

Estado: El preprint ha sido enviado para publicación en revista

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

Héctor Eduardo Sánchez Vargas, Luis Alberto Taramona Ruiz, Amyrsa Salgado Rodríguez, Maribel Huatuco Lozano, Fernando Castillo Picón

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.2851>

Enviado en: 2021-08-25

Postado en: 2021-09-08 (versión 1)

(AAAA-MM-DD)

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

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

Dr.C. Héctor Eduardo Sánchez Vargas¹, <https://orcid.org/0000-0003-0640-6151>

Dr.C. Alberto Taramona Ruiz², <https://orcid.org/0000-0001-7670-3210>

M.Sc. Amyrsa Salgado Rodríguez³, <https://orcid.org/0000-0002-6923-8661>

M.Sc. Maribel Huatuco Lozano⁴, <https://orcid.org/0000-0001-6552-5252>

Dr.C. Fernando Castillo Picón⁵, <https://orcid.org/0000-0002-5576-3027>

^{1 y 3}Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Cuba

²Universidad Le Cordon Bleu, Perú

^{4 y 5}Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú.

autor de correspondencia:

¹*email: hector.sanchez@reduc.edu.cu*

RESUMEN

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 tomar decisiones anticipadas para mitigar sus efectos. Consecuentemente se estableció como objetivo simular escenarios aplicando la modelación físico-matemática, que predigan el comportamiento de la COVID-19 en Perú y faciliten la toma de decisiones. Como métodos y técnicas se aplicaron: análisis-síntesis, revisión documental y modelación físico-matemática mediante herramientas y funciones del software MATLAB. Se reconocen como 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. Se concluyó que: 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 clave: COVID-19, predicción de escenarios, variante *Delta*, modelación físico-matemática

ABSTRACT

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 they require predictive information that makes it possible to make early decisions to mitigate its effects. Consequently, the objective was established to simulate scenarios applying physical-mathematical modeling, which predict the behavior of COVID-19 in Peru and facilitate decision-making. As methods and techniques were applied: analysis-synthesis, documentary review and physical-mathematical modeling using tools and functions of the MATLAB software. The following are recognized as results: determination of the behavior of the main variables of COVID-19 in Peru; physical-mathematical model 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, accumulated infected, unvaccinated infected and vaccinated infected. It was concluded that: 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 said evolution in Peru; another wave of infections must occur and cumulative figures between 2.9 and 3.36 million infected and between 215 and 255 thousand deaths must be reached; The main mitigation strategies should be aimed at guaranteeing social distancing and isolation, as well as increasing the vaccination regimen.

Key words: COVID-19, scenario prediction, Delta variant, physical-mathematical modeling

INTRODUCCIÓN

El nuevo coronavirus, nombrado SARS-CoV-2 y causante de la COVID-19, apareció a finales del año 2019 en la ciudad de Wuhan, capital de la provincia China de Hubei, fue y fue catalogada como pandemia el 11 de marzo de 2020 por la Organización Mundial de la Salud (OMS 2020). Desde la confirmación de los primeros casos y hasta el 26 de julio de 2021, habían sido notificados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) 194 080 019 casos confirmados de COVID-19 y 4 162 304 personas fallecidas en el mundo (OPS 2021).

Entre los países más afectados en cuanto al número de casos se encuentran Estados Unidos, India y Brasil, con más de 19 millones de casos cada uno, seguidos de Rusia, Francia, Reino Unido y Turquía, todos con más de cinco millones. Sin embargo, la región de las Américas se ha convertido en el epicentro de la Pandemia, seguida de Europa y el sudeste asiático (OMS 2021b). Desde la detección de los primeros casos y hasta finales de julio de 2021, en la región de las Américas se habían notificado un total de 74 734 644 casos confirmados de contagio por la COVID-19, lo que representa el 39 % del total mundial, entretanto el número de fallecidos había ascendido a 1 960 619 personas, lo que representa el 48 % del total del planeta, resultando mayor proporcionalmente (OPS 2021).

Ante la problemática que impone la pandemia de la COVID-19 se hace necesario tener una clara visión de los factores que determinan su evolución, así como realizar previsiones basadas en sustentos científicos que permitan tomar decisiones para su enfrentamiento, y que viabilicen una planificación efectiva de los recursos materiales y humanos que se requieren para ello. En este sentido son varios los frentes que se deberán tener en cuenta entre los que se incluyen: el perfeccionamiento de protocolos terapéuticos, el desarrollo de vacunas, la vigilancia epidemiológica y el estudio de tendencias. En este último frente se utilizan ampliamente los modelos matemáticos para la predicción y la determinación del número de reproducción efectivo de la epidemia (R_t), que caracteriza el comportamiento reproductivo de la misma.

Los aumentos en la transmisión a nivel mundial parecen estar determinado por cuatro factores fundamentales: la circulación de variantes del virus más transmisibles, la relajación de las medidas sociales de salud pública originalmente destinadas a controlar la transmisión, el aumento de la interacción social y la gran cantidad de personas que

siguen siendo susceptibles a la infección por SARS-CoV-2 debido a la baja cobertura de vacunación en todo el mundo (OMS 2021b). La manifestación de algunos de estos aspectos en Perú son objetos de estudio de este trabajo.

