

Modelo de umbral de reducción de tasa diaria de casos COVID-19 para evitar el colapso hospitalario en Chile

Model for a threshold of daily rate reduction of COVID-19 cases to avoid hospital collapse in Chile

Rodrigo Gutiérrez-Aguilar^a, Fernando Córdova-Lepe^a, María Teresa Muñoz-Quezada^b,
Juan Pablo Gutiérrez-Jara^c

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

^b Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile

^c Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Maule (CIEAM), Universidad Católica del Maule, Talca, Chile

*Autor corresponsal fcordova@ucm.cl

Citación Gutiérrez-Aguilar R, Córdova-Lepe F, Muñoz-Quezada MT, Gutiérrez-Jara JP. Model for a threshold of daily rate reduction of COVID-19 cases to avoid hospital collapse in Chile. *Medwave* 2020;20(3):e7871

Doi 10.5867/medwave.2020.03.7871

Fecha de envío 26/3/2020

Fecha de aceptación 3/4/2020

Fecha de publicación 8/4/2020

Origen No solicitado

Tipo de revisión Con revisión por pares externa, por tres árbitros a doble ciego

Palabras clave coronavirus, epidemiology, mathematics, models

Resumen

Mediante un modelo matemático este trabajo explora la problemática de la disponibilidad versus sobredemanda de procesos críticos hospitalarios (por ejemplo, camas críticas) ante una fuerte expansión epidémica como la que está ocurriendo como consecuencia de la pandemia de COVID-19. En conexión con la estadística de nuevos casos diarios y el supuesto de cupo máximo, exploramos la dinámica asociada a las variables número de hospitalizados (ocupantes críticos) y mortalidad en el sistema. Obtenemos una condición paramétrica umbral que involucra un parámetro asociado al esfuerzo mínimo diario para el no colapso del sistema. En orden a ejemplificar, incluimos algunas simulaciones para el caso de Chile, en función de un parámetro de esfuerzo a sostener para bajar la tasa de infección diaria.

Abstract

Using a mathematical model, we explore the problem of availability versus over-demand of critical hospital processes (e.g., critical beds) in the face of a steady epidemic expansion such as is occurring from the COVID-19 pandemic. In connection with the statistics of new cases per day, and the assumption of maximum quota, the dynamics associated with the variables number of hospitalized persons (critical occupants) and mortality in the system are explored. A parametric threshold condition is obtained, which involves a parameter associated with the minimum daily effort for not collapsing the system. To exemplify, we include some simulations for the case of Chile, based on a parameter of effort to be sustained with the purpose of lowering the daily infection rate.

Ideas clave

- Ante la actual fase de COVID-19 en Chile, se requiere entender en forma simple la dinámica disponibilidad hospitalaria-demanda.
- Mediante un modelo matemático se prueba, a través de un parámetro que mide el esfuerzo por bajar la tasa diaria de contagio, la existencia de un umbral de no colapso y aplanamiento de la epi-curva.
- El desconocimiento de cómo las distintas medidas ponderan para la estimación numérica del esfuerzo es una limitación importante en la praxis.

Resumen en lenguaje sencillo

Un alto número de contagiados de coronavirus empeoran con el pasar de los días y requerirán hospitalizarse. Si no hay esfuerzo diario permanente para disminuir el porcentaje de personas que se contagian, faltarán dichas camas (con sus respectivos respiradores) y muy probablemente muchos morirán. Usando matemáticas se mide la fracción que debe disminuir el porcentaje de contagiados diariamente para que existan cupos en los hospitales para todos los que lo necesiten.

Lay summary

A high number of those infected with coronavirus worsen as the days go by and will require hospitalization. If there is no ongoing daily effort to decrease the percentage of people who become infected, these beds (and ventilators) will be wanting and many people will most likely die. Using mathematics, we measure the fraction that must decrease the percentage of people who are infected each day to ensure that each person has a place in a hospital if needed.

Introducción

Los antecedentes del brote epidémico en China entre diciembre 2019 y enero 2020 observó un crecimiento exponencial de COVID-19, entregando un número reproductivo básico (R_0) de 2,68 y un tiempo de duplicación de la epidemia de 6,4 días¹. La estimación actual del período de incubación medio para COVID-19 es de 6,4 días, con posible transmisión asintomática². Estos cálculos ya entregaban la evidencia de una epidemia expansiva como la que se observa en estos momentos en el mundo.

Según la Organización Mundial de la Salud³, los niveles de preparación para los períodos inter-pandémicos, pandémicos y post-pandémicos se definen en fases. En las fases 1 y 2 de expansión de COVID-19 el foco de atención (por conocer la localización y la trazabilidad de los casos) está en los intentos por contener el virus en el grupo de individuos positivos identificados y aislados. Sin embargo, roto el cerco, en las fases 3 y 4, cuando se pierde la traza y ya existe circulación comunitaria, el interés se vuelca a posibilitar la atención clínica a la demanda que se proyecta se generará, para mitigar los daños. Sin una reacción potente, tras un período sostenido de transmisión a ritmo geométrico, como es de esperar, le sucederá uno de fuerte demanda de los servicios hospitalarios que, si el sistema no soporta, conlleva a un período de casos con elevado e irreversible daño a la salud o en que el paciente muere.

Al 22 de marzo de 2020, la pandemia de la enfermedad COVID-19 provocada por el nuevo coronavirus SARS-CoV-2 ha afectado a más de 180 países⁴, superando los 330 000 casos confirmados y sobre 14 mil muertes, donde la situación de Italia no solo sorprende por la cantidad de casos, y la rápida tasa de contagios del virus en el país, sino también por la cantidad de muertes totales que supera a China y por la cantidad de casos críticos que están hospitalizados⁵.

Los sistemas de salud de los países secundarios o más alejados en el encadenamiento de la propagación, han tenido algún tiempo para prepararse y fortalecerse, pero en cada caso siempre hay un límite variable según lo responsable de la gestión o de las posibilidades de acceso a los recursos. Finalmente, una capacidad máxima de insumos fungibles y no agotables que determinan primero un tope en el cupo hospitalario general y, en particular, ante la complejidad de los cuadros, las siempre limitadas camas críticas. En el contexto de COVID-

19 notemos que en Italia entre el día 1 y el día 11 de marzo de 2020, el porcentaje de ingresos en unidades de cuidados intensivos se situó entre el 9% y el 11% de los infectados activos⁵. Además, hacia el 16 de marzo de 2020 era hospitalizado el 21% de los casos reportados⁶.

Respecto a las personas que acuden a los centros de salud y dieron positivo, el escenario futuro para ellos es un manejo domiciliario o la necesidad de hospitalización. Estos últimos pueden pasar a cuidado menor o intermedio. Dentro del hospital existen unidades para cuidados intensivos para pacientes recién hospitalizados o para aquellos que no han evolucionado favorablemente. Se requiere en tal caso la posibilidad de ocupar lo que llamaremos camas críticas.

Uno de los problemas que han tenido las autoridades de salud de los países que han presentado un aumento considerable en el número de casos por COVID-19 es el colapso del sistema hospitalario. Esa parece ser la experiencia que nos deja el desarrollo de la enfermedad en países europeos como primeramente Italia, luego España y, en estos momentos, parece empezar a tener Francia. China logró contener los casos de COVID-19 no solo por el endurecimiento de medidas de distanciamiento social, sino por su rápida capacidad de respuesta en la construcción de hospitales con el fin de tener una mayor cantidad de camas disponibles para los pacientes críticos⁵.

