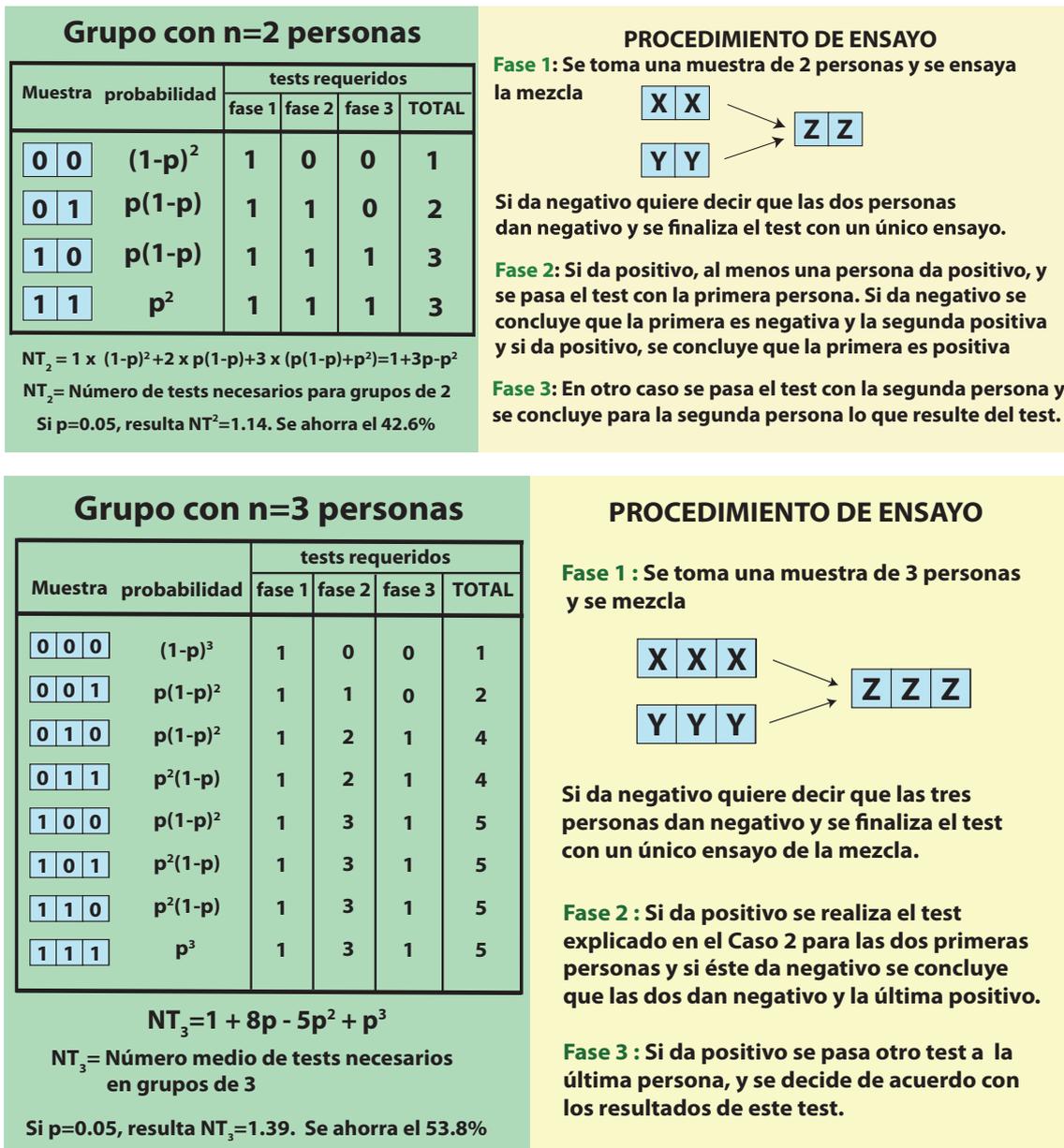


Fig. 2: Descripción de la metodología para el caso de pruebas con grupos de 2 y 3 personas con indicación del ahorro correspondiente para una prevalencia $p=0.05$.

4. Uso en la práctica según el tipo de pruebas y la fase de la pandemia

En determinados grupos que no corren riesgos altos de contagio, la tasa de infectados es muy pequeña, con lo que estos tests de grupo son mucho más efectivos.

La técnica descrita puede utilizarse en situaciones diferentes. Una de ellas es la detección de contagios, en la que se persigue determinar aquellos individuos que tienen la enfermedad.

Otra, muy interesante, es la prevención, en la que se determinan aquellos individuos que no tienen la enfermedad, como ocurre con el caso de las escuelas, donde la prevalencia de la enfermedad suele ser muy baja, y en los grupos de riesgo, como las residencias de mayores, donde la prevalencia suele ser muy alta. No tendrá sentido utilizar el método en una residencia de ancianos donde se sospecha a priori que la mayoría estará infectada. Sin embargo, en las escuelas al comienzo de las clases o durante el control periódico puede resultar muy interesante utilizarlo si se vislumbra ausencia de contagios. Esto es importante tenerlo en cuenta, pues la eficiencia del método depende

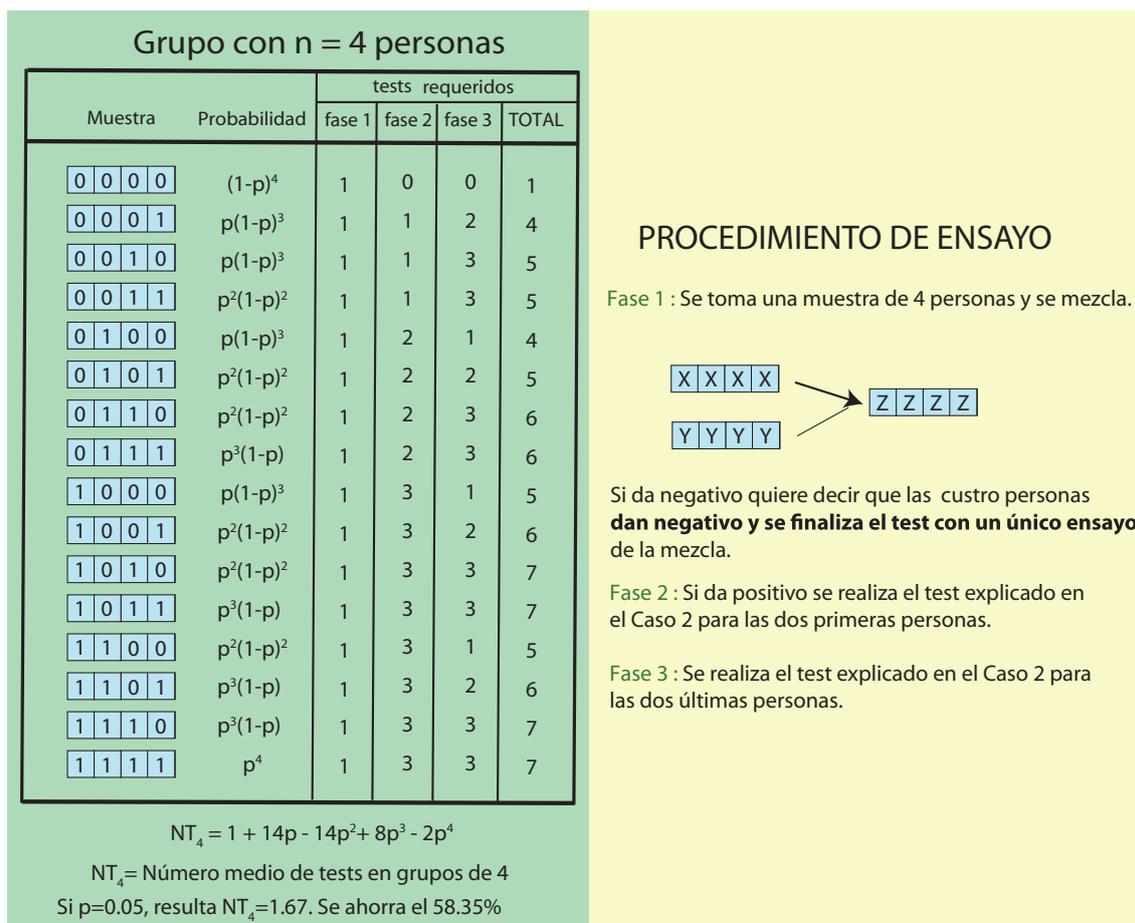


Fig. 3: Descripción de la metodología para el caso de pruebas con grupos de 4 personas con indicación del ahorro correspondiente para una prevalencia p=0.05.

de la prevalencia.

Así, por ejemplo, antes de entrar en las escuelas, deberían utilizarse estos tests de grupos, eligiendo adecuadamente el tamaño de esos grupos. Además, sería necesario hacer un seguimiento cada dos o tres semanas, con lo que se ahorrarían una buena parte de los tests.

Además, el conocimiento de si las personas estudiadas tienen o no, síntomas y su procedencia u otros datos, nos permiten realizar el mezclado de las muestras para optimizar los ahorros.

Por último, hay indicar que el uso de estas técnicas para detección de anticuerpos pierde interés al aumentar el número de personas que los tienen, ya que, como se ha indicado, la eficiencia baja mucho con el aumento de la proporción de personas que tienen estos anticuerpos.

<i>n</i>	Dorman	improved
2	40.75	42.62
3	52.40	53.74
4	56.45	58.35
5	57.37	60.24
6	56.84	64.75

Tabla 1: Comparación de los ahorros conseguidos con el método de Dorman y el propuesto para una prevalencia p=0.05.

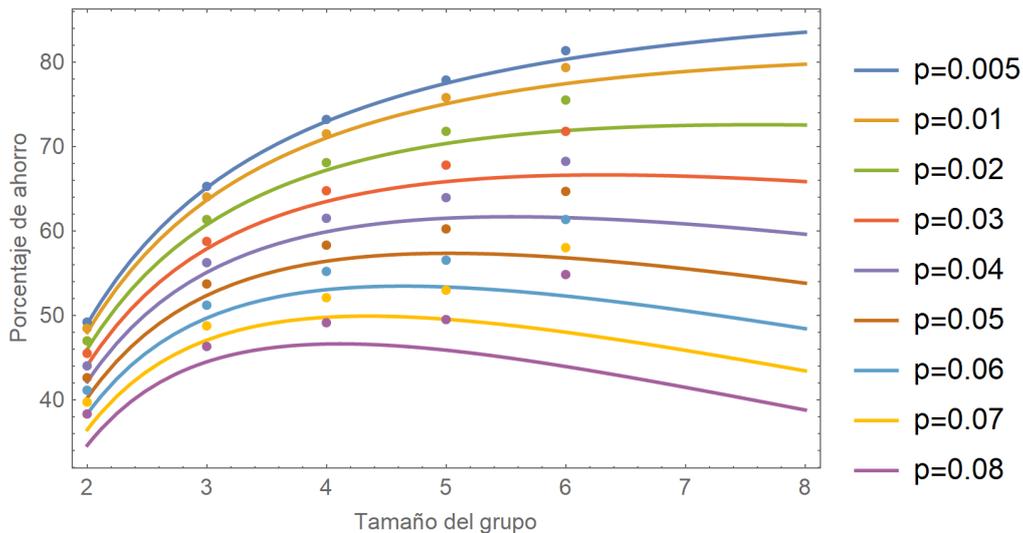


Fig. 4: Ahorros conseguidos por el método de Dorman para diferentes prevalencias y tamaños de grupo y mejoras obtenidas con los métodos propuestos.

5. Consideraciones finales

El método que presentamos no es nuevo y hay muchas publicaciones que analizan y discuten estos métodos (véase, por ejemplo, [2] ó [3]). Además, se ha usado ya en bastantes casos y se ha constatado que la posibilidad de mezclar las muestras naso-faríngeas de varias personas es un hecho, lo que permite implementar la técnica no sólo en el caso de análisis de sangre, sino también en otros casos.

De hecho, el 20 de agosto de 2020 se produjo el siguiente hecho relevante:

Se emitió una autorización por la Administración de Alimentos y Medicamentos de EEUU, de uso de emergencia para la prueba Quest SARS-CoV-2 rRT-PCR de Quest Diagnostics para su uso con muestras agrupadas que contienen hasta cuatro muestras de hisopos individuales recolectadas bajo observación. La prueba es la primera prueba de diagnóstico de COVID-19 autorizada para su uso con muestras agrupadas.

En este artículo queremos poner de manifiesto nuestra sorpresa por comprobar que estos métodos, o similares, no estén aún implementados sistemáticamente en todos los laboratorios. Las causas de esta situación pueden encontrarse en que muchos avances matemáticos y biológicos no son conocidos con generalidad; en la resistencia a los cambios o innovaciones; en la falta de medios; en la falta de colaboración multidisciplinar, etc.

Con respecto al desconocimiento de los avances matemáticos hay que decir que los matemáticos e ingenieros deberíamos divulgar mucho mejor los avances que se están haciendo y sugerir posibles aplicaciones, directamente a las personas que fueran capaces de implementar los cambios correspondientes. Por otro lado, para diseñar estos tests debería contarse con matemáticos que aportaran el conocimiento matemático estadístico y con ingenieros que implementaran procesos eficientes.

Cuando los avances importantes y útiles no se divulgan lo suficiente, lo que desafortunadamente ocurre con frecuencia, especialmente en matemáticas, pero también en otras muchas áreas, hay que hacer algo, pues de lo contrario estamos desperdiciando el conocimiento.

Por ello, es necesario y urgente, implementar estos nuevos métodos para hacer frente a la saturación actual. Queremos hacer aquí una llamada a todos para que se produzca este cambio. Por último, queremos expresar nuestro agradecimiento a D. José María Mazón Ramos, diputado por Cantabria del Parlamento español, por la ayuda prestada para contactar con Valdecilla y poder

llevar a cabo este estudio.

Finalmente, hay que indicar que dado que las decisiones a tomar implican no sólo a la salud sino también a la economía, a las empresas y a los puestos de trabajo, no debería extrañar que estemos trabajando en los límites de lo razonable, pues las soluciones óptimas suelen estar en dichos bordes. Por ello, mucho mejor que controlar el número de infectados, que tendrá una aportación positiva al frenado de la pandemia, habrá que controlar los riesgos de las personas infectadas y las capacidades de nuestros centros de salud.

Bibliografía

- [1] Dorfman, R. (1943). The detection of defective members of large populations. *Ann. Math. Stat.*, 14:436–440.
- [2] Hwang, F. K. (1972). A method for detecting all defective members in a population by group testing. *Journal of the American Statistical Association*, 67(339):605–608.
- [3] Litvak, E., Tu, X. M., and Pagano, M. (1994). Screening for the presence of a disease by pooling sera samples. *Journal of the American Statistical Association*, 89(426):424–434.

España en los tiempos de la COVID-19

César Dopazo

Académico Numerario de la RAI
Profesor Honorífico de la Universidad de Zaragoza

Resumen. Este documento contiene reflexiones sobre la evolución en España de la pandemia del SARS-CoV-2, su gestión por las administraciones central y autonómicas, y las medidas de control adoptadas. Se argumenta que desde el comienzo habría sido necesario considerar, además de los aspectos sanitarios, aquellos relativos al impacto de la COVID-19 en la economía y la sociedad en general. A efectos formales se consideran separadamente tres períodos: la inepción de los contagios entre febrero/marzo y final de junio de 2020; la segunda “ola” en el verano desde julio hasta final de septiembre; el horizonte post-COVID. En la fase inicial, se sugieren varias estrategias que, presumiblemente, podrían haber atenuado los efectos sanitarios y económicos de la pandemia. Se resume el hundimiento de indicadores económicos, como resultado de la pandemia, estimados durante el verano de 2020 para el segundo trimestre del año; se establece una correlación aparente para diversos países entre la calidad de la gestión de la crisis, valorada por el número de fallecimientos por millón de habitantes, y la caída del PIB y se presentan las opiniones de expertos sobre posibles causas para explicar el adelanto y la intensidad en España de la segunda “ola” de la COVID-19 a partir de agosto de 2020. Se propone una estrategia post-COVID para salir de la profunda recesión y reestructurar varios sectores de actividad; se sugiere el análisis de diferentes escenarios y la definición de hojas de ruta que cuantifiquen las inversiones requeridas e identifiquen las trabas regulatorias. Se enumeran algunas conclusiones, necesariamente incompletas, que deberían al menos ser examinadas.

Abstract. This paper contains reflections on the evolution of the SARS-CoV-2 pandemic in Spain, its management by the central and regional governments and the adopted control measures. It is argued that it would have been necessary from the beginning to consider, apart from sanitary aspects, those related to the COVID-19 impact on the economy and the society at large. Formally, three periods are separately treated: the inception of infections between February/March and the end of June 2020; the second “wave” along the summer from July to the end of September; the post-COVID horizon. In the initial stage, suggestions of various strategies, which, presumably, could have mitigated health and economic effects of the pandemic, are described. A summary of the collapse of economic indicators, as a result of the pandemic, estimated during the 2020 summer for the second quarter of the year is presented; an apparent correlation for several countries between the crisis effective management, using the number of deaths per million inhabitants, and the GDP fall is established, and expert opinions on possible reasons explaining the early appearance and intensity in Spain of the COVID-19 second “wave” starting August 2020 are provided. A post-COVID strategy is outlined to emerge from the deep economic recession and to restructure various activity sectors; suggestions are made to analyze different scenarios and to define road maps quantifying required investments and identifying regulatory stumbling blocks. Some conclusions, necessarily incomplete, are itemized, and should be at least examined.

1. Introducción

A final del mes de abril de 2020, una nota incluida en esta publicación [1] reseñaba: “*Los efectos de una pandemia, como la COVID-19, se han de analizar desde sus diversos aspectos epidemiológicos, estratégicos, económicos y sociológicos. Esta aproximación es necesaria debido al desconocimiento del virus, los distintos escenarios de avance de los contagios en función de las medidas de control adoptadas y del impacto socioeconómico que estas últimas necesariamente tendrán en el sistema productivo y en la sociedad española, en general*”. Otras publicaciones posteriores [2] insisten en la necesidad de comprender “... *el impacto que la pandemia y las medidas de contención pueden tener ... en el desarrollo regulatorio, en la economía, y en los derechos fundamentales y libertades*”; se insiste, además, en la aproximación

sistémica con argumentos como “... *hay una comprensión limitada de cómo las medidas que se han tomado ... están perturbando los sistemas sanitarios, los negocios, las cadenas de comercio, y la sociedad en general ...*” y “... *se necesita una perspectiva multidisciplinar ... ciencias biológicas y médicas, otras ciencias naturales e ingeniería, ciencias sociales y humanidades*”. La consultora PWC [3] reconoce que “la pandemia no se consideraba en la planificación estratégica de negocios” y sugiere incluirla en “... simulaciones basadas en escenarios realistas a corto, medio y largo plazos”. La gestión de la incertidumbre, a consecuencia de la pandemia, en diversos sectores de actividad económica se examina en la referencia [4].

Un observador no excesivamente perspicaz habría anticipado en el mes de marzo de 2020 la necesidad ineludible de análisis multidisciplinares rigurosos, basados en el estado del arte, sobre el impacto de la pandemia en la economía, en la educación y en la sociedad en general, en paralelo con los estudios virológicos y sanitarios correspondientes. “*La Física es relevante para determinar la distancia que pueden recorrer las gotas que contienen virus, generadas tras un estornudo, para decidir el distanciamiento físico y valorar la efectividad de las mascarillas*”, “*la ingeniería es importante en el desarrollo de máquinas que ayuden a la supervivencia y a evitar contagios*”, “... *las ciencias sociales, económicas y del comportamiento así como el derecho son cruciales para desarrollar estrategias prácticas que reduzcan eficazmente los contactos humanos*” y “*las humanidades son necesarias en aspectos relativos a la aceptabilidad moral, ética, impacto psico-social, cultura y de comunicación que conforman la toma de decisiones complicadas*” [2]. El citado observador habría propuesto, sin la menor duda, la creación de un Comité Asesor formado por expertos, académicos, profesionales y empresarios, así como otros agentes sociales, no sólo en virus y enfermedades, sino también en ciencias de la naturaleza, ingeniería, economía, sociología, humanidades, ...

El mismo observador del párrafo anterior, aunque no sólo avisado sino además bien informado, habría propuesto el escrutinio de los horizontes inmediato y post-COVID-19 mediante el uso de escenarios y técnicas de planificación estratégica [5]. Un porcentaje importante de políticos y empresarios españoles ignoran o rechazan el uso extensivo de “prospectiva”, “planificación”, “escenarios” o sus sinónimos, y practican “improvisación” y “ocurrencia”, eso sí, creativas. Esto conlleva casi siempre, particularmente en situaciones excepcionales, tomas de decisiones equivocadas e innecesariamente costosas [6]. Este observador documentado habría sugerido inequívocamente la realización de análisis prospectivos de escenarios a corto, medio y largo plazo, para acotar la incertidumbre de la España futura con distintas hipótesis de evolución de variables macroeconómicas y epidemiológicas.

Esta breve nota intenta proponer estrategias diferentes a las adoptadas en la gestión de la pandemia en España, desde su arranque, su evolución a corto y medio plazos, hasta la propuesta de oportunidades para reinventar la sociedad española del futuro. Este análisis se centrará en algunos aspectos de economía e ingeniería. En la Sección 2 se centra en las decisiones adoptadas entre comienzos de marzo y final de junio de 2020. El desarrollo de la crisis desatada por la pandemia en julio-septiembre se trata en la Sección 3. El futuro inmediato y el horizonte a medio y largo plazos se considera en la Sección 4. La Sección 5 esboza algunas conclusiones relativas a la gestión de la pandemia en España a su inicio y desde julio hasta el presente, y reflexiones sobre la oportunidad para reinventarnos.

2. Incepción de la pandemia en España

El 31 de enero se registró el ingreso hospitalario y aislamiento de un ciudadano alemán en Canarias, confirmándose su contagio por coronavirus. Los primeros casos de infección por

SARS-CoV-2 se registraron en la España peninsular durante el mes de febrero. Las cifras oficiales de infectados se dispararon a partir de la primera semana de marzo. Se tenía información, probablemente sesgada, sobre el impacto del virus en China, Corea del Sur e Irán, y datos más fidedignos de Italia. Las alocuciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) comenzaron alertando y continuaron alarmando acerca de la contagiosidad del coronavirus y del posible impacto de la pandemia.

Los virólogos y los microbiólogos bien informados saben que el contacto entre personas es el parámetro más importante en la propagación de una epidemia. El número de individuos asintomáticos, sanos aparentemente pero potencialmente contagiosos, que en el caso de la COVID-19 se supone podría ser elevado en comparación con la cifra de infectados declarados, es otro parámetro esencial de transmisión. Los tiempos característicos de contagio, curación y muerte son también relevantes.

Parece obvio que, incluso con el limitado conocimiento disponible sobre el SARS-CoV-2, las medidas administrativas deberían prioritariamente por prudencia haber reducido los contactos entre individuos (distanciamiento social) y adoptado barreras físicas de protección (uso de mascarillas). En la primera quincena de marzo se mantuvo el flujo bidireccional de pasajeros normales entre España e Italia, un país significativamente infectado entonces por el virus. Asimismo, la asistencia a estadios, a actividades de ocio, a centros educativos y a manifestaciones masivas se mantuvo sin exigir ni distancias de seguridad ni el uso de mascarillas. Ni se aconsejó ni se obligó la adopción de medidas de protección ni en el transporte público ni en las residencias geriátricas. La aparente carencia en esos momentos de mascarillas para el grueso de la población se podría haber resuelto recomendando e incluso exigiendo el uso de mascarillas de fabricación casera.

Por otro lado, la hipótesis plausible de una elevada relación entre los números de asintomáticos y los de infectados declarados complica el control de la propagación de los contagios. Junto a la realización de pruebas masivas de detección y al empleo de rastreadores, las medidas para limitar contactos personales contribuyen a la reducción eficiente de individuos asintomáticos. En marzo era imposible realizar pruebas masivas de rastreo del SARS-CoV-2 (e.g., tests PCR) para la detección y aislamiento de asintomáticos. El alto número de infectados asintomáticos podría explicar las características de la propagación de contagios del coronavirus tanto durante el estado de alarma, hasta la segunda quincena de junio de 2020, como en la segunda “ola”, a partir del mes de julio.

Los hechos son que en la primera quincena de marzo las cifras oficiales de contagiados y fallecidos se dispararon de manera alarmante. El alto número de infectados conllevó un elevado número de ingresos hospitalarios y una saturación del sistema sanitario. Médicos, Técnicos, Asistentes, Auxiliares y Ayudantes de Enfermería se vieron desbordados por los excesivos ingresos y largos periodos de permanencia hospitalaria, además de la escasez de equipos de protección individual (EPI), el desconocimiento de tratamientos eficaces de la COVID-19 y la insuficiencia de equipos materiales (e.g., respiradores). Los hospitales contribuyeron a la propagación de la enfermedad. Hasta el 30 de septiembre, según datos del Ministerio de Sanidad, 63.149 profesionales sanitarios resultaron positivos por COVID-19 en España (8,1% del total de infectados) y 63 fallecidos hasta el 5 junio. Como comparación hasta el 12 de junio los fallecimientos de profesionales sanitarios por la COVID-19 ascendían a 11 en Francia, 45 en Italia, 11 en Holanda, ninguno en Portugal y Croacia, 3 en Bulgaria y 70 en Rumania (Redacción Médica, 02.07.2020).

El colapso del sistema sanitario perjudicó en mayor medida a la población de riesgo, los ciudadanos de mayor edad y los que padecían alguna afección cardiológica o respiratoria. Los responsables de residencias geriátricas, concebidas como moradas para estancia de mayores y que, mayoritariamente, no cuentan con personal sanitario en sus plantillas, vieron cómo proliferaban los infectados que, en un número importante de casos, no podían ni aislar ni derivar a hospitales abarrotados. La recopilación por RTVE de datos de mayores fallecidos por COVID-19 o síntomas compatibles con la enfermedad en las distintas Comunidades Autónomas (CCAA), hechos públicos el 1 de octubre de 2020, arroja un número aproximado de 20.527 personas muertas en las 5.457 residencias geriátricas españolas públicas, concertadas y privadas. Esta cifra representa el 64,2% del total de muertes oficialmente notificadas por el Ministerio de Sanidad. Otras fuentes sitúan el número real de muertos en torno a los 54.000, que al aplicar el mismo 64,2% arrojaría alrededor de 35.000 mayores fallecidos por COVID-19.

No se trata en esta breve reseña ni de determinar el impacto que las aglomeraciones rutinarias o excepcionales de la primera quincena de marzo pudieron tener en el incremento de contactos activos y, por tanto, en el aumento excesivo de contagiados declarados y asintomáticos. Se ha de reseñar, sin embargo, que la propagación de una epidemia como la COVID-19 se produce más como progresión geométrica que aritmética y, por consiguiente, un pequeño número de infectados declarados o asintomáticos puede generar en una cifra muy elevada de contagios en unos pocos días o semanas.

¿Por qué razones el SARS-CoV-19 ha causado en España más infectados y más fallecidos (por 100.000 o por millón de habitantes) que en la mayoría de los países de nivel comparable de desarrollo socioeconómico? El 14 de marzo se decretó el estado de alarma, como resultado del desconcierto y temor creados por la progresión desmesurada de las cifras de contagiados y de fallecidos. Esta decisión implicó el cese de toda actividad económica y social no imprescindible. Se paralizó gran parte del sistema productivo, se anuló casi al completo el transporte aéreo y la llegada de turistas, se cerraron los centros educativos a todos los niveles. El gobierno centralizó la gestión de la COVID-19 y responsabilizó de su pilotaje al Ministerio de Sanidad, un organismo con escasos recursos y competencias, dada la transferencia de éstas a las CCAA. Al mismo tiempo, un licenciado en Medicina asumió el papel de asesor sanitario único para la COVID-19.

¿Era el confinamiento total la única alternativa? ¿Había otras opciones al nombramiento de un asesor único dedicado exclusivamente a aspectos de salud pública? Aparte de otros factores relacionados, el cese de gran parte de la actividad productiva, resultante del confinamiento total, explica el hundimiento de la economía española en el segundo trimestre de 2020 con un desplome interanual del PIB del 18,48%, sólo superado en Europa por el Reino Unido con el 20,37% (El País, 26.08.2020).

