



Revista Habanera de Ciencias Médicas

ISSN: 1729-519X

Universidad de Ciencias Médicas de la Habana

Sánchez Vargas, Héctor Eduardo; Taramona Ruiz, Luis Alberto; Salgado Rodríguez, Amyrsa; Huatuco Lozano, Maribel; Castillo Picón, Fernando
Simulación de escenarios para predecir el comportamiento de la COVID-19 en Perú
Revista Habanera de Ciencias Médicas, vol. 20, núm. 6, e4394, 2021, Noviembre-Diciembre
Universidad de Ciencias Médicas de la Habana

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180473611018>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org



redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Simulación de escenarios para predecir el comportamiento de la COVID-19 en Perú

Scenario simulation to predict the behavior of COVID-19 in Peru

Héctor Eduardo Sánchez Vargas^{1*} , Luis Alberto Taramona Ruiz² , Amyrsa Salgado Rodríguez¹ 
Maribel Huatuco Lozano² , Fernando Castillo Picón³ 

¹Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”. Camagüey, Cuba.

²Universidad “Le Cordon Bleu”. Lima, Perú.

³Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”. Huaraz, Perú.

*Autor para la correspondencia: hectorsanvar2012@gmail.com

Cómo citar este artículo

Sánchez Vargas HE, Taramona Ruiz LA, Salgado Rodríguez A, Huatuco Lozano M, Castillo Picón F. Simulación de escenarios para predecir el comportamiento de la COVID-19 en Perú. Rev haban cienc méd [Internet]. 2021 [citado]; 20(6):e4394. Disponible en: <http://www.revhabanera.sld.cu/index.php/rhab/article/view/4394>

Recibido: 1^o de Septiembre del año 2021

Aprobado: 1^o de Noviembre del año 2021

RESUMEN

Introducción: La COVID-19 ha constituido un reto de múltiples dimensiones para la humanidad, aún más para los decisores responsables de accionar de manera certera y oportuna para su enfrentamiento. En Perú, con una tendencia actual favorable de la Pandemia, es inminente la propagación de la variante *Delta*, de allí que requieran de informaciones predictivas que posibiliten adoptar decisiones anticipadas para mitigar sus efectos.

Objetivo: Simular escenarios aplicando la modelación físico-matemática, para la predicción del comportamiento de la COVID-19 en Perú que facilite la toma de decisiones.

Material y Métodos: Modelación físico-matemática mediante herramientas y funciones del *software* MATLAB.

Resultados: Determinación del comportamiento de las principales variables de la COVID-19 en Perú; modelo físico-matemático basado en el clásico SIR con nuevos compartimientos relacionados con la vacunación y los expuestos, así como su ajuste a los datos de Perú; simulación de escenarios, incluyendo la variante *Delta*, para fallecidos, infectados acumulados, infectados no vacunados e infectados vacunados.

Conclusiones: El modelo concebido para la simulación de escenarios de evolución de la COVID-19, demostró su capacidad de predicción del comportamiento de las variables más importantes que determinan dicha evolución en Perú; debe ocurrir otra ola de contagios y llegarse a cifras acumulativas entre 2,9 y 3,36 millones de infectados y entre 215 y 255 mil fallecidos; las principales estrategias de mitigación deben dirigirse a garantizar el distanciamiento y aislamiento social, así como a incrementar el régimen de vacunación.

Palabras Claves:

COVID-19, simulación de escenarios, variante *Delta*, modelación físico-matemática.

ABSTRACT

Introduction: COVID-19 has been a multi-dimensional challenge for humanity, even more so for decision-makers responsible for acting in an accurate and timely manner to confront it. In Peru, with a current favorable trend of the Pandemic, the spread of the Delta variant is imminent, hence the need for predictive information that makes it possible to make early decisions to mitigate its effects.

Objective: To simulate scenarios applying the physical-mathematical modeling to predict the behavior of COVID-19 in Peru and facilitate decision-making.

Material and Methods: Physical-mathematical modeling using MATLAB software tools and functions.

Results: Determination of the behavior of the main variables associated with COVID-19 in Peru; physical-mathematical modeling based on the classic SIR with new compartments related to vaccination and those exposed, as well as its adjustment to the data from Peru; simulation of scenarios including the Delta variant for deceased persons, cumulative number of infected individuals, and infection in vaccinated and unvaccinated individuals.

Conclusions: The model conceived for the simulation of COVID-19 evolution scenarios demonstrated its ability to predict the behavior of the most important variables that determine such evolution in Peru; another wave of infections may occur and cumulative figures between 2.9 and 3.36 million infected individuals and between 215 and 255 thousand deaths may be reached. The main mitigation strategies should be aimed at guaranteeing social distancing and isolation, as well as increasing the vaccination regimen.

Keywords:

COVID-19, scenario simulation, Delta variant, physical-mathematical modeling.



INTRODUCCIÓN

El nuevo coronavirus SARS-CoV-2 causante de la COVID-19, apareció a finales de 2019 en la ciudad china de Wuhan, y el 11 de marzo de 2020 ya la Organización Mundial de la Salud (OMS)⁽¹⁾ la catalogaba como pandemia. Desde la confirmación de los primeros casos y hasta el 26 de julio de 2021 la Organización Panamericana de la Salud (OPS)⁽²⁾ había notificado 194 080 019 casos confirmados de la COVID-19 y 4 162 304 fallecidos en el mundo.

Entre los países más afectados en cuanto al número de casos se encontraban los Estados Unidos, India y Brasil, con más de 19 millones cada uno, seguidos de Rusia, Francia, Reino Unido y Turquía, con más de cinco millones.⁽³⁾ Mientras en la región de las Américas se habían notificado, desde la detección de los primeros casos y hasta finales de julio de 2021, un total de 74 734 644 casos confirmados por la COVID-19 (39 % del total mundial) y 1 960 619 de fallecidos (48 % del total del planeta). Estos resultados la ubicaron como epicentro de la pandemia.⁽²⁾

Ante la problemática impuesta por la COVID-19 resulta necesario tener una visión de los factores que determinan su evolución, así como realizar previsiones basadas en sustentos científicos que permitan adoptar decisiones para su enfrentamiento, y que viabilicen una planificación efectiva de los recursos materiales y humanos requeridos para ello. En este sentido son varios los frentes que se deberían tener en cuenta, entre ellos: el perfeccionamiento de protocolos terapéuticos; el desarrollo de vacunas; la vigilancia epidemiológica y el estudio de tendencias, para el cual se han utilizado ampliamente los modelos matemáticos,^(4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14) que posibilitan la predicción y determinación del número de reproducción efectivo de la epidemia (R_t), el que caracteriza su comportamiento.^(14,15,16,17,18,19)

Los aumentos en la transmisión a nivel mundial parecen estar determinados por cuatro factores fundamentales: circulación de variantes del virus más transmisibles, relajamiento de las medidas sociales de salud pública originalmente destinadas a controlar la transmisión, aumento de la interacción social y la gran cantidad de personas que siguen siendo susceptibles a la infección por la COVID-19 debido a la baja cobertura de vacunación en todo el mundo.⁽³⁾ La manifestación de algunos de estos aspectos en Perú fueron objetos de estudio de este trabajo.