Si bien el diagnóstico de los primeros casos en los países europeos no fue oportuno, una vez impuestas medidas de aislamiento social para reducir la propagación del virus, estas no fueron asumidas por la población. Los países que ya tercerean en la cadena de contagio tienen la oportunidad de reaccionar a tiempo para evitar que la cantidad de nuevos casos diarios aumente al punto de rebasar, muy por arriba, las capacidades de sus redes de salud, implicando con ello más desesperación, descontrol y mortalidad.

Entender cuáles son los parámetros claves sobre los que intervenir, la sensibilidad de las proyecciones a las condiciones de momento, es una tarea determinante en el éxito del manejo de la crisis sanitaria. Tener comprensión de los grandes y sostenidos esfuerzos que significa frenar los procesos que inherentemente tienen una dinámica de expansión de naturaleza exponencial, es una necesidad para los gestores y líderes de equipos de soporte.

Este trabajo plantea un modelo matemático básico de propagación del contagio que tiene la novedad de incorporar como variables destacadas el número de tratados hospitalariamente y, a la vez, la mortalidad o remoción (censura) del sistema. El propósito del modelo es que los tomadores de decisiones cuenten con una proyección para generar estrategias de mitigación y de rápida respuesta frente a la velocidad de contagio que se presenta en Chile.

Modelo hospitalario

Comentarios al método

En un sentido abstracto, se considera una población cerrada tras la llegada de un primer caso positivo respecto a una enfermedad infecciosa (COVID-19 como modelo). Desde este primer infectado, existe una expansión de los casos y algunos de ellos necesitarán ser hospitalizados. Brevemente, el problema en cuestión es si la capacidad será suficiente para absorber la demanda. En este sentido, el modelamiento matemático ha sido utilizado para determinar las capacidades hospitalarias óptimas (camas, equipos y personal médico) sujeto a la minimización de los costos asociados⁷⁻⁹. Sin embargo, frente a una explosión de personas que requieran de algún tratamiento médico, la capacidad hospitalaria puede verse comprometida. Por lo tanto, la posibilidad de actuar frente a la pandemia del COVID-19 va estar vinculada en gran medida con la capacidad de los sistemas hospitalarios para atender a los enfermos y sostener un número de la población infectada lo más baja posible¹⁰. Proponemos y analizamos un modelo matemático para obtener una condición umbral que permita evitar el colapso hospitalario.

Para una mejor lectura, se considera un tratamiento discreto del tiempo medido en días y una dinámica determinista (ecuaciones en diferencias) de conexión entre las variables (sucesiones numéricas). En la idea de simplicidad técnica, se asume un principio de uniformidad (reflejo de promedios) lo cual posibilita una división de la población en compartimentos asociados a la condición de salud de las personas (por ejemplo, infeccioso, hospitalizado y removido) independiente de la edad o género.

De los casos confirmados diarios

Observemos que un importante primer objetivo en cuanto a control, es lograr que la sucesión definida por (3) comience a decrecer. Como N_{k+1}/N_k es igual a $(1 - \lambda)\{1 + A_0(1 - \lambda)^k\}$, la condición para tal declinación al k_* -día con un esfuerzo λ_* es $A_0(1 - \lambda_*)^{k_*} < \lambda_*$.

El que la declinación mencionada no se alcance (no es socialmente fácil aumentar λ) puede llegar a ser un problema importante, cuando los nuevos casos lleguen a crecer muy rápido y con cifras elevadas.

Denotemos por C_k el número de casos confirmados de COVID-19 al k -ésimo día desde el inicio del conteo en que se registró un contagiado ($C_0 = 1$). Notemos que dicho número no discrimina la condición presente respecto a la enfermedad; se puede estar aún en condición de infeccioso o removido, sea por haberse recuperado o por muerte. Estas cifras, que son propias de un registro oficial, asumiremos se corresponden con la realidad. De no ser así, para efectos de nuestro modelo, estos datos se pueden pensar como estimaciones diarias de otras fuentes.

La dinámica que determina la secuencia $\{C_k\}$ será descrita por el siguiente modelo (recurrencia) lineal:

$$C_{k+1} = \{1 + A_k\}C_k, \quad k \geq 0, \quad (1)$$

el cual traslada el problema de conocer el número de casos a futuro, a la determinación de la sucesión $\{A_k\}$ de tasas de incremento porcentual diario. En una población cerrada (flujo de entradas-salidas muy menor), un desarrollo epidémico sin mitigación mayor presenta una primera fase de comportamiento exponencial, es decir, en (1) los términos A_k son iguales a A_0 . En orden a representar un elemento que las dinamice, como son las diversas medidas en contra de la propagación, vamos a considerar que

$$A_k = A_0(1 - \lambda)^k, \quad k \geq 0, \quad (2)$$

Donde $\lambda \in [0, 1]$ es el parámetro con el cual representaremos el esfuerzo diario para disminuir la tasa de contagio inherente A_0 . Así, si el esfuerzo es nulo ($\lambda = 0$) tenemos $A_k = A_0$, $k \geq 0$. En cambio, si el esfuerzo es total ($\lambda = 1$), se obtiene $A_k = 0$, $k \geq 0$, se para totalmente el contagio.

Este modelo (1) + (2) fue recientemente publicado y el análisis principal introducido en el trabajo va dirigido hacia el efecto del parámetro λ sobre los valores de la sucesión $\{C_k\}$ a mediano y largo plazo¹¹.

Destacamos que los nuevos casos en el k -ésimo día, variable que denotamos por N_k , corresponde a $\Delta C_k := C_{k+1} - C_k$, la *primera variación aditiva* de $\{C_k\}$. Considerando el despeje $C_k = C_0 \prod_{j=0}^{k-1} (1 + A_j)$ desde (1) y que $C_0 = 1$ implica $N_0 = A_0$, tenemos

$$N_k = A_0(1 - \lambda)^k \prod_{j=0}^{k-1} \{1 + A_0(1 - \lambda)^j\}, \quad k \geq 1. \quad (3)$$

Notemos que una fracción de estos nuevos infectados, al pasar algunos días (que en todo el texto supondremos de L -días en promedio), manifestarán síntomas que evolucionan negativamente a un cuadro grave y, por lo tanto, requerirán atención médica en unidades de cuidados críticos. Así, si denotamos por α dicha fracción, al k -ésimo día el grupo que demandará tal atención es αN_{k-1} .

Del sistema hospitalario

Ante una pandemia como COVID-19 habrá un sector de la población contagiada que desarrollará un compromiso vital tal que acudirá a los centros de atención con la clara necesidad de ser internados para recibir el tratamiento del protocolo para intentar salvar sus vidas. La capacidad hospitalaria de ejecutar la atención en número y calidad esperada es un factor determinante que los sistemas de salud deben considerar cuando se enfrenta una epidemia de orden mayor.