¿Habría un confinamiento selectivo reducido la caída en picado de nuestra economía? Un gobierno puede priorizar sectores productivos en base a su relevancia económica y al riesgo de infección en el desempeño de sus actividades [7]. Representando el riesgo de contagio de cada sector en función de la relevancia económica (o social) del mismo se pueden establecer un diagrama con grupos diversos. La Figura 1 muestra esquemáticamente los distintos grupos en los que se podría situar un sector de actividad económica o social. En principio, los sectores de actividad económica situados en las zonas I-IV podrían haber continuado su actividad, mientras que los ubicados en V y VII requerirían un análisis más detallado antes de tomar una decisión. Los sectores localizados en las zonas VI, VIII y IX serían firmes candidatos para proponer su cese temporal de actividad. Se han publicado escalas estimadas del riesgo de contagio del coronavirus de distintas actividades [8]; escalas similares para cada sector se podrían complementar con su

contribución al PIB para elaborar la Figura 1. Sin embargo, una estimación mas rigurosa del riesgo de contagio debería incluir modelos sencillos de interacción de partículas [9] u otros métodos estocásticos [10, 11] calculando la probabilidad de infección y los contactos efectivos diarios. Un confinamiento selectivo con un cese de actividad empresarial parcial basado en estos principios podría haber implicado una caída menos brusca de la actividad económica. La opción del teletrabajo, siempre que fuese posible, se debería tener presente en los análisis anteriores. Se ha estudiado, por ejemplo, detalladamente el cierre dinámico óptimo de las redes de transporte público en tres grandes urbes [12], con cargas víricas variables, integrando modelos epidemiológicos y de comercio; el resultado indica que cierres zonales, en vez de totales y uniformes, reducen significativamente las pérdidas de las empresas con la sencilla adopción de una estrategia de limitar inicialmente los viajes a los distritos centrales con alta densidad de individuos, seguida de una relajación gradual.

Asimismo, se podría haber estudiado la paralización selectiva, basada en un análisis de riesgos, de los distintos niveles de enseñanza y, especialmente, las medidas necesarias y su coste asociado para lograr un sector educativo totalmente operativo en el plazo más breve posible (a ser posible durante el final del curso 2019-2020, y, con certeza, en el curso 2020-2021).

Los párrafos anteriores sólo pretenden ilustrar algunos de los diversos aspectos relativos al inicio de la crisis inducida por el SARS-CoV-2. Considerar únicamente la salud pública en la toma de decisiones, incluso en el caso de que éstas hubieran sido correctas, ha significado dejar aspectos económicos, sociales y humanos al albur de factores imponderables.

	Baja	Moderada	Alta
Riesgo de Contagio			
Bajo	V	II	I
Moderado	VI	IV	III
Alto	IX	VIII	VII
	Baja	Moderada	Alta
	Relevancia Económica		

Figura 1. Grupos de actividad económica (o social) por riesgo de contagio y relevancia económica (o social).

3. La COVID-19 en el verano de 2020

En la segunda quincena de junio de 2020, tras varias prórrogas del estado de alarma, cesaron las restricciones de movilidad impuestas el 14 de marzo. Como consecuencia del riguroso confinamiento, impuesto por el estado de alarma, se ha producido un importante hundimiento de la economía española superior al de otros países de mayor o similar nivel de PIB per cápita. La pandemia parece haberse cebado con la estructura económica de España, excesivamente dependiente del turismo y de servicios, sectores particularmente vulnerables.

En el mes de junio, FEDEA publicó una recopilación de contribuciones [13]. En el prólogo se indica que *“El Fondo Monetario Internacional en su último Informe de Perspectivas de la Economía Mundial (WEO, por sus siglas en inglés), publicado a principios de abril, prevé una contracción de la economía global del 3 por ciento del PIB para el 2020 (-7,5 por ciento para la zona euro), la mayor recesión mundial desde la Gran Depresión y mucho más profunda que la de la crisis de los años 2008 y 2009”, así como “España ya estaba en una situación de relativa vulnerabilidad económica antes de la pandemia. A principios de este año seguíamos arrastrando todavía fuertes desequilibrios como consecuencia de la anterior crisis y de nuestra «pereza fiscal» durante la fase de recuperación, con una elevada deuda pública —cercana al cien por ciento del PIB— y una tasa de paro próxima al 14 por ciento —el doble de la media de la eurozona—. Tampoco ha ayudado nuestra estructura económica, fuertemente sesgada hacia el sector servicios y el turismo y con un peso relativo alto de pequeñas y medianas empresas, generalmente peor preparadas para lidiar con crisis. A eso hay que sumarle otras características como una demografía envejecida, muy vulnerable al virus, o un mercado laboral profundamente dual, tendente a destruir empleo de forma masiva en periodos de crisis y con una incidencia muy desigual entre distintos grupos de población”.*

En el mismo sentido se pronuncia McKinsey & Co [13] que enumera como debilidades de la economía española para afrontar la crisis derivada de la COVID-19: i) su dependencia mayor del turismo y menor de la industria y actividades profesionales y científicas que otras economías de la UE; ii) su alto porcentaje de pequeñas y medianas empresas, más vulnerables a las contracciones económicas; iii) su débil resiliencia, resultado de los bajos niveles estructurales de capital y liquidez.

A comienzos de septiembre los indicadores del INE [15] y de EuroStat [16] son muy negativos. En el segundo trimestre de 2020 se registró una caída del valor agregado bruto (VAB) de los sectores de comercio, transporte y actividades artísticas, recreativas y otros del 39,3% frente a 21.0% en la Eurozona. Esos sectores son los más afectados por la COVID-19. La Tabla1, elaborada a partir de datos del INE, refleja un descenso importantísimo del PIB, exportaciones, importaciones, pernoctaciones en hoteles y matriculaciones de automóviles. Asimismo, los consumos en hogares, de energía eléctrica y de cemento se redujeron muy significativamente. Por su lado, la tasa de paro aumentó 0.8%.

Indicador	Fuente	2019	2020
PIB	INE	2,0	-13,1
Consumo Hogares	INE	1,1	-15,4

Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF)	INE	1,8	-16,6
Exportaciones: Bienes y Servicios	INE	2,6	-22,5
Importaciones: Bienes y Servicios	INE	1,2	-19,9
Consumo de Energía Eléctrica	REE	-2,7	-6,5
Consumo Aparente de Cemento	Mº Industria	-16,5	-15,1
Pernoctaciones en Hoteles	INE	0,9	-71,1
Matriculaciones de Automóviles	ANFAC	-4,8	-40,6
Tasa de Paro EPA (% s/población activa)	INE-Funcas	14,1	14,9

Tabla 1. Variación interanual (%) en el segundo trimestre de 2020 en comparación con 2019 de algunos indicadores de coyuntura de la economía española.

Algunos titulares recientes de los periódicos nacionales son elocuentes: “El Banco de España vira hacia el pesimismo y recorta hasta la mitad (entre 4,1% y 7,3%) el crecimiento de la economía en 2021” (El Mundo, 16.09); “España sufre el mayor retroceso (18,5% del PIB) de la OCDE, sólo por detrás del Reino Unido (20,4%)” (El País, 26.08); “The lost production amounts to around €300 billion, a figure that would be enough to cover pension payments for Spain’s 10 million retirees for two years” (El País, Economy and business, 31.07); “La economía caerá este año entre un 10,5% y un 12,6% y el rebote no será suficiente para compensar el retroceso ni siquiera en 2022” (El País, 16.09). “España pierde en tres meses la riqueza de 14 años y 3,4 millones de puestos de trabajo” (La Razón, 01.08).

En el momento de redactar estas líneas (20 de septiembre), Actualidad Económica (El Mundo) recuerda que España, aparte de registrar “en el segundo trimestre un descenso del 22,1% de PIB en términos interanuales”, también “arroja el peor valor (93,2 puntos) entre los países europeos que pertenecen a la OCDE ... del índice compuesto ... CLI (Composite Leading Indicator, de sus siglas en inglés), ... un predictor bastante fiable de la actividad para los próximos seis-nueve meses”. El paro juvenil de menores de 25 años, implícito en esa puntuación, se situará en España en 41,4%, a comparar con 15,78% de media en los miembros de la OCDE.

El informe 2020 sobre desarrollo sostenible [17] incluye la Sección 1.2 “Comparación temprana del control de la COVID-19 en los países de la OCDE” (pp. 15-20). Se utiliza un índice piloto del control de la COVID-19 que resume el desempeño de cada país en tres dimensiones: tasa de mortalidad, tasa de reproducción efectiva de contagios y eficiencia de control de la pandemia. Se define analíticamente y se cuantifica cada indicador. España aparece en último lugar (puesto 33) como el país menos eficiente en el control de la COVID-19 en los primeros meses de la pandemia, precedida en los puestos 28 a 32 por Estados Unidos, Italia, Francia, Reino Unido y Bélgica, por este orden.

El problema para una gestión eficiente de la COVID-19 y sus efectos colaterales se plantea en los siguientes términos: encontrar el equilibrio óptimo entre la protección de la salud de los ciudadanos y la evitación del hundimiento de la economía. **¿Existe una correlación entre la reducción del PIB y, por ejemplo, el número de contagiados o de fallecidos?**

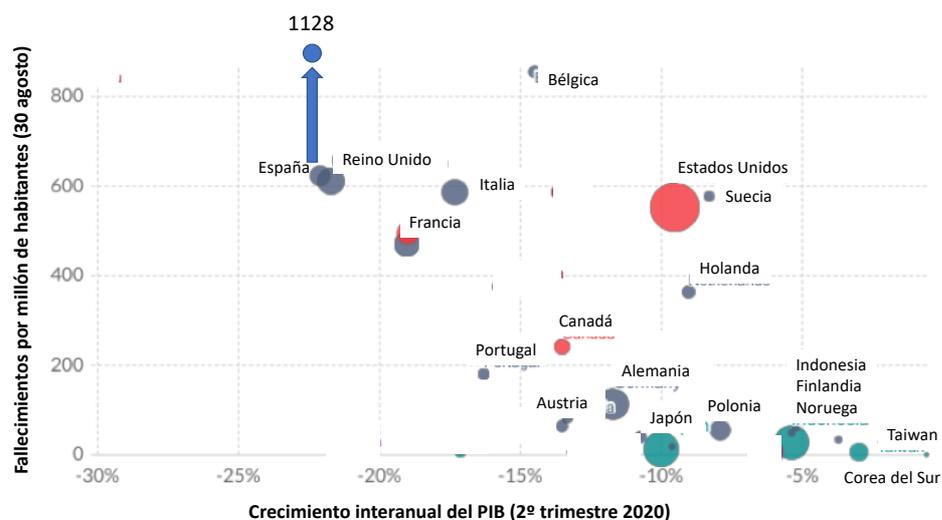


Figura 2. Número de fallecimientos por COVID-19 por millón de habitantes en función de la reducción interanual del PIB (ajustado por la inflación) en el segundo trimestre de 2020.

La Figura 2 representa el número de fallecimientos por millón de habitantes en función de la reducción interanual del PIB para el segundo trimestre de 2020. Se ha elaborado reduciendo el número de países en la figura correspondiente de Ref. [18]. Se incluye también el punto relativo a España (1.128 fallecimientos por millón de habitantes) si se consideran alrededor de 53.000 fallecidos desde el comienzo de la pandemia, cifra que algunos expertos sugieren como más realista que la oficial de aproximadamente 29.000 decesos. Las reducciones más importantes del PIB van asociados a una mayor tasa de mortalidad, mientras que el decrecimiento interanual menor corresponde a países con bajo número de fallecimientos. Conviene indicar que el número de fallecimientos es un reflejo de calidad de la gestión y de la capacidad de control de la COVID-19 en cada país. Bélgica, España, Reino Unido, Italia, Estados Unidos, Suecia y Francia destacan sobre el resto con más de 400 fallecimientos por millón de habitantes. Sin embargo, el descenso interanual del PIB, un indicador de la eficiencia de las medidas adoptadas de gestión y control de la pandemia, varía significativamente entre estos siete países. Frente a unas reducciones del PIB del orden del -8% y -9% para Suecia y Estados Unidos, respectivamente, los hundimientos de PIB de Bélgica (-14%), Italia (-17%) y Francia (-19%) son intermedios en comparación con los de Reino Unido y España en torno al -22%. “Si no hay salud no hay economía” debe muy probablemente sustituirse por “la salud y la economía se han de gestionar (bien o mal) conjuntamente”.

Existen razones que explicarían el hundimiento de la economía española, con un -18,5% de descenso interanual del PIB en el segundo trimestre de 2020, sólo mejor que el del Reino Unido (-20,4%), en mayor medida que en otros países europeos. Según un reciente informe de Oxford Economics [19] la “combinación de factores sanitarios y económicos” están detrás de esta situación. “Las fuertes medidas de confinamiento y limitación de la movilidad de la ciudadanía” del estado de alarma “serían una de las causas obvias de la profunda caída”. Otra causa tendría que ver con la “baja capacidad para adaptarse al teletrabajo” en comparación con el resto de Europa; “sólo el 30% de los trabajos en España son susceptibles de hacerse de forma remota, un número que cae al 20% o menos en varias regiones del país”. “Un sector turístico sobredimensionado”,

con una contribución al PIB y al empleo en torno al 12%, sería otra razón. Se habría de añadir el pequeño tamaño de un porcentaje importante de empresas (72% del empleo en España, frente a 66% en la UE). También se considerarían insuficientes los estímulos económicos a corto plazo en comparación con otros países de la UE.

Desde julio a septiembre las administraciones central y local han intentado infructuosamente salvar la temporada del turismo veraniego. Por diversas razones, el fracaso ha sido pleno. La tasa de variación interanual 2020/2019 (en %) del gasto con tarjetas de crédito extranjeras se recuperó desde -80% en abril y mayo, hasta -60% desde la mitad de julio hasta final de agosto, produciéndose, de nuevo, una brusca caída en septiembre. Una evolución similar se registró en el tráfico aéreo en los aeropuertos españoles (El Mundo, 20.09).

Por otro lado, lo largo del mes de julio se produjo un crecimiento importante del número de contagiados más individuos con PCRs positivos (algún personal sanitario insiste en distinguir entre ambas categorías, ya que un test PCR *“es tan sensible que podría detectar incluso fragmentos de virus muertos de infecciones anteriores”*, según el trabajo de C. Heneghan de la Universidad de Oxford publicado en la web medRxiv). España es aparentemente en este momento el país de Europa con la pandemia mas incontrolada. Desde el inicio de la COVID-19 España registra 640.040 contagios (incluyendo PCRs positivos) frente a 415.481 de Francia, el segundo país de la UE. Aunque, es difícil comparar datos obtenidos con diferentes criterios de contabilidad y de PCRs realizados, estas cifras parecen muy altas e indicativas de ciertos descontrol e ineficiente gestión de la pandemia en ambos países, especialmente en España. Los números de fallecidos y de ingresados en las UCIs, menores que en abril y mayo, están creciendo a niveles preocupantes. Los sistemas de algunas CCAA presentan síntomas próximos a la saturación. Ciertamente, se esperaba este otoño una, así llamada, “segunda ola” con cifras moderadamente crecientes de contagiados, ingresados en UCIs y fallecidos.

¿Qué razones podrían explicar que esta “segunda ola” se haya iniciado en pleno verano y que las tasas de crecimiento sean mucho mas altas que en otros países de nuestro entorno, duramente castigados por el coronavirus hasta junio (e.g., Italia)?

El Mundo en su edición de 20 de septiembre formula a seis expertos del mundo sanitario las siguientes preguntas (se resumen las respuestas mas relevantes a continuación de cada pregunta):

- *¿Por qué España está en la situación actual habiendo tenido uno de los confinamientos más duros del mundo y qué se está haciendo mal?*

La desescalada fue muy rápida y caótica. Los mensajes triunfalistas no ayudaron, ya que el virus no había desaparecido. Se intentó energizar la economía por la vía rápida. Las familias se han reunido como nunca y las CCAA no han dicho nada ante el incumplimiento de las medidas de control adoptadas. Hubo una relajación social en el ocio. No se han incorporado recursos necesarios para controlar los brotes a Atención Primaria y muy escasos a Salud Pública. Falta de liderazgo: las CCAA no crearon capacidades estratégicas para controlar la pandemia y el Gobierno no definió indicadores epidemiológicos transparentes armonizados para tomar decisiones de apertura y cierre.

- *¿Tiene sentido tener 17 formas de actuar, es decir, que las autonomías manejen la situación, por más que tengan las competencias en Sanidad? ¿Debería haber actuado más el Gobierno? ¿Es el modelo de salud pública español el más adecuado para una pandemia?*

Debe hacerse autocrítica desde el individuo, las instituciones y el sistema. Ayudaría tener medidas únicas y compartidas para actuar rápido en todas las CCAA. El Gobierno ha renunciado de facto a su papel de liderar, coordinar y homogeneizar lo que hacen las autonomías. Un mal articulado sistema autonómico hace que ni Ministerio ni CCAA tengan instrumentos legales para enfrentar la pandemia. Las organizaciones administrativas y sanitarias funcionan aisladamente. Hay falta de coordinación. Debe haber responsabilidades políticas derivadas de la gestión de la pandemia. La corresponsabilidad de gobierno exige mecanismos efectivos de toma de decisiones compartidas, no pasarse la patata caliente de unos a otros.

- *¿Ha fallado la sociedad española y su famosa idiosincrasia? ¿Nos hemos relajado demasiado tras el desconfinamiento y hemos vacacionado y “terraceado” por encima de nuestras posibilidades?*

Todos tenemos responsabilidad. No podemos saltarnos la cuarentena sabiendo que somos positivos. Hay mucha gente que no se lo toma en serio. Con unos pocos que no cumplan basta para tirar todo por tierra. Se entiende la necesidad de reactivar la economía... la laxitud en el control del ocio y la necesidad de verse han dado lugar a un elevado número de casos. No se puede culpar a la gente por hacer actividades que sus gobernantes les presentan como seguras.

- *Con las peores cifras de Europa en esta “segunda ola”, ¿estamos tomando nota o estamos improvisando y salvando la situación como podemos, como en la primera ola?*

Hemos aprendido algunas cosas, pero no lo suficiente. Este conocimiento no se ha implementado por cuestiones políticas, económicas y humanas. No se ve a los responsables sanitarios ni con la capacidad ni con el coraje para afrontar las medidas necesarias. El comportamiento de Salud Pública ha mejorado y por eso todavía no estamos saturados en esta segunda ola. Al principio había gente que ni se atrevía a tomar decisiones. Queda mucho por saber y hay que compartir el conocimiento sobre el virus. No están aprendiendo y la percepción del riesgo de políticos y gestores está muy alejada de la realidad. La fase inicial de la pandemia fue desconcertante, pero lo que sucede ahora ya no es excusable.

- *¿Podría venir una tercera ola en noviembre-diciembre cuando la Covid confluya con la gripe y otros virus estacionales? Y en ese caso, ¿habremos aprendido por fin la lección o podría España de nuevo volver a tener las peores cifras de Europa en esta pandemia?*

Las medidas también sirven para contener la gripe y podrían reducir su impacto. No pongamos límite a los recursos. Si no se hace una evaluación de lo realizado por un comité independiente de expertos, con un gran acuerdo político que obvie las luchas partidistas y sinsentidos habidos hasta ahora, caeremos una y mil veces. Es esperable que todos nos comportemos mejor. Se adelantará la gripe y se solapará con la COVID-19, y por eso es importante aplicar las medidas que sabemos que funcionan. Hoy lideramos los datos europeos y hay transmisión comunitaria en Madrid. Es esperable que haya olas sucesivas y es importante evitar que abrumen al sistema sanitario.

Las respuestas resumidas a las preguntas anteriores dan una idea de la situación actual y orientan algo sobre cómo se ha generado la segunda ola. Aparte de cuestionar aspectos sobre la gestión y control de la pandemia por los responsables políticos y sanitarios, se indica el comportamiento individual y grupal como un ingrediente importante para explicar la intensidad de la segunda ola liderada por España en la UE. FEDEA [13] presenta un estudio socioeconómico que trata de explicar “cómo reacciona la psicología humana ante este tipo de shocks” y sugiere que “el control de una epidemia infecciosa depende de forma crucial de que cada uno de nosotros se comporte de una forma responsable. Por eso, la economía del

comportamiento puede ser una herramienta muy útil para entender cómo funciona nuestra psicología ante una crisis de este tipo y qué podemos hacer para responder de forma efectiva, incorporando las lecciones que hemos aprendido sobre nuestros propios sesgos cognitivos ... a los humanos nos cuesta internalizar los beneficios de nuestro comportamiento sobre los demás o que tendemos a funcionar de forma «irracional» ante escenarios de alta incertidumbre”.

4. La era post-COVID-19

Como consecuencia de la COVID-19 la pobreza y la desigualdad aumentarán en el planeta. Las *“respuestas de desarrollo inmediato a esta crisis se han de tomar con una visión de futuro. Las trayectorias de desarrollo a largo plazo estarán afectadas por las decisiones presentes que hagan los países y por el apoyo que reciban”* [20]. La UE ha adoptado medidas económicas decididas para reducir las consecuencias de la propagación y el impacto del coronavirus en sus estados miembros [21]. Se han destinado a España alrededor de 140.000 millones de Euros tras duras negociaciones y la oposición de algunos socios comunitarios del norte, que quieren asegurar un destino productivo y una gestión transparente de esos fondos de recuperación. El efecto de estas ayudas no se notará hasta la segunda mitad de 2012 [19]. Un apoyo económico significativo de la administración española es imprescindible a corto plazo para evitar cierres masivos de empresas y sufrimientos de los ciudadanos mas vulnerables. La Comisión para la Reconstrucción Social y Económica del Congreso de los Diputados aprobó el 29 de julio sus conclusiones sobre reactivación económica que se añaden a las del Ministerio de Sanidad y a las de la UE. Indudablemente el gobierno está recabando opiniones de expertos nacionales e internacionales, aunque los detalles son desconocidos. El Asesor sanitario único, designado al principio de la pandemia, no se complementó con un Comité de Expertos, cuya existencia, anunciada por el gobierno en su día, ha sido desmentida por el mismo. Se observa una clara reticencia a la creación de órganos asesores o evaluadores independientes e imparciales, incluso en aspectos sanitarios [22]. Existen serias dudas sobre la forma (V, U o L) en que se saldrá de esta importante recesión que dependerá en gran medida del eficiente uso de capital y trabajo para aumentar la productividad [23].

Las tecnologías tendrán un importante papel en la recuperación de la economía post-COVID-19. Algunos informes consultados se centran únicamente en las tecnologías de información y comunicaciones (TICs) [24-26]. Indudablemente, las TICs, la inteligencia artificial, la ciencia de datos, blockchain, ... están jugando un papel en el seguimiento y control del SARS-CoV-2 y en la recuperación económica (e.g., teletrabajo). Las actividades en educación (primaria y secundaria) se han reanudado en septiembre presencialmente con una improvisación sobresaliente de las administraciones central y autonómica, así como, en menor medida, de los centros educativos que dos semanas antes de comienzo del curso “organizaron” lo que deberían haber reflexionado durante julio y agosto. Sin embargo, la docencia universitaria depende casi totalmente de la enseñanza online.

Las TICs son solamente una parte del problema. China manufacturaba antes de la pandemia alrededor del 35% de la producción mundial. Cuando China se paralizó en enero y febrero, se produjeron cierres en cadena de fabricantes en todo el planeta. *“Por ejemplo, la producción de EPIs médicos y personales, concentrada en fábricas chinas, disminuyó o se paralizó totalmente, escaseando entre el personal sanitario”* [27]. La COVID-19 ha sacado a la luz la vulnerabilidad resultante de concentrar tanta producción en un único lugar. El Congreso de Estados Unidos, así como los gobiernos de algunos países y varios

fabricantes comienzan a replantearse la opción de “renacionalizar” la producción de varios productos estratégicos. En años recientes han desplazado su fabricación de China a otros lugares, pero solamente porque “*en promedio, la mano de obra manufacturera china se sitúa en la actualidad en 4,12 dólares, según Barclays, frente, por ejemplo, a 1,59 dólares en India*”.

Algunas consultoras internacionales indican que la pandemia no se había considerado ni en la planificación estratégica de las empresas ni en sus modelos de negocio y, por tanto, son necesarios directrices generales para afrontar problemas derivados de la COVID-19 y pasos a dar para lidiar con ellos [28]; los aspectos genéricos considerados cubren la gestión de la crisis y las respuestas a la misma, asuntos relativos a las plantillas de trabajadores fijos y contratados temporales, impacto de la interrupción de la cadena de suministros en el funcionamiento de la empresa, información financiera, fiscalidad, impuestos y comercio, reflexiones tácticas y estratégicas, y temas relacionados con clientes y ventas. Otra consultora reseña la necesidad empresarial de acelerar y estimular resiliencia y agilidad en una nueva realidad complicada e incierta, que también ofrece oportunidades [4]; dedica también notas específicas a la gestión de la incertidumbre en diversos sectores: industria aeroespacial y de defensa [29], automóvil, transporte terrestre, financiero, químico, comunicaciones y medios, PYMES, de petróleo y gas, sanidad, alta tecnología, semiconductores, seguros, farmacéuticas, minero y del metal, productos forestales, viajes y de servicios. Asimismo, reseña el papel de las TICs en la actuación contra la COVID-19 [30]. Especial atención se ha de poner en los equipos industriales que con 3 billones (10^{12}) de dólares de volumen de ventas mundiales representan alrededor del 25% del PIB manufacturero (21,2% en Estados Unidos, 25,4% en la UE, 32,9% en Japón) y un 30% del empleo global [31].

McKinsey & Company [14] estima tiempos de recuperación a los niveles anteriores a la crisis provocada por la COVID-19 en España de varios sectores en función de la reducción de ingresos en términos reales (% con relación a 2019):

- Entre los sectores con reducción de ventas inferiores al 10%, el tiempo de recuperación de actividad será alto (recuperación lenta) para los fabricantes de bienes de consumo, intermedio para telecomunicaciones y bajo (rápida recuperación) para servicios públicos, productos farmacéuticos y médicos, y alimentación.
- Entre los sectores con reducción de ventas intermedia (mayores del 10% y menores del 25%), el tiempo de recuperación de actividad será alto (recuperación lenta) en la construcción, logística, agricultura y pesca, e intermedio para instituciones financieras, energía y servicios, actividades profesionales y otra industria.
- Entre los sectores con reducción elevada de ingresos (mayores del 25% y menores del 55%), el tiempo de recuperación de actividad será alto (recuperación lenta) para todos (hoteles, ocio, transporte, equipamiento, suministros y material para hoteles, restaurantes y catering, ventas al por mayor y menor, excluida alimentación, sector inmobiliario, industria, venta y reparación de automóviles).

Entre las tendencias a escala mundial, así como en España se citan [14]:

- incremento de la economía sin contacto y digitalización en las áreas de comercio electrónico, telemedicina y automatización general del trabajo,
- teletrabajo en actividades que no exijan presencia; esto requerirá formación, colaboración, flexibilidad y responsabilidad de los empleados,
- focalización en la resiliencia, además de la eficiencia y rapidez de operación, que necesitará una revisión detallada de las cadenas de suministro,

- mayor examen de los negocios que han de considerar beneficio, personal y medio ambiente, e incorporar la sostenibilidad como ventaja competitiva,
- mayor intervención del gobierno en la economía, que se ha iniciado con planes de estímulo,
- una ofensiva para redefinir políticas e inversiones globales y locales en salud pública,
- una oportunidad para adoptar el nivel de innovación y velocidad que la crisis catalizó en las industrias.

La Figura 3 presenta de forma genérica el impacto de la COVID-19 en la evolución temporal del PIB dependiendo del grado de control de los contagios por el sistema sanitario y de las actuaciones públicas sobre la economía como respuesta a la crisis. Por el momento, España respondería en diversa medida a los escenarios B1-B5, en los que la recuperación en L o W del PIB es lenta. El objetivo inmediato debiera ser ubicarse en los escenarios A1 o A2, y a medio plazo el A4. El diagrama cualitativo de la Figura 4 muestra que la evolución deseable de la pandemia respondería a la línea ABCD: AB representa la evolución de la pandemia con una mala respuesta inicial del sistema sanitario acompañada de una progresiva reducción en la propagación del virus; BC y CD indicarían la transición con una baja propagación del virus e incrementos sucesivos de la capacidad del sistema sanitario. Por el contrario, en España mientras el sistema sanitario ha aumentado modestamente su capacidad de respuesta, los contagios, que inicialmente disminuyeron debido al confinamiento del estado de alarma, han aumentado mucho por un desconfinamiento incorrecto y un comportamiento peculiar de grupos de ciudadanos. Diferentes CCAA podrían tener diferentes trayectorias en este diagrama.