Perú es uno de los países de América que más ha sido afectado por la pandemia de la COVID-19. Hasta el momento del cierre de esta investigación se habían contagiado 2 102 904 personas y fallecido 195 795 (OPS 2021). Tales datos ubican al país como uno de los de mayor letalidad con 9,31 %, muy por encima de la media mundial de 2,14 %. Estas estadísticas motivan al seguimiento de la evolución de la pandemia en el país y a estudiar los elementos que pudieran agravar la situación, así como identificar las posibles decisiones a tomar para mitigar sus efectos negativos.

Teniendo en consideración estos elementos, se propone como objetivo de esta investigación simular escenarios, aplicando la modelación físico-matemática, que predigan el comportamiento de la COVID-19 en Perú y faciliten la toma de decisiones.

MATERIA Y MÉTODOS

Se aplicaron métodos propios de la investigación científica tales como el análisis-síntesis y la revisión documental para la fundamentación teórica de la investigación.

Para caracterizar el comportamiento evolutivo de la pandemia en Perú se determinó en qué medida había cambiado el número de infectados activos (I) diarios desde su aparición en marzo del año 2020 y hasta finales de julio del 2021. El valor de (I) se determinó como la diferencia entre: infectados acumulados (I_A), fallecidos (F) y recuperados (R).

Siendo,

$$I = I_A - F - R$$

Los datos (I_A , F, R) que se presentan en la tabla 1, se obtuvieron del reporte diario del repositorio de la Universidad Norteamericana Johns Hopkins para el Sistema de Ciencia e Ingeniería (CSSE 2021).

El comportamiento de la cantidad de I_A , F y R a través del tiempo fue graficado y posteriormente se realizó un análisis de tendencia apoyado en la aplicación del modelo SIR de Kermack y McKendrick (1927). También se tomó como punto de partida el análisis realizado por Taramona et al. (2020).

El modelo SIR, es un modelo de compartimientos ampliamente utilizado para la

modelación de epidemias. Como indica su nombre (SIR), para la aplicación de este modelo originalmente se emplearon solamente 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 cambia el número de personas de un determinado grupo poblacional (S, I, R) a través del tiempo.

A partir del modelo SIR clásico se ha empleado un número importante de variantes que lo han enriquecido transformándose en nuevos modelos de compartimientos. Ha sido utilizado por muchos autores para la predicción de la COVID-19, entre los que aparecen Leung et al. (2020), Lin et al. (2020), Ndaïrou et al. (2020), Read et al. (2020), Roda et al. (2020), Taramona et al. (2020) y Wang et al. (2020).

El modelo empleado en este trabajo fue concebido teniendo en cuenta el comienzo de una campaña de vacunación con efectos todavía discretos en la evolución de la pandemia en Perú (ver modelo físico en figura 1).

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 por ciento, la evolución hacia formas graves de la enfermedad (OMS 2021a, Picazo 2021, SCIENSANO 2021). Estos datos condujeron a considerar que 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 de la enfermedad 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 Rv 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 realizaron las siguientes consideraciones:

- 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. La población no expuesta (S_{nv}) no tiene posibilidad de contagio mientras permanezca en esa condición.
- 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.
- 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 convertirse solamente en recuperados (R).
- La tasa de contagio β es proporcional al número de infectados y es la misma para cualquiera de los dos tipos de infectados.
- 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.
- 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 (INEI 2020):

$$N = S_{nv} + S_v + E_{nv} + E_v + I_{nv} + I_v + R + F \quad (1)$$

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:

$$\frac{dS_{nv}}{dt} = -\alpha S_{nv} - f_x Rv \quad (2)$$

$$\frac{dS_v}{dt} = f_x Rv - \alpha S_v \quad (3)$$

$$\frac{dE_v}{dt} = \alpha S_v + (1 - f_x) Rv - \beta E_v I_v - \beta E_v I_{nv} \quad (4)$$

$$\frac{dE_{nv}}{dt} = \alpha S_{nv} - (1 - f_x)Rv - \beta E_{nv}I_v - \beta E_{nv}I_{nv} \quad (5)$$

$$\frac{dI_v}{dt} = \beta E_v I_v + \beta E_v I_{nv} - \gamma I_v \quad (6)$$

$$\frac{dI_{nv}}{dt} = \beta E_{nv} I_v + \beta E_{nv} I_{nv} - \gamma I_{nv} - \mu I_{nv} \quad (7)$$

$$\frac{dI_{ac}}{dt} = \beta E_{nv} I_v + \beta E_{nv} I_{nv} + \beta E_v I_v + \beta E_v I_{nv} \quad (8)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I_{nv} + \gamma I_v \quad (9)$$

$$\frac{dF}{dt} = \mu I_{nv} \quad (10)$$

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 los expuestos no vacunados (E_{nv}).

Todos los parámetros anteriores constituyeron variables independientes de un problema de optimización dirigido a minimizar el error de ajuste del modelo matemático, representado por el coeficiente de variación porcentual promedio de los residuos, que constituyen la diferencia entre las predicciones del modelo y los datos reales para cada una de las variables (grupos poblacionales del modelo físico). Los datos reales utilizados para el ajuste fueron los correspondientes al periodo comprendido entre el 30 de mayo y el 25 de julio del 2021.