El enfoque actual respecto a lo que se comprende por capacidad hospitalaria apunta a la posibilidad efectiva de ofrecer integralmente el flujo entrada \rightarrow salida (el alta) del tratamiento visto este como proceso¹². No es solo contar camas, sino una clara identificación de la ruta y los puntos que generan los cuellos de botella como cierto tipo de equipos—se estima que 5% de los pacientes con COVID-19 podrían desarrollar una enfermedad crítica con insuficiencia respiratoria y requerirán de sistemas de ventilación mecánica¹³, personal especializado, camas críticas u otro elemento) que dependen del territorio, la economía y del modelo de salud imperante¹⁰.

Centrándonos en la red hospitalaria que está en condiciones de ofrecer el tratamiento integral para el coronavirus, la capacidad de esta se expresaría en al menos tres parámetros (Λ, γ, μ) ¹⁴.

1) Un número máximo Λ que indica los individuos posibles de hospitalizar, como ha sido dicho, determinado por las limitaciones en recursos (número de camas generales, cantidad de personal médico, camas críticas u otros específicos a la enfermedad).

2) El tiempo promedio que tarda el tratamiento en forma íntegra en condiciones normales que denotamos $1/\gamma$, o expresado en su inverso como γ , la fracción de tratados que reciben el alta diariamente.

3) No siendo todo tratamiento exitoso, es necesario considerar la fracción diaria μ de tratamientos fracasados, que establecemos expresa fallecimientos, es decir, $1/\mu$ es el tiempo promedio en que los pacientes que no llegan al alta mueren. Asumiremos que la capacidad máxima Λ se respeta o no tiene mayor plasticidad, igual cosa que la normalidad de su implementación y duración promedio, esto es, para el modelo Λ, γ y μ son constantes.

Asociado a la capacidad del sistema de salud en directa relación al flujo hospitalario, consideramos dos variables de importancia:

- i. H_k : Número de personas hospitalizadas al k -ésimo día, es decir, los pacientes que están recibiendo el proceso de tratamiento específico en dicho día. Bajo los supuestos, es claro que siempre $H_k \leq \Lambda$.

- ii. M_k : Número de personas fallecidas hasta el k -ésimo día a contar del día cero. No es solo la mortalidad hospitalaria, también son los enfermos críticos que no fueron hospitalizados. Esta variable mortalidad nunca decrece.

Estas variables se relacionan con los conceptos de *disponibilidad* (número vacantes para ingresar al proceso hospitalario) que es de $\Lambda - H_k$ al día k y de *sobredemanda* la diferencia que puede existir entre los que requieren la hospitalización y la disponibilidad, esto es, $\alpha N_{k-l} - \Lambda$, cuando esta diferencia es positiva.

Así, ante la llegada de un paciente al sistema existen dos escenarios:

- a) Sin disponibilidad ($H_k = \Lambda$). En cuyo caso asumiremos que el destino del flujo demandante αN_{k-l} es ser removidos, luego $\Delta M_k = \alpha N_{k-l} + \mu H_k$.
- b) Con disponibilidad ($H_k < \Lambda$). Si pensamos en todo el flujo de personas que está acudiendo por atenciones, esto es αN_{k-l} , surge una segunda disyuntiva; nos referimos a la necesidad de preguntarnos ¿hay una capacidad de atención? A la que nuevamente bifurcamos en:

b.1. Sin sobredemanda ($\alpha N_{k-l} \leq \Lambda - H_k$). Todos los individuos son tratados y ese día la mortalidad solamente avanza al fracaso del tratamiento. Si denotamos la cuenta de la mortalidad acumulada al k -ésimo día por M_k , tenemos $\Delta M_k = \mu H_k$.

b.2. Con sobredemanda ($\alpha N_{k-l} > \Lambda - H_k$). Es decir, en presencia de limitada disponibilidad, lamentablemente existirán individuos que no podrán ser atendidos, su número es $\alpha N_{k-l} - [\Lambda - H_k]$, los que asumiremos como removidos del sistema v.g., fallecerán por lo que $\Delta M_k = \alpha N_{k-l} - [\Lambda - H_k] + \mu H_k$.

Entonces, la variación en el número de hospitalizados en tratamiento entre el día k y el siguiente, esto es ΔH_k es $\alpha N_{k-l} - (\gamma + \mu)H_k$ en el caso b.1. y $\Lambda - (\gamma + \mu)H_k$ si ocurre b.2.

Ley de evolución del sistema

La dinámica de entrada y salida del sistema hospitalario, descrita en la sección anterior, también puede ser visualizado en esquema de la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo del sistema hospitalario.

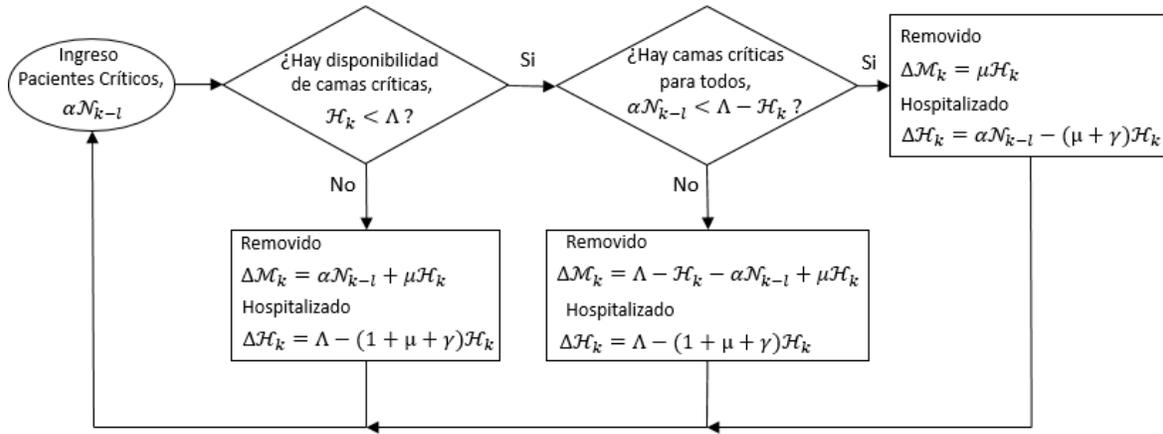


Diagrama de flujo que muestra la variación de los estados hospitalizado y removido en la entrada y salida del sistema hospitalario.

El esquema de la Figura 1, se puede representar en términos de ecuaciones en diferencia. El flujo entre hospitalizados y removidos de sistema hospitalario descrito queda modelado por:

i. Variación de la hospitalización:

$$\Delta H_k = \begin{cases} \alpha N_{k-l} - (\gamma + \mu)H_k, & \text{si } \alpha N_{k-l} < \Lambda - H_k, \quad (\text{b.1}) \\ \Lambda - (1 + \gamma + \mu)H_k, & \text{si } 0 \leq \Lambda - H_k \leq \alpha N_{k-l} \quad (\text{b.2}) \end{cases} \quad (4)$$

ii. Variación de la mortalidad:

$$\Delta M_k = \begin{cases} \mu H_k, & \text{si } \alpha N_{k-l} < \Lambda - H_k, \quad (\text{b.1}) \\ \alpha N_{k-l} - [\Lambda - H_k] + \mu H_k, & \text{si } 0 \leq \Lambda - H_k \leq \alpha N_{k-l} \quad (\text{b.2}) \end{cases} \quad (5)$$

Entendemos que inicialmente existe plena capacidad hospitalaria (es decir $H_0 = 0$) y nula mortalidad asociadas a fracasos del tratamiento específico (es decir $M_0 = 0$). Además, consideramos $N_0 = A_0$.