Perú es uno de los países de América que más ha sido afectado por esta pandemia. Hasta el momento del cierre de esta investigación se habían contagiado 2 102 904 personas y fallecido 195 795.⁽²⁾ Tales datos ubicaban al país como uno de los de mayor letalidad con 9,31 %, muy superior a la media mundial (2,14 %). Estas estadísticas motivaron al seguimiento de la evolución de la pandemia en el país y estudiar los elementos que pudieran agravar la situación, así como identificar las posibles decisiones a adoptar para mitigar sus efectos negativos.

En correspondencia se propuso como **objetivo** de esta investigación: simular escenarios, aplicando la modelación físico-matemática, para la predicción del comportamiento de la COVID-19 en Perú que facilite las decisiones.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se aplicó el método matemático en un estudio de tipo predictivo al diseñar un modelo físico-matemático basado en el clásico SIR, con nuevos compartimientos relacionados con la vacunación y los expuestos, para simular el comportamiento de los factores más importantes que determinan la evolución de la COVID-19 en posibles escenarios a enfrentarse en Perú hasta mayo de 2022.

Para caracterizar el comportamiento evolutivo de la pandemia se determinó en qué medida había cambiado el número de infectados activos (I) por días desde su aparición hasta finales de julio del 2021 en Perú.

El valor de (I) se determinó como la diferencia entre: infectados acumulados (I_A), fallecidos (F) y recuperados (R).

(1)

$$I = I_A - F - R$$

Los datos (I_A , F, R) se presentan en la **Tabla 1**.⁽²⁰⁾

Tabla 1- Datos del reporte diario de la pandemia en Perú

Fecha	Nuevos casos	Infestados acumulados (I_A)	Infestados actuales	Fallecidos (F)	Recuperados (R)
30-5-2021	0	1947555	43940	183391	1720224
31-5-2021	7914	1955469	45109	183783	1726577
1-6-2021	0	1955469	34618	184021	1736830
2-6-2021	9963	1965432	40143	184942	1740347
3-6-2021	0	1965432	40143	184942	1740347
4-6-2021	10734	1976166	43911	185813	1746442
5-6-2021	4225	1980391	43146	186073	1751172
6-6-2021	0	1980391	38337	186073	1755981
7-6-2021	3179	1983570	41516	186511	1755543
8-6-2021	1429	1984999	37444	186757	1760798
9-6-2021	2934	1987933	40378	187157	1760398
10-6-2021	7324	1995257	39788	187847	1767622
11-6-2021	2799	1998056	42587	188100	1767369
12-6-2021	0	1998056	32624	188100	1777332
13-6-2021	5569	2003625	38193	188708	1776724
14-6-2021	0	2003625	27459	188708	1787458
15-6-2021	3852	2007477	27086	189261	1791130
16-6-2021	0	2007477	27086	189261	1791130
17-6-2021	12239	2019716	36146	189757	1793813
18-6-2021	3463	2023179	38180	189933	1795066
19-6-2021	0	2023179	35246	189933	1798000
20-6-2021	3550	2026729	31472	190202	1805055
21-6-2021	3882	2030611	32555	190645	1807411
22-6-2021	0	2030611	32555	190645	1807411
23-6-2021	2995	2033606	29981	190906	1812719
24-6-2021	2843	2036449	32824	191073	1812552
25-6-2021	6813	2043262	35785	191447	1816030
26-6-2021	0	2043262	35785	191447	1816030
27-6-2021	2795	2046057	26341	191584	1828132
28-6-2021	2058	2048115	24936	191899	1831280
29-6-2021	0	2048115	24936	191899	1831280
30-6-2021	3950	2052065	25336	192331	1834398
1-7-2021	5489	2057554	26943	192687	1837924
2-7-2021	0	2057554	26943	192687	1837924
3-7-2021	0	2057554	23948	192687	1840919
4-7-2021	7559	2065113	28664	193230	1843219
5-7-2021	1564	2066677	23415	193389	1849873
6-7-2021	2374	2069051	25789	193588	1849674
7-7-2021	2586	2071637	25580	193743	1852314
8-7-2021	2549	2074186	26071	193909	1854206

Fuente: <https://github.com/datasets/covid-19>⁽²⁰⁾

El comportamiento de la cantidad de I_A al inicio de la pandemia fue graficado y posteriormente se realizó un análisis de tendencia apoyado en la aplicación de una variante del modelo SIR de Kermack y McKendrick,⁽⁶⁾ modelo de compartimientos utilizado para la modelación de epidemias. Como indica su nombre (SIR), originalmente solo se empleaban los compartimientos de susceptibles (S), infectados (I) y recuperados (R). Desde el punto de vista físico, cada compartimiento representa el estado o condición de una fracción de la población: susceptibles, infectados y recuperados. Matemáticamente, el modelo lo compone un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias y su solución permite determinar cómo cambian S, I y R a través del tiempo.

El modelo SIR clásico ha sido enriquecido por autores como Lin, *et al.*,⁽⁸⁾ Read, *et al.*,⁽¹⁹⁾ Sánchez, *et al.*,⁽¹²⁾ Taramona, *et al.*,⁽²¹⁾ y Wang, *et al.*,⁽¹³⁾ quienes emplearon un número importante de variantes transformándolo en nuevos modelos. El modelo físico empleado en este trabajo (**Figura 1**) fue concebido teniendo en cuenta el comienzo de una campaña de vacunación con efectos todavía discretos en la evolución de la pandemia en Perú.