La ecuación del error (Bartholomew-Biggs 2008) se representa como:

$$\text{Error} = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{Ci} - y_{Ei})^2}{y_{Ei}}}}{m} \times 100 \quad (11)$$

Dónde:

- m y n son el número de variables respuesta que se ajustan (grupos poblacionales) y el número de puntos experimentales respectivamente.
- y_{Ci} son los valores de la variable respuesta calculados con el modelo en el punto experimental “i”
- y_{Ei} son los valores reales de la variable respuesta en el punto experimental “i”.

Para realizar la simulación del comportamiento o variación de la cantidad de personas de cada uno de los grupos poblacionales en cualquiera de las situaciones, se hizo necesario resolver el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que constituye el

modelo matemático. Esto se realizó empleando la función del software MATLAB *ode23tb* (The MathWorks Inc. 2017). Esta función emplea el método numérico de *Runge-Kutta* combinado con un método trapezoidal. Para la minimización del error correspondiente al ajuste del modelo 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:

$$RV = \frac{Vacunados_{25\ de\ julio} - Vacunados_{16\ de\ mayo}}{(\text{días transcurridos})_{25\ de\ julio - 16\ de\ mayo}} \quad (12)$$

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 4577651 personas.

Después de ajustado el modelo matemático se realizaron simulaciones para predecir el comportamiento futuro de la pandemia. Estas se basaron en posibles escenarios dados por diferentes condiciones que se experimentaron a partir de los parámetros que definieron dichas condiciones. En este caso, el parámetro α 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, los que se compararon con el escenario actual (tabla 2). El resto de las combinaciones constituyeron escenarios intermedios entre estos extremos. Estas simulaciones de escenarios se realizaron para el periodo comprendido entre el 25 de julio del 2021 y los próximos 10 meses.

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 un 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 (Shim 2021).

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

En la figura 3 se aprecia que al inicio de la pandemia el crecimiento de casos infectados con la COVID-19 siguió una tendencia exponencial hasta aproximadamente el día 2 de junio del 2020. Tal y como identificó Taramona et al. (2020), a partir de esta fecha se produjo una inflexión en esta curva como resultado de la aplicación de un conjunto de medidas de mitigación, que trajeron la consiguiente reducción de número de infectados activos.

La figura 4(b) reafirma la inflexión en la curva de casos infectados. En la curva punteada de color azul, que representa al grupo poblacional de los infectados activos, se observa un decrecimiento a partir de la referida fecha. El seguimiento de la curva de infectados activos es de gran importancia en la planificación de los recursos de todo tipo. En la gráfica de la propia figura 4(b) se observa que esta curva ha tenido un comportamiento ondulatorio, con dos grandes picos, entre 86 mil y 100 mil casos, que ocurrieron en los meses de agosto del 2020 y abril del 2021.

En la figura 4, que muestra la evolución que siguió la pandemia en Perú desde su aparición y hasta finales de julio del 2020. Se aprecia que los dos grandes picos ocurrieron en momentos de mayor pendiente de la curva de infectados acumulados (figura 4(a)). 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 indica la existencia de una única variante circulante en territorio peruano durante el periodo de la pandemia, o la coexistencia de variantes similares. Antes de la reciente aparición de la variante *Delta*, solamente habían circulado las variantes *Alfa* y *Gamma*, esta última con una capacidad de transmisión solo 7 % superior que la reconocida en la variante *Alfa* (OPS 2021, SCIENSANO 2021).

En la tabla 3 se muestra un conjunto de estadígrafos descriptivos del comportamiento de la letalidad durante la pandemia en Perú hasta el día 26 de julio del 2021, los cuales avalan el análisis anteriormente realizado.

A pesar de la crisis sanitaria que ha atravesado el país con la COVID-19, en el momento de la realización de este trabajo, a finales de julio de 2021, la situación resultaba aparentemente alentadora y se reportaban poco más de 6 mil infectados activos en el país (OMS 2021b). 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 en cuanto al número de contagiados y fallecidos?; 3) ¿Qué factores determinarán la evolución de la pandemia? A estas y otras preguntas se le trata de dar respuesta en esta investigación a través de la modelación matemática.

Como resultado del ajuste del modelo matemático se obtuvieron los valores de los parámetros del mismo que caracterizan el comportamiento de la pandemia, lográndose un error de ajuste del 2,32 %, que fue determinado por la ecuación (11). Estos valores se muestran en la tabla 4. Previamente se determinó RV empleando la ecuación (12), resultando ser 53 087,63 personas vacunadas por día.

En la figura 5 se muestran las curvas representativas del ajuste del modelo. Para cada una de las variables respuestas, las líneas punteadas representan los datos reales y las líneas continuas la predicción matemática del modelo.

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_v e I_{nv} se muestran en la figura 6.

El escenario actual se corresponde con los valores de los parámetros determinados con el ajuste del modelo, presentados en la tabla 3 y con RV actual de 53 087 personas vacunadas por día, mientras que el mejor escenario mantiene el mismo valor de los parámetros, pero con un RV 50 % superior que el actual (79 631 vacunados diarios).