¿Colapsará el sistema hospitalario en Chile?

En Chile, la propagación de COVID-19 presenta cifras alarmantes, lo muestra: el número de casos reportados (Tabla 1), algunas proyecciones¹¹ y los comparativos entre países latinoamericanos, por día, desde el caso uno^{4,15-17}. El incremento porcentual diario en Chile en los primeros días ha sido del 35,9% y presentando cifras que son mayores a las conocidas de los casos Italia (It), España (Sp) y Francia (Fr) en una escala temporal equivalente. Actualmente, estos países europeos tienen una elevada mortalidad, consecuencia del colapso de sus servicios hospitalarios, teniendo que enfrentar difíciles decisiones

las cuales son literalmente de vida o muerte¹⁸. Este es el escenario que Chile debe evitar, decretando y gestionando medidas específicas que reduzcan la propagación del COVID-19, y en concordancia con los costos sociales que estas pueden generar.

Condición de no colapso y simulaciones

A la fecha (24/03/2020), los casos confirmados de COVID-19 en Chile son 1142, de los cuales 43 permanecen hospitalizados y, de estos, 14 corresponden a pacientes críticos (ver Tabla 2)^{26,27}. Adicionalmente, 22 personas se encuentran recuperadas y se lamentan 3 fallecidos²⁸. Los reportes realizados por el Ministerio de Salud no detallan el tiempo de estadía (es decir, número promedio de días de hospitalización²⁹) de cada paciente crítico, ni las fechas de ingreso de los pacientes fallecidos^{30,31}. Lo anterior dificulta la obtención de los valores medios para los parámetros γ y μ ajustados a la realidad nacional.

Tabla 2. Resumen de nuevos casos y pacientes críticos por día.

Día	16/03	18/03	19/03	21/03	22/03	25/03
Nuevos casos por día	81	37	104	102	96	202
Pacientes críticos por día	2	1	3	1	4	4
% Pacientes críticos por día	2,5%	2,7%	2,9%	1,0%	4,2%	2,0%

Nuevos casos, cantidad y porcentaje de pacientes críticos por día. En los días no reportados, no se reporta el ingreso de pacientes críticos.

Estudios clínicos iniciales en China^{32,33} establecieron que, de un total de 1099 pacientes confirmados con COVID-19, 55 (5,0%) ingresaron como pacientes críticos y 2,3% debió ser asistido con ventilador mecánico; 1,4% falleció. Un estudio más general realizado en China por la Organización Mundial de la Salud durante el periodo entre el 16 y el 24 de febrero del presente año³⁴, estableció que el tiempo promedio desde el inicio hasta la recuperación clínica para casos leves es de aproximadamente dos semanas, con un rango entre tres y seis semanas (rango de 21 a 42 días) para pacientes con enfermedad grave o crítica. Asimismo, entre los pacientes que han fallecido, el tiempo desde el inicio de los síntomas hasta el resultado de muerte varía de dos a ocho semanas (rango 14 a 56 días). Por otro lado, los síntomas (por ejemplo, respiratorios leves y fiebre) suelen surgir en un promedio de cinco a seis días después de la infección³⁴ con un periodo de incubación cuatro días (mediana del rango intercuartil, 2 a 7 días)³².

Observemos que de no haber esfuerzo por bajar la tasa ($\lambda = 0$), el colapso del sistema hospitalario es inminente. En efecto, tendremos por un importante periodo un crecimiento geométrico de los casos (con un ingreso porcentual diario $A_0 = 35,9\%$, ver Tabla 3), también de los nuevos casos y por ende de la fracción de estos que demanda atención crítica. Si la capacidad hospitalaria no es muy alta una demanda exponencial obviamente (ver Apéndice C) la sobrepasa en pocos días (ver Figura 2).

Tabla 1. Resumen de casos totales, nuevos y tasa diaria de contagio.

Fecha	k	C_k	N_k	$A_k(\%)$	Fecha	k	C_k	N_k	$A_k(\%)$
M. 03	0	1	2	2,0	D. 15	12	75	81	10,8
M. 04	1	3	1	33,3	L. 16	13	156	45	28,8
J. 05	2	4	1	25,0	M. 17	14	201	37	18,4
V. 06	3	5	2	40,0	M. 18	15	238	10 4	43,7
S. 07	4	7	3	42,8	J. 19	16	342*	92	26,9
D. 08	5	10	3	30,0	V. 20	17	434	10 2	23,5
L. 09	6	13	4	30,8	S. 21	18	536	96	17,9
M. 10	7	17	6	35,3	D. 22	19	632	11 4	18,0
M. 11	8	23	10	43,5	L. 23	20	746	17 6	23,6
J. 12	9	33	10	30,3	M. 24	21	922	22 0	23,9
V. 13	10	43	18	41,9	M. 25	22	1142		
S. 14	11	61	14	23,0	J. 26	23			

Casos Totales (C_k), nuevos casos (N_k) y tasa diaria de contagio (A_k) de COVID-19 en Chile. *En adelante, casos confirmados con el nuevo método de testeo e informados con un retardo de 48 horas.

El informe *El Panorama de la Salud 2019* (OCDE)¹⁹ sitúa la capacidad hospitalaria de Chile en $2,1^0/00$ (es decir, en 210 camas por cada 100 mil habitantes) cuya razón es aproximadamente un total de 40 000 (estimando 19 millones de habitantes), cifra menor que $2,97^0/00$ Sp. y $3,18^0/00$ It. Una medida del gobierno de Chile para fortalecer la capacidad hospitalaria ante una eventual explosión de la demanda por COVID-19, es aumentar la disponibilidad en 1732 nuevas camas. Además, se dispondrá de un hospital de campaña con 597 camas, 6 puestos de atención especializado del ejército y los servicios del Buque Hospital Sargento Aldea, y de 800 camas en el lugar de eventos de Santiago denominado Espacio Riesco²⁰⁻²³. Sin embargo, la atención de casos críticos de COVID-19 amerita el uso de camas críticas, es decir, camas con sistemas de ventilación mecánica propias de las Unidades de Cuidado Intensivo (UCI) y de las Unidades de Tratamiento Intermedio (UTI). Informes oficiales, como el realizado por la Unidad de Gestión Centralizada de Camas, UGCC (MINSAL)²⁴, señala que Chile dispone de 1593, 441 y 765 camas críticas para los servicios de adulto, pediatría y neonatología respectivamente.