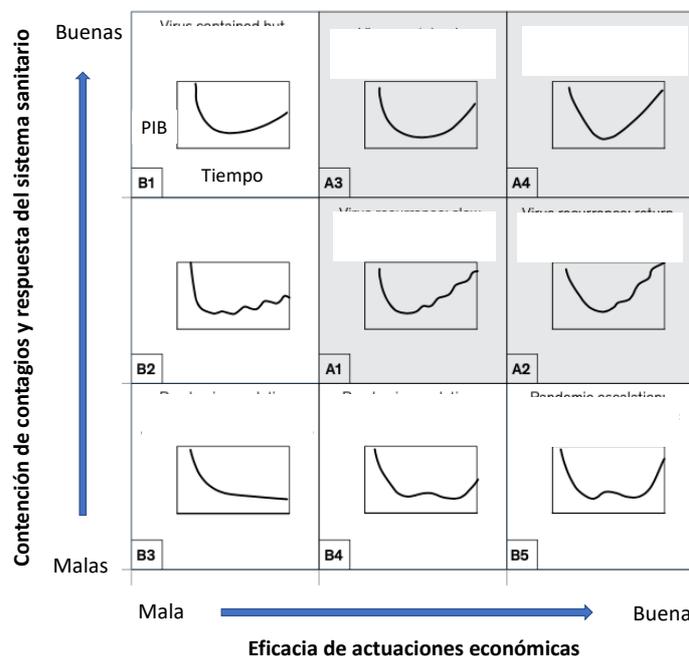


Figura 3. Escenarios genéricos de evolución del PIB en función de la propagación de contagios y la respuesta del sistema sanitario, y de la eficacia de las respuestas económicas. Adaptada de Ref. [7].

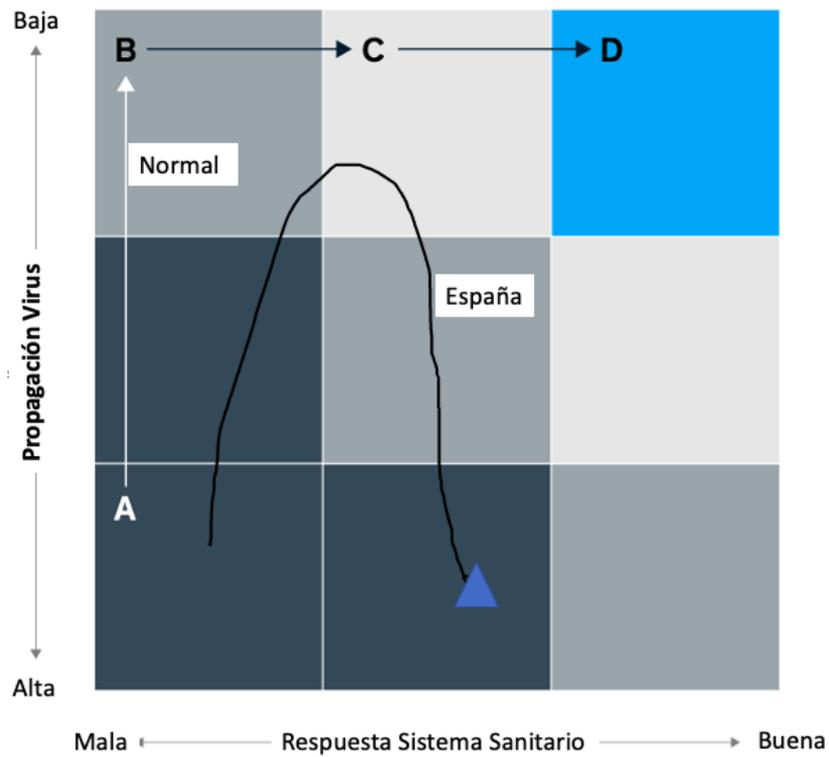


Figura 4. Diagrama de propagación de la COVID-19 y respuesta del sistema sanitario.

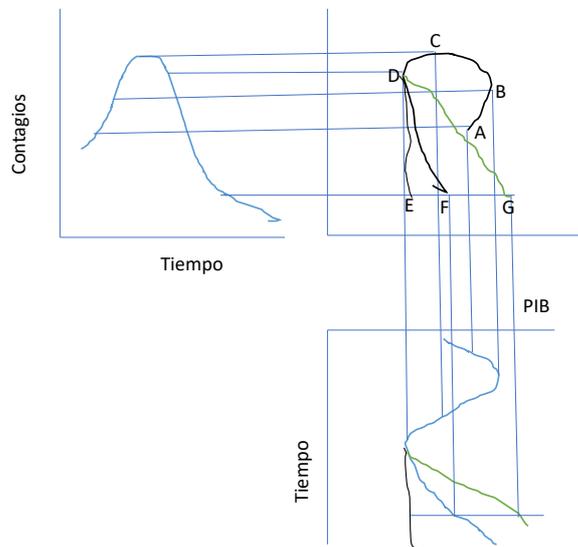


Figura 5. Evoluciones temporales de número de contagios y del PIB, así como del PIB en función del número de contagios.

La evolución de la pandemia en términos sanitarios y económicos se podría caracterizar por la curva de evolución del PIB en función del número de contagios (ver Figura 5). En el plano PIB-Contagios la trayectoria ABCD puede conducir a los puntos E, F o G dependiendo de que la salida de la recesión sea en L, en U o en V.

5. Oportunidad para reinventarnos

Algunos expertos pensaban antes de la crisis desencadenada por la COVID-19 que los sectores españoles de industria y de servicios debían examinarse rigurosamente para orientarlos a “*la producción de productos y servicios de alta complejidad y crear empleos en estas actividades*” y para aumentar “*la complejidad de la cesta de exportaciones*” [32]. Este examen parece aún más importante tras la pandemia y la recesión económica, consecuencia de ésta, y es, asimismo, una oportunidad para “*reinventarnos*” con una visión integradora [33] ante la incertidumbre multifacética del horizonte 2020-2040.

Este estudio debería proponer actuaciones tanto técnicas y económicas como regulatorias, que situaran a España en una o dos décadas entre los países con una diversificada y compleja estructura económica y un eficiente sector del conocimiento. El estudio global tendría que incluir varios análisis sectoriales (e.g., conocimiento, industria, servicios, agricultura).

La metodología para desarrollar las hojas de ruta utilizaría como punto de partida la empleada en estudios realizados con objetivos, en ciertos aspectos, concomitantes con el aquí propuesto [34, 35], introduciendo mejoras e innovaciones.

El contenido del estudio habría de proponer una visión futura de España partiendo de la realidad post-COVID-19. Esto requeriría una caracterización precisa de la actual estructura económica y social de España, con un riguroso análisis DAFO de fortalezas y debilidades, oportunidades y amenazas. Se tendrían que evaluar críticamente planes y programas existentes para la industria, los servicios y la agricultura. La sostenibilidad ambiental sería un ingrediente crucial. Entre otros componentes, se exploraría el “espacio de productos” [36] de la economía española [37] para valorar la falta de diversificación, la necesidad de productos únicos transables y de cierta complejidad. Se examinaría también el espacio del conocimiento [38].

Entre los desafíos se analizaría la complejidad insuficiente de los sectores industrial y servicios, las trabas administrativas, la inestabilidad regulatoria, los cambios requeridos en la financiación dispersa y desenfocada, y la colaboración público-privada. En el ineficiente sector del conocimiento se diseccionarían las enseñanzas primaria y secundaria, poco exitosas en un marco internacional, la escasa valoración de la Formación Profesional y ciclos formativos superiores, la proliferación de universidades de bajo nivel, la escasa atención a la innovación y el emprendimiento, y la falta de integración de la educación, la investigación y el sistema productivo.

Se investigarían las oportunidades para incrementar la diversificación, la complejidad y la productividad, con el objetivo de acelerar el desarrollo y la innovación empresariales. Se estudiaría la reestructuración del sistema de ciencia y tecnología, las mejoras docentes, la innovación y el diálogo conocimiento/producción, así como el retorno de la inversión (ROI) requerida para el mantenimiento y la generación de conocimiento.

Se evaluarían escenarios similares a los de la Figura 6, definidos mediante tres parámetros: Impacto del Virus, Fondos Nacionales y de la UE para recuperación de la actividad económica y Evolución del PIB mundial con el tiempo. El primer factor consideraría, por ejemplo, distintas salidas de la recesión (V, U, W, L) para España, del mismo modo que el último las cuantificaría a escala mundial. Se pueden considerar otros escenarios con más variables para cada sector de actividad analizado. En la Figura 6 se considerarían los escenarios:

- E1: éxito significativo en el control de la pandemia, nivel moderado de fondos nacionales y de la UE para la reconstrucción y recuperación moderada de la economía mundial,

- E2: éxito moderado en el control de la pandemia, nivel moderado de fondos nacionales y de la UE para la reconstrucción y recuperación moderada de la economía mundial,
- E3: éxito moderado en el control de la pandemia, nivel bajo de fondos nacionales y de la UE para la reconstrucción y recuperación moderada de la economía mundial.

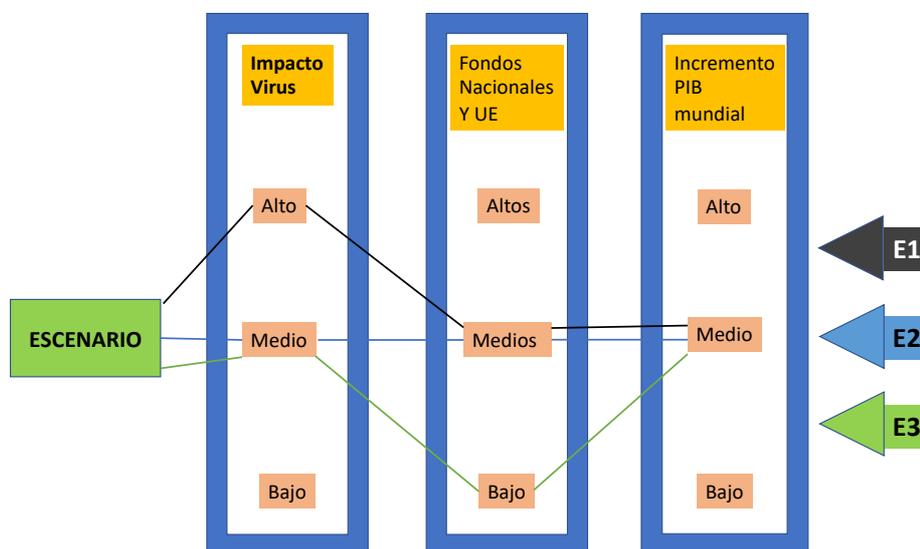


Figura 6. Variables para definir los escenarios posibles.

Se definirían hojas de ruta para el período 2020-2040 (complementadas con estudios a corto plazo [39]) para grandes sectores industriales, de servicios y en agricultura, así como para la enseñanza y la investigación. Se cuantificarían las inversiones requeridas y se valoraría el coste de la inacción (“cost of not doing”).

Estos análisis deberían contar con la participación de un amplio espectro del mundo económico, empresarial y agentes sociales. Los avances y resultados finales se comunicarían al gobierno, al parlamento y a la sociedad, en general.

6. Comentarios finales

Como conclusión de lo presentado anteriormente, se puede decir que la mayoría de los gobiernos del mundo han realizado una mala gestión de la pandemia y sus consecuencias. Sin embargo, España destaca entre los países desarrollados como el que peor o uno de los que peor ha gestionado y controlado esta crisis.

Se resumen a continuación unas provisionales reflexiones personales.

Al comienzo de la pandemia (1 de marzo a final de junio)

- Decisiones iniciales tardías: cierre de vuelos internacionales (especialmente con Italia), prohibición de concentraciones masivas de ciudadanos y adopción de medidas de control en actividades educativas, de ocio y transporte público.
- Se ignoró la amenaza multifactorial de la pandemia y su impacto, además de en la salud pública, en la economía y la sociedad.
- Datos confusos e inciertos de fallecimientos debidos a la COVID-19.

- Nombramiento de un asesor sanitario único que comunicó ideas incorrectas. No se nombró un comité asesor multidisciplinar compuesto por virólogos, epidemiólogos y expertos en salud pública; técnicos en planificación estratégica (expertos en ciencia de datos, IA, modelos de simulación; ingenieros, físicos, matemáticos, economistas); banqueros; empresarios; policy makers; legisladores; políticos; sindicatos; ...
- Se responsabilizó de la gestión de la crisis al Ministerio de Sanidad, casi “vaciado” de competencias ya transferidas a las CCAA, sin recursos ni humanos ni materiales. Se detectaron errores frecuentes en las gestiones con proveedores, adquisiciones de material, ...
- Se saturó el sistema sanitario que no pudo responder a las exigencias por escasez de personal, material y espacio.
- Se descuidó la población de riesgo: mayores y personas con patologías cardiovasculares y respiratorias, principalmente.
- El confinamiento total fue muy eficaz para contener la propagación de los contagios, aunque tuvo efectos económicos devastadores. Un confinamiento selectivo bien estudiado y cambiante con el tiempo habría conjugado salud y economía con mejores resultados en ambos terrenos. Las actividades económicas de bajo riesgo se podrían haber mantenido operativas.
- Falta de una estrategia clara. Las respuestas han sido casi siempre reactivas ante problemas surgidos, sin intentar anticiparse a los mismos.
- La jerga usada ha sido incorrecta (e.g., doblar curvas, desescalada, nueva normalidad, ...).

Durante el verano (final de junio al presente)

- El rápido desconfinamiento para tratar de salvar la temporada turística de verano y sin una clara estrategia posterior es, entre otras, una de las causas de la situación actual. Ni se ha vencido al virus, ni salimos más fuertes.
- Incumplimiento incivil de las normas de distanciamiento y protección con mascarilla (botellones, discotecas, ocio nocturno, grandes reuniones familiares, bodas, otras celebraciones, ...) principalmente por jóvenes “incontinentes sociales”. Comportamiento minoritario caótico y anárquico, aunque con impacto importante debido a la propagación de contagios aproximadamente en progresión geométrica.
- Implantación lenta de los tests PCR y cuestionamiento de sus resultados (puede confundirse una infección vírica anterior con la COVID-19 actual).
- Lenta penetración de las TICs para control de propagación: IA, radar-COVID,...
- Escasez de rastreadores. Probablemente, existencia de un elevado número de asintomáticos contagiadores.
- Relaciones disfuncionales entre gobierno y CCAA.
- Rechazo gubernamental de una evaluación externa e independiente de la gestión de la pandemia.
- Algunos Estados Miembros de la UE han expresado reservas sobre la financiación y, sobre todo, la subvención a España con fondos comunitarios, debido a la demostrada mala gestión de la pandemia.
- La reapertura de los centros de enseñanzas primaria y secundaria ha sido un desastre. Se ha desaprovechado julio y agosto para diseñar una estrategia bien estructurada de retorno a la enseñanza presencial. En una o dos semanas se ha improvisado la vuelta al cole.
- El nuevo curso universitario se ha meditado algo más. La docencia remota parece, con algunas carencias y cuellos de botella, aportar una solución, al menos a corto plazo.

El mundo post-COVID-19

- Se habla ahora de un Comité de Sabios. Incluso los Sabios necesitan “Hojas de Ruta”: DAFO, Escenarios y Hojas de Ruta. La industria y los servicios tienen oportunidad para reinventarse, aumentando la diversificación y complejidad de productos transables. El Turismo se puede repensar. El Sector del Conocimiento requiere un cambio radical: apoyo a unas pocas Universidades y Centros de Investigación, y consolidación de ciclos formativos (FP).
- Uno de los costes de no hacer Hojas de Ruta a medio y largo plazos implica la vuelta a la misma realidad anterior con una estructura económica vulnerable.
- Los 140.000 millones de Euros de la UE debieran contribuir a evitar el sufrimiento de ciudadanos vulnerables y a generar una nueva estructura económica más compleja y diversificada. Estos fondos son insuficientes y se han de invertir y gestionar rigurosamente.
- La ilusión de la vacuna española. De repente el gobierno, cicatero con los fondos de investigación en condiciones normales, concede subvenciones importantes a investigadores en virus y vacunas. La Investigación es una carrera de fondo y es acumulativa. No es una prueba de velocidad como los 100 metros lisos. Como ha indicado un excelente investigador español, la probabilidad de comercializar una vacuna anti-COVID-19 es muy baja por la inexistencia de grandes farmacéuticas nacionales.
- El futuro sería esperanzador si el virus se debilitase progresivamente durante los próximos meses. La capacidad y el interés de los políticos para resolver los problemas creados por la pandemia son cuestionables. Una incapaz clase política continúa desalentadoramente a la greña, con el foco en temas ajenos a la COVID-19. Ni la derecha ni la izquierda han presentado una estrategia integral ni para controlar el problema sanitario ni para emerger del hundimiento económico.
- Los medios de comunicación de diferentes orientaciones ideológicas no parecen observar la misma realidad ni informar sobre los mismos hechos. Este sesgo del periodismo es muy negativo.

Paul Krugman afirma en su artículo “La respuesta de Trump fue más que incompetente” (El País, Negocios, 12.09.2020): ***“Es un error decir que Trump gestionó mal la covid-19. Fue inmoral, rayando en lo criminal”***. Sin entrar en la pertinencia del último epíteto, puede decirse que la frase es aplicable a muchos dirigentes planetarios. Comparten, en mayor o menor medida, una demostrada incompetencia gestora, un visceral rechazo a la autocrítica, una habilidad notable para generar cortinas de humo, una focalización importante en ensoñaciones y proyectos ajenos al SARS-CoV-2, una nula voluntad de pactar soluciones y una contumacia absoluta para incluir el coronavirus como parte de pugnas partidistas. Y según un proverbio congoleño “cuando los elefantes pelean, la hierba sufre”, siempre pero especialmente en los tiempos de la COVID-19.

Agradecimientos

El Dr. Norberto Fueyo, Catedrático de la Universidad de Zaragoza, ha leído el manuscrito original y realizado valiosas observaciones.

Bibliografía

1. Dopazo, C., Blasco, J. y Fueyo, N., Un modelo simplificado de propagación de la COVID-19 en España, en esta publicación, abril 2020.

2. European Commission, “COVID-19 pandemic. Statement on Scientific Advice to European Policy Makers”, June 2020.
3. Price Waterhouse Coopers (PWC), “COVID-19 and the technology industry”, 2020.
4. ACCENTURE, “COVID-19: The industry impact of Coronavirus. Outmaneuver uncertainty, 2020”.
5. Godet, M., *The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls*, *Technological Forecasting and Social Change* 65, 3–22 (2000).
6. Gomez, A., Dopazo, C. and Fueyo, N., The “cost of not doing” energy planning: The Spanish energy bubble, *Energy* **101**, 434-446 (2016).
7. Smit, S., Hirt, M., Buehler, K., Lund, S., Greenberg, E. and Govindarajan, A., “Safeguarding our lives and our livelihoods: The imperative of our time,” March 23, 2020, McKinsey.com.
8. Texas Medical Association, “Know your risk during COVID-19”, 2020.
9. Simulating an epidemic, You Tube, 27 de mar. de 2020 - Experiments with toy SIR models, Home page: <https://www.3blue1brown.com>
10. Mossong ,J., Hens, N., Jit, M., Beutels, P., Auranen, K., Mikolajczyk, R., Massari, M., Salmaso, S., Scalia Tomba, G., Wallinga, J., Heijne, J., Sadkowska-Todys, M., Rosinska, M. and Edmunds, W.J., Social Contacts and Mixing Patterns Relevant to the Spread of Infectious Diseases, <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0050074>, March 25, 2008.
11. Ferretti, L., Wymant, C., Kendall, M., Zhao, L., Nurtay, A., Abeler-Dörner, L., Parker, M., Bonsall, D., Fraser, C., Quantifying SARS-CoV-2 transmission suggests epidemic control with digital contact tracing, *Science* 31 Mar 2020, DOI: 10.1126/science.abb6936.
12. Fajgelbaum, P.D., Khandelwal, A., Kim, W., Mantovani, C. and Schaal, E., Optimal Lockdown in a Commuting Network, Barcelona GSE Working Paper Series Working Paper no 1187, June 2020.
13. Roldán, A., Jimeno, J.F. y de la Fuente, A., La economía española en tiempos de pandemia, FEDEA 2020.
14. McKinsey & Company, “Spain after COVID-19: From resilience to reimagination”, June 2020.
15. Instituto Nacional de Estadística, Panel de Indicadores de Coyuntura, 2020.
16. COVID-19, Eurostat, 2020.
17. Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Lafortune, G., Fuller, G. and Woelm, F., “Sustainable Development Report 2020. The Sustainable Development Goals and Covid-19, June 2020, Cambridge University Press.
18. Hasell, J., Which countries have protected both health and the economy in the pandemic? Our World in Data, September 2020.
19. El Economista, Las cuatro razones por las que España es el mayor perdedor en la crisis del coronavirus, agosto 2020.
20. United Nations Development Programme, “Socio-Economic Impact of COVID-19”, 2020.
21. European Commission, Directorate General, Economic and Financial Affairs, “Policy measures taken against the spread and impact of the coronavirus, August 2020.
22. García-Basteiro, A.L. et al. (20 signatories), Evaluation of the COVID-19 response in Spain: principles and requirements, *The Lancet, Public Health*, September 21,2020.
23. Harvard Business Review, “Understanding the Economic Shock of the Covid-19 Crisis”, Vídeo, May, 2020.
24. Agencia Española de Protección de Datos, El uso de las tecnologías en la lucha contra el COVID-19. Un análisis de costes y beneficios, Unidad de Evaluación y Estudios Tecnológicos, mayo 2020.

25. Deloitte, Understanding the sector impact of COVID-19. Technology sector, March 2020.
26. Xiao, Y. and Fan, Z., World Economic Forum, “10 technology trends to watch in the COVID-19 pandemic”, April 2020.
27. Kosowatz, J., Rethinking China, ASME, September 1, 2020.
28. PWC, “COVID-19 and the technology industry”, 2020.
29. ACCENTURE, “COVID-19: Address disruption and build resilience in Aerospace and Defense”, April 15, 2020.
30. ACCENTURE, “Role of technology in the fight against COVID-19”, May 4, 2020.
31. ACCENTURE, “From survival to revival: Industrial post COVID-19”, March 29, 2020.
32. Felipe, J., Lecciones para España desde la óptica del desarrollo (I) y (II), 2019.
<https://nadaesgratis.es/admin/lecciones-para-espana-desde-la-optica-del-desarrollo-i>
<https://nadaesgratis.es/admin/lecciones-para-espana-desde-la-optica-del-desarrollo-ii>
33. Morera Martín, M., Canarias, es el momento de reinventarnos, TVLaPalma.com, Redacción 9 de abril, 2020. <https://tvlapalma.com/not/17100/canarias-momento-reinventarnos-moises-morera-martin/>
34. Asian Development Bank (ADB), Regional: Preparation of Sector Road Maps for Central and West Asia (Kazakhstan), Technical Assistance Consultant’s Report, Project Number: 44402-01, November 2012.
35. Asian Development Bank (ADB), An Infrastructure Road Map for Uzbekistan, Staff Consultant’s Report, 100172-S41689 Preparation of Sector Road Maps for Central and West Asia, Final Report Uzbekistan, September 2012.
36. Hidalgo, C.A. and Hausmann, R., The building blocks of economic complexity, PNAS **106** (26), 10579-10575 (2009).
37. Center for International Development (CID), The Atlas of Economic Complexity, Harvard University, <https://atlas.cid.harvard.edu>
38. Balland, P-A., Boschma, R., Crespo, J. and Rigby, D.L., Smart specialization policy in the European Union: relatedness, knowledge complexity and regional diversification, Regional Studies **53** (9), 1252-1268 (2019). <https://doi.org/10.1080/00343404.2018.1437900>
39. Asian Development Bank, Policies to support the development of Indonesia’s manufacturing sector during 2020-2024, A Joint ADB-BAPPENAS Report, January 2019.

Un modelo simplificado de propagación del COVID-19 en España

C. Dopazo^{1,2}, J. Blasco¹ y N. Fueyo¹

¹ Universidad de Zaragoza

² Real Academia de Ingeniería

Resumen. Los efectos de una pandemia, como la COVID-19, se han de analizar desde sus diversos aspectos epidemiológicos, estratégicos, económicos y sociológicos. Esta aproximación es necesaria debido al desconocimiento del virus, los distintos escenarios de avance de los contagios en función de las medidas de control adoptadas y del impacto socioeconómico que estas últimas necesariamente tendrán en el sistema productivo y en la sociedad española, en general. Esta nota pretende únicamente ilustrar cómo el uso de modelos matemáticos de simulación de la propagación de la infección puede guiar la toma de decisiones administrativas y contribuir a la mitigación de sus efectos. Se describe qué es un modelo de simulación de un proceso y las incertidumbres en su utilización, así como sus posibles usos. Se presenta un modelo, similar a otros existentes en la literatura científica, se simplifica para tratar solamente tres grupos de individuos, “susceptibles” de ser contagiados por “infectados” diagnosticados y “asintomáticos”, y se adimensionalizan las ecuaciones diferenciales, descriptoras del proceso de propagación. Tras pruebas con numerosísimas combinaciones de los valores de los parámetros numéricos, se logra una comparación razonable, aunque no perfecta, entre las predicciones del modelo y las cifras oficiales de “infectados” diagnosticados. A partir de este caso base, se analiza el impacto relativo de una disminución del número de contactos, consecuencia de medidas administrativas de control entre los individuos “susceptibles” de contagio y los “infectados” y “asintomáticos”, en la mitigación de los efectos de esta pandemia. Este modelo es diferente de los usados por epidemiólogos y no incluye las clases de individuos hospitalizados, recuperados y muertos.

Este documento se elaboró desde la mitad de marzo hasta la mitad de abril de 2020.

1. ¿Qué es un modelo matemático y para qué se puede utilizar?

La Fig. 1 describe conceptualmente en qué consiste una posible simulación matemática del proceso de propagación de la epidemia del SARS-CoV-2. Un modelo matemático trata de simular el proceso real, representado en la parte inferior de la figura. El contagio se inicia con un número inicial “real” de “infectados” diagnosticados, $I(0)$, y un número desconocido de “asintomáticos”, $E(0)$. El virus desarrolla su potencial de infección y diariamente genera unas cifras oficiales de individuos diagnosticados, curados y fallecidos, que pueden ser similares o muy diferentes de las magnitudes reales. Por otro lado, el número de infectados “asintomáticos”, que pueden contagiar, aunque no muestren síntomas de la enfermedad, es desconocido, dada la imposibilidad de realizar “pruebas” de detección (PCRs) a toda la población. El grupo de “asintomáticos” puede ser, según los expertos, mucho más numeroso que el de individuos “infectados” diagnosticados y un factor importante, además de difícil de controlar, en la propagación de la epidemia. Aparentemente, un país como Corea realizó “pruebas” abundantes en la fase inicial de la pandemia para detectar y aislar un porcentaje importante de los relativamente escasos, en ese momento, ciudadanos “asintomáticos”.