Como muestra la figura 6, esta diferencia de escenario pudiera representar una diferencia de cerca de 14 000 fallecidos en los próximos diez meses de pandemia, solo por el hecho de incrementar la cantidad de personas que sean vacunadas diariamente. Para el peor escenario, equivalente a la llegada de la variante *Delta* del virus, con un 50 % mayor de exposición y sin incrementar el régimen de vacunación respecto al actual, la cantidad de fallecidos podría superar las 254 000 personas para el primero de mayo del 2022. La diferencia sería de más de 39 000 fallecidos respecto al escenario actual. Estos resultados indican lo peligroso que puede resultar para la mortalidad global que provocaría la pandemia 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.

Al igual que la mortalidad, el número de casos activos se elevaría para el peor escenario hasta más de 28 mil casos de I_{nv} , ocurriendo un nuevo pico pandémico, que al sumar los activos vacunados y no vacunados podría estar cerca de 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 ha considerado hipotéticamente que los valores de los parámetros representativos de este escenario se han impuesto desde el 25 de julio, por lo que habría 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, algo que se observa en la figura 6. Este grupo poblacional corre pocos riesgos de salud al estar vacunados (considerando que las vacunas protegen de la evolución hacia estadios graves de la enfermedad), no obstante, ellos sí poseen capacidad para contagiar a cualquier susceptible, siendo una fuente de infección y propagación de la enfermedad. El hecho de sentirse vacunado y bien de salud transmite un exceso de confianza que trae consigo la pérdida de percepción de riesgo y el incremento de la exposición, lo que se traduce globalmente y a los efectos del modelo, en un incremento del valor de α , algo muy peligroso.

La coexistencia de factores como: 1) baja percepción de riesgo, que conlleve al

levantamiento de las medidas de distanciamiento y aislamiento social; 2) un gran número de personas susceptibles para una población de más de 32 millones de habitantes como la de Perú; 3) la presencia de la variante *Delta* del virus en territorio peruano; 4) la baja cobertura y velocidad de vacunación, pudieran llevar la pandemia en Perú hacia un escenario muy catastrófico.

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

La variante *Delta* es la más contagiosa, de mayor riesgo de hospitalización y se está propagando por todo el mundo, incluyendo países que habían mantenido una muy baja tasa de incidencia con las variantes anteriores. Un total de 124 países han reportado la presencia de esta variante en su territorio, 18 de ellos en la región de las américas, entre los que ya se encuentra Perú (OPS 2021). Esta realidad indica que, si no se puede evitar la extensión de la variante *Delta*, no será posible controlar la capacidad de contagio de la pandemia ni la letalidad inherente a esta variante del virus por lo que, desde el punto de vista del modelo matemático, equivale a que no se podrá evitar que los valores de β y μ alcancen niveles superiores a los actuales.

La situación descrita indica que, además del incremento de RV, otra estrategia verdaderamente razonable debe estar encaminada a reducir al mínimo la movilidad de la población y 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 desde el punto de vista del modelo equivale a minimizar el valor de α , la que tiene un efecto muy marcado en la incidencia de casos y en la mortalidad (ver figura 7).

La figura 7 expresa el efecto desastroso del incremento de la exposición de la población, aun sin la presencia de la variante *Delta* del virus, solo incrementando el valor de α en 1,5; 2 y 2,5 veces respecto al escenario actual. Como se muestra, la diferencia de contagiados entre el escenario actual y el de 2,5 veces el valor de α , pudiera ser de 1 273 000 personas para el 20 de mayo del 2022. En cuanto al número de fallecidos, la

diferencia entre estos dos escenarios sería 67 400, con lo que se llegaría a la cifra de 282 300 fallecidos en todo el periodo de la pandemia. Estas últimas cifras resultan conservadoras, ya que no tuvieron en cuenta la inminente propagación extensiva de la variante *Delta*, sin embargo, manifiestan la importancia de mantener las medidas restrictivas que eviten la exposición de la población.

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, llegando 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 el momento de la ocurrencia dependerá de la conjugación de varios 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 gestionar el incremento del RV hasta los niveles máximos posibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bartholomew-Biggs, M. (2008). *Nonlinear Optimization with Engineering Applications*. Vol. 19, *Optimization and Its Applications*. New York, USA: Springer.
- Bidegain, N., L. Scuro, y I. Vaca. (2020). "La autonomía económica de las mujeres en tiempos de COVID-19." *Revista de la CEPAL, Naciones Unidas* (132):226-238.

