

Biotempo (Lima)



<https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo>

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

## MODELING AND ANALYSIS OF COVID-19 INFECTIONS IN PERU

## MODELADO Y ANÁLISIS DE LOS CONTAGIOS POR COVID-19 EN EL PERU

Olegario Marín-Machuca<sup>1\*</sup>; Julia Iraidá Ortiz-Guizado<sup>2</sup>; Fredy Aníbal Alvarado-Zambrano<sup>3</sup>; José Eduardo Candela-Díaz<sup>4</sup>; Carlos Enrique Chinchay-Barragán<sup>5</sup>; Ricardo Arnaldo Alvarado-Zambrano<sup>6</sup>, Luis Germán Jáuregui-del-Águila<sup>7</sup>, Ulert Marín-Sánchez<sup>8</sup> y María del Pilar Rojas-Rueda<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Alimentaria, Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias alimentarias y Acuicultura, Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental (GISA), Escuela Universitaria de Posgrado. Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. [omarin@unfv.edu.pe](mailto:omarin@unfv.edu.pe)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Departamento Académico de Ciencias Básicas, Universidad Nacional José María Arguedas. Apurímac, Perú. [jortiz@unagma.edu.pe](mailto:jortiz@unagma.edu.pe)

<sup>3</sup> Laboratorio de Análisis Sensorial de Alimentos, Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú. [falvaradoz@unasam.edu.pe](mailto:falvaradoz@unasam.edu.pe)

<sup>4</sup> Laboratorio de Tecnología de los Alimentos. Escuela Profesional de Ingeniería Alimentaria, Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias alimentarias y Acuicultura, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. [jcandela@unfv.edu.pe](mailto:jcandela@unfv.edu.pe)

<sup>5</sup> Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos, Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú. [cchinchayb@unac.edu.pe](mailto:cchinchayb@unac.edu.pe)

<sup>6</sup> Facultad de Industrias Alimentarias. Departamento de Ciencia y Tecnología. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. [ralvaradoz@unasam.edu.pe](mailto:ralvaradoz@unasam.edu.pe)

<sup>7</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Alimentaria, Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias alimentarias y Acuicultura, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. [ljáuregui@unfv.edu.pe](mailto:ljáuregui@unfv.edu.pe)

<sup>8</sup> Dirección General de Asuntos Ambientales de Industria (DGAAMI). Ministerio de la Producción (PRODUCE). [umarins@produce.gob.pe](mailto:umarins@produce.gob.pe)

<sup>9</sup> Escuela Académico Profesional de Medicina Humana, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Norbert Wiener, Lima, Perú. [maria.rojasr@uwienner.edu.pe](mailto:maria.rojasr@uwienner.edu.pe)

\* Corresponding author: [omarin@unfv.edu.pe](mailto:omarin@unfv.edu.pe)

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

Julia Iraidá Ortiz-Guizado: <https://orcid.org/0000-0001-5626-7992>

Fredy Aníbal Alvarado-Zambrano: <https://orcid.org/0000-0002-7213-656X>

José Eduardo Candela-Díaz: <https://orcid.org/0000-0002-4198-5745>

Carlos Enrique Chinchay-Barragán: <https://orcid.org/0000-0003-0053-4865>

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

Luis Germán Jáuregui-del-Águila: <https://orcid.org/0009-0005-0062-8759>

Ulert Marín-Sánchez: <https://orcid.org/0000-0003-2487-782X>

María del Pilar Rojas-Rueda: <https://orcid.org/0000-0003-3812-7579>



**ABSTRACT**

Describe the COVID-19 pandemic in Peru, carry out mathematical statistical modeling, determine the critical time, the speed with which the pandemic developed and validate the estimated data; have characterized this research; whose objective has been to model and analyze COVID-19 infections in Peru, and compare infected people and estimated infected people; assess the critical time in which the maximum speed of estimated infected people occurs and statistically validate the model. The data on COVID-19 infections until February 24, 2023, has been taken into account; determining that they describe a sigmoidal logistic dispersion; an event that was mathematically modeled using the expression  $N=M/(1+B \times e^{-k \times t})$ , which is a predictive logistic equation. With the predictive mathematical model, the number of people infected and their behavior of COVID-19 in Peru was estimated. Likewise, the speed of people infected with COVID-19 in Peru was evaluated. The critical time ( $t_c$ ) was estimated for which the speed of infected people was maximum, values that are  $t_c=740$  days and the maximum speed  $(\frac{dN}{dt})_{\max}=6\,934,9307$  people/day, respectively and the date that there was the maximum speed of infections due to COVID-19 was February 28, 2022. The Pearson correlation coefficient for the time elapsed ( $t$ ) and the number of infected people ( $N$ ) in Peru, due to COVID-19, based on 37 cases, was  $r=-0.79$ ; determining that the relationship between time and the number of infections is real, that the predictive model has a high estimate of the correlated data, that there is a “very strong correlation” between the time elapsed ( $t$ ) and the number of infected people ( $N$ ) and that 63% of the variance in  $N$  is explained by  $t$ . It is concluded that the logistic model can be rigorously applied to pandemic and epidemiological phenomena with high resolution and a high degree of estimation and, it has been determined that the correlation coefficient has a “very strong negative association” between the number of infections due to COVID-19 and elapsed time in days.