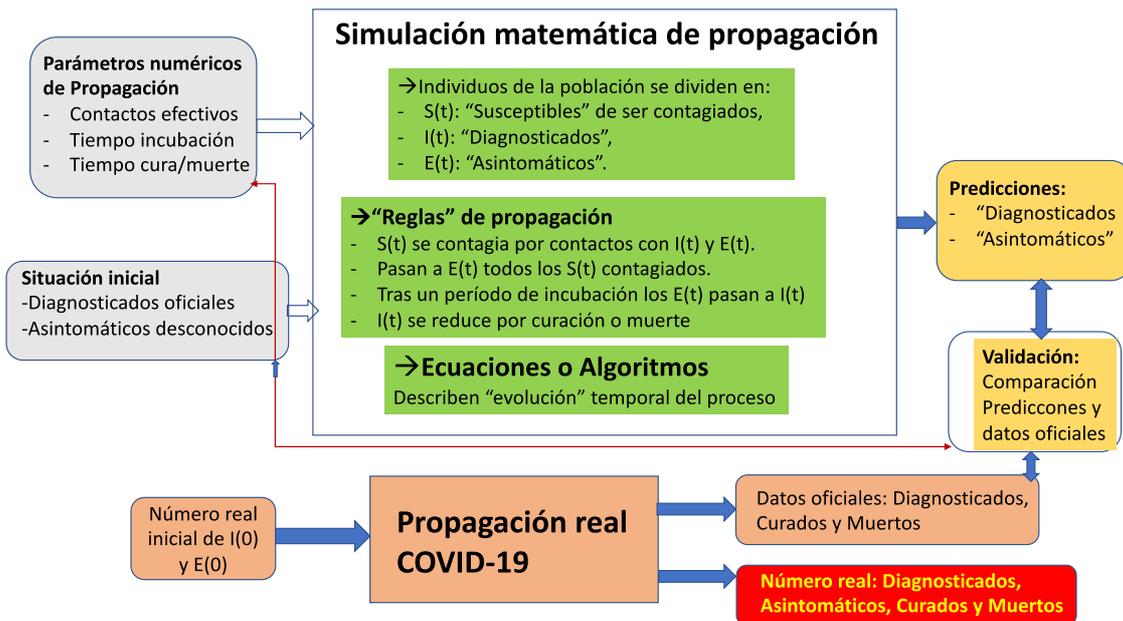


Figura 1. Descripción conceptual de un modelo de simulación del proceso de propagación del COVID-19.

Por otro lado, la parte central superior de la Fig. 1 presenta (en verde) los componentes de un modelo de simulación del SARS-CoV-2 [1-5]:

- La población se divide en tres grupos: i) los individuos “susceptibles” de ser contagiados, cuyo número en el tiempo t se expresa por $S(t)$; ii) los ciudadanos “infectados” diagnosticados en el tiempo t , dados por $I(t)$; iii) los ciudadanos infectados “asintomáticos”, que pueden contagiar sin mostrar signos externos de la enfermedad, denotados por $E(t)$.
- Un individuo del grupo $S(t)$ se puede contagiar por contactos bi-personales con otros de los grupos $I(t)$ o $E(t)$.
- Todos los ciudadanos $S(t)$ contagiados pasan necesariamente al grupo de infectados “asintomáticos”. Una fracción indeterminada de los $E(t)$ puede curarse; el resto, tras un período de incubación, pasan al grupo $I(t)$.
- El número de “infectados” diagnosticados se reduce por hospitalización, curación o muerte.
- El modelo matemático expresa las reglas anteriores (“cinética” del proceso) mediante ecuaciones o algoritmos de cálculo.

El modelo debe alimentarse con datos numéricos que caractericen la propagación de la pandemia (bloque superior izquierdo de la figura) como, por ejemplo:

- Tasa efectiva de contactos,
- Período de “incubación” o manifestación de la enfermedad,
- Tiempo característico de curación o muerte.

Asimismo, el modelo requiere información numérica sobre la situación inicial (por ejemplo, el 1 de marzo) de la población para comenzar los cálculos (bloque intermedio izquierdo de la figura). Mientras la cifra inicial de “infectados” diagnosticados se puede aproximar con los datos oficiales, el número de “asintomáticos” es totalmente desconocido y, necesariamente, se han de hacer hipótesis sobre su magnitud inicial.

La integración numérica de las ecuaciones, suministrados los datos del proceso y las condiciones iniciales anteriores, se realiza en unos pocos segundos para un tiempo de hasta varios meses. La salida incluye una representación gráfica de las predicciones, con los datos oficiales de “infectados” superpuestos. Si la comparación entre los últimos y las predicciones no es buena, se puede repetir la integración variando los parámetros numéricos de propagación y/o los valores iniciales de “infectados” y “asintomáticos”.

En el Anexo I se describe en detalle el modelo matemático usado en este estudio.

2. Incertidumbre en el uso de modelos de simulación

La incertidumbre en las predicciones de un modelo matemático de simulación proviene de:

- el conocimiento insuficiente de las reglas científicas que rigen la “cinética” de propagación, que hace que la simulación matemática del proceso refleje esas deficiencias,
- los errores en los parámetros numéricos de propagación de la epidemia, debido al desconocimiento del virus que la origina,
- el desconocimiento de la cifra real de “infectados” diagnosticados y “asintomáticos” al inicio de la simulación del proceso,
- la evolución con el tiempo del número real de “infectados”.

La incertidumbre sobre la cinética de propagación sólo se puede mejorar investigando durante un período temporal suficiente la dinámica de la pandemia; mientras excelentes epidemiólogos avanzan en el conocimiento de ésta, las ecuaciones matemáticas representan una aproximación a la descripción del proceso. La bondad del modelo actual se puede evaluar solamente por la comparación de las predicciones generadas con cifras fidedignas de “infectados”.

Los parámetros numéricos de propagación de la COVID-19 han de presentar errores significativos, por tratarse de un virus nuevo. Sin embargo, expertos epidemiólogos pueden establecer rangos de variación de sus valores para alimentar el modelo y determinar aquellos que predicen resultados mas aproximados a las cifras disponibles de “infectados” diagnosticados.

El número oficial de “infectados” diagnosticados en el instante en que se inicia la simulación (en este caso, 1 de marzo) es una valiosa cifra, alrededor de la cual se pueden tomar diferentes valores, inferiores o superiores. Por otro lado, el desconocimiento total de la magnitud de los infectados “asintomáticos” obliga a variar su número en un margen amplio de valores.

La fiabilidad de los datos oficiales sobre la cifra real de “infectados” diagnosticados es crucial para establecer la validez del modelo de simulación.

A pesar de la incertidumbre, resultante del conocimiento científico insuficiente del proceso de infección por el SARS-CoV-2, de los valores imprecisos de los parámetros numéricos de su propagación y de la fiabilidad relativa de los datos iniciales y finales de infectados, los modelos matemáticos se pueden utilizar, con criterio, en la toma de decisiones para la acotación de los márgenes de proyecciones futuras.

En esta breve nota se apuntan las dificultades para usar un modelo matemático clásico en la descripción de la evolución del número de “infectados” por el SARS_CoV-2 en España y cómo se podría utilizar para anticipar el impacto de diferentes estrategias administrativas con restricciones legales en los contactos de la población.

3. Usos del modelo

Las consideraciones de los apartados anteriores permiten, a la espera de que epidemiólogos con experiencia mejoren el conocimiento de los mecanismos científicos de propagación y de los rangos de valores realistas de los parámetros numéricos del SARS-CoV-2, utilizar el modelo puesto a punto de varias maneras.

3.1 Como herramienta de predicción de “infectados”

Los parámetros dimensionales que cuantifican la descripción de la propagación del coronavirus son:

- Velocidad de contactos, c ($\frac{\text{contactos}}{\text{día}}$).
- Riesgo de transmisión o probabilidad de infección, p ($\frac{1}{\text{individuo}}$).
- Número de individuos en la población, N .
- σ^{-1} (días) es el tiempo característico de transmisión.
- Velocidad de detección de $E(t)$, K_E (infectados "asintomáticos /día), mediante “pruebas” PCR.
- α es la fracción de infectados “asintomáticos” que se recuperan sin pasar al grupo I de “infectados” diagnosticados.
- δ^{-1} (días) es el tiempo característico de duración de la infección.
- η^{-1} (días) es el tiempo característico de hospitalización o mortalidad.

En ausencia de valores precisos de los parámetros de propagación del virus, se han probado los siguientes rangos en los que éstos, convenientemente adimensionalizados, podrían variar:

$$\frac{cp}{\sigma} \in [1,4]; \frac{S(0)}{N} \in [0.80,0.90]; \frac{I(0)}{N} \in [1.8 \times 10^{-6}, 2.6 \times 10^{-5}]; \frac{E(0)}{I(0)} \in [100,1500];$$
$$\frac{\delta+\eta}{\sigma} \in [5,20]; \alpha \in [0,1].$$

$S(0)$, $E(0)$ e $I(0)$ son los individuos “susceptibles”, “asintomáticos” e “infectados” en el momento de iniciar la simulación del proceso, es decir, el día 1 de marzo.

Se ha realizado la integración del sistema no lineal de ecuaciones para múltiples combinaciones de los valores de los parámetros adimensionales. Se han tomado condiciones iniciales, $\tau = 0 = t$, el 1 de marzo. Como no se han realizado “pruebas” PCR sistemáticas de detección de infectados “asintomáticos”, se ha supuesto, por el momento, $K = 0$.

La Fig. 1 presenta las predicciones del modelo para $\sigma = 0.083 \text{ días}^{-1}$ (tiempo característico en que los infectados “asintomáticos” pasan a “infectados” diagnosticados de 12 días), $\frac{S(0)}{N} = 0.89$ (89% de la población española es “susceptible” de infectarse con el SARS-CoV-2), $\frac{I(0)}{N} = 2.0 \times 10^{-6}$ (la cifra de “infectados” diagnosticados el 1 de marzo era aproximadamente 94), $\frac{E(0)}{I(0)} = 1300$ (el número de infectados “asintomáticos” el 1 de marzo era 1300 veces superior al de “infectados” diagnosticados, es decir, unos 122200 individuos), $\frac{cp}{\sigma} = 2.5$ (la velocidad de contacto, cp , es 2.5 veces la de transición de E a I, σ), $\frac{\delta+\eta}{\sigma} = 18.5$ (la velocidad de hospitalización/curación/muerte es 18.5 veces mayor que la de transición de E a I) y $\alpha = 0.40$ (40% de los infectados “asintomáticos” se curan sin pasar a “infectados” diagnosticados).

[A posteriori, algunos epidemiólogos han sugerido que solamente un porcentaje en torno al 16% de los individuos “asintomáticos” podría contagiar a los “susceptibles”. Esto permitiría reducir el valor de $\frac{E(0)}{I(0)}$ y de $\frac{\delta+\eta}{\sigma}$ a valores que podrían ser mas lógicos].

Este conjunto de valores logra un ajuste razonable del número de infectados hasta $\tau = 4$, es decir, entre el 1 de marzo y el 15 de abril. Expertos epidemiólogos podrán valorar la elección de valores de los parámetros numéricos que mejor ajustan los datos oficiales. A pesar de las limitaciones reseñadas sobre los valores absolutos resultantes, parece apropiado indicar que a mitad de abril el modelo predice alrededor de 253800 “infectados” diagnosticados y 7698600 “asintomáticos”, es decir, un número 30 veces superior de los segundos en comparación con los primeros.

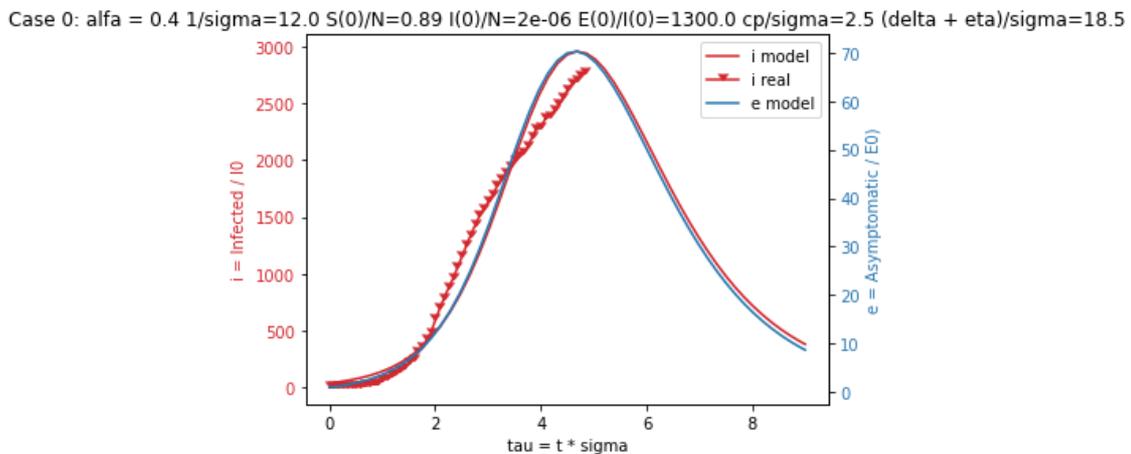


Figure 1. Número adimensional de individuos “infectados”, $i(t) = I(t)/I(0)$, en función del tiempo adimensional, $\tau = \sigma t$, para $\frac{cp}{\sigma} = 2.5$, $\frac{S(0)}{N} = 0.89$, $\frac{I(0)}{N} = 2.0 \times 10^{-6}$, $\frac{E(0)}{I(0)} = 1300$, $\frac{\delta+\eta}{\sigma} = 18.5$, $\alpha = 0.40$. $I(0) \approx 94$ individuos “infectados” el 1 de marzo de 2020.

Una primera conclusión que se puede extraer de este ejercicio es que el sencillo modelo propuesto y los valores seleccionados de los parámetros reproducen, al menos, la evolución del número oficial de infectados por el SARS-CoV-2 en España entre el 1 de marzo y el 15 de abril. **Como el objetivo de esta nota no es reproducir con precisión los números de “infectados” diagnosticados, más aún dada la incertidumbre de las cifras oficiales, se tomarán estos parámetros como los que mejor representan el estado del arte en la propagación de la COVID-19.**

3.2 Como herramienta para analizar el impacto de decisiones tácticas

Esta sub-sección intenta solamente ilustrar cómo se podría haber usado este modelo para orientar la toma de posibles medidas administrativas en fechas en torno al 1 de marzo.

Una filosofía similar a la aquí propuesta se ha empleado para analizar el comportamiento del sistema energético español [6] en los primeros doce años de este siglo; si se hubiesen realizado simulaciones a corto plazo con un modelo matemático, las predicciones podrían haber guiado la toma de decisiones sobre inversiones en ciclos combinados y en tecnologías renovables y haber supuesto un ahorro de alrededor de 30000 millones de Euros. Se puede argumentar que este uso a posteriori del modelo tiene escasa utilidad, dado que la evolución real de los hechos es

inalterable. Según esta filosofía, la predicción del pasado o la realización de la autopsia de un sistema económico o biológico sería un ejercicio fútil. Esta sub-sección intenta demostrar un punto de vista diferente, ilustrando el uso de modelos como herramientas utilísimas en la toma de decisiones en condiciones normales y, particularmente, ante emergencias de incierta evolución temporal.

El presente modelo es una simplificación de otros existentes sobre propagación de epidemias disponibles en la literatura científica [1-5]. La adimensionalización de las ecuaciones es una novedad introducida, aunque no esencial. Por tanto, el bloque central de la parte superior de la Fig. 1 estaba disponible desde hace bastante tiempo.

Parece evidente para epidemiólogos y virólogos que “La transmisión de una infección depende de tres factores: el número de contactos que una persona tiene, la capacidad del patógeno para transmitirse y la capacidad de infección.” [7]. El bloque izquierdo en la parte superior de la Fig. 1 subraya gráficamente esta afirmación; los parámetros numéricos que controlan la propagación de la epidemia eran desconocidos el 1 de marzo y lo siguen siendo, en menor medida, en este momento. Como se ha indicado anteriormente, ante la incertidumbre de los valores numéricos, los epidemiólogos y virólogos podrían haber establecido unos rangos realistas dentro de los cuales podrían variar los mismos. El bloque izquierdo, debajo del anterior en la Fig.1, suministra las cifras de “infectados” diagnosticados y “asintomáticos” en el instante inicial de la simulación, es decir, el 1 de marzo. En esta fecha, se disponía de la cifra oficial de “infectados”, mas o menos ajustadas a la realidad, y, debido al total desconocimiento de los “asintomáticos”, se podría haber tomado un rango amplio de variación, por ejemplo, entre 100 y 2000. Unos países preliminares del modelo confirmaron que, de acuerdo con lo indicado en la Referencia [9], el número de contactos entre individuos “susceptibles” de contagiarse e “infectados” diagnosticados y “asintomáticos” es un parámetro muy importante en la propagación de la enfermedad, como era lógico e intuitivamente esperable.

Por tanto, todos los elementos necesarios para utilizar el modelo de simulación de la propagación del SARS-CoV-2 (COVID-19), con las incertidumbres reseñadas, estaban disponibles el 1 de marzo. Una pregunta lógica que muchos ciudadanos, y necesariamente los expertos y los gestores de la pandemia, debieran haberse formulado a comienzos del mes de marzo es:

¿Cómo evolucionaría el número de infectados si se redujesen los contactos entre individuos “susceptibles” de ser contagiados y los ya “infectados” diagnosticados y “asintomáticos” en porcentajes de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%?

Como se ha indicado el número de contactos es importante en el avance de las infecciones. Es, por otro lado, el parámetro controlable mediante medidas administrativas. La tasa o velocidad de contactos efectivos para la transmisión de la enfermedad es igual al número total de contactos por día, c , multiplicado por la probabilidad, p , de contagio por cada individuo “susceptible”. Las Referencias [8-14] presentan varios modelos, en su mayoría estocásticos, que permiten cuantificar estos parámetros. Se podría haber simulado el impacto en el valor de cp de distintas concentraciones, formadas por individuos “susceptibles” de ser contagiado por “infectados” diagnosticados y por “asintomáticos”, así como la reducción de cp , resultado de diferentes medidas administrativas. Se podría haber estimado, aproximadamente, qué tanto por ciento (%) de reducción de cp se habría logrado evitando esos contactos (e.g., viajes internacionales, particularmente con Italia, asistencia a estadios de fútbol, transporte público urbano e interurbano, enseñanzas primaria y secundaria, docencia universitaria, actividades de ocio, manifestaciones, y cualquier concentración masiva de ciudadanos).

Con los valores de cp obtenidos para cada concentración evitada, se podría haber simulado varios Escenarios y valorado su efecto mitigador en la evolución del contagio. Las respuestas se muestran en las Figs. 2-6. El primer Escenario, E-1, con una reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ del orden del 10%, indica que el máximo de infectados “diagnosticados” habría sido algo inferior al que se alcanzará según cifras oficiales (Fig. 2); a mitad de abril la cifra de “infectados” se habría situado en torno a 155000, mientras que los “asintomáticos” habrían sido algo menos de 5 millones. Una reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ del 20% (Escenario E-2) habría conllevado, según la Fig. 3, un retraso en la presentación del máximo, significativamente inferior, que podría haber evitado la saturación del sistema sanitario; a mitad de abril las cifras de “diagnosticados” y de “asintomáticos” habrían sido de alrededor de 79000 y 2630000, respectivamente. La Fig. 4 muestra el orden de magnitud que se habría conseguido como consecuencia de medidas administrativas que hubieran reducido $\frac{cp}{\sigma}$ un 30% (Escenario E-3); el número de “diagnosticados” a mitad de abril ($\tau \approx 4$) podría haberse situado alrededor de 40000 y el de “asintomáticos” en torno a 1220000. Con reducciones de $\frac{cp}{\sigma}$ del 40% y 50% (Escenarios E-4 y E-5), el modelo indica (Figs. 5 y 6) que la cifra de “infectados” diagnosticados a mitad de abril habría sido en torno a 19000 y a 9000, respectivamente, mientras que los “asintomáticos” habrían ascendido a 525000 y 214000. Los valores relativos de los números son elocuentes.

La evolución de la cifra oficial de “infectados” diagnosticados no se conocía el 1 de marzo. Sin embargo, era posible comparar las cinco curvas de predicciones del modelo, obtenidas bajo distintos supuestos de actuaciones administrativas. El Escenario E-1, con una reducción de un 10% de $\frac{cp}{\sigma}$, predice alrededor de 140000 “infectados” a mitad de abril (Fig. 2), mientras que otra que implique una disminución, por ejemplo, de un 30% (Escenario E-3, Fig. 4), predice un número de “diagnosticados” de unos 37000. Los dos valores de “diagnosticados” no son obviamente precisas. Sin embargo, la relación de ambas, un factor de casi cuatro, es muy relevante para adoptar una actuación decidida a favor del Escenario E-3.

Medidas administrativas para evitar importantes concentraciones ciudadanas y la circulación incontrolada de personas desde y hacia países con cifras alarmantes de “infectados” habrían tenido, muy probablemente, un impacto que simulaciones como las descritas en esta nota podrían haber cuantificado. Asimismo, se podría haber evaluado la reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ que un confinamiento parcial (e.g., cierre de algunos espectáculos, locales públicos, universidades, escuelas,...) inteligentemente diseñado y el uso de elementos físicos de protección (mascarillas) habrían representado en la fase inicial de propagación de la pandemia. También, se podría haber valorado la efectividad de un confinamiento total (estado de alarma) en una fase avanzada en la evolución del proceso.

Case 0: $\alpha = 0.4$ $1/\sigma = 12.0$ $S(0)/N = 0.89$ $I(0)/N = 2e-06$ $E(0)/I(0) = 1300.0$ $cp/\sigma = 2.25$ $(\delta + \eta)/\sigma = 18.5$

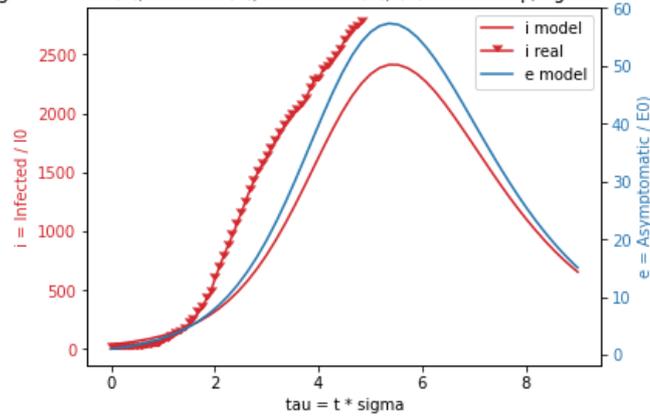


Figura 2. Evolución del número de “infectados” en el Escenario E-1, con una reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ de un 10%. Los puntos son las cifras oficiales.

Case 0: $\alpha = 0.4$ $1/\sigma = 12.0$ $S(0)/N = 0.89$ $I(0)/N = 2e-06$ $E(0)/I(0) = 1300.0$ $cp/\sigma = 2.0$ $(\delta + \eta)/\sigma = 18.5$

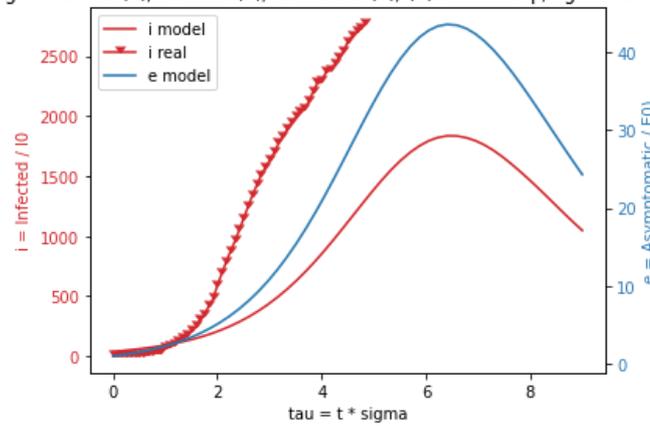


Figura 3. Evolución del número de “infectados” en el Escenario E-2, con una reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ de un 20%. Los puntos son las cifras oficiales.

Case 0: $\alpha = 0.4$ $1/\sigma = 12.0$ $S(0)/N = 0.89$ $I(0)/N = 2e-06$ $E(0)/I(0) = 1300.0$ $cp/\sigma = 1.75$ $(\delta + \eta)/\sigma = 18.5$

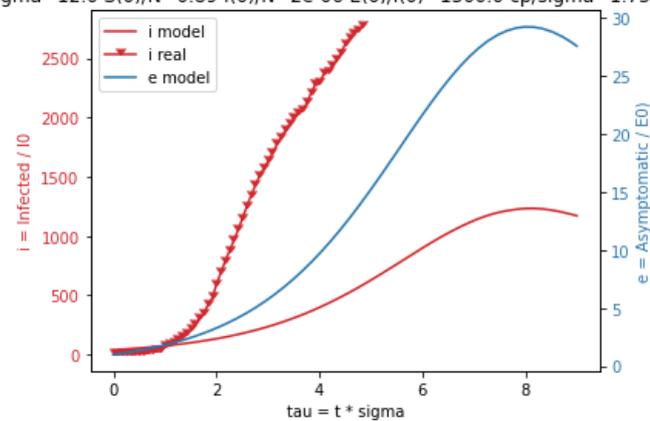


Figura 4. Evolución del número de “infectados” en el Escenario E-3, con una reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ de un 30%. Los puntos son las cifras oficiales.

Case 0: $\alpha = 0.4$ $1/\sigma = 12.0$ $S(0)/N = 0.89$ $I(0)/N = 2e-06$ $E(0)/I(0) = 1300.0$ $cp/\sigma = 1.5$ $(\delta + \eta)/\sigma = 18.5$

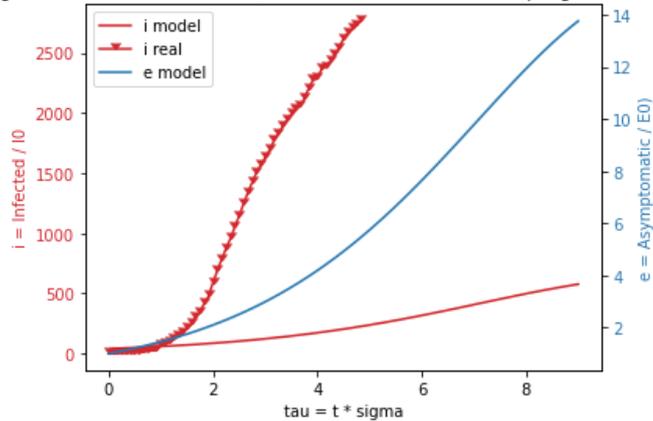


Figura 5. Evolución del número de “infectados” en el Escenario E-4, con una reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ de un 40%. Los puntos son las cifras oficiales.

Case 0: $\alpha = 0.4$ $1/\sigma = 12.0$ $S(0)/N = 0.89$ $I(0)/N = 2e-06$ $E(0)/I(0) = 1300.0$ $cp/\sigma = 1.25$ $(\delta + \eta)/\sigma = 18.5$

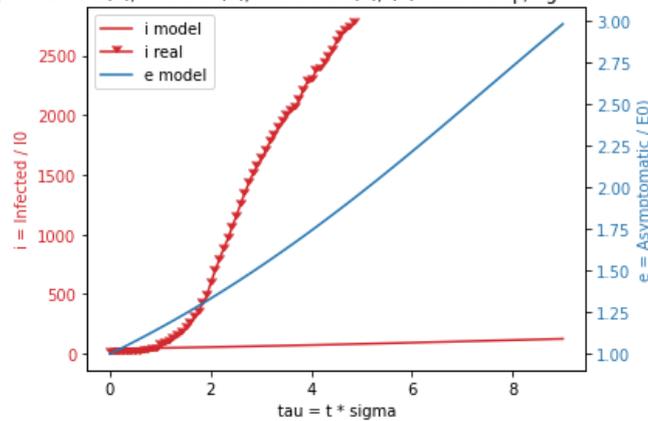


Figura 6. Evolución del número de “infectados” en el Escenario E-5, con una reducción de $\frac{cp}{\sigma}$ de un 50%. Los puntos son las cifras oficiales.

Con las limitaciones reseñadas, la adopción de esta herramienta habría orientado en la toma de decisiones en la fase inicial de evolución del virus, cuando, aparentemente, las medidas adoptadas habrían tenido un impacto decisivo en la evolución posterior de la epidemia en España.

4. Conclusiones

Los modelos matemáticos deterministas, como el propuesto, son una herramienta utilísima para guiar la toma de decisiones. Incluso con datos de entrada inciertos, un modelo que simula características conocidas, aunque imperfectamente, de la evolución de un proceso ayuda a acotar la incertidumbre en las predicciones realizadas mediante la variación racional de los parámetros. Obviamente, los modelos estocásticos proporcionan más información y en términos de probabilidad de ocurrencia de una variable.

