



LOGISTICS ESTIMATION OF THE COVID-19 VACCINATION PROCESS IN PERU

ESTIMACIÓN LOGÍSTICA DEL PROCESO DE VACUNACIÓN CONTRA LA COVID-19 EN EL PERÚ

Olegario Marín-Machuca^{1*}; Luis Alberto Dávila-Solar²; Walter Eduardo Blas-Ramos³; Luz Eufemia López-Ráez⁴; Fredy Aníbal Alvarado-Zambrano⁵; Ricardo Arnaldo Alvarado-Zambrano⁶ & Obert Marín-Sánchez⁷

- ¹ Escuela Profesional de Ingeniería Alimentaria. Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura (FOPCA). Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental (GISA), Escuela Universitaria de Posgrado (EUPG). Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú. omarin@unfv.edu.pe
- ² Escuela Profesional de Ingeniería Alimentaria. Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura (FOPCA). Escuela Universitaria de Posgrado (EUPG), Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú. ldavila@unfv.edu.pe
- ³ Escuela Profesional de Ingeniería Alimentaria. Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura (FOPCA). Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú. wblas@unfv.edu.pe
- ⁴ Escuela Profesional de Ingeniería Alimentaria. Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura (FOPCA). Escuela Universitaria de Posgrado (EUPG), Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú. llopezr@unfv.edu.pe
- ⁵ Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias, Laboratorio de Análisis Sensorial de Alimentos. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Ancash, Perú. falvaradoz@unasam.edu.pe
- ⁶ Facultad de Industrias Alimentarias. Departamento de Ciencia y Tecnología. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. aalvarado@uas.edu.pe
- ⁷ Facultad de Medicina, Departamento Académico de Microbiología Médica. Grupo de Investigación en Inmunología y Cáncer (INMUCA), Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. omarin@unmsm.edu.pe
- * Corresponding author: omarin@unfv.edu.pe

Olegario Marín-Machuca:  <https://orcid.org/0000-0002-0515-5875>

Luis Alberto Dávila-Solar:  <https://orcid.org/0000-0002-6562-1313>

Walter Eduardo Blas-Ramos:  <https://orcid.org/0000-0001-7817-122X>

Luz Eufemia López-Ráez:  <https://orcid.org/0000-0002-5425-1900>

Fredy Aníbal Alvarado-Zambrano:  <https://orcid.org/0000-0002-2713-656X>

Ricardo Arnaldo Alvarado-Zambrano:  <https://orcid.org/0000-0002-5060-6428>

Obert Marín-Sánchez:  <https://orcid.org/0000-0003-2912-1191>

Este artículo es publicado por la revista Paideia XXI de la Escuela de posgrado (EPG), Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



ABSTRACT

While it is true that vaccines generate immunity with a high degree of effectiveness and that in Peru, a certain time was spent initiating the COVID-19 disease, a vaccination process that was developed logistically. The objective was to obtain the mathematical model of the COVID-19 vaccination process in Peru, to estimate the number of people vaccinated, the critical time for which the estimated rate of vaccinated people has been the highest value, and to specify the date on which the highest number of people vaccinated has occurred. The methodology was based on determining the form of a dispersion of the vaccination process, this being a logistic distribution and considering that a mathematical model is a mathematical description, employing a function of a real-world phenomenon, such as the number of people vaccinated against the COVID-19 disease. The model presented a correlation coefficient of $r = -0.95$, the critical time (t_c) was 286 days, and the maximum rate of vaccinated persons was 143071 persons/day, dated December thirteenth, 2022: between March second, 2021, and March ninth, 2022. The estimated number of people vaccinated against COVID-19 disease was determined by the equation $\hat{N} = \frac{28601461}{1+89,0602 \times e^{-0,0157 \times t}}$ and the rate of change or rate of estimated persons vaccinated against COVID-19 in Peru was calculated by the equation $\frac{d\hat{N}}{dt} = \frac{39949527,1600 \times e^{-0,0157 \times t}}{(1+89,0602 \times e^{-0,0157 \times t})^2}$; the correlation coefficient between the elapsed time t (days) and the number of people vaccinated (N), based on twenty-five cases, was $r = -0.95$, representing a “very strong correlation” between the elapsed time (t) and the number of people vaccinated (N), and the coefficient of determination indicates that 89.47 % of the variance in N is explained by t ; for the vaccination process against COVID-19 in the country; concluding that the theory of Bronshtein & Semendiaev and the logistic models can be adequately applied to pandemic and epidemiological phenomena, that the critical time (t_c), for the contagions was two hundred eighty-six days, reaching its maximum speed of contagion estimated at 112142 persons/day.