- CSSE. 2021. "Upstream repository ". Johns Hopkins University Center for Systems Science and Engineering. <https://github.com/datasets/covid-19>.
- Datosmacro. (2021). "Perú - COVID-19 - Crisis del coronavirus 2021." accessed 30 de agosto del 2021. <https://datosmacro.expansion.com>.
- INEI. (2020). Estado de la población peruana (2020). edited by Fondo de población de las naciones unidas.
- Kermack, W. O., y A. G. McKendrick. (1927). "Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics." *Proceedings of the Royal Society of London* 115 (772):700-721.
- Leung, K., J. T. Wu, D. Liu, y G. M. Leung. (2020). "First-wave COVID-19 transmissibility and severity in China outside Hubei after control measures, and second-wave scenario planning: a modelling impact assessment." *Lancet* 395 (2020):1382–93. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30746-7.
- Lin, Q., S. Zhao, D. Gao, Y. Lou, S. Yang, S. S. Musa, M. H. Wang, Y. Cai, W. Wang, L. Yang, y D. He. (2020). "A conceptual model for the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan, China with individual reaction and governmental action." *International Journal of Infectious Diseases* 93:211–216. doi: doi.org/10.1016/j.ijid.2020.02.058.
- Ndaïrou, F., I. Area, J. J. Nieto, y D. F. M. Torres.(2020). "Mathematical Modeling of COVID-19 Transmission Dynamics with a Case Study of Wuhan." *Chaos, Solitons and Fractals* (Journal Pre-proof). doi: 10.1016/j.chaos.2020.109846.
- OIT. 2021a. Conferencia Internacional del Trabajo – 109.^a reunión, 2021. Informes de la Comisión de Respuesta a la COVID.
- OIT. 2021b. Perspectivas Sociales y del Empleo en el Mundo. Tendencias 2021. Ginebra, Suiza.
- OMS. 2020. "COVID-19: Cronología de la actuación de la OMS." Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int>.
- OMS. 2021a. COVID-19 Weekly Epidemiological Update. Edition 47, published 6 July 2021.
- OMS. 2021b. COVID-19 Weekly Epidemiological Update. Edition 49, published 20 July 2021.
- OPS. 2021. Actualización Epidemiológica Enfermedad por coronavirus (COVID-19).
- Picazo, J. J.(2021). "Vacuna frente al COVID-19." *Sociedad Española de Quimioterapia*:

- infección y vacunas. Facultad de Medicina. Universidad Complutense (Madrid):31.*
- Read, J. M., J. R. E. Bridgen, D. A. T. Cummings, A. Ho, y C. P. Jewell. (2020). "Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions." *medRxiv*.
- Roda, W. C., M. B. Varughese, D. Han, y M. Y. Li. (2020). "Why is it difficult to accurately predict the COVID-19 epidemic?" *Infectious Disease Modelling* 5:271-281. doi: 10.1016/j.idm.2020.03.001.
- SCIENSANO. (2021). FACT SHEET. COVID-19 disease (SARS-CoV-2 virus).
- Shim, E.(2021). "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* 18 (7578):1-11.
- Taramona, L. A., H. E. Sánchez, A. Sánchez, y M. M. Huatuco. (2020). "Modelación matemática para mitigar los efectos de la COVID-19 en el turismo peruano." *Rev. Investigaciones ULCB* 7 (1):125-141. doi: <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2020v7n1.0010>.
- Matlab 9.3.0.713579 (R2017b) (Programa de computador). The MathWorks Inc., Natick, MA, USA.
- Wang, L., Y. Wang, Y. Ye, y Q. Liu. (2020). "Review of the 2019 novel coronavirus (SARS-CoV-2) based on current evidence." *International Journal of Antimicrobial Agents*. doi: 10.1016/j.ijantimicag.2020.105948.

Tablas

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: OMS (2021)

Tabla 2 Escenarios simulados para predecir el comportamiento de la COVID-19 en Perú

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

Tabla 3 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

Tabla 4. Valores de los parámetros del modelo obtenidos con el ajuste

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

Figuras

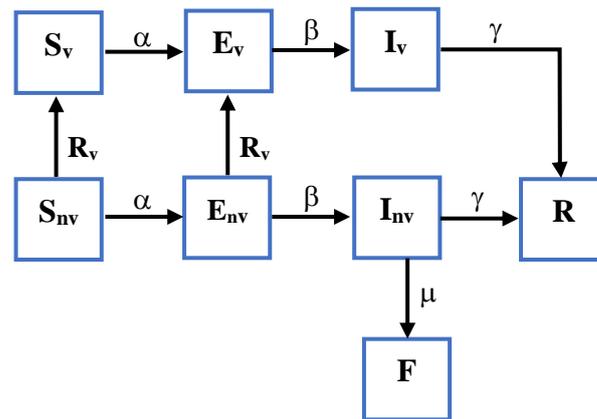


Figura 1. Estructura del modelo físico propuesto.