Ante las dudas sobre las cifras oficiales de infectados en España y la imposibilidad de acotar los rangos de los parámetros dimensionales que el modelo necesita para su integración, es imposible afirmar que el modelo matemático propuesto representa fielmente la “cinética” desconocida de la evolución de contagios por el SARS-CoV-2. Sin embargo, tras haber realizado numerosísimos pases del modelo, variando sistemáticamente los valores constantes de los parámetros

adimensionales durante el tiempo de integración, sus predicciones reproducen aproximadamente los datos oficiales de “infectados” diagnosticados en España. El objetivo de este estudio no es buscar los valores óptimos de los parámetros que ajustan con precisión la curva de “infectados” en función del tiempo. Por tanto, las predicciones de valores absolutos de “infectados” se deben considerar solamente como orientativas.

Por el contrario, la comparación de cifras de “infectados” con distintas estrategias de variación de los parámetros proporciona una valoración fiable de cada conjunto de sus magnitudes. Se presentan los resultados de simulaciones que varían solamente $\frac{cp}{\sigma}$, parámetro que cuantifica el número de contactos entre “susceptibles”, “infectados” y “asintomáticos”, que se puede modificar mediante decisiones administrativas. Se analiza de esta manera el impacto relativo de cada estrategia adoptada en el número de “infectados” a lo largo de la evolución temporal de la epidemia. En su momento, el uso de estas simulaciones podría haber guiado las decisiones administrativas más eficientes a implantar.

El número de “asintomáticos”, que algunos epidemiólogos estiman muy superior al de “infectados”, podría ser una de las variables importantes, junto a los contactos efectivos, en la evolución de los contagios. Dada la progresión geométrica, mas que aritmética, de los contagios, un pequeño número de “asintomáticos”, infectados en una concentración ciudadana, puede generar en muy poco tiempo una cifra elevada de “infectados”. Es difícil controlar el avance de la pandemia inicial y de sus “olas” sucesivas si no se minimizan los riesgos de contagio de cada actividad.

El hundimiento del PIB, como consecuencia de las decisiones administrativas adoptadas en la gestión de la pandemia, requiere un análisis sistémico, integrando modelos económicos y sanitarios. La metodología expuesta es un ejemplo simplificado de los segundos.

Agradecimientos

El Dr. Elías Fereres, Académico de la Real Academia de Ingeniería, y el Dr. Alonso Rodríguez, Profesor Emérito de la UPM, han aportado valiosos comentarios al contenido de esta nota. El Dr. Pedro García Barreno, Académico de la Real Academia Española y de la Real Academia de Ciencias, ha proporcionado información sobre publicaciones científicas en las que se usan modelos de propagación del SARS-CoV-2.

D. Juan José Romero ha analizado detalladamente el modelo matemático y sugerido valores realistas de los parámetros adimensionales.

Bibliografía

1. Gilbert, J.A., Meyers, L.A., Galvani, A.P. and Townsend, J.P., Probabilistic uncertainty analysis of epidemiological modeling to guide public health intervention policy, *Epidemics* **6**, 37-45 (2014).
2. Rabajante, J.F., Insights from early mathematical models of 2019-nCoV acute respiratory disease (COVID-19) dynamics, supported by the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2020.
3. Wu, J.T., Leung, K. and Leung, G.M., Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study, www.thelancet.com, vol. **395**, 689-697 (2020).

4. Li, R., Pei, S., Chen, B., Song, Y., Zhang, T., Yang, W. and Shaman, J., Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2), *Science*, 16 March, 2020.
5. Wynants, L., Van Calster, B., Bonten, M.M.J., Collins, G.S., Debray, T.P.A., De Vos, M., Haller, M.C., Heinze, G., Moons, K.G.M., Riley, R.D., Schuit, E., Smits, L.J.M., Snell, K.I.E., Steyerberg, E.W., Christine Wallisch, C. and van Smeden, M., Prediction models for diagnosis and prognosis of covid-19 infection: systematic review and critical appraisal, *BMJ* 2020;369:m1328 <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.m1328>, Accepted: 31 March 2020.
6. Gomez, A., Dopazo, C. and Fueyo, N., The “cost of not doing” energy planning: The Spanish energy bubble, *Energy* **101**, 434-446 (2016).
7. Entrevista a Oriol Mitjà, “La epidemia del coronavirus era evitable”, Jessica Mouzo, Barcelona, El País, 17 de marzo, 2020.
8. Kucharski, A.J., Russell, T.W., Diamond, C., Liu, Y., CMMID nCoV working group, Edmunds, J., Funk, S. and Rosalind M Eggo, R.M., Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study, medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.01.31.20019901>, (not peer-reviewed), 2020.
9. Gielen, J.L.W., Epidemics Between Bailey and Reed-Frost: A Stochastic Version of the Kermack and Mckendrick Model, *J. Biological Systems*, DOI: 10.1142/S0218339097000308, December 1997.
10. Mossong, J., Hens, N., Jit, M., Beutels, P., Auranen, K., Mikolajczyk, R., Massari, M., Salmaso, S., Scalia Tomba, G., Wallinga, J., Heijne, J., Sadkowska-Todys, M., Rosinska, M. and Edmunds, W.J., Social Contacts and Mixing Patterns Relevant to the Spread of Infectious Diseases, <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0050074>, Published: March 25, 2008.
11. Ferretti, L., Wymant, C., Kendall, M., Zhao¹, L., Nurtay, A., Abeler-Dörner, L., Parker, M., Bonsall, D., Fraser, C., Quantifying SARS-CoV-2 transmission suggests epidemic control with digital contact tracing, *Science* 31 Mar 2020, DOI: 10.1126/science.abb6936.
12. Clamer, V., Dorigatti, I., Fumanelli, L., Rizzo, C. and Pugliese, A., Estimating transmission probability in schools for the 2009 H1N1 influenza pandemic in Italy, *Theoretical Biology and Medical Modelling*, volume 13, Article number: 19 (2016).
13. Siettos, C.I. and Lucia Russo, L., Mathematical modeling of infectious disease dynamics, *Virulence*. 2013 May 15; 4(4): 295–306. Published online 2013 Apr 3. doi: [10.4161/viru.24041](https://doi.org/10.4161/viru.24041).
14. Simulating an epidemic, You Tube, 27 de mar. de 2020 - Experiments with toy SIR models Home page: <https://www.3blue1brown.com>

Anexo I. Modelo SEI simplificado

A. Ecuaciones

Varias simplificaciones del modelo SIR clásico [1] de propagación de epidemias dan origen a diversas versiones [2-3]. Hipótesis, en principio, realistas permiten tratar tres ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) para los individuos “susceptibles” de infectarse, $S(t)$, los “infectados” diagnosticados, $I(t)$, y los infectados “asintomáticos” (“undocumented infections” en [4]), $E(t)$. Los dos últimos grupos pueden contagiar a los “susceptibles”. Mientras los $I(t)$ son conocidos y se pueden aislar para evitar contagios posteriores, los $E(t)$ son incógnitos portadores y transmisores del virus y, presumiblemente, son un factor importante en la propagación de contagios. El resto de grupos, incluidos en modelos SIR (e.g., “vacunados”, “en tratamiento”, “hospitalizados”, “recuperados”, ...), se podrían considerar por separado. Se espera que esta

simplificación capture las características esenciales conocidas de la propagación de infecciones del SARS-CoV-2.

Como consecuencia de estas simplificaciones, se propone examinar el siguiente sistema de tres EDOs para describir la propagación de la infección:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{cp}{N}IS - \frac{cp}{N}ES$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{cp}{N}IS + \frac{cp}{N}ES - \sigma E - K_E$$

$$\frac{dI}{dt} = (1 - \alpha)\sigma E - (\delta + \eta)I$$

La integración de estas ecuaciones requiere la siguiente información:

- Condiciones iniciales, $S(0)$, $E(0)$ and $I(0)$.
- Velocidad de contactos, $c \left(\frac{\text{contactos}}{\text{día}} \right)$.
- Riesgo de transmisión o probabilidad de infección, $p \left(\frac{1}{\text{individuo}} \right)$.
- Número de individuos en la población, N .
- Velocidad característica de transmisión, $\sigma(\text{días}^{-1})$. $\sigma^{-1}(\text{días})$ es el tiempo característico de transmisión.
- Velocidad de detección de $E(t)$, K_E (infectados no declarados /día), mediante “pruebas”.
- α es la fracción de infectados “asintomáticos” que se recuperan sin pasar al grupo I de “infectados” diagnosticados.
- Velocidad de infección, $\delta(\text{días}^{-1})$. $\delta^{-1}(\text{días})$ es el tiempo característico de duración de la infección.
- Velocidad de hospitalización y mortalidad, $\eta(\text{días}^{-1})$. $\eta^{-1}(\text{días})$ es el tiempo característico de hospitalización o mortalidad.

B. Sistema adimensional de EDOs

Se definen $S(t)/S(0) = s(t)$, $E(t)/E(0) = e(t)$, $I(t)/I(0) = i(t)$ y el tiempo adimensional, $\tau = \sigma t$. Con ello, las tres ecuaciones se reducen a:

$$\frac{ds}{d\tau} = -\left(\frac{cp}{\sigma}\right) \left[\frac{I(0)}{N}\right] is - \left(\frac{cp}{\sigma}\right) \left[\frac{E(0)}{N}\right] es$$

$$\frac{de}{d\tau} = \left(\frac{cp}{\sigma}\right) \left[\frac{S(0)}{N}\right] \frac{1}{[E(0)/I(0)]} is + \left(\frac{cp}{\sigma}\right) \left[\frac{S(0)}{N}\right] es - e - K$$

$$\frac{di}{d\tau} = (1 - \alpha) \left[\frac{E(0)}{I(0)}\right] e - \left(\frac{\delta + \eta}{\sigma}\right) i$$

Este sistema necesita para su integración la siguiente información:

- Las condiciones iniciales se simplifican a: $s(0) = 1 = e(0) = i(0)$.

- $\frac{cp}{\sigma}$ es la relación entre las velocidades de contacto, cp , y de transmisión, σ , o, alternativamente, la relación entre los tiempos característicos de transmisión, σ^{-1} , y de contacto efectivo, $(cp)^{-1}$.
- $\frac{S(0)}{N}$ es la fracción (de la población total) de individuos “susceptibles” de ser infectados en el tiempo inicial, $t = 0$.
- $\frac{E(0)}{N}$ es la fracción (de la población total) de individuos infectados “asintomáticos” (no documentados) en el tiempo inicial, $t = 0$.
- $\frac{I(0)}{N}$ es la fracción (de la población total) de individuos “infectados” (documentados) en el tiempo inicial, $t = 0$.
- $K = \frac{K_E}{\sigma E(0)}$ es la velocidad adimensional de detección de individuos infectados “asintomáticos” mediante “pruebas” PCR. $K_E/E(0)$ es la velocidad de detección ($días^{-1}$) basada en el número inicial de individuos “asintomáticos”.
- α es la fracción de infectados “asintomáticos” que se recuperan sin pasar a la clase I de “infectados” diagnosticados.
- $\frac{\delta+\eta}{\sigma}$ es la relación entre las velocidades de infección/hospitalización/mortalidad y de transmisión.

¿Qué dicen estas ecuaciones?

- El número de individuos “susceptibles” de ser infectados decrece con una velocidad dada por los contactos “bi-personales” con “infectados” diagnosticados, $-\left(\frac{cp}{\sigma}\right)\left[\frac{I(0)}{N}\right]iS$, y con infectados “asintomáticos”, $-\left(\frac{cp}{\sigma}\right)\left[\frac{E(0)}{N}\right]eS$.
- El número de infectados “asintomáticos” aumenta exactamente a la misma velocidad a la que disminuye los individuos “susceptibles”, $\left(\frac{cp}{\sigma}\right)\left[\frac{S(0)}{N}\right]\left[\frac{I(0)/N}{E(0)/N}\right]iS + \left(\frac{cp}{\sigma}\right)\left[\frac{S(0)}{N}\right]eS$, menos un decremento, $-e$, debido a los infectados “asintomáticos” que, tras un tiempo característico de transmisión de σ^{-1} ($días$), pasan en una proporción $(1 - \alpha)e$ a engrosar el número de “infectados” diagnosticados, mientras que una fracción αe se cura. La realización de “pruebas” PCR de detección reduce de manera forzada el número de infectados “asintomáticos” a una velocidad constante, $-K$.
- El número de individuos “infectados” diagnosticados aumenta con una velocidad $(1 - \alpha)\left[\frac{E(0)}{I(0)}\right]e$, a medida que una fracción $(1 - \alpha)e$ de infectados “asintomáticos” se convierten en “infectados” diagnosticados y disminuye con velocidad $-\left(\frac{\delta+\eta}{\sigma}\right)i$, a medida que los “infectados” superan la infección, son hospitalizados o mueren.

C. Sistema lineal

Si los parámetros adimensionales son $\left(\frac{cp}{\sigma}\right)\left[\frac{I(0)}{N}\right] \ll 1$ y $\left(\frac{cp}{\sigma}\right)\left[\frac{E(0)}{N}\right]$, el número de individuos “susceptibles” se puede considerar constante, es decir, $s(\tau) = s(0)$. El sistema se reduce a dos EDOs lineales para $i(\tau)$ y $e(\tau)$ (“cinética” de primer orden, por analogía con la cinética química lineal de sistemas reactivos espacialmente homogéneos). Este sistema se puede integrar analíticamente si los parámetros adimensionales son constantes.

Por ejemplo, para España $N = 47 \times 10^6$ habitantes. Para la situación actual, $I(0) \sim 10^4$ individuos “infectados” documentados y se supone $E(0) \sim 10^5$ individuos infectados “asintomáticos” (no documentados), las condiciones anteriores implican

$$\left(\frac{cp}{\sigma}\right) \ll \frac{47 \times 10^6}{10^4} = 4700$$

$$\left(\frac{cp}{\sigma}\right) \ll \frac{47 \times 10^6}{10^5} = 470.$$

Siempre que $\left(\frac{cp}{\sigma}\right) \ll 470$, la ecuación para $s(\tau)$ se podrá aproximar por:

$$\frac{ds}{d\tau} \approx 0.$$

Y, por tanto, $s(\tau) = s(0)$.

Sin embargo, si el número de “infectados” documentados sigue aumentando hasta alcanzar valores $I(0) \sim 10^5$ individuos y, se supone, $E(0) \sim 10^6$ individuos “asintomáticos” (no documentados), las condiciones anteriores implicarán

$$\left(\frac{cp}{\sigma}\right) \ll \frac{47 \times 10^6}{10^5} = 470$$

$$\left(\frac{cp}{\sigma}\right) \ll \frac{47 \times 10^6}{10^6} = 47.$$

La condición para despreciar la variación de $s(\tau)$ sería $\left(\frac{cp}{\sigma}\right) \ll 47$, mucho más restrictiva que en la anterior y, muy probablemente, se debería usar el sistema no lineal.

Suponiendo que se cumplen las restricciones anteriores, el sistema de dos EDOs es:

$$\frac{de}{d\tau} = \left(\frac{cp}{\sigma}\right) \left[\frac{S(0)}{N}\right] \frac{1}{[E(0)/I(0)]} i + \left(\frac{cp}{\sigma}\right) \left[\frac{S(0)}{N}\right] e - e - K$$

$$\frac{di}{d\tau} = (1 - \alpha) \left[\frac{E(0)}{I(0)}\right] e - \left(\frac{\delta + \eta}{\sigma}\right) i$$

Este sistema tiene soluciones analíticas que se pueden obtener fácilmente.

Sobre el estornudo: aspectos mecánicos de la transmisión del COVID-19

Javier Jiménez

Universidad Politécnica de Madrid, Pl. Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid, España
Real Academia de Ingeniería de España

Resumen: Este artículo resume algunos de los aspectos de la transmisión de los virus y bacterias responsables de enfermedades respiratorias, centrándose en los que dependen del comportamiento de las gotas expulsadas por individuos enfermos, estimando la probabilidad de las distintas rutas de contagio: directa, por contaminación de superficies y por aerosoles. Los resultados se interpretan en relación con las diversas medidas preventivas, incidiendo brevemente en la posible influencia de factores ambientales.

“La pandemia que acaba de barrer el mundo no tiene precedentes. Ha habido epidemias más mortales, pero más locales, y otras casi tan globales, pero menos mortíferas ... Lo sorprendente es que nadie sabía al principio cuál era la enfermedad, de dónde provenía, ni cómo pararla...”

Esta cita [S19] no se refiere a la pandemia actual de COVID-19, sino a la llamada ‘gripe española’ que asoló el planeta en 1918-19. En realidad, las pandemias no son demasiado infrecuentes. Algo que puede definirse como pandemia ha ocurrido cada cien años durante los últimos dos milenios, y epidemias más localizadas, pero igualmente devastadoras, se presentan bastante más a menudo. El autor de la cita anterior habla en el mismo artículo de otra ‘pandemia’ de gripe en 1889-90, y durante el siglo veinte hubo al menos tres que dejaron millones de muertos (en 1918, 1957 y 1968). De esto se desprenden dos cosas: la primera es que hay bastante información acumulada sobre la transmisión de enfermedades respiratorias [M20], y que probablemente podamos aprender casi tanto explorando esa información como redescubriéndola. La segunda es que, al estudiar la pandemia actual, estaremos haciendo algo útil para lo que queda de ella, pero también para las pandemias de nuestros hijos. Este artículo intenta resumir la información existente sobre los aspectos mecánicos de la transmisión aérea de enfermedades respiratorias, que en su mayor parte se realiza por medio de las gotas de saliva cargadas de virus que expulsamos al hablar, respirar, toser o estornudar. Intentaremos conectar estos comportamientos mecánicos con recomendaciones higiénicas y factores ambientales, pero los aspectos médicos y epidemiológicos del problema requieren un tratamiento separado.

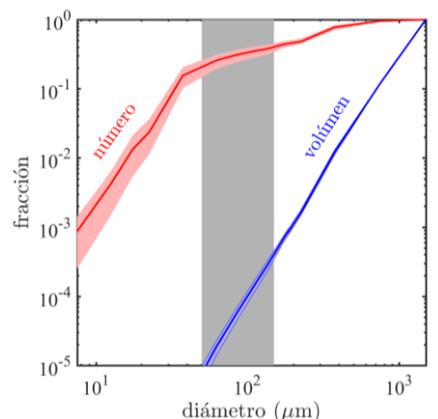


Figura 1: Fracción del número y volumen de gotas expulsadas de la boca por debajo de un cierto diámetro. La franja gris separa los aerosoles, a la izquierda, de las gotas grandes a la derecha.

Reglas como la distancia de seguridad de dos metros están basadas de forma tangencial en estudios de los años 1930 [W34]. La distribución del diámetro de las gotas que expulsa un individuo enfermo depende relativamente poco de cómo lo haga, aunque su volumen total sí varía. La figura 1 representa la fracción de gotas menores que un cierto tamaño que son expulsadas al hablar en voz alta, estornudar, toser con la boca inicialmente cerrada, o toser desde el fondo de la garganta. La curva roja representa el número de gotas, y la azul, el volumen acumulado [D46]. La estrecha banda de color que rodea cada una de las curvas representa la diferencia entre las distintas formas de

expulsión. La zona gris entre 50-150 μm de diámetro separa las gotas que pueden considerarse grandes de las pequeñas. Las dos se comportan de forma distinta. Una vez que una gota deja la boca, empieza a evaporarse y a caer, y la distinción entre tamaños depende de cuál de los dos procesos es el más rápido. Si la gota cae al suelo antes de evaporarse, lo contamina, pero deja de estar en el aire y pierde su capacidad de ser inhalada. Si se seca antes de caer, dejando un núcleo sólido que puede contener viriones (partículas de virus viables), su diámetro disminuye en media por un factor de dos o tres [N05], y pasa a formar parte de un aerosol que puede permanecer en suspensión durante horas, y cuya dispersión está controlada por las corrientes ambientales de aire, incluyendo las generadas por los sistemas de climatización, por el movimiento de la gente, o incluso por las corrientes de convección debidas al calor humano. El límite entre los dos comportamientos se fija convencionalmente comparando el tiempo de caída sobre dos metros (desde la boca al suelo) con la evaporación en una atmósfera estándar, y varía algo dependiendo de la distancia de caída (por ejemplo, a una mesa en vez de al suelo) y del estado de la atmósfera. El calor y la baja humedad aumentan la velocidad de evaporación, y aumentan el tamaño crítico que separa el aerosol de las gotas grandes. La humedad, incluyendo la del aliento, ralentiza la evaporación, y una menor distancia de caída disminuye el tiempo disponible para ella. Ambas disminuyen el tamaño crítico, y es posible que estas diferencias expliquen parte de las variaciones estacionales de infectividad, o de la diferencia entre ambientes exteriores e interiores [W34]. En todo caso, el diámetro crítico es del orden del que se indica en la figura 1, y el tiempo de caída o evaporación para esas gotas marginales es siempre del orden de 1 a 3 s.

Mecanismos de contagio

Se deduce de lo dicho anteriormente que hay tres mecanismos principales de contagio a través de gotas [M20]. El primero es la ingestión directa de las gotas provenientes de un estornudo o de otra expulsión por un enfermo. El segundo es la contaminación de superficies por las gotas que caen antes de evaporarse, y que pasan más tarde a las manos del receptor. El tercero es la inhalación de los núcleos que forman el aerosol.

Transmisión directa

El primer mecanismo no es fácil de evitar si nos encontramos en la trayectoria del spray generado por un enfermo. La probabilidad de infección depende del tamaño de las gotas del spray y de la carga viral en la saliva, que es del orden de 1 a 10 millones de viriones (M_{vir}) por cm^3 en un enfermo de COVID-19, durante los primeros catorce días de infección [G20]. Con esas concentraciones, las gotas más pequeñas que sobreviven la desecación, con un diámetro de 100 μm , contienen, en media, $c=0.5$ viriones para una carga de 1 $M_{\text{vir}}/\text{cm}^3$, o $c=5$ viriones para 10 $M_{\text{vir}}/\text{cm}^3$, y la probabilidad de que una gota de este tamaño contenga *alguna* partícula viral viene dada por la distribución de Poisson, $p(c) = 1 - \exp(-c)$. Es decir, $p(0.5)=40\%$ para 1 $M_{\text{vir}}/\text{cm}^3$, y $p(5)=90\%$ para 10 $M_{\text{vir}}/\text{cm}^3$. La carga viral contenida en una gota aumenta con su tamaño, y prácticamente todas las gotas mayores que 200 μm transportan algún virión. Se cree que una sola partícula viral es suficiente para provocar una infección [N05], aunque los datos disponibles no se refieren directamente al SARS-CoV-2. Sin embargo, el movimiento de estas partículas grandes es balístico, y puede interrumpirse cubriendo la boca con obstáculos mecánicos, como mascarillas quirúrgicas, pantallas o incluso el brazo, y algo que todos hemos aprendido en los últimos meses es a estornudar educadamente. Incluso sin el uso de interrupciones mecánicas, la distancia interpersonal reduce mucho la probabilidad del contagio directo. Exceptuando alguna publicación sin confirmar de nubes de estornudo que se extienden a lo largo de varios metros [B20], la mayor parte de las simulaciones y visualizaciones de estornudos humanos coinciden en que el alcance

máximo de la nube de gotas producidas por un estornudo o por una tos es algo menor que un metro [B14].

Contaminación de superficies

El alcance de la nube de expulsión determina también la distancia en la que una persona enferma contamina las superficies de su entorno, que no siempre es el suelo, sino las mesas, postes del transporte público, ropa, etc. El contagio se produce más tarde, cuando alguien toca la superficie y se lleva la mano a la cara. Este proceso de contaminación es relativamente sencillo, y puede considerarse una variante de la transmisión directa discutida más arriba, en la que el ‘contagio’ se aplica a un objeto en vez de a una persona. El único aspecto mecánico a discutir es la densidad de contaminación esperable. Se deduce de la figura 1 que sólo una fracción (20%) de las gotas expulsadas son suficientemente grandes para no secarse antes de caer al suelo, pero que estas gotas grandes contienen una abrumadora mayoría del volumen expulsado al hablar o al estornudar. Sólo una cienmilésima parte de este volumen pasa a formar parte del aerosol, y puede despreciarse a la hora de estimar los efectos de la contaminación directa. El volumen expulsado en un estornudo es del orden de 600 mm^3 . Una tos genera 8 mm^3 , y un minuto de conversación en voz alta, 0.4 mm^3 [D46]. La contaminación viral de equilibrio se alcanza cuando la generación de partículas infectadas se compensa con la inactivación natural del virus, y puede escribirse como

$$M = 1.4V_0T_{1/2},$$

donde V_0 es el volumen de las gotas producidas por unidad de tiempo, $T_{1/2}$ es la vida media de la infectividad del virus, y M se mide, bien en volumen de saliva, o, suponiendo una carga vírica inicial en las gotas, en número de viriones. Algunas vidas medias del SARS-CoV-2 o de virus similares contenidos en gotas depositadas sobre superficies, o en aerosoles, se dan en la tabla siguiente.

	Aerosol (HR<40%)	Aerosol (HR>40%)	Cobre	Cartón	Acero	Plástico
$T_{1/2}$ (h)	1	0.05	0.7	3.5	5.5	6.5

Tabla 1: Vida media de viriones viables sobre superficies de distintos materiales [D20], o en aerosoles en distintas condiciones de humedad relativa ambiental [H60].

La mayor parte del volumen exhalado por un individuo infectivo se deposita sobre las superficies vecinas, en un área que es del orden de un metro cuadrado para un individuo que permanezca quieto, o proporcionalmente mayor para uno que esté moviéndose. Suponiendo una carga viral relativamente baja, de 1 Mvir/cm^3 , el ritmo de producción de volumen de gotas y de viriones por una persona que estornude una vez cada 5 min, o que tosa diez veces por minuto, es $V_0 \approx 5 \text{ cm}^3/\text{h} \approx 5000 \text{ Kvir/h}$. Para una conversación en voz alta, $V_0 \approx 20 \text{ mm}^3/\text{h} \approx 24 \text{ Kvir/h}$ (donde Kvir = mil viriones) [D46]. Se desprende de estos datos que incluso una conversación sostenida durante algunas horas alrededor de una mesa de plástico puede acumular una contaminación del orden de 200 Kvir/m^2 sobre la mesa. Esta cifra debe interpretarse con cuidado, porque no todos los viriones pasan a la mano al tocar la mesa, ni todos los virus en la mano pasan luego a la cara o al pulmón. Tampoco está claro cuál es la dosis mínima necesaria para producir un contagio, aunque hemos visto más arriba que un único virión podría bastar para provocarlo. Afortunadamente, la mayor parte de esta contaminación se debe a gotas relativamente grandes, que caen cerca del individuo infeccioso, y su número disminuye mucho con el uso de mascarillas quirúrgicas, e incluso higiénicas, por parte del emisor.

Transmisión aérea

El modo de transmisión que ha sido objeto de más controversia es el contagio por medio de aerosoles [W34,L43,D46,K80,N05]. Parte del problema es que su definición no ha sido uniforme entre los distintos grupos de trabajo, especialmente en lo que atañe al límite entre gotas grandes y pequeñas, pero hay evidencia circunstancial de contagios en recintos cerrados, a distancias demasiado grandes para cualquiera de los mecanismos discutidos hasta ahora [P20], incluyendo al menos un caso en el que el contagio parece haber estado controlado por la circulación debida a un aparato de aire acondicionado [L20].