Keywords: COVID-19 – critical time – logistics estimation – Peru – vaccination – velocity

RESUMEN

Si bien es cierto que las vacunas generan inmunidad con alto grado de efectividad y que en el Perú se realizó a cierto tiempo de iniciada la enfermedad COVID-19, este proceso de vacunación se desarrolló logísticamente. El propósito fue obtener un modelo matemático del proceso de vacunación contra la enfermedad de la COVID-19 en el Perú, para estimar el número de personas vacunadas, el tiempo crítico para el cual la velocidad estimada de personas vacunadas ha sido la de mayor valor, y precisar la fecha en que se ha producido la mayor cantidad de personas vacunadas. La metodología se basó en determinar la forma de dis-

persión del proceso de vacunación, siendo esta una distribución logística y teniendo en cuenta que un modelo matemático es una descripción matemática, mediante una función de un fenómeno del mundo real, como el número de vacunados contra la enfermedad COVID-19. El modelo presentó un coeficiente de correlación $r=-0,95$, el tiempo crítico (t_c) y la velocidad máxima de personas vacunadas, de fecha trece de diciembre del 2022; entre el dos de marzo del 2021 y el nueve de marzo del 2022. El número estimado de personas vacunadas contra la enfermedad COVID-19 fue determinado por la ecuación $\hat{N} = \frac{28601461}{1+89,0602 \times e^{-0,0157 \times t}}$ y la razón de cambio o velocidad de personas estimadas vacunadas contra la COVID-19 en el Perú, se calculó por la ecuación $\frac{dN}{dt} = \frac{39949527,1600 \times e^{-0,0157 \times t}}{(1+89,0602 \times e^{-0,0157 \times t})^2}$; el coeficiente de correlación entre el tiempo transcurrido t (días) y el número de personas vacunadas (N), basado en veinticinco casos, fue de $r=-0,95$, representando una “correlacion muy fuerte” entre el tiempo transcurrido (t) días y el número de personas vacunadas (N), y el coeficiente de determinación indica que el 89,47 % de la variancia en N es explicada por t ; para el proceso de vacunación contra la COVID-19 en el país; concluyendo que la teoría de Bronshtein & Semendiaev y los modelos logísticos se pueden aplicar adecuadamente a fenómenos pandémicos y epidemiológicos, que el tiempo crítico (t_c), para los contagios fue de doscientos ochenta y seis días, llegando a su velocidad máxima de contagio estimada de 112142 personas/día.

Palabras clave: COVID-19 – estimación logística – Perú – tiempo crítico – vacunación – velocidad

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las vacunas contra el COVID-19 se dio tan pronto como se publicó el genoma del virus a principios de enero del 2020 (Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses, 2020). Se usó tecnología sofisticada y se desarrollaron vacunas diferentes que se distribuyeron a fines de diciembre de 2020 en campañas de vacunación masiva en todo el mundo (Dai & Gao, 2021). Así actualmente las vacunas proporcionan inmunidad contra

el SARS-CoV-2 al generar anticuerpos neutralizantes a través de mecanismos definidos molecularmente, en virtud que todas las vacunas son capaces de desencadenar la generación endógena de proteína que a su vez resulta en la formación de anticuerpos neutralizantes y respuestas celulares al COVID-19 (Billah *et al.*, 2020), deteniendo su propagación y posterior manifestación fisiopatológica (Anderson *et al.*, 2020).