Figura 2. Tendencia del régimen de vacunación en Perú

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

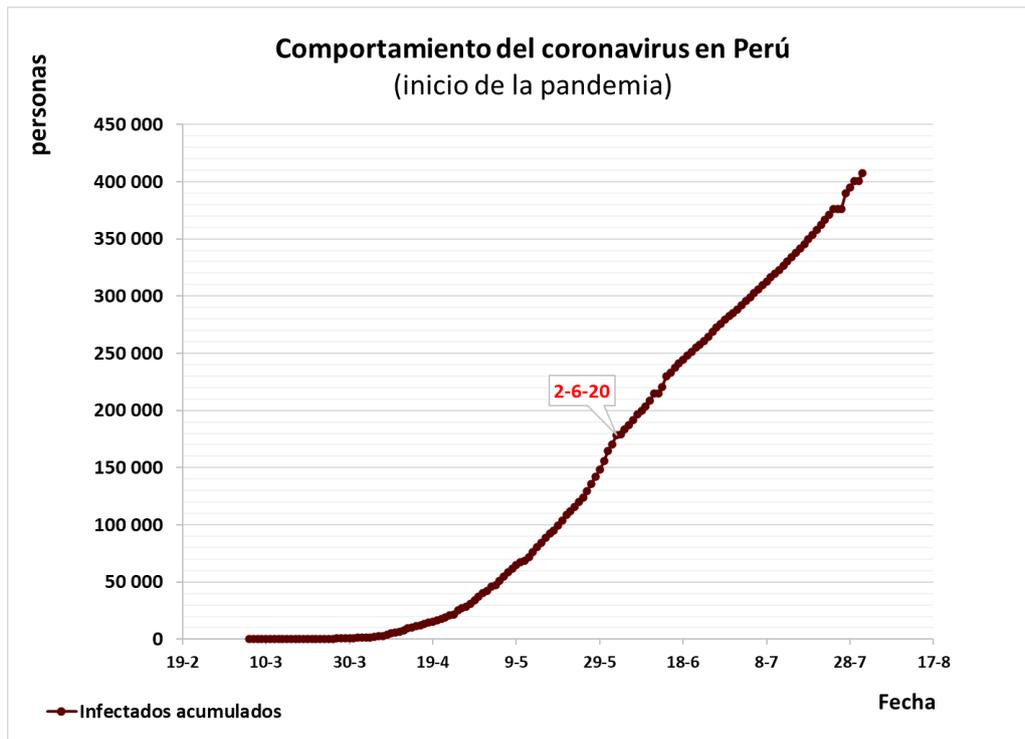
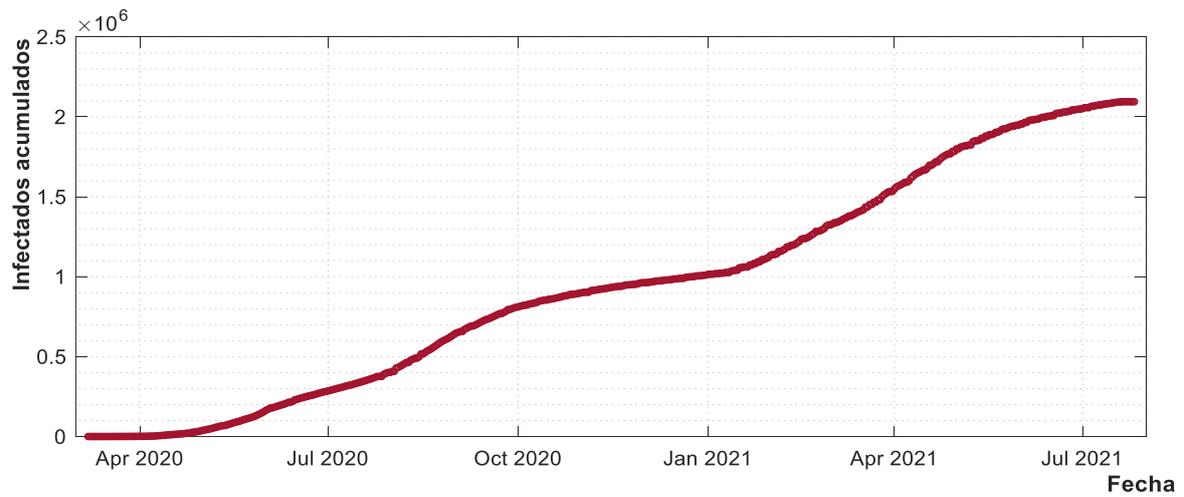
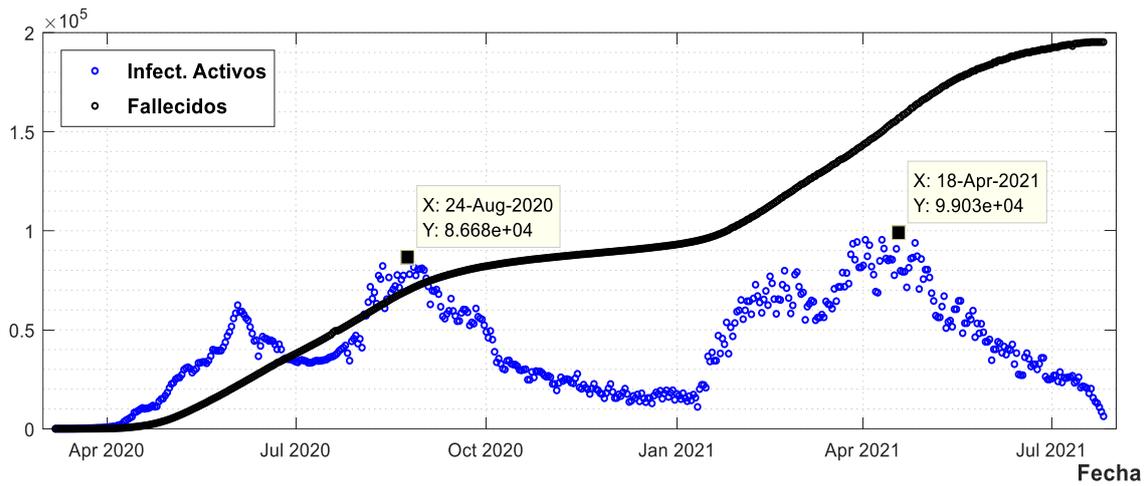