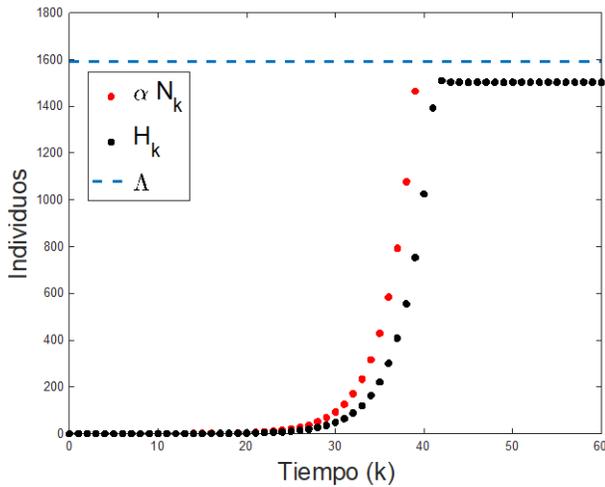
Por otro lado, el ministro de Salud (Jaime Mañalich) en entrevista realizada por el canal televisivo *24 Horas*²⁵ recalzó que frente al probable escenario de 40 mil contagiados, 16% de estos deberán requerir hospitalización y 8% (esto es, 3200 personas) van a requerir tratamiento intensivo. Si esta demanda se concentra en un periodo corto (epi-curva muy acampanada), las camas críticas posiblemente no alcanzarán.

Tabla 3. Resumen, definición y valor de los parámetros utilizados en el modelo (4)-(5).

Parámetro	Descripción	Valor	Fuente
A_0	Incremento porcentual diario	35,9%	Estimado*
Λ	Cantidad de camas críticas	1593	(24)
γ^{-1}	Tiempo promedio de tratamiento exitoso	32 días	(34)
μ^{-1}	Tiempo promedio de tratamiento fracasado	35 días	(34)
α	Porcentaje de casos críticos	2,6%	Estimado*
l	Tiempo promedio arribo de pacientes	6 días	(34)

Valores de parámetros para el modelo (4)-(5) usados en las proyecciones. * Valor estimado a través de un ajuste exponencial sobre el total de casos confirmados. † Mediana de los datos de la Tabla 2.

Figura 2. Evolución diaria de la demanda y hospitalización sin control.



Evolución diaria de la demanda (rojo) y hospitalización (negro) sin control ($\lambda = 0$) en base a los datos de la tabla 3. La estimación del día de colapso es $k_* \approx 42$. La capacidad Λ (azul) no es alcanzada debido la remoción constante de individuos tratados y fallecidos.

Ahora, si incorporamos medidas de control cuyos esfuerzos reducen día a día el incremento porcentual diario, el colapso de los sistemas hospitalarios es posible de evitar solamente si se satisface una condición umbral. Denotando $B = 1 - \gamma - \mu$, que es un parámetro positivo asociado a la fracción de permanencia hospitalaria diaria, esta se puede expresar al menos de dos formas:

(NC) Nuevos casos (Apéndice A):

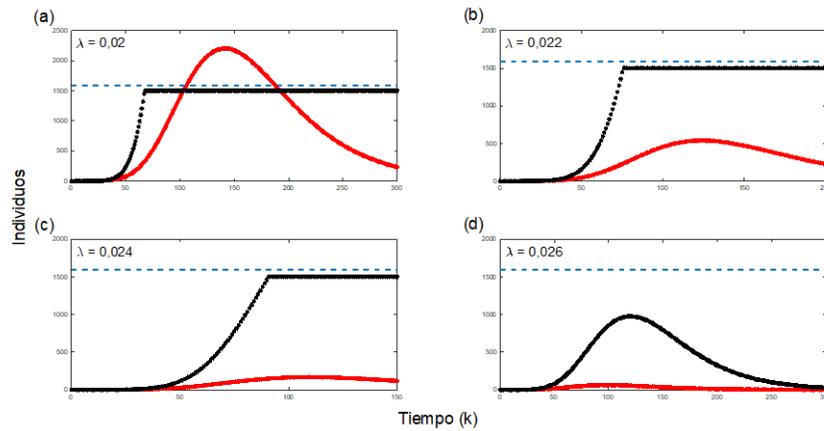
$$N_{k-l} + B^{(k-l)-1} \sum_{j=0}^{(k-l)-1} N_j / B^j + B^{k-l} C_0 < \frac{\Lambda}{\alpha}, \quad k \geq l,$$

(CT) Casos totales (Apéndice B):

$$C_{(k-l)+1} + \frac{1-B}{B} \sum_{j=0}^{(k-l)-1} B^{(k-l)-j} C_j < \frac{\Lambda}{\alpha}, \quad k \geq l.$$

Con el objetivo de visualizar el efecto del parámetro de esfuerzo λ en cuanto a ser un determinante importante de las curvas de demanda hospitalaria, hospitalización y mortalidad, consideramos simulaciones con los parámetros de la Tabla 3 para cuatro valores de esfuerzo.

Figura 3. Evolución diaria de la demanda y hospitalización con control.



En (a), (b), (c) y (d) se presenta la evolución diaria de la demanda (rojo) y hospitalización (negro) con $\lambda = 0,020$, $\lambda = 0,022$, $\lambda = 0,024$ y $\lambda = 0,026$ respectivamente. Figura 3(a): Con $\lambda = 2,0\%$ no es suficiente el esfuerzo. La capacidad hospitalaria se copa al día $k^* \approx 68$. Figura 3(b): Con $\lambda = 2,2\%$ no es suficiente el esfuerzo. La capacidad hospitalaria se copa al día $k^* \approx 76$. Figura 3(c): Con $\lambda = 2,4\%$ no es suficiente el esfuerzo. La capacidad hospitalaria se copa al día $k^* \approx 91$. Figura 3(d): Con $\lambda = 2,6\%$ tenemos que la demanda hospitalaria está bajo control y la capacidad hospitalaria no llega nunca a coparse.

Destacamos la sensibilidad de la situación al parámetro λ . La diferencia entre las figuras anteriores lo hace solamente una variación de un $0,6\%$ en el parámetro esfuerzo. En una primera interpretación, tal parece que esta diferencia es posible de lograr a través de pequeñas acciones de mitigación y precaución, que entre todas suman al esfuerzo. Nótese que el incremento porcentual diario A , descrito por la ecuación (2), puede ser expresado como el producto entre el tiempo de transmisibilidad, τ , y el número promedio de personas expuestas, c^{35} . Entonces a partir de la identidad $A = \tau \cdot c$, se obtiene

$$c = \frac{A_0}{\tau} (1 - \lambda)^k.$$

Por lo tanto, el parámetro de esfuerzo tiene el potencial de reducir el número promedio de personas expuestas al día k e implícitamente está relacionado con una medida de distanciamiento social. Así, fijando una cantidad esperada de personas expuestas al día k , es posible determinar el valor de esfuerzo necesario para tal objetivo.

Balance de las medidas de mitigación en Chile

La hospitalización y el tratamiento oportuno de pacientes críticos depende de la disponibilidad del equipamiento médico adecuado que en su conjunto constituyen las camas críticas. En este trabajo desarrollamos un modelo matemático que describe la entrada y salida de pacientes críticos a servicios hospitalarios, cuyo colapso dependerá de los esfuerzos colectivos por reducir futuros contagios o aumentar la capacidad de respuesta y generar medidas de contención como las que realizó China en la construcción rápida de instalaciones hospitalarias con camas críticas⁵.