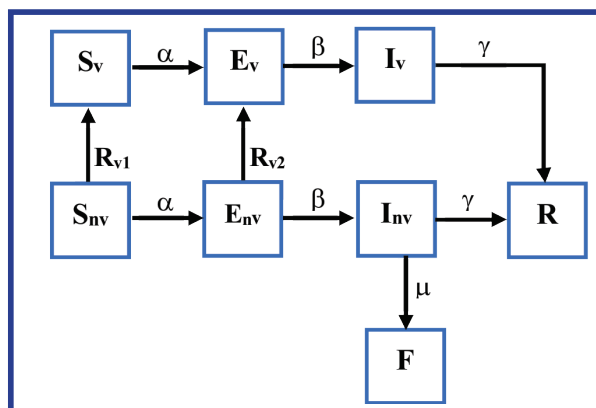


Figura 1- Estructura del modelo físico propuesto

Ante esta nueva realidad, al modelo se le añadió un grupo de compartimientos relacionados con la vacunación y la exposición de los individuos susceptibles:

- S_v – personas susceptibles al contagio, que están vacunadas y no están expuestas
- S_{nv} – personas susceptibles al contagio, que no están vacunadas ni expuestas
- E_v – personas susceptibles al contagio, que están vacunadas y expuestas
- E_{nv} – personas susceptibles al contagio, que no están vacunadas y están expuestas
- I_v – personas infectadas, que están vacunadas
- I_{nv} – personas infectadas, que no están vacunadas

El grupo E_v concierne a aquellas personas que pueden ser infectadas, pero con una evolución favorable por contar con los anticuerpos neutralizantes proporcionados por la vacunación. En este caso se tuvo en cuenta que las vacunas que combaten la enfermedad en Perú son las de AstraZeneca, Sinopharm y Pfizer, las que evitan en un elevado porcentaje, la evolución hacia formas graves de la enfermedad.^(22,23,24) Estos datos condujeron a considerar que si este grupo se convierte en infectados vacunados (I_v), su evolución siempre será hacia la recuperación, aunque con capacidad de contagio; los infectados susceptibles activos que no han sido vacunados (I_{nv}) sí podrían evolucionar hacia formas graves y fallecer. Se definió como infectados acumulados (I_{ac}), a la suma de I_v e I_{nv} .

Las letras griegas β , γ , μ son las velocidades específicas de infestación, recuperación y muerte, respectivamente. La letra α es un parámetro asociado al grado de exposición de las personas susceptibles y R_V es el régimen de vacunación (cantidad de personas que se vacunan diariamente), que está dividido en dos fracciones: (f_x) que tiene que ver con la vacunación de los S_{nv} y $(1-f_x)$ con la vacunación de los E_{nv} .

Para la deducción del modelo matemático y teniendo en cuenta las características de la pandemia, se partió de los siguientes supuestos:

a) Existe una mezcla homogénea de infectados (I_{nv} e I_v) y los susceptibles expuestos (E_v y E_{nv}), por lo que toda la población expuesta tiene la misma probabilidad de ser contagiada. Las poblaciones S_v y S_{nv} no tiene posibilidad de contagio.

b) La velocidad de nuevos contagios es proporcional al número de infectados (I_{nv} e I_v) y de susceptibles expuestos (E_v y E_{nv}) que se pongan en contacto.

c) El desenlace de la enfermedad para los I_{nv} es la muerte (F) o la inmunidad completa (R). El desenlace para los I_v es recuperarse.

d) La velocidad específica de infestación β es proporcional al número de infectados y es la misma para cualquiera de los dos tipos de infectados.

e) La población total es contante y el sistema es cerrado, o sea, no se tienen en cuenta los nacimientos, las muertes por otras causas, ni las migraciones.

f) La suma de todos los grupos poblacionales representa la población total de Perú (N), considerada como 32 162 184 personas, según reportes del Instituto Nacional de Estadística e Información:⁽²⁵⁾

$$(2) \quad N = S_{nv} + S_v + E_{nv} + E_v + I_{nv} + I_v + R + F$$

El modelo matemático se obtuvo a partir del balance de masa aplicado a cada grupo poblacional y está compuesto por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$(3) \quad \frac{dS_{nv}}{dt} = -\alpha S_{nv} - f_x Rv$$

$$(4) \quad \frac{dS_v}{dt} = f_x Rv - \alpha S_v$$

$$(5) \quad \frac{dE_v}{dt} = \alpha S + (1-f_x) Rv - \beta E_v I_v - \beta E_v I_{nv}$$

$$(6) \quad \frac{dE_{nv}}{dt} = \alpha S_{nv} - (1-f_x) Rv - \beta E_{nv} I_v - \beta E_{nv} I_{nv}$$

$$(7) \quad \frac{dI_v}{dt} = \beta E_v I_v + \beta E_v I_{nv} - \gamma I_v$$

$$(8) \quad \frac{dI_{nv}}{dt} = \beta E_{nv} I_v + \beta E_{nv} I_{nv} - \gamma I_{nv} - \mu I_{nv}$$

$$(9) \quad \frac{dI_{ac}}{dt} = \beta E_{nv} I_v + \beta E_{nv} I_{nv} + \beta E_v I_v + \beta E_v I_{nv}$$

$$(10) \quad \frac{dR}{dt} = \gamma I_{nv} + \gamma I_v$$

$$(11) \quad \frac{dF}{dt} = \mu I_{nv}$$

Antes de usar el modelo para predecir el comportamiento de las variables respuestas (grupos poblacionales) de este sistema de ecuaciones fue preciso su ajuste, o sea, la determinación del valor de cada uno de los parámetros, β , γ , μ , α y f_x . También se determinó con el ajuste, el valor inicial de E_{nv} .

Todos los parámetros anteriores constituyeron variables independientes de un problema de optimización dirigido a minimizar el error de ajuste del modelo, representado por el coeficiente de variación porcentual promedio de los residuos.⁽²⁶⁾ Los datos para el ajuste se tomaron del período entre el 30 de mayo y el 25 de julio de 2021.

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias se realizó empleando la función del *software* MATLAB *ode23tb*.⁽²⁷⁾ Esta emplea el método numérico de *Runge-Kutta* combinado con un método trapezoidal. Para la minimización del error se utilizó la estrategia *GlobalSearch* de MATLAB junto con la función *fmincon*.