Figura 3. Comportamiento de los infectados al inicio de la pandemia en Perú

Fuente: (Taramona et al. 2020)



4 (a)



4 (b)

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)

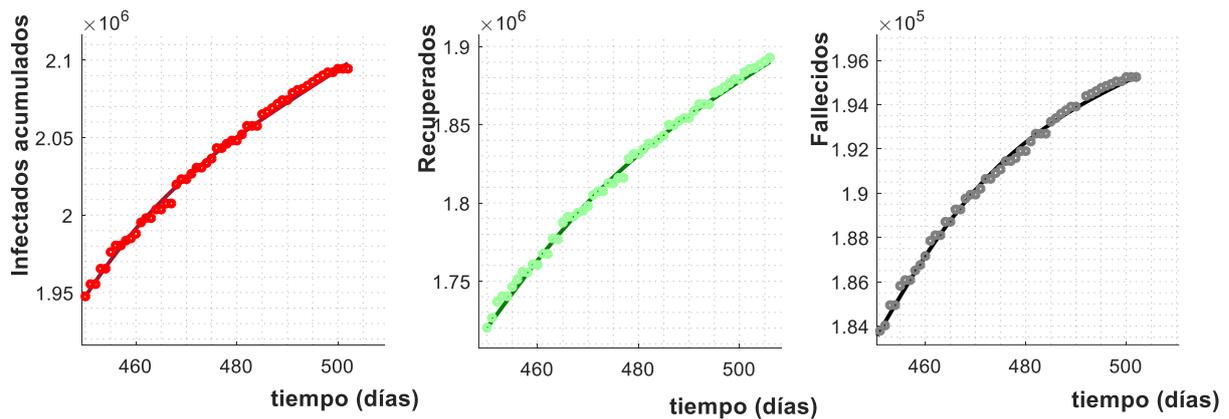


Figura 5. Ajuste del modelo matemático a los datos de la pandemia de la COVID-19 en Perú

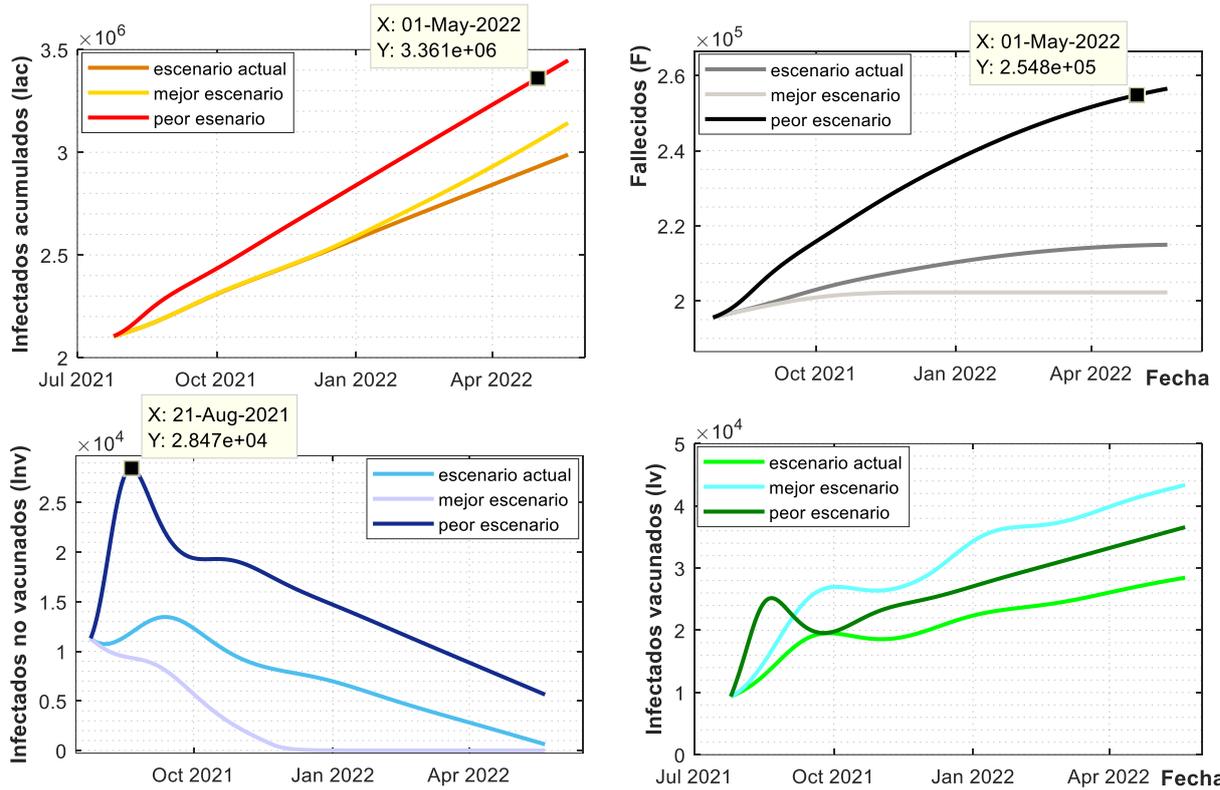


Figura 6. Resultados de la simulación de escenarios para las variables I_{ac} , F , I_{nv} , I_v