**Keywords:** contagios – COVID-19 – estimation – logistic modeling – Peru – validation

**RESUMEN**

Describir la pandemia de la COVID-19 en el Perú, realizar un modelamiento estadístico matemático, determinar el tiempo crítico, la velocidad con que se desarrolló la pandemia y validar de los datos estimados; han caracterizado esta investigación; cuyo objetivo ha sido modelar y analizar los contagios por COVID-19 en el Perú, y comparar las personas contagiadas y las personas estimadas contagiadas; valorar el tiempo crítico en la que se produce la velocidad máxima de personas estimadas contagiadas y validar estadísticamente el modelo. Se ha tomado en cuenta los datos de contagios por la COVID-19 hasta el veinticuatro de febrero del 2023; llegando a determinar que describen una dispersión logística sigmoidal; suceso que fue modelado matemáticamente mediante la expresión  $N=M/(1+B \times e^{-k \times t})$ , que es una ecuación logística predictora. Con el modelo matemático predictivo se estimó el número de personas contagiadas y su comportamiento de la COVID-19 en el Perú. De igual forma se evaluó la velocidad de las personas contagiadas con la COVID-19 en el Perú. Se estimó el tiempo crítico ( $t_c$ ) para la cual la velocidad de personas contagiadas fue máxima, valores que son  $t_c=740$  y la velocidad máxima  $(\frac{dN}{dt})_{\max}=6\,934,9307$  personas/día, respectivamente y la fecha que hubo la máxima velocidad de contagios por la COVID-19, fue el 28 de febrero del 2022. El coeficiente de correlación de Pearson para el tiempo transcurrido ( $t$ ) y el número de personas contagiadas ( $N$ ) en el Perú, por la COVID-19, basado en 37 casos, fue de  $r=-0,79$ ; determinando que la relación entre el tiempo y el número de contagios, es real, que el modelo predictivo tiene alta estimación de los datos correlacionados, que existe una “correlación muy fuerte” entre el tiempo transcurrido ( $t$ ) y el número de personas contagiadas ( $N$ ) y que el 63 % de la variancia en  $N$  es explicada por  $t$ . Se concluye que el modelo logístico se puede aplicar con rigurosidad a fenómenos pandémicos y epidemiológicos con alta resolución y con alto grado de estimación y, se ha determinado que el coeficiente de correlación tiene una “asociación negativa muy fuerte” entre el número de contagios por la COVID-19 y el tiempo transcurrido en días.

**Palabras clave:** contagios – COVID-19 – estimación – modelado logístico – Perú – validación

## INTRODUCCIÓN

La forma de describir el comportamiento de la pandemia COVID-19 en el Perú, en cuanto al modelamiento estadístico matemático, el tiempo crítico (días) en que se produce el mayor contagio posible, la rapidez o velocidad con que se desarrolla, la validación de los datos estimados; junto con otros indicadores de salud pública mundial; constituyen un verdadero problema de prevención, que con seguridad sirven de datos referenciales para afrontar otros problemas similares de salud en el Perú (Tellier *et al.*, 2019).

Un estudio reciente sobre la relación entre el clima y la transmisión del virus de la influenza menciona que la transmisión aumenta en presencia de aire frío y baja humedad (Chen *et al.*, 2017; Tellier *et al.*, 2019).

Marín-Machuca *et al.* (2020) mencionan que el modelado para la COVID-19 en China se basó en determinar la relación entre la variación del número de casos reportados ( $dN$ ) y la variación del tiempo transcurrido ( $dt$ ), denominado velocidad con que el fenómeno de casos es reportado.

Se ha encontrado que, en ambientes abiertos, la turbulencia atmosférica puede facilitar que el virus se mantenga suspendido por más tiempo y viajar mayores distancias; describiendo comportamientos exponenciales de contagios (Liu *et al.*, 2019). El SARS-CoV-2 que causa la enfermedad COVID-19 es capaz de unirse a partículas atmosféricas, depositarse sobre las superficies, por lo que es preferible mantener las habitaciones ventiladas, teniendo cuidado de no recibir directamente el aire que sale de otras habitaciones, para reducir de forma exponencial los contagios (Guo *et al.*, 2020; Levison, 2020; World Health Organization, 2020).