Se consideró Rv como un valor constante, siendo la pendiente de la curva de personas totalmente vacunadas en el tiempo entre el 16 de mayo y el 25 de julio de este año 2021. El cálculo del Rv se realizó según la ecuación:

$$(12) \quad RV = \frac{\text{Vacunados}_{25 \text{ de Julio}} - \text{Vacunados}_{16 \text{ de Mayo}}}{(\text{días transcurridos})_{25 \text{ de Julio}-16 \text{ de Mayo}}}$$

Como se muestra en la **Figura 2**, el día 16 de mayo se habían vacunado completamente 861 517 personas y el 25 de julio ya este número ascendía a 4 577 651.



Figura 2- Tendencia del régimen de vacunación en Perú

Fuente: <https://datosmacro.expansion.com/coronavirus/Perú>

Las simulaciones predictivas se basaron en posibles escenarios determinados por los parámetros del modelo. En este caso, el parámetro determina el grado de exposición de las personas a tener contacto con infectados. La capacidad de transmisión de la enfermedad está definida por el valor de β y el parámetro μ determina la letalidad. Otra variable considerada como condicionante de la evolución de la pandemia fue RV.

Se diseñó un experimento simulado para evaluar el efecto de estas cuatro variables en dos niveles, uno inferior (-) y otro superior (+). Para un experimento factorial de este tipo, el número de experimento (N) se calcula como n^k , donde k es el número de factores (β, μ, α, RV), cuatro en este caso, y n es el número de niveles, que es dos.

$$N = n^k = 2^4 = 16$$

De las posibles 16 combinaciones solo se simularon dos de ellas, las que constituirían el mejor y el peor escenario, que se compararon con el escenario actual (**Tabla 2**). El resto de las combinaciones constituyeron escenarios intermedios entre estos extremos.

El nivel (-) de las variables se corresponde con los valores que se obtuvieron a partir del ajuste del modelo donde: β y μ caracterizan la cepa original circulante en Perú desde el inicio de la Pandemia; α caracteriza el grado de aislamiento y distanciamiento social impuesto para evitar la exposición de los susceptibles a la infección; y RV es el régimen de vacunación promedio actual en el país.

El nivel (+) de las variables se corresponde con 50 % superior al nivel (-). Esto se definió a partir de la posible expansión de la variante *Delta* del virus, que se considera entre 40 y 60 % más transmisible y virulenta que la cepa original.⁽²⁸⁾

β	μ	α	RV	Escenario
+	+	+	-	peor escenario
-	-	-	+	mejor escenario
-	-	-	-	escenario actual

Por último, se realizó una simulación dirigida a probar el efecto del incremento de la exposición de la población (representado por el valor del parámetro α) en la cantidad de casos infectados y en la de fallecimientos. Los escenarios utilizados en este caso, se basaron en el incremento del valor de α en 1,5; 2 y 2,5 veces respecto al escenario actual.

RESULTADOS

Como resultado de la caracterización de la pandemia en Perú, se muestra el comportamiento evolutivo que siguió esta en su período inicial (**Figura 3**). Se aprecia que el crecimiento de casos infectados con la COVID-19 siguió una tendencia exponencial hasta aproximadamente el 2 de junio de 2020.



Figura 3- Comportamiento de los infectados al inicio de la pandemia en Perú

Fuente: Taramona y colaboradores⁽²¹⁾

La **Figura 4** muestra la evolución que siguió la pandemia en Perú desde su aparición y hasta finales de julio de 2021. En la **Figura 4(a)** se exponen los infectados acumulados y en la **Figura 4(b)** los infectados activos y fallecidos.

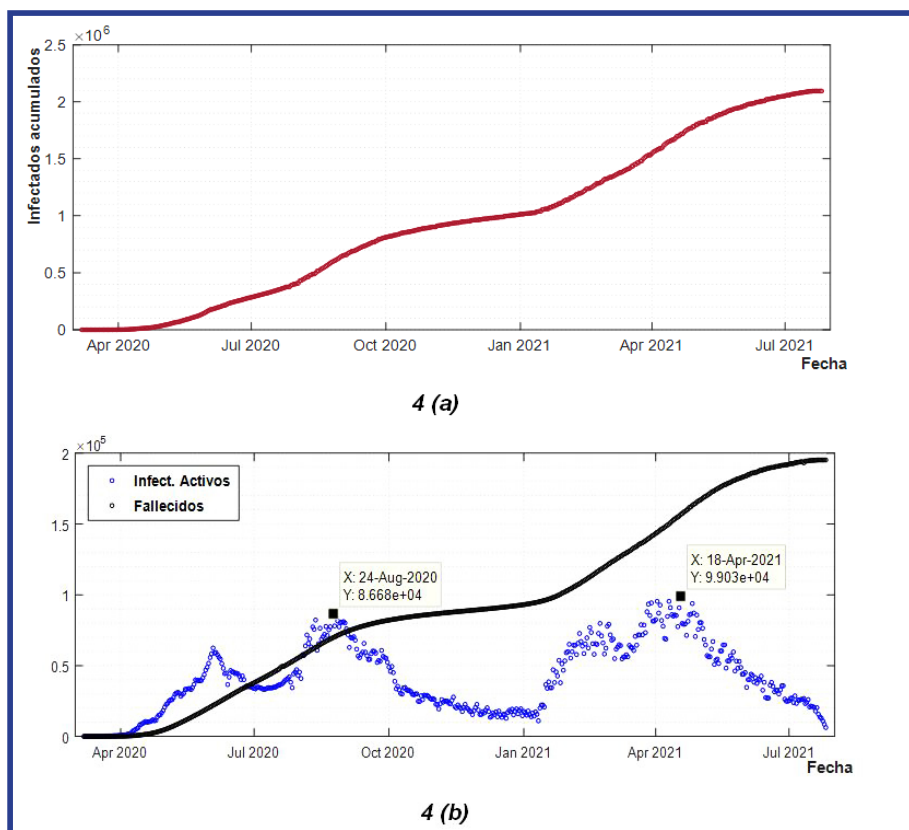


Figura 4- Comportamiento de las principales variables de la pandemia en Perú. 4(a)- Infectados acumulados. 4(b)- Fallecidos (color negro). Infectados activos (color azul).