Hemos visto más arriba que las gotas que se evaporan antes de caer al suelo dejan como residuo núcleos que contienen en un resto sólido y posiblemente viriones. En el proceso, su diámetro se reduce por un factor de dos o tres [N05]. En teoría, estas partículas se mantienen en suspensión durante suficiente tiempo como para que su comportamiento esté controlado por las corrientes ambientales de aire, pero no hay un límite bien definido para que esto se cumpla. Hemos visto que el límite superior convencional para gotas que se secan antes de caer es de $100\ \mu\text{m}$ [W34], lo que llevaría a la formación de núcleos de $30\text{-}50\ \mu\text{m}$ de diámetro. Pero, aunque estas gotas caigan demasiado despacio para evitar su desecamiento, su caída no deja de ser rápida. La velocidad terminal de caída de una gota de agua en aire varía con el cuadrado de su diámetro, y es aproximadamente $9\ \text{cm/s}$ para gotas de $50\ \mu\text{m}$. En un ambiente en reposo, estas gotas caen al suelo en $20\ \text{s}$, y, aunque una corriente de $1\ \text{m/s}$ pueda desplazarla varios metros durante su caída, su concentración a la altura de la respiración decae rápidamente con la altura. El tamaño también es importante para el contagio, porque las gotas de distinto tamaño se depositan en distintas partes del sistema respiratorio cuando se inhalan [N82]. Las gotas mayores que $10\ \mu\text{m}$ se depositan preferentemente en la boca o en la tráquea, donde su capacidad de contagio puede ser menor, mientras que las gotas entre $1\text{-}10\ \mu\text{m}$ penetran hasta los alveolos del pulmón, con una deposición máxima (60%) para gotas de $4\ \mu\text{m}$. Por debajo de $0.5\ \mu\text{m}$, las partículas tienden a exhalarse sin llegar a depositarse en el pulmón, y el tamaño del SARS-CoV-2, que es del orden de $0.1\ \mu\text{m}$, fija un límite inferior para el diámetro de los núcleos infectivos. La velocidad terminal de una gota de $10\ \mu\text{m}$ es de $2\ \text{mm/s}$. En la práctica, esos núcleos, e incluso partículas algo mayores, se mantienen indefinidamente en suspensión, especialmente en ambientes ligeramente turbulentos. La pregunta es si su concentración en el ambiente es suficiente para que la probabilidad de que se depositen viriones en el pulmón de un sujeto que no esté en la cercanía inmediata del individuo infectado sea apreciable.

Como consecuencia de la reducción de diámetro durante el desecamiento, los núcleos de $15\ \mu\text{m}$ provienen de gotas con diámetros de $30\text{-}50\ \mu\text{m}$, y la figura 1 revela que el volumen total por debajo de ese rango de tamaños es 10^5 veces menor que el de las gotas grandes. Los factores que controlan la cantidad de viriones exhalados por un individuo infeccioso son los mismos que para la contaminación de superficies (en este caso, lo que se contamina es el aire), y pueden obtenerse dividiendo los resultados para superficies por 10^5 . La concentración, en cambio, pasa ahora a medirse como carga por unidad de volumen en vez de por unidad de superficie. Así, suponiendo una vida media de 1 hora para los viriones (tabla 1), un individuo tosiendo o estornudando genera una carga de equilibrio de 50 viriones en suspensión, mientras que una conversación en voz alta sólo genera 0.25. En una habitación de $25\ \text{m}^2$, y suponiendo que el aerosol se mantiene uniformemente distribuido dentro de los 2 metros inferiores, la concentración generada por un individuo sintomático es de algo más de un virión por metro cúbico, y, puesto que una persona respira unos $0.4\ \text{m}^3/\text{h}$, la probabilidad de respirar algún virión durante dos horas es de $1 - \exp(-0.8) \approx 55\%$. Expresado de otra manera, la probabilidad de que *alguien* resulte contagiado en una reunión de 6 personas que incluya un enfermo sintomático, es de $1 - \exp(-0.8*5) \approx 98.7\%$. Incluso

en el caso de un individuo asintomático, cuyo único medio de transmisión sea la conversación, la probabilidad de que un contertulio particular resulte infectado en el curso de dos horas es 0.4%, y la de que alguno de los otros cinco participantes se contagie, es del 2%.

En realidad, aunque algunos de los números del párrafo anterior puedan parecer preocupantes, son conservadores, porque están obtenidos usando un límite inferior para la carga viral en la saliva del enfermo. Una hipótesis igualmente válida sería una carga diez veces superior, $10 M_{\text{vir}}/\text{cm}^3$ [G20], en cuyo caso la probabilidad de contagio durante una conversación de dos horas con un individuo asintomático sería del 4% para un participante en particular, y del 18% para alguno de los participantes.

Las partículas responsables de este modo de transmisión son pequeñas, del orden de $1 \mu\text{m}$ o incluso menores. Su distribución es ambiental, controlada por el movimiento del aire en vez de por la proximidad del enfermo, y no está ligadas a una posición particular. Las mascarillas quirúrgicas o higiénicas no filtran estas partículas. Quitando las precauciones elementales de no participar en reuniones con personas infectadas, y de evitar en lo posible los espacios cerrados y las corrientes de climatización, tanto en su utilización como en su diseño, el único mecanismo de control apropiado son las mascarillas de alto filtrado (N95 o similares).

Factores ambientales

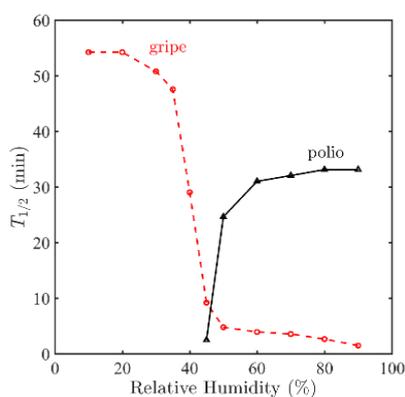


Figura 2: Vida media de los viriones en aerosol como función de la humedad relativa, para dos virus de características distintas. Adaptado de [H60].

Es interesante observar la gran diferencia entre la duración de la infectividad de los aerosoles en las dos primeras columnas de la tabla 1. Una humedad alta disminuye la vida media por un factor de más de diez en virus encapsulados, como el SARS-CoV-2, mientras que el efecto sobre los virus desnudos, como la poliomielitis, es el opuesto [H60]. La transición es relativamente abrupta alrededor de $HR \approx 40\%$ (figura 2), y se ha propuesto como explicación para la estacionalidad de algunas enfermedades [L43,H60]. La gripe es una enfermedad de invierno, cuando la humedad dentro de las casas es baja debido a la calefacción (en el norte de los EEUU y en Europa), mientras que la poliomielitis era una enfermedad de verano en las

mismas áreas. En las circunstancias actuales, cabe preguntarse si el mismo efecto podría explicar parte de la diferencia de severidad de la pandemia en distintas localidades. Por ejemplo, si hubiéramos usado la vida media en la segunda columna de la tabla 1 para la reunión de seis personas analizada en la sección anterior, la probabilidad de *algún* contagio habría caído al 20% en el caso de un participante sintomático (frente al 99% en un ambiente seco), y a un 0.1% en la conversación con un participante asintomático (frente al 2%).

Las razones para este comportamiento del virus no están claras, y la dependencia con la humedad y temperatura de la supervivencia sobre superficies contaminadas es más irregular, pero es interesante que un estudio detallado de la desecación de gotas de saliva demuestra que hay una transición alrededor de $HR = 40\%$, por debajo de la que las gotas menores de $20 \mu\text{m}$ se secan completamente, mientras que por encima retienen algo de agua [N05]. Desde el punto de vista epidemiológico o virológico, se pueden encontrar revisiones recientes del efecto de la humedad relativa sobre la infectividad del virus en [A20,Mo20].

Conclusiones

Hemos resumido brevemente alguno de los mecanismos más importantes de transmisión de virus respiratorios, basándonos en gran parte en resultados clásicos y bien contrastados de pandemias anteriores a la actual, aunque sin olvidar la investigación reciente. En consonancia con las recomendaciones sanitarias durante esta pandemia, hemos discutido los tres mecanismos principales de transmisión: directa por gotas, por contaminación de superficies, y por aerosoles, y hemos estimado su importancia relativa para la probabilidad de contagio. Los dos primeros son los más importantes en el contacto estrecho entre personas, pero son relativamente fáciles de controlar por medio de mascarillas sencillas. Sin embargo, la transmisión aérea por aerosoles no es despreciable, especialmente en espacios cerrados, y es más difícil de controlar al no estar asociada a la cercanía de un sujeto determinado, y al estar mediada por partículas que no se filtran más que con las mascarillas más tupidas. Por último, hemos revisado brevemente el efecto de la humedad relativa sobre la supervivencia del virus y su transmisión, incluyendo posibles mecanismos.

El autor quiere expresar su gratitud a F. Higuera Antón por su ayuda al interpretar la literatura sobre el comportamiento de las gotas.

Bibliografía

- [A20] Ahlawat, A, Wiedensohler, A, Mishra, S.K. (2020) An Overview on the role of relative humidity in airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments. *Aerosol. Air Qual. Res.*, 20: 1856-1861.
- [B20] Bourouiba, L. (2020) Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: potential implications for reducing transmission of COVID-19, *J. Am. Med. Assoc.*, 323: 1837-1838.
- [B14] Bourouiba, L, Dehandschoewercker, R, Bush, J.W.M. (2014) Violent expiratory events: on coughing and sneezing, *J. Fluid Mech.* 745: 537-563.
- [D46] Duguid, J.P. (1946) The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet nuclei. *Epidemiol. Infect.* 44: 471-479.
- [D20] van Doremalen, N, *et al.* (2020) Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *N. Eng. J. Med.* 382: 1564-1567.
- [G20] Guo, J., Xu, Y., Chen, X. (2020) Viral dynamics of SARS-Cov-2 in saliva from infected patients. *J. Inf.* 81: e48-e50.
- [H60] Hemmes, J.H, Winkler, K.C, Kool, S. M. Virus survival as a seasonal factor in Influenza and Poliomyelitis. *Nature*, 188: 430-431.
- [K80] Knight, V. (1980) Viruses as agents of airborne contagion, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 353:147-156
- [L43] Loosli, C, Lemon, H, Robertson, O, Appel, E. (1943) Experimental air-borne influenza infection. 1. Influence of humidity on survival of virus in air. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 53:205–206
- [L20] Lu, J. et al. (2020) COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant in Guangzhou, China, 2020. *Emerg. Infect. Dis.* 26:1628-1631. Doi: 10.3201/eid2607.200764.
- [M20] Mittal, R., Ni, R., Seo, J-H. (2020) The flow physics of COVID-19. *J. Fluid Mech.* 894: F2.
- [Mo20] Moriyama, M, Hugentobler, W. J, Iwasaki, A. (2020) Seasonality of respiratory viral infections. *Ann. Rev. Virol.*, 7: 2.1-19.
- [N82] Newman, S.P., Agnew, J.E., Pavia, D., Clarke, S.W. (1982) Inhaled aerosols: lung deposition and clinical applications, *Clin. Phys., Physiolo. Meas.* 3:1-20.

- [N05] Nicas, M, Nazaroff, W.W, Hubbard, A (2005) Towards understanding the risk of secondary airborne infection: Emission of respirable pathogens, *J. Occup. Envir. Hyg.* 2:3: 143-154.
- [P20] Park, S.Y. et al. (2020) Coronavirus disease outbreak in call center, South Korea. *Emerg. Infect. Dis.* 26:1666-1670. Doi: 10.3201/eid2608.201274.
- [S19] Soper, G.A. (1919) The lessons of the pandemic. *Science* 49: 501-506.
- [W34] Well, W.F. (1934) On airborne infection. Study II. Droplets and droplet nuclei. *Am. J. Epidemiol.*, 20: 611-618.

Las Ciencias de Datos en la lucha contra el SARS-CoV-2: la experiencia en la Comunidad Valenciana

Nuria Oliver* en colaboración con Xavier Barber¹, Francisco Escolano, Antonio Falcó, Juan Camilo Gómez, Joaquín Huerta, Miguel Angel Lozano, Marina Martínez-García, Alejandro Rabasa, Miguel Rebollo, Kristof Roomp, Emilio Sansano, Juan Carlos Trujillo

Grupo de Ciencias de Datos en la Lucha contra la COVID-19 de la Generalitat Valenciana

*ELLIS, The European Laboratory for Learning and Intelligent Systems

Alicante

Resumen. Las Ciencias de Datos son una herramienta de vital importancia tanto para apoyar la toma de decisiones públicas en los datos y la evidencia, así como para evaluar el impacto de las mismas. En este capítulo describimos, de manera resumida, la experiencia del Grupo de Ciencias de Datos en la lucha contra el COVID-19 dentro del Comisionado para Presidencia de la Generalitat Valenciana. Desde marzo hemos trabajado en cuatro áreas de impacto: (1) modelado de la movilidad humana agregada; (2) modelos epidemiológicos computacionales; (3) modelos predictivos; y (4) ciencia ciudadana. Nuestro equipo es un ejemplo de colaboración estrecha entre la comunidad científica, la ciudadanía y una administración pública para conseguir que las políticas públicas estén, efectivamente, basadas en la evidencia y el conocimiento experto.

1. Introducción

En este documento describimos, de manera resumida, el trabajo realizado por el Grupo de Trabajo de Ciencias de Datos en la Lucha contra el COVID-19, dentro del Comisionado para Presidencia de la Generalitat Valenciana sobre Estrategia de Inteligencia Artificial y Ciencias de Datos contra el COVID-19. El grupo de trabajo es un equipo multidisciplinar de una veintena de voluntarios, todos ellos miembros del sistema investigador de la Comunidad Valenciana, trabajando con la Dirección General de Análisis y Políticas Públicas de Presidencia. Forman parte del grupo expertos y expertas de la Universitat Jaume I, Universitat de València, Universitat Politècnica de València, Universitat Miguel Hernández, Universitat d'Alacant, Universidad CEU Cardenal Herrera, Fisabio y Microsoft, con la colaboración de ESRI España, Walhalla, el INE, la Secretaría de Estado de Sociedad Digital e Inteligencia Artificial y las tres empresas más importantes de telefonía móvil del país.

La configuración, manera de trabajar y resultados de este equipo de trabajo son singulares no solo a nivel nacional, sino también internacional, de manera que el equipo y su trabajo han recibido visibilidad tanto en medios nacionales [1,2,3] como internacionales [4,5].

Esperamos que la experiencia compartida en este capítulo sirva de inspiración a otros gobiernos, tanto nacionales como internacionales, para fomentar que la toma de decisiones públicas y la evaluación de estas estén basadas en la evidencia (captada por los datos) y en el conocimiento científico experto.

¹ Autores en orden alfabético.

El trabajo de este equipo está dividido en 4 áreas, descritas a continuación y representadas en la Figura 1: (1) modelado de la movilidad humana agregada; (2) modelos epidemiológicos computacionales; (3) modelos predictivos; y (4) ciencia ciudadana.

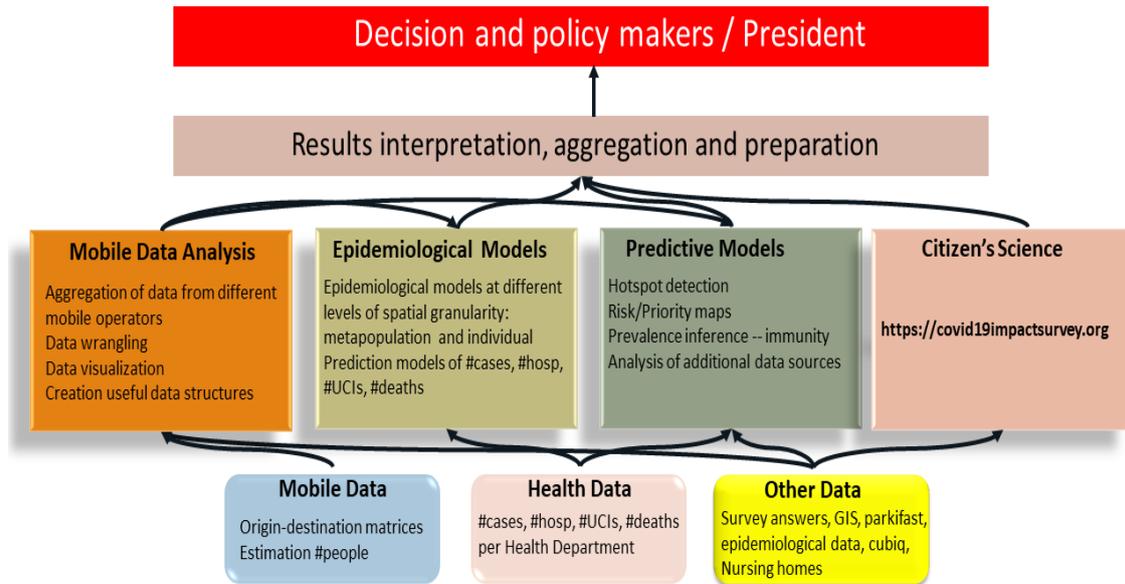


Figura 1. Áreas de trabajo del grupo de Ciencias de Datos contra el COVID-19

2. Análisis de la movilidad agregada

La primera área de trabajo está centrada en el análisis de la movilidad humana. La movilidad humana es clave para la propagación de enfermedades infecciosas. En la literatura, hay ejemplos de uso de la movilidad agregada y anonimizada a partir de la red de telefonía móvil para la lucha de enfermedades como el ébola [6], el zika [7] y la malaria [8].

Cuando una enfermedad infecciosa de transmisión de humano a humano se encuentra en una fase de transmisión comunitaria, la contención de la movilidad humana suele ser la intervención no farmacológica más comúnmente implementada para limitar la propagación de la enfermedad. En Europa, la inmensa mayoría de países limitaron la movilidad de su población, en mayor o menor grado, durante las semanas álgidas de la pandemia de COVID-19 (desde mediados de marzo hasta mayo).

En España, se declaró el estado de alarma el 14 de marzo de 2020 para poder implementar dichas medidas de contención de la movilidad que comenzaron el 16 de marzo y finalizaron cuando se regresó a la “nueva normalidad” el 21 de junio de 2020.

Nuestro trabajo de análisis de la movilidad en el contexto de la pandemia de COVID-19 constituye un piloto pionero en la Comunidad Valenciana, tal y como fue anunciado por la vicepresidenta Nadia Calviño el 23 de marzo.

Pudimos analizar datos agregados y anonimizados extraídos a partir de la red de telefonía móvil y compartidos por el Instituto Nacional de Estadística (INE), gracias a un acuerdo de colaboración entre el INE y las tres operadoras móviles más grandes en España (Telefónica, Vodafone y Orange), correspondientes al periodo desde el 16 de marzo 2020 hasta el 30 de junio

de 2020 [9]. El proyecto cumple las condiciones de anonimización del Reglamento General de Protección de Datos, tal y como describe el INE [10].

Los principales objetivos del análisis de la movilidad incluyen:

- (a) monitorizar el impacto de las medidas de contención en la movilidad real de la ciudadanía;
- (b) identificar áreas donde las medidas han tenido mayor o menor impacto y seguimiento de su comportamiento a lo largo del tiempo;
- (c) cuantificar el éxito de la campaña #quedateencasa;
- (d) modelar el impacto que la movilidad reducida ha tenido en la progresión del coronavirus;
- (e) identificar comunidades basadas en la movilidad de la población para poder predecir mejor la propagación del coronavirus y determinar la utilidad de posibles confinamientos selectivos, si se produjesen nuevos brotes post-confinamiento.

A partir de los datos del INE, cuantificamos la movilidad real de la ciudadanía desde el comienzo de la epidemia con granularidad diaria, comparándolos con datos de referencia que fueron proporcionados también por el INE para un día "normal" o *baseline* antes de que comenzara la pandemia (noviembre 2019).

Los datos recibidos corresponden a celdas o áreas definidas por el INE con un mínimo de 5.000 personas para garantizar la privacidad y agregados de manera diaria.

Desarrollamos algoritmos de agregación de los datos a nivel de código postal, municipio, departamento y zona de salud y provincia ya que éstas son las escalas geográficas relevantes para la toma de decisiones públicas. A partir de los datos recibidos, construimos varios indicadores de movilidad para cada día y para cada escala geográfica, incluyendo el porcentaje de personas que permanecen en su área de residencia y la diferencia con respecto al día de referencia en noviembre, cuántas personas entran/salen en cada nivel geográfico tanto en términos absolutos como diferencias con respecto al día de referencia en noviembre y los flujos poblacionales entre zonas geográficas.

El análisis de dichos flujos nos permitió evaluar el cumplimiento de las medidas de contención de movilidad, conocer el volumen de población que estaba activa y desplazándose en un área de estudio e incluso prevenir la dispersión de un posible brote de una epidemia como la COVID-19.

2.1. Cumplimiento de la campaña “Quédate en casa”

Calculamos, para cada día, el porcentaje de personas que no salieron durante más de 2 horas de su área de residencia, definida como el área geográfica donde pernoctan. La superficie de dicha área depende de la densidad de población, dado que tiene que cumplirse la condición de que haya, como mínimo, 5.000 habitantes en cada una de las áreas para preservar la privacidad. Los municipios muy pequeños se agrupan en un área hasta sumar 5.000. Los municipios de entre 5.000 y 70.000 forman un área. Por contra, los municipios grandes (de más de 70.000 habitantes) se dividen en varias áreas de al menos 5.000 habitantes cada una. En el periodo entre el 16 de marzo y el 27 de abril, en media, un 88% (días laborales) y un 92% (fines de semana y festivos) de la población de la Comunidad Valenciana permaneció en su área de residencia, lo que ilustra un alto cumplimiento de las medidas de confinamiento.

2.2. Movilidad laboral

También analizamos los niveles de movilidad laboral en comparación a un día laborable pre-COVID-19 en noviembre. En promedio, en el periodo del 16 de marzo al 27 de abril, observamos una reducción en un 59% del número de personas que pasaron al menos 2 horas fuera de su área de residencia en horario laboral.

La Figura 2 muestra una visualización de los datos y análisis de movilidad realizados, cuyo resumen puede encontrarse en dos informes publicados por la Generalitat Valenciana en abril [11] y mayo [12] de 2020.



Figura 2. Visualizador de los datos de movilidad (<http://t.ly/9riC>).

1.3. Comunidades de movilidad

Además del análisis del flujo de movimientos en sí, los datos de movilidad son la entrada a un módulo de análisis de grafos. Los grafos son estructuras presentes en numerosos fenómenos tanto naturales como artificiales y se han usado para modelar, por ejemplo, flujos migratorios o el tráfico aéreo. Empleamos los flujos para identificar patrones en la movilidad de las personas. De esta manera, podemos detectar qué áreas están interrelacionadas, independientemente de los límites administrativos que dividen el territorio. Para ello, llevamos a cabo la detección automática de las comunidades que emergen de los flujos utilizando el algoritmo propuesto por Newman [13].

Una comunidad está formada por zonas geográficas entre las que hay una densidad alta de movimientos mutuos entre ellas, y pocos movimientos con el resto. Del análisis de comunidades a partir de los datos de movilidad descritos anteriormente y su evolución durante el confinamiento, obtuvimos las siguientes conclusiones:

--Identificamos una estructura clara de comunidades bastante estable, que no coincide exactamente con los límites administrativos. Existe una relación muy estrecha entre poblaciones del norte de Castellón con el sur de Tarragona, así como de las poblaciones limítrofes entre

Murcia y Alicante. Lo mismo ocurre entre provincias. Por ese motivo, es necesaria la coordinación de políticas de contención entre las CC AA.

--El número de comunidades fue aumentando a medida que se ampliaban las restricciones de movilidad, pasando de 27 comunidades en la semana de referencia de noviembre a entre 50 y 60 durante el confinamiento (ver Figura 3, derecha). Después, observamos una disminución paulatina del número de comunidades, con picos en los días festivos comparables al periodo de máximo confinamiento. Durante todo el periodo, el número de comunidades aumentó al menos el 50% respecto a la semana de referencia. Tener muchas comunidades pequeñas y separadas ayudó a contener la propagación del SARS-CoV-2. Esta misma reducción de tamaño se observaba también durante los festivos y fines de semana.

--La división en comunidades es coherente con la división de zonas de salud de la CV, por lo que tomar decisiones basadas en las zonas de salud puede resultar eficaz en el control de la infección.

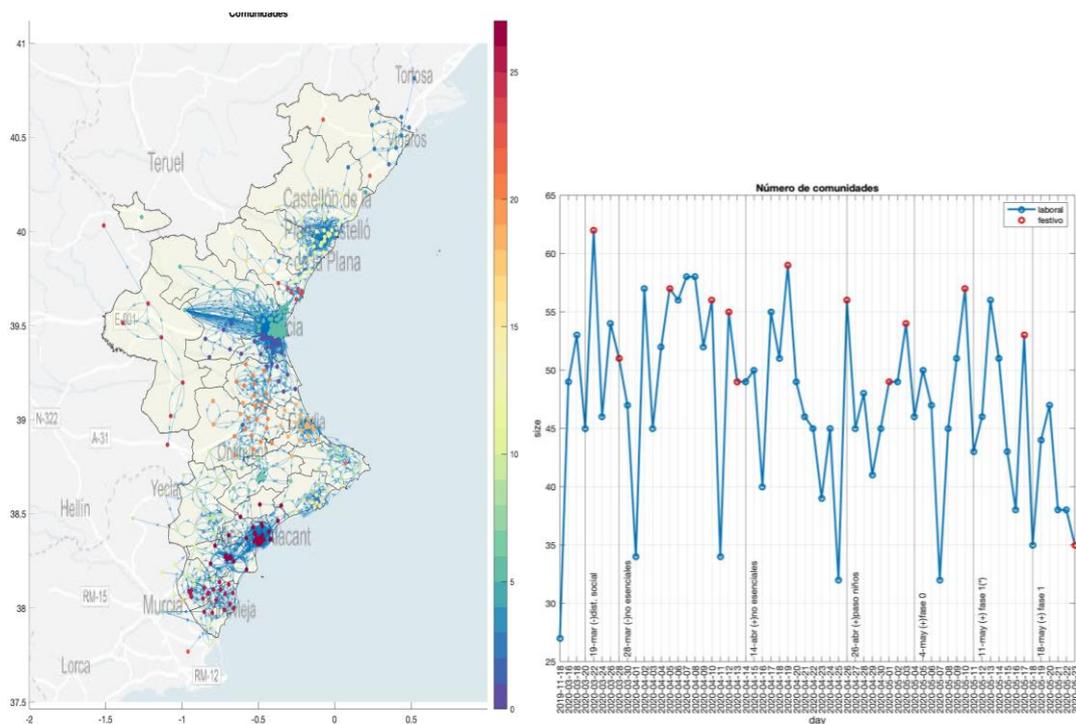


Figura 3. División en comunidades (izda.) y evolución de su tamaño a lo largo del tiempo (dcha.)

Este análisis de comunidades en base a los flujos de movilidad es importante para apoyar la toma de decisiones relativas a confinamientos selectivos de ciertas zonas geográficas, en función de su situación epidemiológica. Cuanto más autocontenida sea la movilidad de una zona geográfica, menor será el impacto epidemiológico de un confinamiento de dicha zona ya que la mayor parte de su movilidad es interna, no con origen/destino en otras zonas geográficas.

3. Modelos epidemiológicos computacionales

En esta área de trabajo desarrollamos dos tipos de modelos epidemiológicos computacionales: modelos meta-poblacionales tipo SEIR y modelos individuales de agentes. Los modelos epidemiológicos nos permiten tanto hacer predicciones sobre la evolución de la pandemia bajo

las condiciones actuales, como hacer predicciones sobre su posible evolución bajo distintos escenarios de movilidad, contacto social, inmunidad pre-existente o trazado de contactos.

3.1. Modelo meta-poblacional tipo SEIR

El modelo meta-poblacional que desarrollamos parte de un modelo SEIR clásico [14] caracterizado por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\begin{aligned}\dot{S}(t) &= -\beta S I, \\ \dot{E}(t) &= \beta S I - \sigma E, \\ \dot{I}(t) &= \sigma E - \gamma I, \\ \dot{R}(t) &= \gamma I\end{aligned}$$

S representa el número de individuos susceptibles de contraer la enfermedad, E el número de individuos de la población expuestos a contraer la enfermedad, I denota el número de individuos infectados y que pueden transmitir la enfermedad, y por último R representa la cantidad de individuos que son retirados del sistema, tanto los fallecidos como los que superan la enfermedad y que suponemos inmunizados, al menos de manera temporal. Esta hipótesis permite afirmar que la suma total de individuos permanece constante a lo largo del tiempo. Los parámetros del modelo representan las tasas de transferencia de individuos entre las distintas sub-poblaciones en las que se ha dividido la población, de manera que podemos determinar cuántos individuos conforman cada una de las clases en cualquier instante del tiempo. Estas cantidades dependen de las condiciones iniciales y de las tasas de transferencia entre clases. Para SARS-CoV-2, los parámetros del modelo SEIR son $\sigma = 1/5.1$, $\gamma = 1/12$ y $\beta = R_0\gamma$. En nuestro trabajo, estimamos la tasa de reproducción R_0 en cada una de las diferentes fases de evolución de la pandemia.