Controlar el aumento de nuevos casos de COVID-19 es responsabilidad de todos. En virtud de esto, el gobierno chileno ha respondido con un conjunto de medidas con el objetivo de contener la propagación del virus. Específicamente, el 16 de marzo de 2020, fecha en la

cual se declaró oficialmente estar en fase 4 debido a la dispersión comunitaria de la enfermedad, se estableció la suspensión de todo tipo de actividades educativas por 14 días en establecimientos educacionales del sector público y privado, incluyendo jardines infantiles. También, el cierre de fronteras terrestres, aéreas y marítimas por 15 días, y la prohibición de actividades que convoquen a más de 200 personas²⁰, cantidad posteriormente reducida a 50 personas. Luego de dos días, se decretó Estado de Catástrofe por 90 días a partir de las 00:00 horas del 19 de marzo con el objetivo de anticipar a futuros escenarios de la pandemia. Adicionalmente, con el objetivo de intensificar el distanciamiento social, se decretó el cierre total de cines, teatros, restaurantes, pubs, discotecas y eventos deportivos independientes con fecha del 20 de marzo de 2020³⁶ y toque de queda a partir de las 22:00 hasta las 05:00 horas²⁹. Sin embargo, a la luz de las experiencias internacionales, estas medidas parecen ser insuficientes para reducir el avance del virus de manera efectiva³⁷. Desde los municipios y el Colegio Médico de Chile, surgieron nuevas medidas que consideran desde el cierre total del comercio formal e informal, hasta el cierre programado de ciudades completas. En este sentido, el gobierno decretó cuarentenas, aduanas y cordones sanitarios en zonas específicas del territorio nacional que presentan la mayor cantidad de casos o brotes epidémicos²⁹. Acciones más recientes establecen la extensión de la suspensión de clases por dos semanas para todo el sistema escolar a contar del lunes 30 de marzo³⁸.

Frente a un incremento de los casos de COVID-19 en nuestro país, el gobierno estima que el máximo de los casos ocurrirá a fines de abril y principios de mayo, preparándose para atender a 100 mil personas simultáneamente. Para esto ha destinado recursos con el objetivo de extender la capacidad hospitalaria a 43 mil camas y la adquisición de 800 ventiladores mecánicos, aumentando así el número de camas críticas. Adicionalmente, autoridades chinas donarán más de 1000 equipos del mismo tipo.

Los resultados de los modelos que presentamos en este artículo establecen la necesidad de realizar constantes esfuerzos de manera oportuna para evitar el colapso del sistema hospitalario nacional, lo cual requiere extremar las medidas de distanciamiento y aislamiento social lo más rápidamente posible, aumentar el diagnóstico temprano a través de equipos qPCR en diversas partes del país (en esto es clave la colaboración de universidades y centros de investigación que cuenten con ese equipamiento), en conjunto al lavado constante y profuso de nuestras manos y espacios de trabajo. Reducir la propagación del COVID-19 es tarea de todos, sin embargo, debe ser liderado con estrategias efectivas y rápidas que promuevan la prevención y participación activa entre las autoridades, expertos y la comunidad.

Actualmente, también existen programas virtuales que modelan matemáticamente la situación de contagio que podrían estar enfrentando en los próximos días los hospitales³⁵. Estos permiten que los hospitales y las autoridades sanitarias puedan priorizar la demanda en salud para la atención a los casos de pacientes con COVID-19 y al mismo tiempo, se pueda tomar medidas más severas de distanciamiento social evitando que los casos de COVID-19 sobrepasen las capacidades humanas y materiales de los centros de salud. Sin embargo, este enfoque de modelación está sujeto a la capacidad que posean los laboratorios para realizar el oportuno diagnóstico de pacientes con COVID-19 precisando los casos confirmados en una determinada región, así como conocer la cantidad efectiva de pacientes hospitalizados. Mientras más específica sea la información de entrada, el modelo brindará una predicción más precisa. Específicamente, el modelamiento realizado por el equipo de salud predictivo de la Universidad de Pennsylvania³⁵ se basa en la calibración del clásico modelo epidemiológico SIR (Susceptible-Infecioso-Removido)³⁹, considerando una tasa de contagio dependiente del tiempo promedio de duplicación. De este modo, el surgimiento de un brote epidémico dependerá si el número reproductivo básico, definido por el cociente entre la tasa de contagio y la tasa de removidos, es mayor a uno. La calibración de este modelo considera parámetros relevantes, llamados parámetros severos (por ejemplo, porcentaje de pacientes en ventilación, número promedio de días en UCI/UTI, entre otros) los cuales también son relevantes en la presente investigación. Sin embargo, no considera esfuerzos por reducir el incremento porcentual diario. Si bien la descripción del método menciona que la tasa de contagio es dependiente del número de individuos expuestos, incorporando implícitamente la variable de distanciamiento social, esto no es del todo cierto, pues aquel supuesto es reemplazado por la tasa de duplicación.

En un escenario epidémico, la curva de nuevos casos (correspondiente al grupo de infecciosos) tendrá una forma acampanada tal como ocurre en las proyecciones realizadas con el modelo SIR. Al inicio, el aumento de los nuevos casos ocurre a un ritmo exponencial cuya limitante principal, resultando en un posterior decaimiento, es la reducción de individuos susceptibles. Este control autónomo no debe ser el esperado, siendo urgente la ejecución de medidas que reduzcan rápidamente el incremento porcentual diario.

El modelo desarrollado en el presente trabajo asume el principio de uniformidad respecto a sus parámetros. En particular, la capacidad

hospitalaria es un elemento clave de todo sistema de salud cuyo fortalecimiento es posible a través de la adquisición de nuevas de camas críticas. Actualmente, los países afectados por el COVID-19 se encuentran enfocados a la tarea de fortalecer su capacidad hospitalaria. En nuestro país, se espera la llegada de 871 nuevos respiradores mecánicos para fines del mes de abril e inicios de mayo, lamentablemente durante el *peak* de casos, y estarán operativos a fines de mayo⁴⁰. La incorporación de cierta flexibilidad creciente en la capacidad hospitalaria podría complejizar nuestro modelo, permitiendo por ejemplo evaluar la cantidad óptima de camas críticas en relación al esfuerzo realizado para disminuir el incremento porcentual diario u otras variables de interés. Asimismo, es importante disponer de los datos atinentes a la realidad nacional que permitan estimar los tiempos promedio de tratamiento (γ^{-1} y μ^{-1}) para realizar proyecciones más certeras y así, anticiparse a la evolución del COVID-19 en nuestro país. En virtud de lo anterior, el Ministerio de Ciencia actualmente trabaja en dejar a disposición los datos de contagio en Chile con fines investigativos y académicos⁴¹.

Palabras finales

Sin duda que ejecutar medidas que impidan la propagación del COVID-19 y que implican el aislamiento de la sociedad, tiene consecuencias negativas para la economía y la libertad de movimiento de las personas. Estas medidas comprometen la estabilidad económica de una gran cantidad de pequeñas y medianas empresas, y repercuten significativamente en los ingresos y fuentes de trabajo de miles de chilenos e incluso afectan la salud mental debido a un posible escenario de cesantía.

La salud y el bienestar de la población debe estar por sobre de cualquier interés o acción individual y, más aún, considerando que el grupo de mayor riesgo lo componen los adultos mayores, quienes corresponden al 22,9% de la población chilena (4 350 100 de personas) y personas con enfermedades crónicas. Asimismo, no debemos olvidar a personas en situación de calle y personas privadas de libertad, quienes debido a sus precarias condiciones de vida también constituyen grupos de riesgo.