A partir de junio 2020 se produjo una inflexión en la curva de infectados acumulados (**Figura 3**), que se refleja en la de infectados activos, curva de color azul de la **Figura 4(b)**. También se aprecia que la cantidad de este grupo poblacional tiene un comportamiento ondulatorio, con dos grandes picos entre 86 mil y 100 mil casos, en los meses de agosto 2020 y abril de 2021 respectivamente.

Como resultado del ajuste del modelo matemático se obtuvieron los valores de los parámetros que caracterizan el comportamiento de la pandemia (**Tabla 3**), y se logró un error de ajuste de 2,32 %. Previamente se determinó el RV empleando la ecuación (12), resultando ser 53 087,63 personas vacunadas por día.

La **Figura 5** muestra las curvas representativas del ajuste del modelo. Para cada una de las variables respuestas, las líneas punteadas representan los datos reales, mientras las continuas la predicción matemática del modelo.

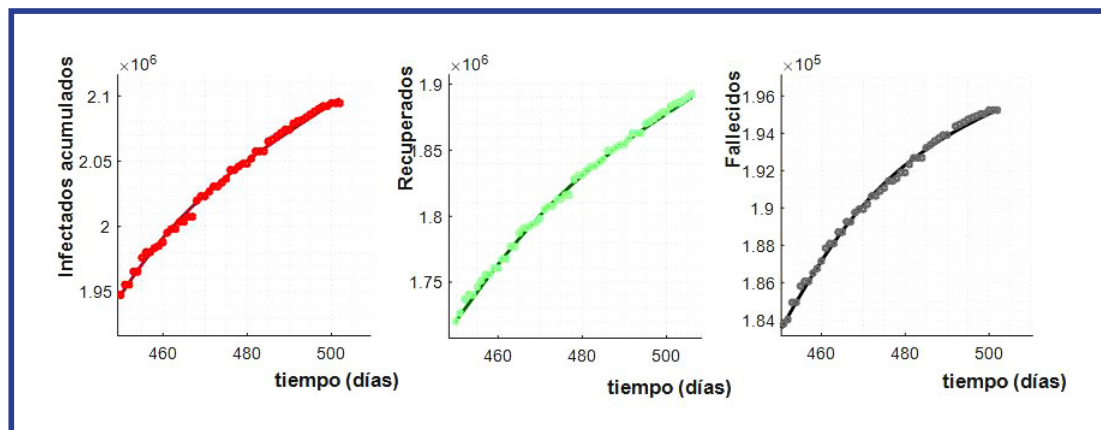


Figura 5- Ajuste del modelo matemático a los datos de la pandemia de la COVID-19 en Perú

Este modelo ajustado permitió la simulación de los escenarios seleccionados (actual, mejor y peor). Las curvas de comportamiento resultantes para los tres escenarios y para las variables I_{ac} , F , I_{nv} e I_v se muestran en la **Figura 6**.

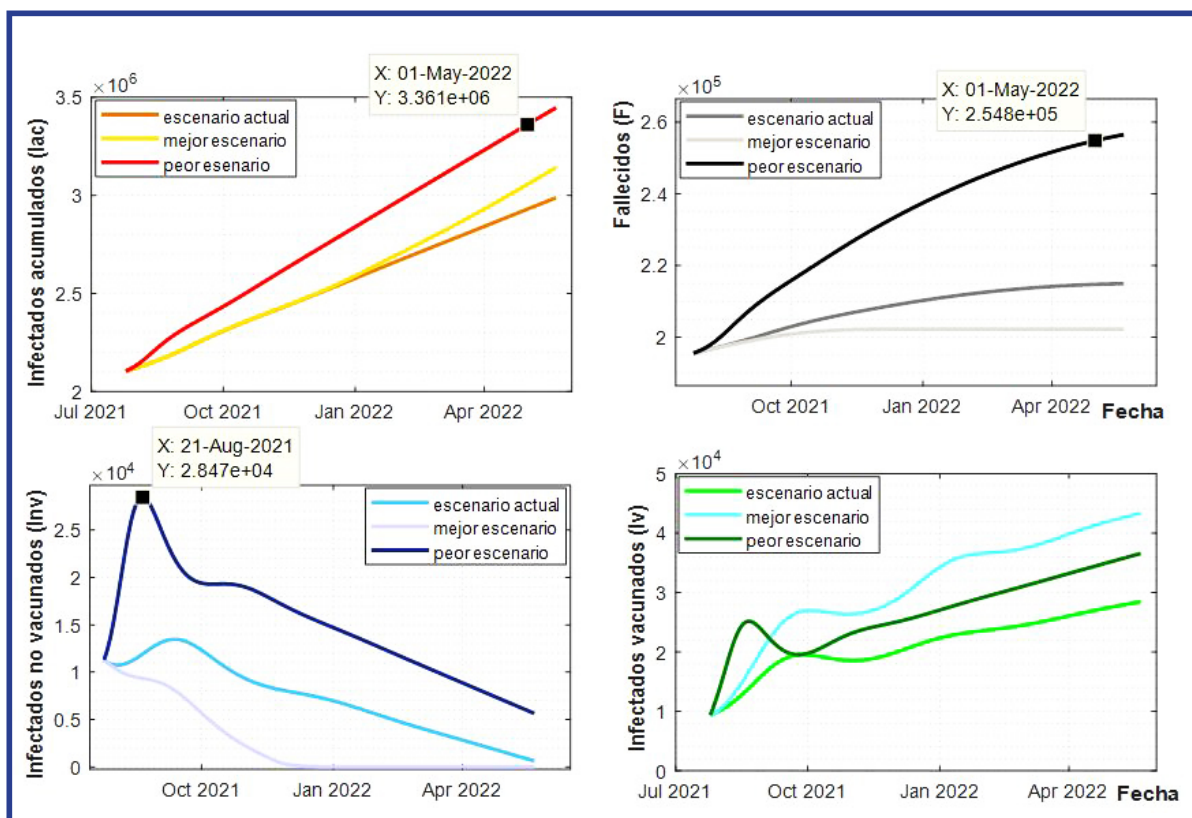


Figura 6- Resultados de la simulación de escenarios para las variables I_{ac} , F , I_{nv} , I_v

El escenario actual se corresponde con los valores de los parámetros determinados con el ajuste del modelo (Tabla 3) y con el RV actual calculado, mientras que el mejor escenario mantiene el mismo valor de los parámetros, pero con un RV 50 % superior que el actual de 79 631 vacunados diarios.