La vacunación es clave en el éxito del control de enfermedades y a pesar

del creciente número de vacunas eficaces y seguras en el mercado, la reticencia a las vacunas es un problema creciente de implicancias globales; tomando importancia debido a los brotes de enfermedades prevenibles que se encontraban previamente controladas con las vacunas y la aceptación de vacunarse, contra la COVID-19 (Sallam, 2021), es una discusión relevante debido a la desinformación, desconfianza y teorías de la conspiración que han obstaculizado la adopción de otras medidas de mitigación comunitaria contra la enfermedad, del cual las vacunas no han sido ajenas (Herrera-Añazco *et al.*, 2021). Habiéndose administrado según la Organización Mundial de la Salud (OMS) más de 4 mil millones de dosis de vacunas contra esta enfermedad (Sallam, 2021). Se considera que la vacunación del 60-80 % de la población mundial permitirá la inmunidad colectiva contra COVID-19 (Britton *et al.*, 2020).

Perú no solo ha sido uno de los países más afectados por la mortalidad por COVID-19, sino que también ha experimentado un estado de emergencia sanitaria decretada el 15 de marzo de 2020 (Tenorio-Mucha *et al.*, 2022). Por lo cual se asignó al Centro Nacional de Abastecimiento de Recursos Estratégicos en Salud (CENARES), la ejecución del contrato de compraventa con la empresa Sinopharm® para la compra de la primera vacuna aprobada en Perú en enero del 2021 (MINSA, 2021), seguida por AstraZeneca® en el mismo mes, el registro por DIGEMID en Perú

fue de PFIZER®, el cual se produjo en febrero de 2021, lo que permitió su importación y uso en campañas de vacunación (DIGEMID, 2021). Observándose que la eficacia de las dos vacunas distribuidas en el Perú (Sinopharm y Pfizer) han mostrado que generan una inmunidad contra el virus recién a partir de los 14 días de aplicada cada dosis (Polack *et al.*, 2020).

En abril de 2021, AstraZeneca obtuvo permiso de la DIGEMID para la inmunización activa de los peruanos mayores de 18 años y en julio de 2021, la vacuna Jansen de Johnson & Johnson fue aprobada por DIGEMID; siendo la vacuna Sinopharm, última en obtener registro sanitario condicional en Perú, en agosto de 2021 (Vizcardo *et al.*, 2022).

En nuestro país, la estrategia de vacunación con la dosis de refuerzo incluyó a la población de mayores de 18 años en los que hayan transcurrido al menos tres meses desde la aplicación de la segunda dosis (Quispe *et al.*, 2022).

El Perú ha sido uno de los países más afectados por la pandemia del COVID-19 y según Ministerio de Salud (MINSA), para el 7 de junio de 2021, se reportó un acumulado de más de 1,9 millones de casos y más de 186 500 fallecidos por la COVID-19 el 7 de febrero de 2021, llegó el primer lote de vacunas al Perú, iniciándose el proceso de vacunación contra la COVID-19 y a pesar de que a la fecha (treinta y uno de diciembre del 2021) se han aplicado más de cuatro millones de dosis, al

igual que en el resto del mundo, en el Perú, la aceptación de la vacuna no es total, que según encuesta publicada por Ipsos en febrero de 2021, de existir una vacuna disponible y gratuita contra la COVID-19, el 35 % de la población del país no se vacunaría, siendo la primera razón el miedo a los efectos adversos (Herrera-Añazco *et al.*, 2021).

Una de las mayores motivaciones para el desarrollo científico es la comprensión de fenómenos del mundo real, con valores reales, en función a que durante las últimas décadas hemos observado una explosión del conocimiento científico, que se ha visto reflejado en asombrosos avances en nanotecnología o ingeniería genética (Harari, 2017). En la actualidad, un método muy extendido para describir procesos reales es la modelización matemática, conteniendo parámetros que requieren su estimación a partir de datos experimentales; donde la toma de estos datos debe proporcionar la mayor información posible con el objetivo de minimizar la incertidumbre de los parámetros y poder proporcionar predicciones más fiables y reales (Ruiz, 2018).