Este modelo determinista introducido por Joan L. Aron y Ira B. Schwartz [14] en 1984 se presenta como paradigma científico del comportamiento dinámico de los diferentes grupos en los que dividimos la población. Desarrollamos una extensión estocástica de este modelo determinista con el objetivo de introducir la incertidumbre en el modelo original. El modelo estocástico resultante se expresa de la forma siguiente. Denotaremos por N la cantidad de individuos de la población que deseamos estudiar, cantidad que asumimos conocida *a priori*. Ahora S, E, I y R representan la fracción de la población que conforman en un instante de tiempo dado cada una de las sub-poblaciones que conforman el modelo. Las ecuaciones quedan dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}S_t &= \frac{X_t}{N} \\ E_t &= S_{t-1} - \frac{X_t}{N} + \frac{Y_t}{N} \\ I_t &= E_{t-1} - \frac{Y_t}{N} + \frac{Z_t}{N} \\ R_t &= R_{t-1} + I_{t-1} - \frac{Z_t}{N}.\end{aligned}$$

siendo X, Y y Z distribuciones binomiales de las características:

$$X_t \sim \mathcal{B}(NS_{t-1}, e^{-\beta I_{t-1}}), Y_t \sim \mathcal{B}(NE_{t-1}, e^{-\sigma}), Z_t \sim \mathcal{B}(NI_{t-1}, e^{-\gamma}).$$

X representa la cantidad de individuos susceptibles que permanecen como tales entre dos instantes de tiempo consecutivos, Y la cantidad de individuos expuestos que permanecen y, finalmente, Z mide los infecciosos que conservan su estado. En este caso los parámetros están asociados a las probabilidades de conservar el estado al que se pertenece entre dos instantes de tiempo consecutivos. Para introducir la movilidad entre una población dividida en n-diferentes regiones, debemos tener en cuenta la siguiente ley de conservación:

$$S_t + E_t + I_t + R_t = S_0 + E_0 + I_0 + R_0 = 1$$

Esto nos lleva a descomponer cada una de las subpoblaciones en función de la región a la que pertenecen:

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_t^{(i)}, E_t = \sum_{i=1}^n E_t^{(i)}, I_t = \sum_{i=1}^n I_t^{(i)} \text{ y } R_t = \sum_{i=1}^n R_t^{(i)}.$$

El superíndice indica la región a la que la subpoblación está asignada. Descomponemos entonces las distribuciones binomiales del modelo SEIR estocástico empleando este mismo criterio del modo siguiente:

$$X_t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_t^{(i \rightarrow j)}, Y_t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_t^{(i \rightarrow j)} \text{ y } Z_t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Z_t^{(i \rightarrow j)}$$

en este caso el superíndice (i -> j) indica la cantidad de individuos de la subpoblación correspondiente que estando en la región i se desplazan a la región j. Con esta formulación lo que obtenemos es que el modelo SEIR global se puede calcular como superposición de los subsistemas de tipo SEIR que lo componen.

En la Figura 4 se muestra la estimación que hace el modelo SEIR comparada con los datos reales de casos reportados en la Comunidad Valenciana. Hay que remarcar que un elevado porcentaje de los casos COVID-19 son asintomáticos o presentan una sintomatología leve. Esto produce que, especialmente en la etapa inicial de la pandemia en la que la disponibilidad de tests era limitada, exista un gran número de casos no reportados. El modelo nos permite realizar una estimación del número subyacente de casos totales, y compararlo con el número de casos reportados, observando cómo la tasa de casos reportados ha aumentado progresivamente desde alrededor de un 10% al comienzo de la pandemia hasta casi la totalidad de casos en el mes de julio (ver Figura 4, derecha).

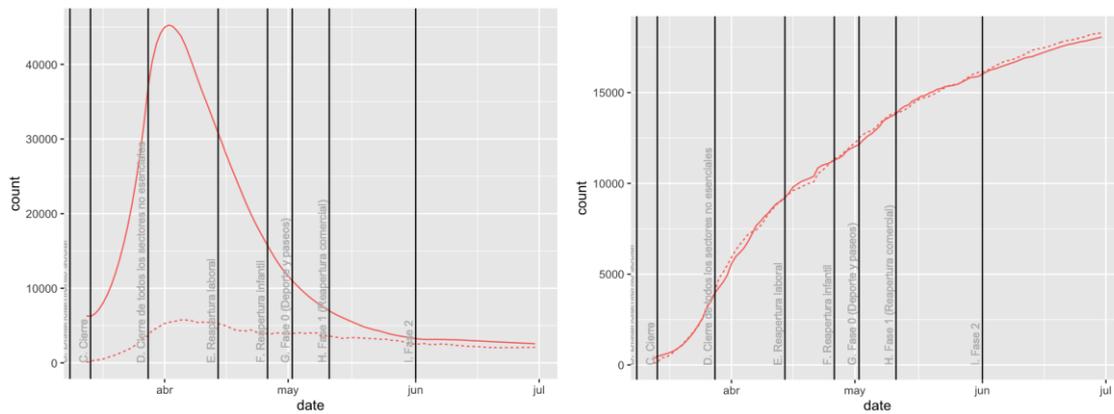


Figura 4. Predicciones del modelo SEIR (línea sólida) y datos reales observados (línea discontinua) en la Comunidad Valenciana. Izquierda: Comparativa entre los casos activos subyacentes que predice el modelo, con los casos activos reportados. Derecha: Casos totales acumulados estimados por el modelo que habrían sido reportados, y casos totales acumulados reportados en las series de datos reales.

3.2. Correlación entre la movilidad y la tasa de reproducción

El modelo SEIR global incorpora la movilidad entre regiones como elemento dispersor de la enfermedad. No obstante, y de manera similar al estudio de grafos en la sección 2.3, diseñamos un *proxy de la tasa de reproducción* basado únicamente en el análisis temporal de las cadenas de Markov asociadas a los grafos de movilidad diarios. Dichas cadenas contienen la estructura de los movimientos potenciales de las sub-poblaciones. Cuanto mayor movimiento potencial existe, mayor es el rango de la media temporal de cadenas de Markov a lo largo de distintos instantes del mismo día. Sin embargo, dicho rango se relaciona con la *entropía de bypass* de la descomposición singular, llamada *embedding del grafo* o distribución de caminos aleatorios [15]. Por eso usamos esa entropía para cuantificar los grados de libertad que tiene la propagación de la enfermedad. En la Figura 5 observamos que antes del cierre de colegios, la entropía es alta y precisamente es el confinamiento lo que consigue reducirla justo hasta la reapertura laboral (hito E), a partir de la cual vuelve a crecer hasta volver a moderarse durante la apertura laboral (H) en Fase 1. La correlación con la tasa de reproducción es significativa durante el confinamiento ya que ambas cantidades se ven influenciadas por este. Tras la apertura, la entropía es más un indicador de riesgo o un índice de anticipación.

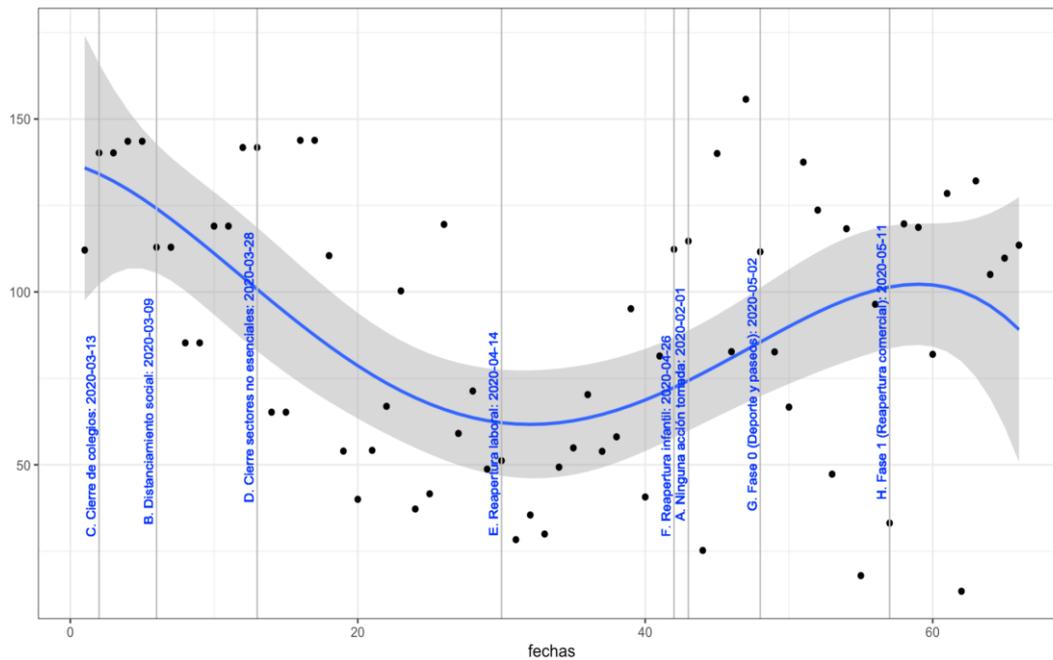


Figura 5. Evolución de la entropía de movilidad a lo largo del tiempo.

3.2. Modelo individual de agentes y el impacto del trazado de contactos

Una de las medidas más efectivas para reducir la tasa de contagio es el trazado de contactos. La técnica se basa en una temprana detección del mayor número posible de casos positivos con el objetivo de que se aíslan y así cortar la cadena de transmisión. Los casos detectados se aíslan a la vez que se procede a la identificación de aquellas personas que hayan podido estar en contacto cercano con ellos. Idealmente, los contactos cercanos detectados con riesgo de haber sido infectados deben realizar las pruebas necesarias para determinar si han sido contagiados, así como aislarse hasta conocer los resultados de las pruebas. Si en algún caso el resultado de esta prueba es positivo, el procedimiento se repite para este individuo, es decir, se le pide que se aíslan hasta que negativice y se identifica a sus contactos más cercanos para intentar romper la cadena de transmisión lo antes posible.

En nuestro estudio, modelamos la interacción entre la capacidad existente para realizar un trazado de contactos efectivo y la curva epidemiológica resultante en función de dicha capacidad, con el objetivo de estimar diferentes escenarios en la evolución de la pandemia. Para ello, simulamos una serie de escenarios que contemplan distintos contextos en cuanto a la eficacia del trazado de contactos a partir de mediados del mes de mayo, cuando las medidas de confinamiento empezaron a decaer dando paso a una desescalada gradual.

Los datos utilizados para las simulaciones han sido proporcionados por la Generalitat Valenciana. Las estimaciones se han realizado utilizando como base el modelo REINA [16], adaptado a las características de la Comunidad Valenciana. Es un modelo epidemiológico individual, basado en agentes, que modela la dinámica de la población a través de interacciones sociales entre los individuos. Una de las características distintivas de este tipo de modelos es que los agentes no son entidades homogéneas, sino que son creados con una serie de características que representan el comportamiento de una determinada población humana. De esta manera, la simulación se desarrolla mediante una serie de reglas e interacciones entre los agentes que intentan reflejar las

características de la población objeto de estudio. Así, la propagación de la epidemia no será igual para todos los agentes, sino que dependerá de sus características particulares y de sus interacciones con otros agentes. Por ejemplo, un agente de edad avanzada que resulte contagiado tendrá una probabilidad mayor de necesitar servicios médicos que un agente más joven. Por lo general, los modelos basados en agentes requieren de una cantidad considerable de información demográfica, sociológica y de otras fuentes para poder desarrollar las interacciones de manera cercana a la realidad. Asimismo, suelen ser costosos computacionalmente ya que requieren llevar a cabo simulaciones del comportamiento individual de millones de agentes (en nuestro caso, 4.975 millones de habitantes de la Comunidad Valenciana).

Los distintos escenarios contemplados van desde la inexistencia de trazado de contactos hasta un trazado del 100%, lo que implicaría que se detecta a todos los contactos de cada caso positivo, y que se consigue aislar a estos completamente durante dos semanas. Como era esperable, (ver Figura 5) este último escenario, aunque imposible de llevar a cabo en la realidad, conlleva una rápida reducción en el número de casos detectados. Los resultados de la simulación muestran que una eficacia del 40% en el trazado de contactos reduce considerablemente el número de casos y consecuentemente el número de hospitalizaciones y fallecimientos.

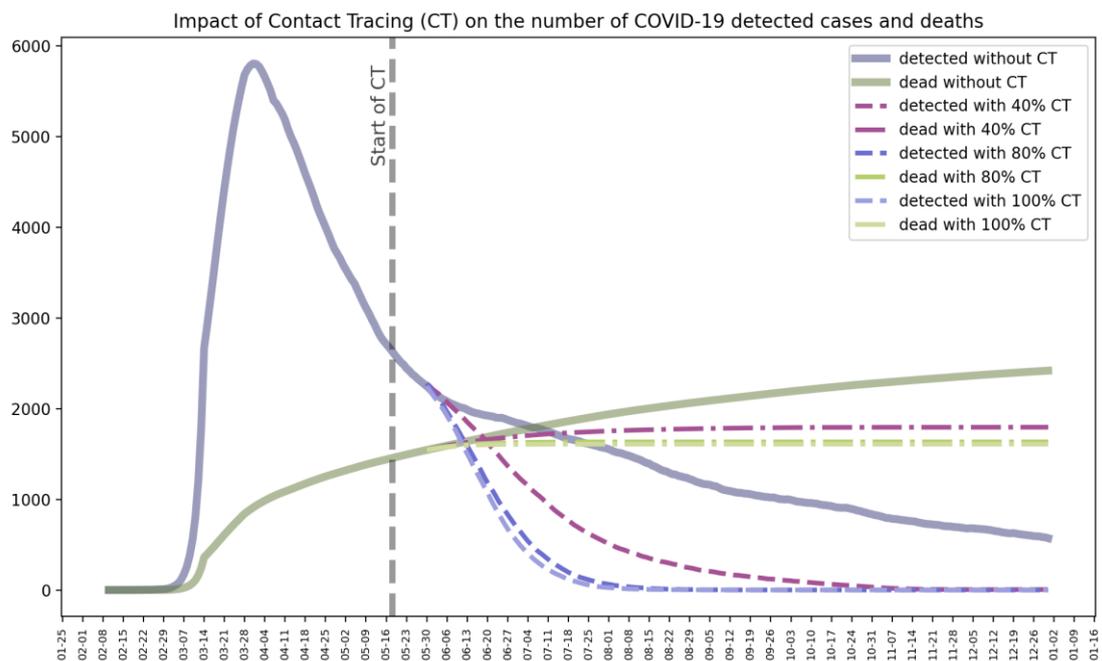


Figura 6. Predicciones del modelo de agentes en función de distintos escenarios de trazado de contactos. La línea sólida representa el número de casos detectados (azul) y de fallecimientos (verde) en caso de no implementar ningún tipo de trazado de contactos. Las líneas diferentes discontinuas representan los diferentes escenarios de trazado de contactos simulados (40%, 80% y 100%)

Hay que tener en cuenta que estas simulaciones se realizaron a mediados de mayo de 2020, y están basadas en las condiciones de aislamiento vigentes en ese momento en la Comunidad Valenciana. En todos los escenarios simulados, estas condiciones de aislamiento social y de

restricción de la movilidad se mantienen constantes hasta el final de la simulación (31/12/2020), siendo la eficacia del trazado de contactos el único parámetro variable.

4. Modelos predictivos

4.1. Modelo predictivo por departamento de salud del número de casos positivos

En esta área de trabajo, desarrollamos modelos predictivos para estimar diariamente en cada uno de los 24 departamentos de salud de la Comunidad Valenciana, el número de casos, de hospitalizados, de casos activos, de personas ingresadas en cuidados intensivos y de fallecidos con un horizonte temporal de 5 días.

Para hacer las predicciones de los infectados, utilizamos un modelo de suavizado basado en un método de regresión no paramétrica ajustado al vecindario en una ventana temporal de 5 días de manera que podemos detectar tendencias y ciclos. Los modelos predictivos a corto plazo son de tipo ARIMA, con distintas estructuras para cada departamento de salud y modelos GAM utilizando como predictores las observaciones históricas de cada departamento de salud.

Aplicamos de manera diaria estos modelos a las series temporales de número de casos, hospitalizados tanto en camas hospitalarias como de cuidados intensivos, y fallecidos con los siguientes resultados.

La Figura 7 ilustra las predicciones para cuatro departamentos de salud de la Comunidad Valenciana a fecha del 20 de mayo del 2020. La línea sólida negra representa el número de casos detectados, los puntos azules corresponden a los datos suavizados al pasado, los puntos en rojo son las predicciones del método. Las líneas en vertical indican las distintas fases de la desescalada: línea roja, fecha del inicio del estado de alarma (16/03/2020); línea verde, 10 días después del estado de alarma (26/03/2020); línea azul, día del levantamiento parcial del confinamiento (13/04/2020); línea morada indica el comienzo de la desescalada.

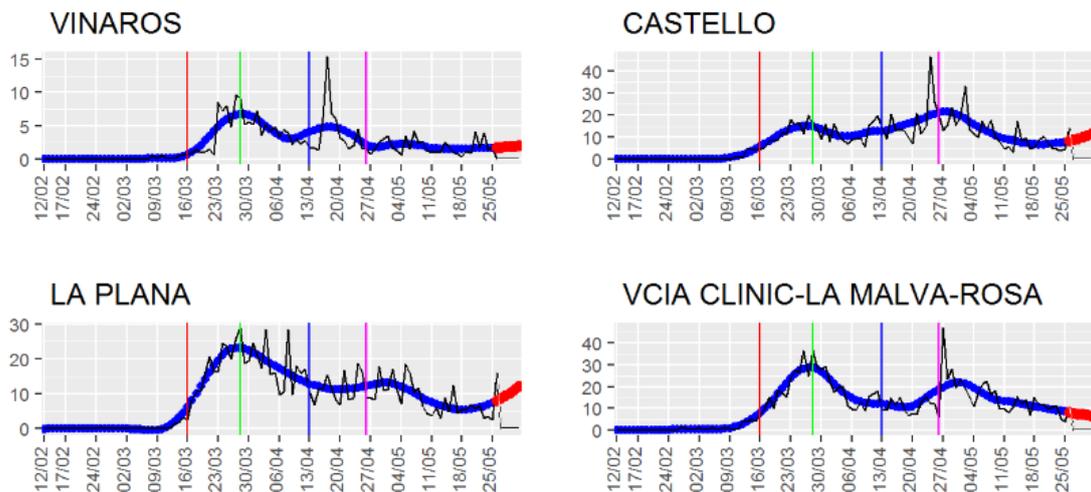


Figura 7. Predicciones del modelo de casos positivos por departamento de salud (ejemplo ilustrativo para 4 departamentos de salud).

El *performance* de este modelo varía mucho por departamento de salud. El objetivo es modelar la tendencia en el número de casos y de hospitalizados de los departamentos para identificar

aquellos departamentos de salud con tendencia creciente positiva que pueda conducir a una saturación de los centros de salud y/o hospitales. Para los casos ilustrados en la Figura 7, los errores cuadráticos medios fueron de 9.9, 25.3, 32.2 y 16.7, respectivamente,

4.2. Modelo de predicción del porcentaje de ocupación de UCIs a 7 días por departamento de salud

Desde mediados de marzo, conforme crecía exponencialmente el número de casos reportados y hospitalizados con enfermos de coronavirus, los hospitales presentaban un porcentaje de ocupación muy alto, llegando algunos a estar totalmente colapsados, teniendo que habilitar camas adicionales para atender la alta demanda. Por ello, dentro de la tarea dedicada a la elaboración de modelos predictivos, abordamos el problema de predicción de la ocupación de las camas de cuidados intensivos (UCIs) en cada departamento de salud.

Para intentar prever futuras saturaciones de las UCIs, desarrollamos un modelo basado en series temporales para predecir, con 7 días de antelación, el porcentaje de ocupación de las camas UCI por departamento de salud. La información usada para realizar la predicción, además del histórico de ocupación de las UCI, fue el número de casos positivos y hospitalizaciones por SARS-CoV-2 en cada departamento de salud. Utilizamos un modelo lineal dinámico bayesiano, implementado en el lenguaje Python usando la librería pyDLM.

Para validar el modelo, realizamos la predicción de ocupación de las UCIs de cada departamento de salud, para los últimos 14 días (los días más recientes en el tiempo) de la serie temporal del porcentaje de ocupación. La métrica de evaluación usada es la media del error absoluto (*Mean Absolute Error, MAE*), que calculamos para los 14 días predichos. El MAE medio por departamento es de 7,95 con una desviación estándar de 5,3.

En la Figura 8 se muestra, por departamento de salud, la predicción basada en los últimos 14 días. La línea azul es el porcentaje de ocupación real de las UCI, la línea naranja corresponde con la predicción, el sombreado violeta al intervalo de confianza de la predicción (95%) y la línea vertical punteada negra indica el primer día en el que se realiza la predicción. La predicción corresponde a 7 días vista.

El *performance* de los modelos varía por departamento de salud. La heterogeneidad de la serie a predecir hace que la predicción del modelo, en algunos casos, difiere del valor real. Conviene matizar que la predicción se realiza con los datos disponibles de las series temporales de ocupación, positivos confirmados por PCR y hospitalizaciones. Esto quiere decir que no están incluidos otros factores relevantes como pueden ser cambios en los criterios médicos a la hora de realizar PCRs o de hospitalizar a pacientes. Como trabajos inmediatos futuros, estamos trabajando en la incorporación de información adicional como variables regresoras para el modelo, así como la realización de un modelo específico para cada departamento de salud, personalizando en cada caso su arquitectura.

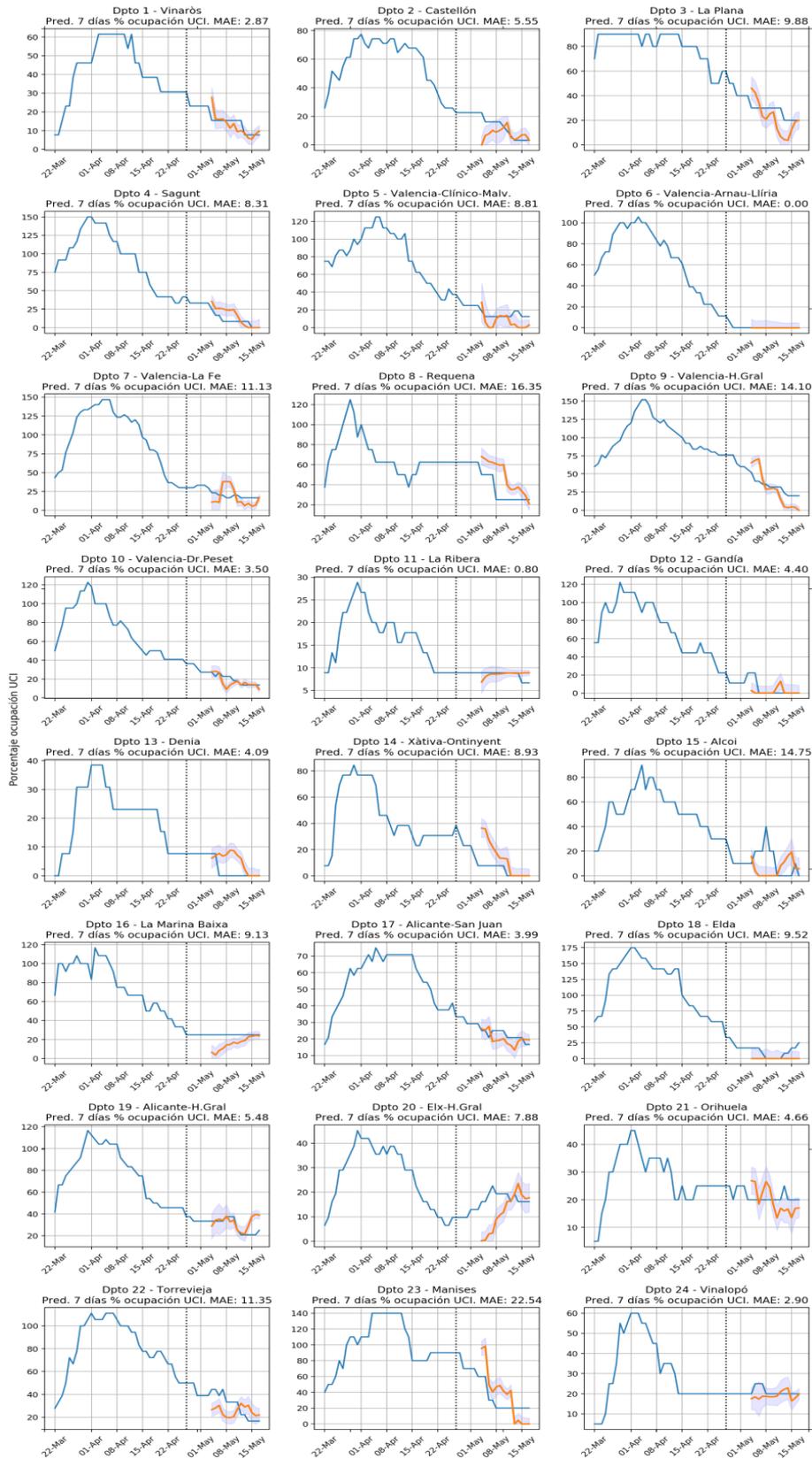


Figura 8. Predicción del porcentaje de ocupación de las camas UCI por departamento de salud.

5. Ciencia ciudadana

Ante el crecimiento exponencial en el número de casos confirmados de SARS-CoV-2 en España en el mes de marzo, poder hacer una rápida evaluación de la situación y percepción de la ciudadanía durante la pandemia es de vital importancia en el contexto del diseño, priorización y toma de decisiones de políticas públicas. Por ello, en marzo diseñamos y lanzamos una gran encuesta ciudadana *online* llamada *Covid19impactsurvey* [17], que, con más de 280.000 respuestas en España y aproximadamente 50.000 del resto de países del mundo, se ha convertido en la mayor encuesta ciudadana sobre COVID-19 en nuestro país.

La encuesta es anónima y está estructurada en 25 preguntas que incluyen información demográfica sobre los participantes (país, edad, sexo, código postal), su situación en el hogar (tipo de hogar, número de co-habitantes en el hogar y sus edades), su comportamiento social (medidas de protección individual, percepción de seguridad de distintas actividades, número estimado de contactos cercanos, si han tenido contacto cercano con alguien infectado con coronavirus, etc...), su percepción sobre las medidas adoptadas para paliar la pandemia, su situación laboral y económica, el impacto emocional que la pandemia está teniendo en sus vidas y su estado de salud.

En nuestra experiencia, dicha encuesta es una valiosa herramienta para arrojar luz sobre temas de vital importancia para los que no existen datos captados de manera sistemática. Dado el éxito y el valor del análisis de las respuestas de los primeros días tras el lanzamiento de la misma (del 28 de marzo al 4 de abril), decidimos mantener la encuesta online y analizar los datos en oleadas semanales. Las preguntas, metodología de análisis y principales conclusiones del análisis de las respuestas de la primera oleada están descritos en un artículo científico publicado en JMIR [18].

En este apartado resumimos, brevemente, los resultados más destacados.

En primer lugar, encontramos que los contactos cercanos jugaron en marzo e incluso juegan hoy un papel fundamental en la transmisión de coronavirus. Entre los encuestados que reportaron en la primera oleada haber dado positivo en el test de SARS-CoV-2, un 81% también reportó haber tenido contacto cercano con una persona infectada por coronavirus a la que conocían. Es decir, la fuente probable de infección era conocida en la inmensa mayoría de casos. Este porcentaje es tan elevado probablemente porque a finales de marzo y principios de abril nos encontrábamos en una situación de confinamiento. Desde la suspensión del estado de alarma y la instauración de la “nueva normalidad”, dicho porcentaje ha disminuido a un 65%. Sin embargo, sigue siendo un porcentaje elevado. Los miembros del hogar son el contacto cercano más frecuentemente citado, seguidos de familiares y amigos y compañeros/as de trabajo.

En segundo lugar, identificamos diferencias estadísticamente significativas de género en el impacto de la pandemia que sitúan a las mujeres en una situación de mayor vulnerabilidad o exposición en comparación a los hombres. Asimismo, las mujeres reportan los mayores niveles de ansiedad, estrés, tristeza y soledad en comparación a los hombres en su misma franja de edad.