De acuerdo con los resultados, se reconoce como mejor escenario, en el que ocurriría la menor cantidad de fallecimientos. Por consiguiente, en esta condición, como se observa en las gráficas inferiores de la Figura 6, se estaría en presencia de un número mayor de infectados que ya fueron vacunados (I_v), ante una cantidad menor de infectados aun sin vacunar (I_{nv}), esta última en la gráfica de la izquierda. Según se muestra en la Tabla 2, en este mejor escenario existiría el mayor régimen de vacunación (RV), por lo que hay una tendencia a que los que se infecten ya estén vacunados (esto incrementaría con el tiempo el valor de I_v). Esta tendencia se potencia ya que estos vacunados que se infectan (I_v) tienen la misma capacidad de contagiar (tasa de contagio) que los no vacunados, según se establece en el supuesto d). Obsérvese que al inicio del período simulado la curva de I_v para el peor escenario tiene mayor pendiente que la de mejor escenario, pero luego de un máximo, ocurre una disminución, ya que el incremento de I_v en el peor escenario está limitado por la baja cantidad de vacunados.

S_0	β	γ	μ	α	f_x
95754	$1.17 \cdot 10^{-06}$	0.1	0.00891	$9.021 \cdot 10^{-05}$	0.9738

La simulación que se presenta en la Figura 7 expresa el efecto de la exposición de la población aun sin la presencia de la variante Delta del virus, solo cambiando el valor de α respecto al escenario actual.

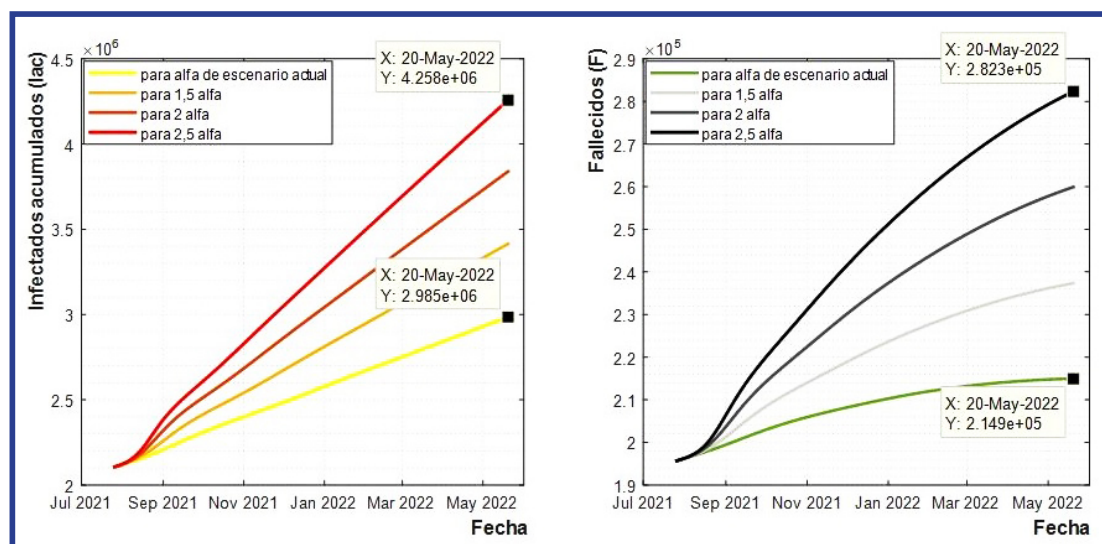


Figura 7- Efecto de la exposición de la población expresada como (α) en los contagios y los fallecimientos

DISCUSIÓN

Las tendencias observadas en las curvas de las Figuras 3 y 4, que muestran la evolución de la pandemia en Perú, posibilitan algunos análisis de importancia. Uno de estos análisis se relaciona con la inflexión de la curva de infectados activos ocurrido aproximadamente el día 2 de junio del 2020, también observada por Taramona, et al.⁽²¹⁾ y que estuvo asociada a la aplicación de un conjunto de medidas de mitigación las que acarrearón la reducción de infectados activos. Esta inflexión demuestra la eficacia que tuvieron estas medidas en ese momento de la pandemia, sin embargo, no necesariamente podrán éstas extrapolarse a otras circunstancias con predominio de otra variante del virus y la influencia de otros factores como la percepción del riesgo y el cansancio psicológico.

Otro de los análisis pudiera orientarse al comportamiento ondulatorio de casos confirmados, conocidos como oleadas y que repercute directamente en el número de infectados activos. En la Figura 4(a) se aprecia que los dos grandes picos ocurrieron en momentos de mayor pendiente de la curva de infectados acumulados. También se evidencia una marcada correlación entre los casos acumulados y los fallecidos, que se ha mantenido a lo largo de toda la pandemia y que denotan la existencia de una elevada letalidad y la ineficacia mantenida de los protocolos terapéuticos para evitar las muertes por COVID.

Este comportamiento puede indicar la existencia de una única variante circulante en territorio peruano durante el periodo de la pandemia, o la coexistencia de variantes similares en cuanto a transmisibilidad y letalidad. Antes de la reciente aparición de la variante Delta, solamente habían circulado las variantes Alfa y Ganma, esta última con una transmisibilidad solo 7 % superior que la reconocida en la variante Alfa.^(2, 24) Lo anterior supone baja variabilidad de la letalidad durante la pandemia en Perú, como demuestran los estadígrafos descriptivos expuestos en la Tabla 4.

Tabla 4- Estadígrafos del comportamiento de la letalidad de la COVID-19 en Perú	
Estadígrafo	valor
Cantidad de días (tamaño de la muestra)	493
Promedio	10,60
Desviación Típica	1,7378
Mayor	14.77
Menor	9.08

A pesar de la crisis sanitaria que ha atravesado Perú con la COVID-19, a finales de julio de 2021, la situación resultaba aparentemente alentadora y se reportaban poco más de 6 mil infectados activos en el país.⁽³⁾ Ante esta situación cabría realizarse algunas preguntas, tales como:

- 1) ¿Ocurrirá otra ola de contagios y un nuevo pico de infectados activos?
- 2) ¿Qué ocurrirá en los próximos meses con el número de contagiados y fallecidos?
- 3) ¿Qué factores determinarán la evolución de la pandemia?