La importancia de hacer modelaciones radica en poder entender el número de vacunados y porque no hacer predicciones con respecto al comportamiento futuro, cubriendo las etapas de modelar el número de vacunados en función del tiempo, formular y elegir, mediante la dispersión de la data, determinar el modelo logístico para analizarlo, sacar conclusiones

matemáticas, y realizar predicciones acerca del número de muertes por la COVID-19 en el Perú y la velocidad con que se han dado los decesos.

El objetivo fue obtener un modelo logístico del proceso de vacunación contra la enfermedad COVID-19 en el Perú, para estimar, según el tiempo transcurrido, el número de personas vacunadas, el tiempo crítico para el cual la velocidad estimada de personas vacunadas sea la cantidad óptima, y precisar la fecha en que se ha producido la mayor cantidad de personas vacunadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El protocolo empleado se basó en la constante específica del modelo de crecimiento poblacional de vacunas (k), donde las condiciones del proceso ejercen restricciones sobre el número de vacunados contra el COVID-19 en el Perú, teniendo presente que la constante k va a decrecer a medida que las vacunas aumentan y partiendo que el k de las personas vacunadas (crece o decrece) sólo depende del número de personas y no de mecanismos dependientes del tiempo, tales como los fenómenos no estacionales; llegando a determinar una ecuación logística cuya solución es una función logística. Teniendo en cuenta que un modelo matemático es una descripción matemática, con frecuencia, mediante una función o ecuación de un fenómeno del mundo real, como el número de vacunados contra la enfermedad COVID-19 en el Perú; cuyo propósi-

to es entender el proceso de vacunación y porque no hacer predicciones con respecto al comportamiento futuro. Las etapas cubiertas fueron: 1) el problema de modelar fue una función del número de personas vacunadas en función del tiempo, 2) formular y elegir, mediante la dispersión de la data, el modelo logístico, 3) determinar el modelo, analizarlo y sacar las conclusiones matemáticas, y 4) realizar predicciones (estimaciones) acerca del número de personas vacunadas contra la enfermedad COVID-19 en el Perú. Teniendo en cuenta que el modelo matemático nunca es una representación totalmente precisa, que solo es una idealización, que simplifica el número de personas vacunadas contra la enfermedad COVID-19 en el Perú, y que es lo suficientemente precisa para promover conclusiones valiosas y discusiones relevantes.

La teoría de Modelamiento Empírico (Bronshtein & Semendiaev, 2018) sobre el número de casos reportados (M), en función del tiempo transcurrido, t , (días). Determinando el comportamiento (figura 1) de los datos estadísticos (tabla 1) del número de personas vacunadas contra la COVID-19 en el Perú, del tipo

$$N = \frac{M}{1+Q \times e^{k \times t}} \quad \dots(1)$$

Donde " M " es una cantidad máxima posible de personas vacunadas, " Q " es una cantidad preexponencial, es una constante de proporcionalidad, " k " es el tiempo transcurrido (días) de contagio y " N " es el número de personas

vacunadas. La forma de calcular M es considerando tres valores aleatorios independientes y sus correspondientes valores dependientes de la tabla 1.

Bronshtein & Semendiaev (2018) mencionan que para obtener los valores máximos (M) para este tipo de modelos se debe usar de preferencia el primer valor (A) que debe ser, precisamente en el momento en la que el comportamiento presenta un punto de inflexión, el segundo valor (B) es el último dato y el tercer valor (I) es un valor intermedio ente entre los valores A y B . Este valor intermedio, es la media entre el primero y el último valor. Luego, se aplica la fórmula:

$$M = \frac{A \times B - I^2}{A + B - 2I} \quad \dots(2)$$

Datos estadísticos

Al nueve de marzo del 2023, se han registrado en el Perú alrededor de 28,5 millones de personas vacunadas, contrarrestando las infecciones por el coronavirus (SARS-CoV-2), ocasionando la enfermedad COVID-19, que se originó en la ciudad de Wuhan (China), extendiéndose a todos los países del mundo. Los casos acumulados de personas vacunadas en el Perú en función del tiempo transcurrido (días) se presentan en la tabla 1 (Estado de Salud, 2022).