Pensar en esto conlleva a reflexionar sobre cuál es nuestro rol en la sociedad y hasta qué punto nuestras decisiones individuales afectan la vida de otros, nunca olvidando que Chile posee recursos limitados para atender síndromes respiratorios agudos como el COVID-19. A lo anterior se debe agregar que se acerca la temporada de otras patologías virales comunes en el país con compromiso respiratorio como la influenza estacional, adenovirus y virus sincicial respiratorio que también requerirán del uso de servicios hospitalarios y personal de salud con capacidad de respuesta inmediata.

Apéndice

A. Condición de no colapso (NC)

Assumiremos que la tasa λ ($\lambda \neq 0$) que reduce el incremento porcentual diario actúa desde el primer día. Consideramos también inicialmente que la capacidad del hospital es plena, esto es, $H_0 = 0$. De modo que $H_k = 0$ para todo $k < l$, es decir, permanece vacío al menos hasta antes de $k = l$, instante

que llegan los primeros αC_0 (observemos que hemos supuesto $C_0 = 1$) pacientes críticos. Considerando que se está preparado para este flujo inicial (se supone $\alpha C_0 < \Lambda$) se realiza su inmediata hospitalización $H_l = \alpha C_0 = \alpha$. Notemos que mientras exista capacidad se tiene que $H_{k+l} = BH_k + \alpha N_{k-l}$, con $B = 1 - \gamma - \mu$, para $k \geq l$.

Entonces, con la convicción $N_{-l} = C_0$, tenemos $H_{l+1} = \alpha(BN_{-1} + N_0)$, $H_{l+2} = \alpha(B^2N_{-1} + BN_0 + N_1)$, $H_{l+3} = \alpha(B^3N_{-1} + B^2N_0 + BN_1 + N_2)$, y así prosiguiendo recursivamente. Por lo tanto, por el método inductivo, obtenemos

$$H_k = \alpha \sum_{j=0}^{(k-l)-1} B^{(k-l)-j} N_{j-1}. \quad (6)$$

Esta expresión cuantifica a los individuos en tratamiento hospitalario mientras exista capacidad, esto es, si y sólo si se verifica la desigualdad $\alpha N_{k-l} < \Lambda - H_k$, que reemplazando el valor de H_k obtenido, es equivalente a:

$$N_{k-l} + \sum_{j=0}^{(k-l)-1} B^{(k-l)-j} N_{j-1} < \Lambda/\alpha.$$

Expresión que al factorizar la sumatoria por $B^{(k-l)-1}$, al aislar el primer término y recordar que $N_{-1} = C_0$, se obtiene la condición de no colapso (**NC**) enunciada.

B. Condición de no colapso (CT)

Notese que la condición (**NC**) se puede escribir como

$$N_{k-l} + B^{(k-l)-1} \sum_{j=0}^{(k-l)-1} N_j/B^j + B^{k-l} C_0 < \Lambda/\alpha.$$

Respecto a la sumatoria de esta desigualdad, observemos que si denotamos $q = k - l$ y $B_* = 1/B$, tenemos que, al aplicar la fórmula de Abel (suma por partes), obtenemos la igualdad

$$\sum_{j=0}^{q-1} N_j/B^j = \sum_{j=0}^{q-1} \Delta C_j B^j = [C_q B_*^q - C_0] - \sum_{j=0}^{q-1} C_{j+1} \Delta B_*^j.$$

Como ΔB_*^j es igual a $(B_* - 1)B_*^j$, al escribir en la expresión anterior B^* en función de B , se obtiene

$$\sum_{j=0}^{q-1} N_j/B^j = \left[\frac{C_q}{B^q} - C_0 \right] - \frac{1-B}{B} \sum_{j=0}^{q-1} \frac{C_{j+1}}{B^j}.$$

Así al reemplazar este último valor en la sumatoria del lado izquierdo de la condición de no colapso (**NC**), tenemos

$$N_q + B^{q-1} \left[\frac{C_q}{B^q} - C_0 - \frac{1-B}{B} \sum_{j=0}^{q-1} \frac{C_{j+1}}{B^j} \right] + B^q C_0.$$

Usando que $N_q = C_{q+1} - C_q$, distribuyendo el factor B^{q-1} (que luego se introduce a la sumatoria) y usando el cambio $i = j + 1$ y reordenando, tenemos

$$C_{q+1} - \left(\frac{1}{B} - 1 \right) C_q + B^q C_0 \left(1 - \frac{1}{B} \right) - \frac{1-B}{B} \sum_{i=1}^q B^{q-i} C_i.$$

Ahora, factorizando por $(1-B)/B$ y haciendo que la sumatoria absorba el término $B^q C_0$, nos queda reducidamente

$$C_{q+1} + \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \left(C_q - \sum_{i=1}^q B^{q-i} C_i \right).$$

Finalmente, la condición de no colapso (**CT**) sigue restando C_q con el último término de la sumatoria y reemplazando $q = k - l$.

C. Colapso inminente sin control

En ausencia de medidas de control ($\lambda = 0$) el colapso del sistema hospitalario sucederá prontamente. Dado que los casos totales aumentan a un ritmo exponencial, los nuevos casos también. Entonces, considerando $N_k = A_0(1 + A_0)^k$ (que es (3) con $\lambda = 0$) y que H_k está dado por la ecuación (6), tenemos

$$\begin{aligned} H_k &= \alpha B^{k-l} C_0 + \alpha A_0 B^{k-l-1} \sum_{j=0}^{k-l-1} \left(\frac{1 + A_0}{B} \right)^j, \\ &= \alpha B^{k-l} C_0 + \alpha A_0 \frac{B^{k-l} - (1 + A_0)^{k-l}}{B - (1 + A_0)}, \end{aligned}$$

Con lo que la condición $\alpha N_{k-l} + H_k < \Lambda$, queda

$$A_0(1 + A_0)^{k-l} \left(\frac{1 + \gamma + \mu + A_0}{\gamma + \mu + A_0} \right) + B^{k-l} \left(\frac{\gamma + \mu}{\gamma + \mu + A_0} \right) < \frac{\Lambda}{\alpha}.$$

Observemos que, en la anterior expresión los únicos términos que dependen de la variable temporal, k , son $(1 + A_0)^{k-l}$ y B^{k-l} . Como la primera base es mayor que uno (crece con k) y la segunda menor que uno (decrece con k), necesariamente existe un entero positivo k^* función de todos los parámetros, en el cual el lado izquierdo de esta desigualdad alcanza o sobrepasa la cota Λ/α . Esto es, al k^* -ésimo día colapsa el sistema hospitalario.

Notas

Roles y contribuciones de autoría

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

Fuentes de financiamiento

Los autores declaran que no hubo fuentes de financiación externas.

Declaración de conflictos de intereses

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

Agradecimientos

Agradecemos al programa de Doctorado en Modelamiento Matemático Aplicado, a la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado (VRIP) y al Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Maule (CIEAM), Todos pertenecientes a la Universidad Católica del Maule.