A estas y otras preguntas se les trata de dar respuesta en esta investigación a través de la modelación matemática.

Como muestra la **Figura 6**, la diferencia de escenarios pudiera representar alrededor de 14 000 fallecidos en los próximos diez meses, solo por el hecho del incremento de RV.

Para el peor escenario, equivalente a la llegada de la variante *Delta* del virus, con 50 % mayor de exposición y sin incrementar RV respecto al actual, la cantidad de fallecidos podría superar las 254 000 personas para el primero de mayo de 2022. La diferencia sería de más de 39 000 fallecidos respecto al escenario actual. Estos resultados indican lo peligroso que puede resultar la combinación de los factores considerados. En este caso la presencia de la variante *Delta*, combinada con un incremento de la exposición, representado por el parámetro α y a un bajo RV, pudiera incrementar significativamente el número de fallecidos.

Para el peor escenario, tanto la mortalidad como el número de casos activos se elevarían, ocurriendo un nuevo pico pandémico, donde la suma de I_v e I_{nv} pudiera llegar a los 55 mil casos. Se debe aclarar que los picos y otros máximos de la simulación para el peor escenario, no necesariamente ocurrirán en las fechas representadas, ya que se consideró hipotéticamente que los valores de los parámetros representativos de este escenario tendrían su inicio el 25 de julio; sin embargo, pudiera producirse un desfase que dependerá de la fecha en que comience a expandirse la variante *Delta*, si es que esto llegara a ocurrir.

En cualquiera de los escenarios, teniendo en cuenta que en todos se lleva a cabo un proceso de vacunación masiva de la población, las curvas de I_v tendrán siempre una tendencia al alza (**Figura 6**). Este grupo poblacional corre pocos riesgos al estar vacunados, en cambio sí posee capacidad para contagiar a cualquier susceptible, siendo una fuente de infección y propagación de la enfermedad. El hecho de sentirse vacunado y saludable pudiera traer consigo la pérdida de percepción de riesgo y el incremento de la exposición, lo que se traduce en un incremento del valor de α .

La coexistencia de factores como:

- a) Baja percepción de riesgo, que conlleve al levantamiento de las medidas de distanciamiento y aislamiento social.
- b) Un gran número de personas susceptibles para una población de más de 32 millones de habitantes como la de Perú.
- c) la presencia de la variante *Delta* del virus en territorio peruano.
- d) la baja cobertura y velocidad de vacunación, pudieran llevar la pandemia en Perú hacia un escenario catastrófico.

Ante la riesgosa situación que amenaza la salud del pueblo peruano urge identificar sobre qué elementos actuar y qué decisiones adoptar. Es evidente que una de las principales estrategias es incrementar la vacunación tanto como sea posible, algo que está altamente determinado por la disponibilidad de vacunas. Como se ha demostrado matemáticamente, el incremento del RV en solo 50 % podría evitar la muerte de más de 10 mil personas.

Por otra parte, la contagiosidad que ha generado la variante *Delta* en países que habían mantenido una muy baja tasa de incidencia con las variantes anteriores; los 124 países que ya han reportado su presencia, de ellos 18 en las Américas, incluyendo Perú y el resultar la variante más contagiosa y de mayor riesgo de hospitalización,⁽²⁾ es una realidad que indica la alta probabilidad de extensión de esta variante, que desde el punto de vista del modelo matemático, equivale a que no podrá evitarse que los valores de β y μ alcancen niveles superiores a los actuales.

La situación descrita apunta a que, además del incremento del RV, otra estrategia verdaderamente razonable debía estar encaminada a reducir al mínimo la movilidad de la población y a propiciar el aislamiento social. Estas y otras medidas como el uso de mascarillas pudieran reducir la exposición de la población ante el

virus, algo que equivale a minimizar el valor de α , que tiene un efecto muy marcado en la incidencia de casos y en la mortalidad (**Figura 7**). Como se ilustra, la diferencia de contagiados entre el escenario actual y el de 2,5 veces el valor de α , pudiera representar 1 273 000 personas para el 20 de mayo de 2022. En cuanto al número de fallecidos, la diferencia entre estos dos escenarios sería 67 400, y se llegará a 282 300 fallecidos. En esta última simulación aún no se ha tenido en cuenta la propagación extensiva de la variante *Delta*.

Algunos de los resultados mostrados en este trabajo se consideran conservadores, al no contarse con datos suficientes de evidencia científica, como es el caso del porcentaje de eficacia real de las vacunas; sin embargo, se ofrecen posibles tendencias e información valiosa para la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