Tabla 1. Datos estadísticos del número de personas vacunadas contra la enfermedad COVID-19 en el Perú, en función del tiempo transcurrido (días).

Fecha	Tiempo transcurrido <i>t</i> , (días)	N (número de vacunados)
02/03/2021	1	2150
02/04/2021	31	395629
02/05/2021	61	710774
02/06/2021	92	441894
03/07/2021	123	3519344
03/08/2021	154	5808194
03/09/2021	185	8761805
03/10/2021	215	12348965
04/11/2021	247	16099451
04/12/2021	277	19552457
04/01/2022	308	22274999
04/02/2022	339	23566679
04/03/2022	367	25114368
04/04/2022	398	26438834
04/05/2022	428	27161831
04/06/2022	459	27509831
06/07/2022	491	27759624
06/08/2022	522	27992634
06/09/2022	553	28173562
06/10/2022	583	28268046
05/11/2022	613	28309802
08/12/2022	646	28388340
06/01/2022	675	28447783
07/02/2022	707	28503188
09/03/2022	737	28545833

Tratamiento estadístico. Hernández-Sampieri *et al.* (2014), mencionan que el tratamiento estadístico de datos bivariados correlacionados implica determinar la validez de los modelos matemáticos mediante los coeficientes de correlación y determinación, validados por la prueba de significancia del coeficiente de correlación de Pear-

son (r), la cual se desea saber si el valor representa una relación real entre las dos variables. El error estándar se evalúa mediante:

$$t_c = \frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}} \times \sqrt{N-2} \quad (3)$$

Comparando el t de Student (t_{cal}) con el t de tabla (t_{tab}) se ha

concluido la relación entre el tiempo transcurrido, t (días) y el número de personas vacunadas N , el grado de diferencia y la estimación del modelo y, la interpretación de los coeficientes de correlación (r) y determinación (r^2) de los dos modelos matemáticos de estimación.

Aspectos éticos:

Los autores declaran que no presentan ningún aspecto ético según

normatividad nacional e internacional que esté vigente.

RESULTADOS

En cuanto a los resultados, para determinar el modelo logístico de estimación del comportamiento del número de personas vacunadas contra la enfermedad COVID-19 en el Perú, hemos realizado los cálculos que se presentan a continuación:

Primer valor: $t_1 = 247$ días, le corresponde: $A = 16\,099\,451$ personas vacunadas.
Segundo valor: $t_2 = 737$ días, le corresponde: $B = 28\,545\,833$ personas vacunadas.
Tercer valor: $t_3 = \frac{247 + 737}{2} = 492$ días, le corresponde: $I = 27\,767\,515$ personas vacunadas.

Ahora, reemplazamos en (2): $M = \frac{16099451 \times 28545833 - 27767515^2}{16099451 + 28545833 - 2(27767515)} = 28601461$

El modelo, ecuación (1): $N = \frac{M}{1+Q \times e^{k \times t}}$ se puede escribir $N = \frac{28601461}{1+Q \times e^{k \times t}}$

Aplicando el método de los mínimos cuadrados a la expresión; $\ln\left(\frac{28601461}{N} - 1\right) = Q + k \times t$; obtenemos el modelo de estimación,

$$\hat{N} = \frac{28601461}{1 + 89,0602 \times e^{-0,0157 \times t}} \quad \dots (4)$$

Con un $r = -0,94$.

Derivando la ecuación (4) se obtiene la ecuación de estimación de velocidad de las personas contagiadas, expresada por la ecuación (5),

$$\frac{d\hat{N}}{dt} = \frac{39949527,1600 \times e^{-0,0157 \times t}}{(1 + 89,0602 \times e^{-0,0157 \times t})^2} \quad \dots (5)$$

Derivando la ecuación (5) e igualando a cero se llega a determinar el tiempo crítico (t_c) para la cual la velocidad de las personas estimadas contagiadas es máxima,

$$t_c = -\frac{1}{k} \times \ln(1/Q) \quad \dots (6)$$

El tiempo fue $t_c = 286$ días y la velocidad máxima $\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\max} = 112142$ personas / día producido el trece de diciembre del 2021, fecha en la que hubo la máxima velocidad de personas vacunadas.