En tercer lugar, la edad también es un factor importante. Identificamos diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento de contacto social entre los participantes mayores de 60 años y los participantes de menor edad. Las personas mayores tenían casi el doble de probabilidad de reportar quedarse en casa sin salir que los participantes más jóvenes. También identificamos diferencias de edad con respecto a las actitudes hacia las medidas de confinamiento, siendo los jóvenes los que mostraron tanto mayor apoyo a la adopción de medidas

más estrictas para paliar la pandemia como, al mismo tiempo, menor capacidad de permanecer el confinamiento (4.9% vs 0.8%).

En general, los participantes demandaban más medidas cuando lanzamos la encuesta, ya que un 50.4% de los encuestados reportaron apoyar la adopción de medidas adicionales. Este porcentaje disminuyó en semanas posteriores y se mantuvo estable alrededor de un 40% hasta la suspensión del estado de alarma y el regreso a la “nueva normalidad”. A partir de ese día y de manera monótonica, el porcentaje de encuestados que demanda más medidas ha aumentado hasta situarse en un 68% en la semana del 17 al 24 de septiembre.

La mayoría (76.5%) de los participantes en la primera oleada de la encuesta reportaron poder mantenerse confinados durante un mes o más. Dicho porcentaje ha ido disminuyendo a lo largo de las semanas hasta estabilizarse alrededor de un 61% durante los meses estivales. Aquellos que reportan no poder aguantar más eran una pequeñísima minoría en la primera oleada (1.5%) y ahora representan más de un 19% de los encuestados.

El impacto económico de la pandemia, incluso a finales de marzo, ya era evidente. Entre los encuestados que reportaron trabajar en empresas pequeñas (1-9 empleados), un 19.4% afirmaron estar en peligro de bancarrota y más de un 47% reportaron haber sido impactados económicamente por la pandemia. Los sectores más impactados según la encuesta son la hostelería, la construcción, el servicio doméstico y el comercio. Este impacto ha ido aumentando con las semanas, especialmente la pérdida de ahorros, reportada por un 9% en la primera oleada y por un 18% en el periodo del 17 al 24 de septiembre.

El impacto psicológico también es evidente, particularmente entre las mujeres jóvenes (18-29 años), que reportan los mayores niveles de estrés (50%), ansiedad (46%) y uso abusivo de la tecnología (57%). Los hombres jóvenes (18-29 años) reportan los niveles más elevados de discusiones en el hogar (25%), abuso de alcohol (9%) y drogas (6%), tristeza (29%) y de soledad (17%), superiores a los reportados por las personas mayores de 60 años. Destacan también los elevados niveles de uso abusivo de la tecnología (72%) por parte de los niños en las familias con hijos.

Con respecto a las medidas de protección individual, observamos un uso generalizado de mascarillas (90%) y de desinfección de manos (90%). La medida menos adoptada, sobre todo por los jóvenes, es la ventilación de lugares cerrados (46%). Las medidas de distanciamiento físico (evitar dar abrazos y besos, y estrechar las manos; mantener distanciamiento físico; limitar los contactos cercanos) son adoptadas por un 74% de los encuestados siendo solo un 59% de los encuestados jóvenes (18-29 años) los que reportan adoptar estas medidas.

El deporte individual (77%), las compras en pequeños comercios (69%) y la asistencia a lugares con cita previa como peluquerías (59%) son las actividades que los participantes consideran más seguras con respecto a la probabilidad que conllevan de contraer coronavirus. Las consideradas menos seguras son viajar en avión (13%), asistir a servicios religiosos (15%), usar transporte público (24%), tener invitados en casa (24%) y tomar consumiciones en la terraza de un bar (26%). Un 29% de los encuestados considera que es posible asistir colegios e institutos con bajo riesgo de contagio de coronavirus. Este porcentaje, aunque bajo, ha aumentado de manera monótonica desde la primera semana de mayo, cuando sólo un 8% de los participantes en la encuesta consideraban que podría realizarse con bajo riesgo de contagio.

Un aspecto preocupante es el elevado porcentaje de participantes (54%) que reporta no poder hacer una cuarentena efectiva si fuese necesario. Observamos diferencias muy significativas de edad: mientras que un 33% de los participantes mayores de 60 años reporta no poder hacer una cuarentena efectiva, este porcentaje se eleva a un 64% entre los jóvenes (18-29 años). El motivo principal es la compartición del hogar, seguido del cuidado de hijos u otras personas, motivos psicológicos (incluyendo el miedo a la estigmatización que se ha duplicado desde abril) y motivos económico-laborales.

La mediana en el número de contactos cercanos fuera del hogar en una semana se ha mantenido estable desde la cancelación del estado de alarma en 6-7 contactos, cifra valiosa para ayudar a determinar el dimensionamiento de los equipos de rastreadores de contactos. Según la encuesta, en el periodo entre el 21 de agosto al 23 de septiembre de 2020, un 67% de los encuestados que reportaron haber tenido un contacto cercano con alguien infectado con SARS-CoV-2 reportaron que ningún rastreador de contactos les había llamado para hacerles el trazado de contactos. Esta cifra es preocupante y, combinada con el elevado porcentaje de encuestados que reporta no poderse poner en cuarentena, podría indicar grandes dificultades para la ejecución de la estrategia T-T-A (trazar-testear-aislar) para la contención de la pandemia.

Finalmente, durante la primera oleada de la encuesta, elaboramos un modelo de regresión logística para estimar la prevalencia de SARS-CoV-2 a partir de tres preguntas de la encuesta (síntomas, contacto cercano con alguien del hogar positivo de coronavirus y sexo). Nuestro modelo, estimó en abril una prevalencia de un 5% a nivel nacional, muy alineada con la estimación proporcionada por el estudio de seroprevalencia llevado a cabo por el Instituto Carlos III.

A partir de las respuestas de la encuesta ciudadana construimos modelos para predecir dos variables de especial relevancia en la toma de decisiones durante el confinamiento: la voluntad reportada por los ciudadanos para seguir confinados y la satisfacción con las medidas adoptadas desde el gobierno. Dichos modelos se basan en árboles de clasificación [19,20], como el mostrado en la Figura 9, y algoritmos de extracción de patrones [21]. Ponen de relevancia qué combinaciones de respuestas de la encuesta conducen (y con qué probabilidad) a determinados niveles de voluntad para permanecer confinados y a la valoración de las medidas gubernamentales.

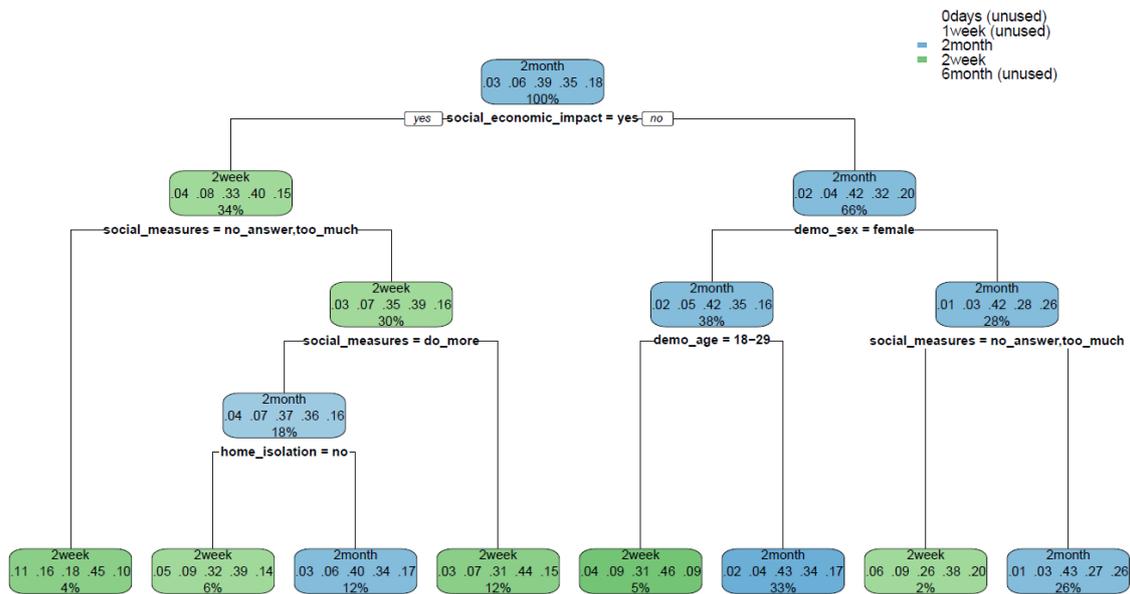


Figura 9: Modelado de la voluntad para permanecer en confinamiento a partir de las variables más relevantes de la encuesta

Los patrones extraídos mediante árboles y reglas de clasificación nos permitieron proponer una serie de acciones comunicativas muy concretas a la población, dependiendo de su situación demográfica, socio-económica y de salud. Algunas de estas recomendaciones apuntaban hacia la necesidad de una desescalada progresiva sin relajar los mensajes de concienciación a los jóvenes; la conveniencia de ofrecer soluciones alternativas de aislamiento a familias intergeneracionales con dificultades para el confinamiento en el hogar y el fomento activo del teletrabajo para reducir la movilidad, así como la importancia de la detección de asintomáticos en la población en edad laboral, entre otras.

6. Conclusiones

Las Ciencias de Datos son una disciplina de gran valor en el contexto de las pandemias, tanto para contribuir al modelado y predicción de la situación como para evaluar el impacto de las intervenciones no farmacológicas diseñadas para contener la propagación de la enfermedad infecciosa. En este breve artículo, hemos descrito de manera resumida el trabajo realizado desde marzo dentro del Grupo de Trabajo en Ciencias de Datos para la lucha contra el COVID-19 dentro del Comisionado para Presidencia de la Generalitat Valenciana en Inteligencia Artificial y Ciencias de Datos para la lucha contra el COVID-19.

El COVID-19 demuestra algo que ya sabíamos: los problemas de salud pública no dependen solo del sistema sanitario, sino que implican a toda la sociedad y las soluciones no pueden ser simples: requieren una aproximación holística. Ante la magnitud del problema en términos de dificultad, complejidad, costes y necesidad de colaboración de los afectados, lo único que nos permitirá aterrizar la necesaria aproximación holística es reforzar la gobernanza basada en la colaboración real y leal de los distintos niveles políticos, administraciones nacionales, regionales y locales, junto con actores del sector privado y la sociedad civil.

Hay que poner en marcha herramientas y procesos tecnológicos, sanitarios y sociales entrelazados, coordinados y buscando sinergias. La contextualización y complementariedad de las distintas herramientas —incluyendo la tecnología— que usemos en la lucha contra el

coronavirus son fundamentales. Hemos de reconocer y aceptar que hacemos frente a una pandemia que se va a mantener durante meses y con la que por fuerza tenemos que convivir de manera sostenible (psicológica, económica, medioambiental y socialmente).

Este planteamiento holístico conlleva no solo el desarrollo de una visión clara y en colaboración con los distintos agentes sino de manera más importante la ejecución urgente de la misma, incluyendo los siguientes tres aspectos clave que forman un círculo virtuoso, ilustrado en la Figura 10:

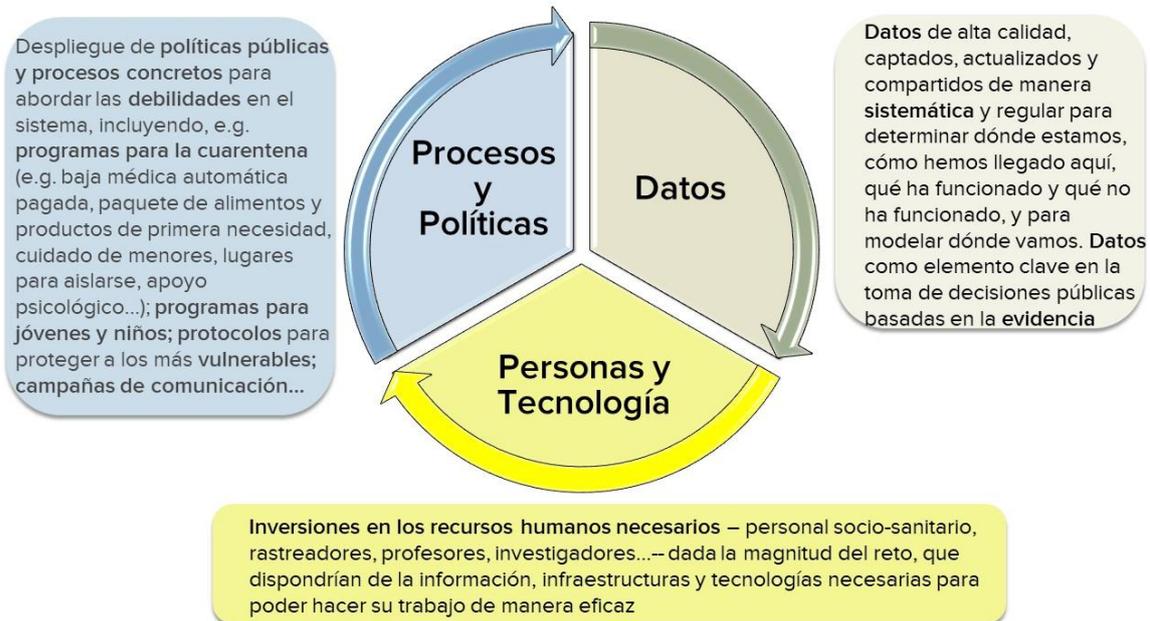


Figura 10: Círculo virtuoso de datos, personas, tecnología, procesos y políticas en un acercamiento holístico en la lucha contra la pandemia de SARS-CoV-2

1. La disponibilidad de **indicadores específicos** y de **datos** de calidad, captados, actualizados y compartidos de manera sistemática y regular, que nos permitan hacer un diagnóstico de dónde estamos, analizar las causas, determinar lo que ha funcionado y lo que no ha funcionado, y modelar hacia dónde vamos, posibilitando la toma de decisiones basadas en la evidencia y el conocimiento, incluyendo la decisión sobre el uso o no de una app para el trazado de contactos.
2. La inversión en los **medios humanos** —personal sanitario y social, rastreadores, profesores, investigadores...— necesarios para la magnitud del reto, que además cuenten con la información, infraestructuras y tecnologías necesarias para poder realizar su trabajo de manera eficaz.
3. El despliegue de **políticas públicas y procesos específicos** para abordar debilidades del sistema, incluyendo programas para facilitar la cuarentena (por ejemplo, baja médica pagada inmediata, pack de comida y productos de necesidad básica, cuidadores para niños o adultos que los necesiten, lugares donde poder aislarse si no es posible en el hogar, garantías de no perder el trabajo, apoyo psicológico, etc.); campañas de comunicación para fomentar una cultura en la que las personas no se relacionen con otras si tienen la mínima sospecha de poder estar infectados con coronavirus; protocolos para proteger a los colectivos más vulnerables; normativas para minimizar el riesgo de contagio en lugares y actividades proclives a brotes (más ejemplos, plantas

de procesamiento de alimentos, discotecas, celebraciones familiares,...) y un conjunto de acciones específicas para niños, adolescentes y jóvenes, que no podemos olvidar, son lo que están sufriendo con mayor intensidad la carga emocional de la pandemia.

Trabajemos juntos, personas y tecnología, sociedad civil, empresas y administraciones, en la lucha contra el virus. El trabajo descrito en este artículo es un ejemplo en esta dirección. La unión, sin duda, es lo que nos da la fuerza.

7. Agradecimientos

Agradecemos la participación entusiasta de más de 280.000 personas en la encuesta ciudadana desde el 28 de marzo de 2020. El trabajo aquí descrito ha sido parcialmente financiado por el proyecto CD4COVID del Fondo Supera COVID-19 creado por el Banco de Santander, el Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la CRUE; y por el proyecto AI4COVID19 financiado por las ayudas de la Fundación BBVA a equipos de investigación científica SARS-CoV-2 y COVID-19.

Bibliografía

- [1] <https://www.muyinteresante.es/salud/articulo/una-foto-semanal-de-la-situacion-del-coronavirus-en-espana-811585915653>
- [2] <https://www.lavanguardia.com/politica/20200424/48693659917/una-encuesta-recoge-que-42-de-espanoles-podria-estar-un-mes-mas-confinado.html>
- [3] <https://www.rtve.es/alacarta/audios/por-tres-razones/tres-razones-inteligencia-artificial-para-combatir-pandemia-24-04-20/5564188/>
- [4] <https://www.politico.eu/newsletter/ai-decoded/politico-ai-decoded-how-ai-is-helping-fight-a-pandemic-europes-coronavirus-app-insights-from-valencia/>
- [5] <https://www.youtube.com/watch?feature=youtu.be&v=A06j9Nv8-CA>
- [6] A. Wesolowski A, C.O. Buckee, L. Bengtsson, E. Wetter, X. Lu, A.J. Tatem. “Commentary: containing the ebola outbreak - the potential and challenge of mobile network data”. *PLoS Curr.* 2014;6: currents.outbreaks.0177e7fcf52217b8b634376e2f3efc5e. Published 2014 Sep 29. doi:10.1371/currents.outbreaks.0177e7fcf52217b8b634376e2f3efc5e
- [7] C. M. Peak, A. Wesolowski, E. zu Erbach-Schoenberg, A. J Tatem, E. Wetter, X. Lu, D. Power, E. Weidman-Grunewald, S. Ramos, S. Moritz et al. Population mobility reductions associated with travel restrictions during the Ebola epidemic in Sierra Leone: use of mobile phone data. *International Journal of Epidemiology*, Volume 47, Issue 5, October 2018, Pages 1562–1570, <https://doi.org/10.1093/ije/dyy095>
- [8] A. Wesolowski, N. Eagle, A.J. Tatem, D.LSmith, A.M. Noor, R.W Snow, C.O. Buckee (2012). “Quantifying the impact of human mobility on malaria”. *Science* 338:267-270.
- [9] https://www.ine.es/covid/covid_movilidad.htm
- [10] https://www.ine.es/covid/exp_movilidad_covid_proyecto.pdf
- [11] <http://infocoronavirus.gva.es/documents/170024890/170025022/Informe+Movilidad+gva+Abril+2020.pdf/2d728f25-f202-4e7d-81ca-cc25eef9e7d4>

- [12] <http://infocoronavirus.gva.es/documents/170024890/170025022/Informe+Movilidad+gva+Mayo+2020.pdf/5b043319-eed9-4a66-8477-d214ffe11c39>
- [13] M. E. J. Newman. “Modularity and community structure in networks”. PNAS 103(23) 8577-8582. 2006
- [14] Joan L.Aron and Ira B.Schwartz. “Seasonality and period-doubling bifurcations in an epidemic model”. Journal of Theoretical Biology, Volume 110, Issue 4, 21 October 1984, Pages 665-679. [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(84\)80150-2](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(84)80150-2)
- [15] F. Escolano, P. Suau, B. Bonev. “Information Theory in Computer Vision and Pattern Recognition”, Springer 2009.
- [16] J. T. Tuomisto, J. Yrjölä, M. Kolehmainen, J. Bonsdorff, J. Pekkanen, T. Tikkanen. “An agent-based epidemic model REINA for COVID-19 to identify destructive policies”. medRxiv 2020.04.09.20047498; doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.09.20047498><https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.09.20047498v2>
- [17] <https://covid19impactsurvey.org>
- [18] N. Oliver, X. Barber, K. Roomp, K. Roomp. “Assessing the Impact of the COVID-19 Pandemic in Spain: Large-Scale, Online, Self-Reported Population Survey”. J Med Internet Res 2020;22(9):e21319. DOI: [10.2196/21319](https://doi.org/10.2196/21319)
- [19] J.R. Quinlan. “Induction of decision trees”. Mach Learn 1, 81–106 (1986). <https://doi.org/10.1007/BF00116251>
- [20] L. Breiman, J. Friedman, C.J. Stone, , R.A. Olshen. “Classification and Regression Trees”. Ed. Taylor & Francis. The Wadsworth and Brooks-Cole statistics-probability series (1984).
- [21] M. Almiñana, L.F. Escudero, A. Pérez-Martín, A. Rabasa, L. Santamaría, “A classification rule reduction algorithm based on significance domains”. TOP, 22. 397-418 (2012)

COVID en la industria agroalimentaria: respuestas desde la ingeniería de alimentos

Daniel Ramón Vidal

Archer Daniels Midland Co.-Biopolis; Parc Científic Universitat de València ; C/ Catedrático Agustín Escardino Benlloch 9 ; 46980-Paterna ; Valencia

Decía John Lennon en su canción “Beautiful boy” que la vida es “eso que te sucede mientras tú estás haciendo otros planes”. A principios del 2020 todos teníamos planes, personales y profesionales, hasta que algo en el límite de la vida, un simple virus, nos los ha destrozado. Mirar hacia atrás es perder el tiempo, lo que nos queda es mirar el presente y pensar el futuro. Y de eso es de lo que quiero hablarles en los párrafos siguientes: de cómo el coronavirus marca y marcará el presente y el futuro de nuestra alimentación y de cómo la ingeniería de alimentos puede ayudar a superar en parte esta crisis.

Al hablar del presente me disculparán si retrocedo unos meses atrás, justo a los primeros meses de esta pandemia en los que se impuso el confinamiento estricto. Lo hago para resaltar el comportamiento ejemplar del sector agroalimentario español durante ese tiempo. Todos sus eslabones hicieron un esfuerzo encomiable para que la cadena de suministro no se rompiera. Desde el campo y las granjas a los mercados y supermercados, desde las industrias de transformación a las empresas de logística. Ningún rincón de nuestro país quedó sin suministro alimentario. El sector agroalimentario y su gente estuvieron a la altura del problema, al igual que lo estuvieron todos los profesionales sanitarios, el sector farmacéutico o los cuerpos y fuerzas de seguridad del estado. Todos ellos con su esfuerzo diario consiguieron superar la situación crítica. Conviene recordarlo una y mil veces, para que no sean otros colectivos que hicieron poco, o más bien nada, hasta incluso en ocasiones estorbar, los que se cuelguen las medallas.

Tras el cese del confinamiento la situación volvió a la mal llamada “nueva normalidad”. Y es ahí donde empezamos a constatar lo que los gurús que prevén las tendencias ya habían adelantado meses atrás: nada iba a ser igual, ni en la alimentación ni fuera de la alimentación. Pero centremos en la agroalimentación. Como Mintel, la agencia de inteligencia de mercado líder en el mundo, publicaba en sus informes mensuales desde el origen de la pandemia, millones de habitantes del planeta estaban empezando a concebir de una forma distinta su alimentación. En los primeros quince días de pandemia en USA, Mintel destacaba que se enumeraba prácticamente el doble de búsquedas en internet sobre “sistema inmunitario y alimentación” que sobre “COVID-19 y alimentación”. En sus últimos informes de junio y julio llamaban la atención sobre el incremento de ese interés en el binomio alimentación-sistema inmunitario y en el auge de las compras de alimentos on-line y las búsquedas de recetas en la nube para cocinar en casa. La opinión de estos asesores es que se va a producir un aumento considerable del consumo de todos aquellos alimentos o suplementos nutricionales que mejoren nuestro estado de salud y nos protejan frente al COVID-19 y cualquier nueva infección. Ese crecimiento se producirá sobre todo entre los “millennials” y la gente de más de 60 años, los primeros por su afán de buscar nuevas alternativas, los segundos por motivos obvios: ellos han sido la carne de cañón de esta pandemia. ¿Cómo la ingeniería de alimentos va a ayudar al desarrollo de estos nuevos conceptos?

Desde el punto de vista del binomio “alimentación-sistema inmunitario”, la ingeniería jugará un papel clave. Para buscar y analizar la funcionalidad de nuevos alimentos e ingredientes alimentarios que refuercen nuestro sistema inmune precisaremos de métodos de escrutinio

masivo. Esos métodos deberán analizar “in silico” bases de datos de moléculas, robotizar modelos animales y desarrollar sistemas miniaturizados que simulen nuestros órganos (“organ-on-a-chip”). En todos estos procesos se hará imprescindible la colaboración entre ingenieros con conocimiento en biomedicina e inteligencia artificial con biólogos celulares y expertos en alimentación y nutrición. A todo ello habrá que añadir el estudio de la interrelación entre el coronavirus, nuestro sistema inmune y el conjunto de trillones de microorganismos que pueblan nuestro cuerpo, el llamado microbioma humano. Ya hay muchos datos que indican una predisposición a la infección por este virus y al desarrollo más agresivo de la infección en personas con determinadas patologías, predisposiciones genéticas o microbiomas digestivos. El objetivo final será la búsqueda de nuevos alimentos y suplementos nutricionales que protejan a estos sectores de la población y retarden la proliferación del virus. La carrera ya ha empezado y de hecho hay varios ensayos clínicos en marcha tendentes a analizar el papel positivo de determinados suplementos nutricionales en el tratamiento de pacientes infectados por el coronavirus, algunos de ellos en nuestro país.

Los primeros datos ya han comenzado a aparecer y los próximos meses traerán muchos más. Pero lo más importante es que servirán como ejemplo para acelerar una tendencia de búsqueda de este tipo de productos que nos prevengan y protejan frente al desarrollo de otras muchas patologías frecuentes. En otras palabras, muy probablemente la pandemia del COVID-19 será un catalizador en el desarrollo de la nutrición de precisión, la alimentación dirigida a nuestro fondo genético y microbiano. Esta tendencia sólo crecerá si va pareja a otros avances. El primero de ellos, será el desarrollo de dispositivos que nos permitan detectar de forma íntima cambios en parámetros que tengan que ver con nuestra salud. Hace cincuenta años ninguna mujer pensaba que podría saber si estaba embarazada en unos pocos minutos y de forma íntima en su hogar. Hasta 1987 no había una prueba de medida de la glucosa en sangre. Hoy todo ello es una realidad, una realidad que la nutrición de precisión quiere hacer propia desarrollando métodos que permitan detectar aplicaciones en nuestro móvil que nos indiquen no sólo algo tan obvio como la temperatura de nuestro cuerpo, sino muy probablemente nuestros niveles de minerales o vitaminas, nuestra tensión arterial, la actividad de nuestro sistema inmune o si un virus nos está infectando. En base a esa información cambiaremos nuestra dieta, probablemente de la forma que una aplicación informática nos lo diga. Es evidente que todos estos avances vendrán del trabajo de grupos de ingenieros junto con profesionales de la medicina y la informática. El segundo desarrollo necesario para acelerar la nutrición de precisión será el diseño de tecnologías que permitan vehiculizar la ingesta de esos nuevos ingredientes de forma atractiva para el consumidor. Estamos hablando de robots de cocina caseros o cafeteras que permitan fabricar panes, purés, granizados o infusiones enriquecidas en determinados suplementos nutricionales que fortalezcan nuestro sistema inmune. Sin ninguna duda, las nuevas tendencias de compra y consumo a las que hacía referencia al comienzo de este artículo acelerarán el trabajo de centenares de ingenieros expertos en el desarrollo de este tipo de máquinas domésticas.

No quisiera terminar estas líneas sin una última reflexión. Si al hablar de la alimentación en lugar de fijarnos en el consumidor nos centramos en el sector agroalimentario, como indicaba en una entrevista muy reciente el historiador israelí Yuval Noah Harari, esta epidemia puede ser el detonante de la llegada masiva de la inteligencia artificial y la robótica a la cadena alimentaria. El COVID-19 nos ha recordado que en muchas ocasiones las infecciones son letales y ha traído de nuevo a nuestras mentes el miedo al contagio, sobre todo en aquellos sectores de la población que han sido más castigados. La sustitución de mano de obra humana por robots que no contaminan es algo que tan sólo unos meses atrás sonaba insolidario, pero que quizás en el futuro haya que, al menos parcialmente, reconsiderar. Y por supuesto tendrá un impacto social, sobre

todo en países pobres. Deberemos tomar decisiones poniendo todos los pros y los contras en la balanza.

Nos enfrentamos a un futuro difícil, con decisiones muy complicadas que nos marcarán por años. El papel de las distintas ramas de la ingeniería en estos desarrollos será clave, sobre todo si sus profesionales interaccionan con los profesionales de los otros sectores implicados. Hace falta un esfuerzo común, hoy más que nunca, y estoy seguro que la ingeniería, y en particular la ingeniería española, estará a la altura.



Real Academia de Ingeniería

Calle Don Pedro, 10 – 28005 Madrid

Telf.: 91 528 20 01

www.raing.es