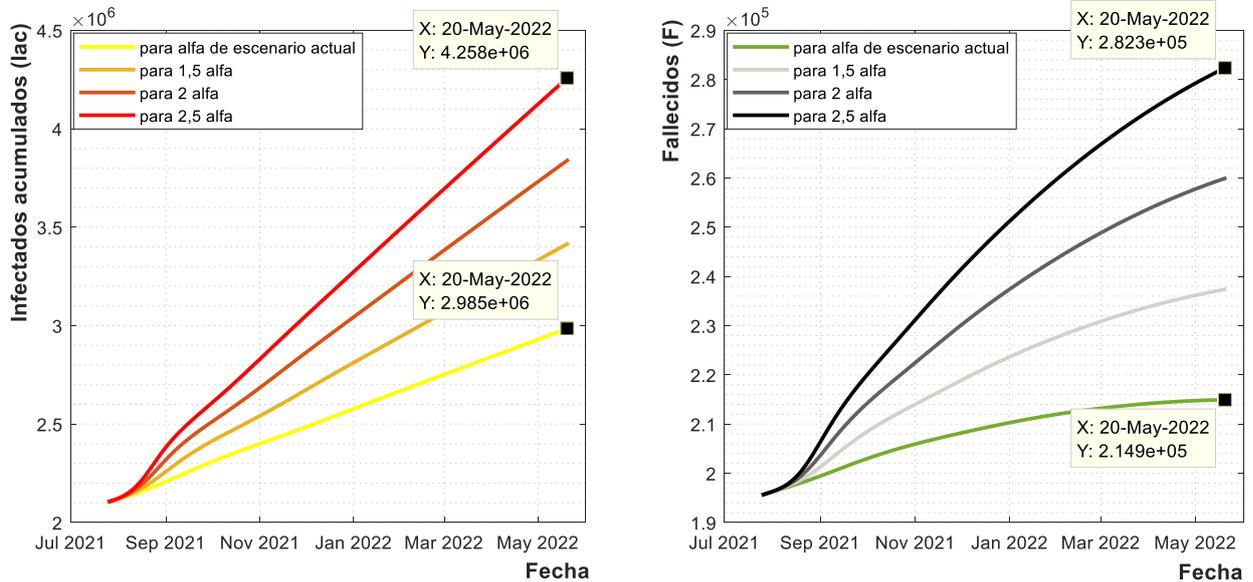


Figura 7. Efecto de la exposición de la población expresada como (α) en los contagios y los fallecimientos

Conflicto de intereses:

Los autores de este trabajo declaran que no existen conflictos de interés en la investigación presentada.

Contribución de los autores:

- Héctor Eduardo Sánchez Vargas: conceptualización (líder), aplicación de técnicas computacionales para el procesamiento de datos, creación de modelos, programación lineal, redacción del borrador inicial.
- Alberto Taramona Ruiz: Administración del proyecto, conceptualización (igual), provisión de recursos (líder), supervisión
- Amyrsa Salgado Rodríguez: conceptualización (de apoyo), redacción del borrador inicial (de apoyo)
- Maribel Huatuco Lozano: conceptualización (de apoyo), recopilación de datos
- Fernando Castillo Picón: conceptualización (de apoyo), provisión de materiales (igual), revisión crítica del borrador inicial

Este preprint fue presentado bajo las siguientes condiciones:

- Los autores declaran que son conscientes de que son los únicos responsables del contenido del preprint y que el depósito en SciELO Preprints no significa ningún compromiso por parte de SciELO, excepto su preservación y difusión.
- Los autores declaran que se obtuvieron los términos necesarios del consentimiento libre e informado de los participantes o pacientes en la investigación y se describen en el manuscrito, cuando corresponde.
- Los autores declaran que la preparación del manuscrito siguió las normas éticas de comunicación científica.
- El manuscrito depositado está en formato PDF.
- Los autores aceptan que el manuscrito aprobado esté disponible bajo licencia [Creative Commons CC-BY](#).
- Los autores declaran que los datos, las aplicaciones y otros contenidos subyacentes al manuscrito están referenciados.
- El autor que presenta el manuscrito declara que las contribuciones de todos los autores y la declaración de conflicto de intereses se incluyen explícitamente y en secciones específicas del manuscrito.
- Los autores declaran que el manuscrito no fue depositado y/o previamente puesto a disposición en otro servidor de preprints o publicado en una revista.
- Si el manuscrito está siendo evaluado o siendo preparando para su publicación pero aún no ha sido publicado por una revista, los autores declaran que han recibido autorización de la revista para hacer este depósito.
- El autor que envía el manuscrito declara que todos los autores del mismo están de acuerdo con el envío a SciELO Preprints.
- Los autores declaran que la investigación que dio origen al manuscrito siguió buenas prácticas éticas y que las aprobaciones necesarias de los comités de ética de investigación, cuando corresponda, se describen en el manuscrito.
- Los autores aceptan que si el manuscrito es aceptado y publicado en el servidor SciELO Preprints, será retirado tras su retractación.