El número estimado de personas vacunadas contra la enfermedad COVID-19 queda determinada por

la ecuación (4). La razón de cambio o velocidad de personas estimadas vacunadas contra la COVID-19 en el Perú, queda determinada por la ecuación (5).

Prueba de significancia de r .

El coeficiente de correlación de Pearson

para el tiempo transcurrido t (días) y el número de personas vacunadas (N) contra la enfermedad COVID-19 en el Perú basado en veinticinco datos, fue

de $r = -0,94$. Este valor de r representa una relación real entre las dos variables; en la cual el error estándar de r fue calculada por la ecuación (1).

$$t_{cal} = \frac{|-0,9459|}{\sqrt{1-(-0,9459)^2}} \times \sqrt{25-2} = 14,46 \quad y \quad t_{tab(23;0,95)} = 1,71$$

Interpretación:

como $t_{cal} = 14,46$ es mayor que $t_{cal} = 1,71$; se concluye que la relación entre el tiempo, t (días) y el número de personas vacunadas N (personas) es real; por lo tanto, existe diferencia significativa y que el modelo obtenido (ecuación 2) tiene alta estimación de los datos correlacionados. Además, existe

una “correlacion muy fuerte” entre el tiempo transcurrido (t) y el número de personas vacunadas (N), mientras que el coeficiente de determinación ($r^2 \times 100$) indica que el 89,47 % de la variancia en N es explicada por t ; para el proceso de vacunación contra la COVID-19 en el Perú.

Tabla 2. Datos de tiempo transcurrido, personas vacunadas, estimado del número de personas vacunadas y velocidad estimada del número de personas vacunadas contra la enfermedad COVID-19 en el Perú.

Tiempo transcurrido t , (días)	N (número de vacunados)	\hat{N} (número estimado de personas vacunadas)	dN / dt
0	2150	317582	4925,4490
31	395629	513114	7902,9889
61	710774	813026	12388,8332
92	441894	199582	19455,7460
123	3519344	2055778	29924,1445
154	5808194	3200407	44576,7638
185	8761805	4865537	63326,9361
215	12348965	7069160	83466,0361
247	16099451	10060193	10228,5480
277	19552457	13298376	111590,9922
308	22274999	16752362	108846,1110
339	23566679	19934825	94735,8883
367	25114368	22343042	76675,8245
398	26438824	24400490	56208,2151
428	27161831	25825305	39313,4280
459	27509831	26828789	26078,4046

Continúa Tabla 2

Continúa Tabla 2

491	27759624	27501946	16581,2085
522	27992634	27915480	10500,4624
553	28173562	28175889	6575,0996
583	28268046	28334250	4151,6222
613	28309802	28434033	2610,4694
646	28388340	28501496	1562,3165
675	28447783	28537796	993,4494
707	28503188	28563014	602,1684
737	28545833	28577443	376,3604

DISCUSIÓN

El modelo matemático obtenido (ecuación 4) para estimar el número de personas vacunadas contra la COVID-19 en el Perú resultó aceptable, alcanzado un coeficiente de correlación de Pearson de $r = -0,94$ coincidiendo, en el sentido que un coeficiente de correlación mayor a $a = -0,90$ implica una correlación negativa muy fuerte. El modelo matemático de velocidad (ecuación 5), estima que el mayor número de personas vacunadas (personas/día) contra la enfermedad COVID-19 en el Perú, es 112141 personas / día, cuya fecha calendarizada sucedió el trece de diciembre del 2022, coincidiendo, en el sentido que al aplicar la derivada de un modelo cualesquiera y sobre todo a algún modelo logístico, siempre se van a obtener razones de cambio o variabilidad y valores críticos o precisos de la variable independiente (en este caso tiempo en días) para estimar valores óptimos de la variable dependiente (en este caso personas estimadas vacunadas); reportado por Manrique-Abril *et al.* (2020) y Marín-Machuca *et al.* (2020). En el modelo matemático de estimación (ecuación