El modelo de compartimientos concebido para la simulación y el análisis de los escenarios de evolución de la pandemia en Perú para los próximos meses, demostró su capacidad de predicción a partir del comportamiento de los factores más importantes que determinan dicha evolución, tales como el régimen de vacunación, el nivel de exposición de la población al contagio y las características inherentes a las variantes imperantes del virus. Los resultados de la simulación demuestran que, ante la aparición de la variante *Delta* del virus en Perú, debe producirse una nueva ola de contagios en los próximos meses, llegándose a cifras acumulativas para el mes de mayo del 2022, que pudiera oscilar entre 2,9 y 3,36 millones de infectados y entre 215 mil y 255 mil fallecidos, sin embargo, la severidad y momento de la ocurrencia dependerán de la conjugación de factores tales como el régimen de vacunación que se alcance y la eficacia de las medidas de aislamiento social. Ante la inminente propagación de la variante *Delta* del virus por territorio peruano y la alta sensibilidad del parámetro α y RV en los resultados de la simulación, las principales estrategias de mitigación deben estar dirigidas a garantizar el distanciamiento y aislamiento social, con el establecimiento de rigurosas medidas restrictivas, así como a incrementar el RV hasta los niveles máximos posibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Organización Mundial de la Salud. COVID-19: Cronología de la actuación de la OMS [Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2020 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/27-04-2020-who-timeline---covid-19>
2. Organización Mundial de la Salud. Actualización Epidemiológica Enfermedad por coronavirus (COVID-19) [Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2021 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update-on-covid-19---20-july-2021>
3. Organización Mundial de la Salud. COVID-19 Weekly Epidemiological [Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2021 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/344799?locale-attribute=ar&>
4. Brauer F, Castillo Chávez C, Feng Z. Mathematical Models in Epidemiology. USA: Princeton University; 2019.
5. Getz WM, Salter R, Muellerklein O, Yoon HS, Tallam K. Modeling epidemics: A primer and Numerus Model Builder implementation. Epidemics [Internet]. 2018;25(2018):9-19. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.epidem.2018.06.001>
6. Kermack WO, McKendrick AG. Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics. Proceedings Royal Society Mathematical Theory Epidemics [Internet]. 1927 [Citado 02/06/2021];115(772):700-21. Disponible en: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1927.0118>
7. Leung K, Wu JT, Liu D, Leung GM. First-wave COVID-19 transmissibility and severity in China outside Hubei after control measures, and second-wave scenario planning: a modelling impact assessment. Lancet [Internet]. 2020;395(2020):1382-93. Disponible en: [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30746-7](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30746-7)
8. Lin Q, Zhao S, Gao D, Lou Y, Yang S, Musa SS, et al. A conceptual model for the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan, China with individual reaction and governmental action. Int J Infectious Diseases [Internet]. 2020;93:211-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.02.058>
9. Malek A, Hoque A. Trends of 2019-nCoV in South Asian countries and prediction of the epidemic peaks. Virus Research. 2021;292(2021):1-10.
10. Ndaïrou F, Area I, Nieto JJ, Torres FM. Mathematical Modeling of COVID-19 Transmission Dynamics with a Case Study of Wuhan. Chaos Solitons Fractals [Internet]. 2020;135:109846. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109846>
11. Roda WC, Varughese MB, Han D, Li MY. Why is it difficult to accurately predict the COVID-19 epidemic?. Infectious Disease Modelling [Internet]. 2020;5:271-81. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.idm.2020.03.001>
12. Sánchez HE, Ramos LB, Galindo PÁ, Rodríguez AS. Modelación físico-matemática para la toma de decisiones frente a la COVID-19 en Cuba. Retos de la Dirección [Internet]. 2020 [Citado 02/06/2021];14(2):55-86. Disponible en: <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/retos/article/view/3544>
13. Wang L, Wang Y, Ye Y, Liu Q. Review of the 2019 novel coronavirus (SARS-CoV-2) based on current evidence. Int J Antimicrob Agents [Internet]. 2020;55(6):105948. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105948>
14. Yang C, Wang J. A mathematical model for the novel coronavirus epidemic in Wuhan, China. Mathematical Biosciences and Engineering [Internet]. 2020;17(3):2708-24. Disponible en: <http://doi.org/10.3934/mbe.2020148>
15. Cori A, Ferguson NM, Fraser C, Cauchemez S. A new framework and software to estimate time-varying reproduction numbers during epidemics. American Journal of Epidemiology. 2013;178(9):1505-12.
16. Li Q, Guan X, Wu P. Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus-Infected Pneumonia. New England Journal of Medicine [Internet]. 2020;382:1199-207. Disponible en: <http://doi.org/10.1056/NEJMoa2001316>
17. Liu Y, Gayle AA, Wilder Smith A, Rocklöv J. The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus. Journal of Travel Medicine [Internet]. 2020;27(2):1-4. Disponible en: <http://doi.org/10.1093/jtm/taaa021>

18. Ma J. Estimating epidemic exponential growth rate and basic reproduction number. *Infectious Disease Modelling* [Internet]. 2020;5(2020):129-41. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.idm.2019.12.009>
19. Read JM, Bridgen RE, Cummings DAT, Ho A, Jewell CP. Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions. *MedRxiv* [Internet]. New York: Cold Spring Harbor; 2020. Disponible en: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.01.23.20018549v2>
20. Center Systems Science Engineering. CSSE at JHU Upstream repository [Internet]. Baltimore: [Johns Hopkins University](https://github.com/datasets/covid-19); 2021 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: <https://github.com/datasets/covid-19>
21. Taramona LA, Sánchez HE, Sánchez A, Huatuco MM. Modelación matemática para mitigar los efectos de la COVID-19 en el turismo peruano. *Rev Investigaciones ULCB* [Internet]. 2020;7(1):125-41. Disponible en: <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2020v7n1.0010>
22. Organización Mundial de la Salud. COVID-19 Weekly Epidemiological Update. Edition 47 [Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2021 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/342524?locale-attribute=es&>
23. Picazo JJ. Vacuna frente al COVID-19. Sociedad Española de Quimioterapia: infección y vacunas. Madrid: Facultad de Medicina Universidad Complutense; 2021.
24. SCIENSANO. FACT SHEET COVID-19 disease (SARS-CoV-2 virus) [Internet]. Bélgica: SCIENSANO; 2021 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: https://covid-19.sciensano.be/sites/default/files/Covid19/COVID-19_fact_sheet_ENG.pdf
25. Instituto Nacional Estadística Informática. Estado de la población peruana 2020 [Internet]. Perú: INEI; 2020 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/nosotros/>
6. Bartholomew Biggs M. *Nonlinear Optimization with Engineering Applications* [Internet]. New York: Springer; 2008 [Citado 02/06/2021]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-78723-7>
27. Collin P, Malec D, Lefevre Y. *A General Method to Compute the Electric Flux Lines between Two Magnet Wires in Close Contact and Its Application for the Evaluation of Partial Discharge Risks in the Slots of Electric Machines Embedded in Future Transportation Systems*. *Advances in Aerospace Science and Technology* [Internet]. 2021 [Citado 02/06/2021];6(1): [Aprox. 2 p.]. Disponible en: <https://www.scirp.org/%28S%28351jmbntvnsjt1aadkposzje%29%29/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2937391>
28. Shim E. Projecting the Impact of SARS-CoV-2 Variants and the Vaccination Program on the Fourth Wave of the COVID-19 Pandemic in South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(7578):1-11.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución de autoría

Héctor Eduardo Sánchez Vargas: Conceptualización, aplicación de técnicas computacionales para el procesamiento de datos, creación de modelos, programación lineal, redacción del borrador inicial.

Luis Alberto Taramona Ruiz: Administración del proyecto, conceptualización, provisión de recursos, supervisión.

Amyrsa Salgado Rodríguez: Conceptualización, redacción del borrador inicial.

Maribel Huatuco Lozano: Conceptualización, recopilación de datos.

Fernando Castillo Picón: Conceptualización, provisión de materiales, revisión crítica del borrador inicial.

Todos los autores participamos en la discusión de los resultados y hemos leído, revisado y aprobado el texto final.