Referencias

1. Wu JT, Leung K, Leung GM. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. *Lancet*. 2020 Feb 29;395(10225):689-697. | CrossRef | PubMed |
2. Lai CC, Shih TP, Ko WC, Tang HJ, Hsueh PR. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and coronavirus disease-2019 (COVID-19): The epidemic and the challenges. *Int J Antimicrob Agents*. 2020 Mar;55(3):105924. | CrossRef | PubMed |
3. OMS. Preparación y respuesta ante una pandemia de influenza: Documento de orientación de la OMS. 2009. [On line]. | Link |
4. OMS. Coronavirus disease (COVID-19) Situation Dashboard. 2020. [On line]. | Link |
5. Remuzzi A, Remuzzi G. COVID-19 and Italy: what next? *Lancet*. 2020 Mar 13. pii: S0140-6736(20)30627-9. | CrossRef | PubMed |
6. Paterlini M. On the front lines of coronavirus: the Italian response to covid-19. *BMJ*. 2020 Mar 16;368:m1065. | CrossRef | PubMed |
7. Barado J, Guergué JM, Esparza L, Azcárate C, Mallor F, Ochoa S. A mathematical model for simulating daily bed occupancy in an intensive care unit. *Crit Care Med*. 2012 Apr;40(4):1098-104. | CrossRef | PubMed |
8. Costa AX, Ridley SA, Shahani AK, Harper PR, De Senna V, Nielsen MS. Mathematical modelling and simulation for planning critical care capacity. *Anaesthesia*. 2003 Apr;58(4):320-7. | PubMed |
9. Khalili S, Ghodoosi M, Hasanpour J. The Optimal Number of Hospital Beds Under Uncertainty: A Costs Management Approach. *J Optim Ind Eng*. 2018;11(2):129-38. | CrossRef |
10. Allred S, McQuade M, Merrill N, Piccoli B, Spielman D, Villacis C, et al. Regional health system shortfalls with a novel COVID-19 model. 2020. [On line]. | Link |
11. Córdova-Lepe F, Gutiérrez-Aguilar R, Gutiérrez-Jara JP. Number of COVID-19 cases in Chile at 120 days with data at 21/03/2020 and threshold of daily effort to flatten the epi-curve. *Medwave*. 2020 Mar 27;20(2):e7861. | CrossRef | PubMed |
12. Rechel B, Wright S, Barlow J, McKee M. Hospital capacity planning: from measuring stocks to modelling flows. *Bull World Health Organ*. 2010 Aug 1;88(8):632-6. | CrossRef | PubMed |
13. Casella M, Rajnik M, Cuomo A, Dulebohn SC, Di Napoli R. Features, Evaluation and Treatment Coronavirus (COVID-19). *StatPearls*. 2020. | PubMed | Link |
14. Grasselli G, Pesenti A, Cecconi M. Critical Care Utilization for the COVID-19 Outbreak in Lombardy, Italy: Early Experience and Forecast During an Emergency Response. *JAMA*. 2020 Mar 13. | CrossRef | PubMed |
15. 24Horas. Chile en segundo lugar: el ranking de países con más contagios en Sudamérica. 2020. [On line]. | Link |
16. LaTercera. La comparación de Chile con otros países a dos semanas del primer caso. La Tercera. 2020. [On line]. | Link |
17. PAHO. Cumulative COVID-19 cases reported by countries and territories in the Americas. 2020. [On line]. | Link |
18. El Desconcierto. Coronavirus colapsó totalmente a Italia: recintos médicos dejarán de atender a adultos mayores. *ElDesconcierto*. 2020. [On line]. | Link |
19. OECDlibrary. Health at a Glance 2019: OECD Indicators. 2020. [On line]. | Link |
20. MINSAL. Coronavirus en Chile pasa a fase 4 y Presidente anuncia cierre de fronteras. 2020. [On line]. | Link |
21. MINSAL. Ministro de Salud es designado como Coordinador Interministerial del Plan de Coronavirus. 2020. [On line]. | Link |
22. Enríquez J. Fuerzas Armadas ofrecen apoyo al gobierno para enfrentar coronavirus: casi 600 camas disponibles. *BioBioChile*. 2020. [On line]. | Link |
23. Stange B. Hospital de emergencia en Espacio Riesco: Tiene tres edificios y 800 camas de primer nivel. *24Horas*. 2020. [On line]. | Link |
24. MINSAL. Unidad de Gestión Centralizada de Camas, UGCC: Período Enero 2014 – Diciembre 2017. 2018. [On line]. | Link |
25. Mora S. Mañalich: “Es posible llegar al 1 de abril con más de 40 mil casos” de coronavirus en Chile [Internet]. *24Horas*. 2020. [On line]. | Link |
26. GobiernodeChile. Ministerio de Salud informa 342 casos confirmados de COVID-19 en Chile y anuncia nuevas medidas sanitarias. 2020. [On line]. | Link |
27. GobiernodeChile. Ministerio de Salud informa de 537 casos confirmados de COVID-19 en el país. 2020. [On line]. | Link |
28. GobiernodeChile. Casos confirmados de COVID-19 a nivel nacional. 2020. [On line]. | Link |
29. GobiernodeChile. Plan de acción por Coronavirus. 2020. [On line]. | Link |
30. GobiernodeChile. Ministerio de Salud reporta primer fallecido por Covid-19 en Chile. 2020. [On line]. | Link |
31. GobiernodeChile. Ministerio de Salud confirma fallecimiento por COVID-19. 2020. [On line]. | Link |
32. Guan WJ, Ni ZY, Hu Y, Liang WH, Ou CQ, He JX, et al. Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China. *N Engl J Med*. 2020 Feb 28. | CrossRef | PubMed |
33. Li Q, Guan X, Wu P, Wang X, Zhou L, Tong Y, et al. Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus-Infected Pneumonia. *N Engl J Med*. 2020 Mar 26;382(13):1199-1207. | CrossRef | PubMed |
34. WHO. Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). 2020. [On line]. | Link |

35. Predictive Healthcare team. COVID-19 Hospital Impact Model for Epidemics (CHIME). 2020. [On line]. | [Link](#) |
36. GobiernoChile. Ministerio de Salud anuncia nuevas medidas sanitarias para enfrentar el Coronavirus. 2020. [On line]. | [Link](#) |
37. Choi SC, Ki M. Estimating the reproductive number and the outbreak size of Novel Coronavirus disease (COVID-19) using mathematical model in Republic of Korea. *Epidemiol Health*. 2020 Mar 12:e2020011. | [CrossRef](#) | [PubMed](#) |
38. GobiernoChile. Gobierno extiende la suspensión de clases, adelanta las vacaciones de invierno y anuncia nuevas medidas sanitarias para Chiloé y Puerto Williams. 2020. [On line]. | [Link](#) |
39. Kermack WO, McKendrick AG. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc R Soc A Math Phys Eng Sci*. 1927 Aug 1;115(772):700–21. [On line]. | [Link](#) |
40. Albert C, Miranda B. Minsal inicia operación para evitar colapso de hospitales: reparte 60 ventiladores mecánicos nuevos. CIPER. 2020. [On line]. | [Link](#) |
41. Ministerio de Ciencia, Tecnología C e I. Mesa de datos COVID-19 se constituye para disponibilizar datos para la investigación. 2020. [On line]. | [Link](#) |

Correspondencia a

Avenida San Miguel 3605
Talca, 3480112
Chile



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