4), la constante de proporcionalidad y los coeficientes de correlación y determinación son de gran importancia para analizar y estimar datos de fenómenos de protección de la salud pública; coincidiendo con lo mencionado por Hernández-Sampieri *et al.* (2014). Un método muy extendido para describir procesos reales es la modelización matemática, conteniendo parámetros que requieren su estimación a partir de datos experimentales sólidos, confiables y reales; provenientes de casos reales (como el caso de la enfermedad COVID-19 y generando resultados en base a parámetros necesarios para estimar modelos logísticos reales de variables reales (Ruiz, 2018).

Del estudio se concluye que la teoría de Bronshtein & Semendiaev (2018) se puede aplicar sin mayor dificultad, siempre y cuando se considere en qué tiempo los procesos o fenómenos manifiestan un comportamiento de que no siempre van a ascender o no siempre van a descender. Los modelos logísticos (factuales) se pueden aplicar, por lo general y con la mayor rigurosidad posible, a fenómenos pandémicos y epidemiológicos con

alta resolución y con alto grado de acercamiento o estimación a los datos reales, basado en otras aplicaciones prácticas de casos reales y resultados reales dentro de los modelos logísticos y reales (Harari, 2017). El tiempo crítico (t_c), para los contagios a nivel mundial fue de doscientos ochenta y seis días, llegando a su velocidad máxima de contagio estimados de 112142 personas/día. Del tratamiento estadístico realizado a los datos y de los modelos obtenidos se ha determinado que el coeficiente de correlación de la ecuación (4) tienen una “correlación negativa muy fuerte” entre el número de contagios estimados y el tiempo transcurrido (días), por la COVID-19.

Para tener una mejor estimación del modelo, se recomienda que los datos estadísticos, en cuanto a la variable dependiente (número de personas vacunadas por la COVID-19) debe estar en función de más variables independientes; los datos de la variable independiente deben estar igualmente espaciados para aplicar otras técnicas de cálculo, análisis e interpretación.

Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

OMM=Olegario Marín-Machuca
 LADS= Luis Alberto Dávila-Solar
 WEBR=Walter Eduardo Blas Ramos
 LELR=Luz Eufemia López Ráez
 FAAZ=Fredy Aníbal Alvarado Zambrano
 RAAZ=Ricardo Arnaldo Alvarado Zambrano
 OMS=Obert Marín Sánchez

Conceptualization: OMM, LELR
Data curation: OMM, LADS, OMS
Formal Analysis: WEBR, FAAZ
Funding acquisition: RAAZ
Investigation: OMM, LADS, OMS, FAAZ
Methodology: FAAZ, OMM
Project administration: OMM
Resources: OMM, OMS
Software: WEBR
Supervision: LELR, OMS, LADS
Validation: LELR, OMS
Visualization: OMS
Writing – original draft: OMM
Writing – review & editing: OMM, LADS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, R. M., Vegvari, C., Truscott, J., & Collyer, B. S. (2020). Challenges in creating herd immunity to SARS-CoV-2 infection by mass vaccination. *Lancet (London, England)*, 396(10263), 1614–1616.

Billah, M. A., Miah, M. M., & Khan, M. N. (2020). Reproductive number of coronaviruses: A systematic review and meta-analysis based on global level evidence. *PloS one*, 15, e0242128.

Britton, T., Ball, F., & Trapman, P. (2020). A mathematical model reveals the influence of population heterogeneity on herd immunity to SARS-CoV-2. *Science (New York, N.Y.)*, 369(6505), 846–849.

Bronstein, I., & Semendiaev, K. (2018). *Manual de matemáticas para ingenieros y estudiantes*. 4ª Edición. Editorial Mir.

- Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses (2020). The species severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2. *Nature microbiology*, 5, 536–544.
- Dai, L., & Gao, G. F. (2021). Viral targets for vaccines against COVID-19. *Nature reviews. Immunology*, 21, 73–82.
- DIGEMID. (2021). *Otorga registro sanitario condicional a vacuna de Pfizer contra la COVID-19*.
<https://rpp.pe/peru/actualidad/coronavirus-en-peru-digemid-otorga-registro-sanitario-condicional-a-vacuna-de-pfizer-contra-la-covid-19-noticia-1318775>
- Estado de Salud. (2022). *COVID 19: Numero acumulado de casos en el mundo 2020-2022*.
<https://es.statista.com/estadisticas/1104227/numero-acumulado-de-casos-de-coronavirus-covid-19-en-el-mundo-enero-marzo/>
- Harari, Y. N. (2017). *Homo deus: a brief history of tomorrow*. Harper Perennial.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación*. Editorial McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Herrera-Añazco, P., Uyen-Cateriano, Á., Urrunaga-Pastor, D., Bendezu-Quispe, G., Toro-Huamanchumo, C. J., Rodríguez-Morales, A. J., Hernández, A. V., & Benites-Zapata, V. A. 2021. Prevalence and factors associated with the intention to be vaccinated against COVID-19 in Peru. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 38, 381–390.
- Manrique-Abril, C.A., Agudelo-Calderón, Víctor M., González-Chordá, Oscar., Gutiérrez-Lesmes, Cristian F., Téllez-Piñerez & Herrera-Amaya, Giomar 2020. Modelo SIR de la Pandemia de COVID-19 en Colombia. *Revista de Salud Pública*, 22, 123-131.
- Marín-Machuca, O., Zambrano-Cabanillas, A. W., García-Talledo, E. G., Ortiz-Guizado, J. I., Rivas-Ruiz, D. E., & Marín-Sánchez, O. 2020. Modelamiento matemático del comportamiento epidemiológico de la pandemia COVID-19 en China. *The Biologist (Lima)*, 18, 83-89.
- MINSA (2021). *Resolución Ministerial N° 023-2021-MINSA-CENARES se encarga de ejecutar el Acuerdo de Compraventa con la Empresa Sinopharm*. Ministerio de Salud: Lima, Perú.
<https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/1475842-023-2021-minsa>
- Sallam, M. (2021). COVID-19 Vaccine Hesitancy Worldwide: A Concise Systematic review of vaccine acceptance rates. *Vaccines (Basel)*, 9, 160.
- Polack, F. P., Thomas, S. J., Kitchin, N., Absalon, J., Gurtman, A., Lockhart, S., Perez, J. L., Pérez Marc, G., Moreira, E. D., Zerbini, C., Bailey, R., Swanson, K. A., Roychoudhury, S., Koury, K., Li, P., Kalina, W. V., Cooper, D., Frenck, R. W., Jr, Hammitt, L. L., Türeci, Ö., Gruber, W., Kathrin, U., & Clinical

- Trial Group. (2020). Safety and Efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 Vaccine. *The New England journal of medicine*, 383, 2603–2615.
- Quispe, G., Chuquineyra, B., Guzman, D., Urrunaga, D., Herrera, P., & Benites, V. (2022). Factors associated with not receiving a booster dose of COVID-19 vaccine in Peru. *Vaccines*, 10, 1183.
- Ruiz, S. C. M. (2018). *Metodologías para el diseño óptimo de experimentos en tecnologías de seguridad alimentaria*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Tenorio-Mucha, J., Portocarrero, J., Busta-Flores, P., Pesantes, M. A., & Lazo-Porras, M. (2022). Perceptions of acceptance and reluctance to COVID-19 vaccination in Peru. Percepciones de aceptabilidad y reticencia a las vacunas contra la COVID-19 en el Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 39, 274–280.
- Vizcardo, D., Figueroa, L., Pizarro, K., Alvarez, A., Yañez, J., & Mejia, C. (2022). Sociodemographic Predictors Associated with the Willingness to get vaccinated against COVID-19 in Perú: A cross-sectional survey. *Vaccines*, 10,48.

Received March 10, 2023.

Accepted April 26, 2023.