La problemática se refleja en la falta de aplicar conocimientos estadísticos, matemáticos y logísticos y, validar los parámetros y factores de los modelos de estimación para relacionar, estimar o predecir para tiempos transcurridos (fechas de sucesos) el número de casos infectados que, de no saberlo lleva a un vacío científico inminente (Marín-Machuca *et al.*, 2020). Un modelo matemático es una descripción matemática mediante una función o ecuación de un fenómeno del mundo real, tal como los contagios por la COVID-19 en el Perú, y cuyo propósito es entender el fenómeno y hacer predicciones con respecto al comportamiento futuro; cuyos modelos se deben validar usando las herramientas estadísticas y aceptar los modelos matemáticos de estimación (Hernández *et al.*, 2014).

El modelo matemático y estadístico de estimación que describe un crecimiento inicialmente exponencial, se basa del modelo Verhulst-Pearl, que describe un crecimiento inicialmente exponencial, pero que se ralentiza a medida que la población se acerca a su capacidad de carga exponencial; generando la fórmula para calcular la dinámica de COVID-19 en Perú, que describe una dispersión logística de la forma:

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

donde “M” es el número máximo de casos, muertes y personas vacunadas, “Q” es una cantidad preexponencial, “k” es una constante de proporcionalidad, “t” es el tiempo transcurrido (en días) y “N” es el número de casos, muertes y personas vacunadas, según el caso (Marín-Machuca *et al.*, 2023).

Existen otras formas de modelar fenómenos atípicos de la COVID-19 tales como el modelo de dinámica de sistemas (SDM), el modelo basado en agentes (ABM) y la simulación de eventos discretos (DES), y sus híbridos en la investigación de COVID-19, que identifican innovaciones teóricas y de aplicación en salud pública (Zhang *et al.*, 2022).

Se ha encontrado el empleo de algunas modelaciones, como el modelo SV1V2EIR que revela el impacto de la vacunación de dos dosis en la COVID-19 mediante el uso de la derivada fraccional de Caputo. El número básico de reproducción del modelo mediante el método matricial de nueva generación se realiza el análisis de estabilidad local y global tanto para el estado de equilibrio libre de enfermedad como para el endémico; donde el modelo se valida con datos reales de casos acumulados de COVID-19 en la República de la India entre el 1 de enero y el 30 de abril de 2022 (Joshi *et al.*, 2022).

El objetivo planteado en el presente trabajo fue analizar el comportamiento de la pandemia del SARS-CoV-2, que ocasionó la enfermedad COVID-19 en el Perú, comparar las cantidades de personas contagiadas y personas estimadas contagiadas, valorar el tiempo crítico (días) para la cual se produjo la velocidad máxima de personas estimadas contagiadas y validar, estadísticamente, la confiabilidad de los modelos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las etapas cubiertas para el modelamiento matemático fueron: 1) el problema de modelar el número de contagios de la COVID-19 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 contagios por la COVID-19 en el Perú. Para modelar matemáticamente el comportamiento del número de casos contagiados por la COVID-19 en el Perú, nos hemos basado en la teoría de Modelamiento Empírico (Bronshstein & Semendiaev, 2018), sobre el número de casos reportados ( $N$ ), en función del tiempo transcurrido,  $t$  (días).

Los datos de la COVID-19 fueron tomados Sistema Informático Nacional de Defunciones (SINADEF) (2022) y de Estado de Salud (2022). Los casos acumulados de personas infectadas en el Perú en función del tiempo transcurrido (días) se presentan en la Tabla 1.

Se determinó el comportamiento de los datos estadísticos (Tabla 1) con base al número de personas contagiadas por la COVID-19. Se ha considerado que el modelo es logístico, del tipo  $N = \frac{M}{1+B \times e^{k \times t}}$ . Donde " $M$ " es un cantidad máxima posible, " $B$ " es una cantidad preexponencial, " $k$ " es una constante de proporcionalidad, " $t$ " es el tiempo transcurrido (días) de contagio y " $N$ " es el número de personas contagiadas. La forma de calcular  $M$  es considerando tres valores aleatorios independientes y sus correspondientes valores dependientes de la tabla 1.

Al veinticuatro de febrero del 2023 se han registrado en el Perú alrededor de 4,5 millones de casos de contagiados de coronavirus (SARS-CoV-2), ocasionados por la enfermedad COVID-19.

**Tabla 1.** Número de personas contagiadas por la COVID-19 en el Perú, en función del tiempo transcurrido (días), con frecuencia en días de intervalos no constantes entre marzo del 2020 al 24 de febrero del 2023.

Fecha	Tiempo (días)	(personas contagiadas)
05/03/2020	0	57
31/03/2020	26	1317
07/04/2020	33	4929
16/05/2020	72	102374
21/06/2020	108	267310
30/07/2020	147	436810
23/08/2020	171	627110
06/09/2020	185	720920
14/10/2020	223	884702
21/11/2020	261	961514

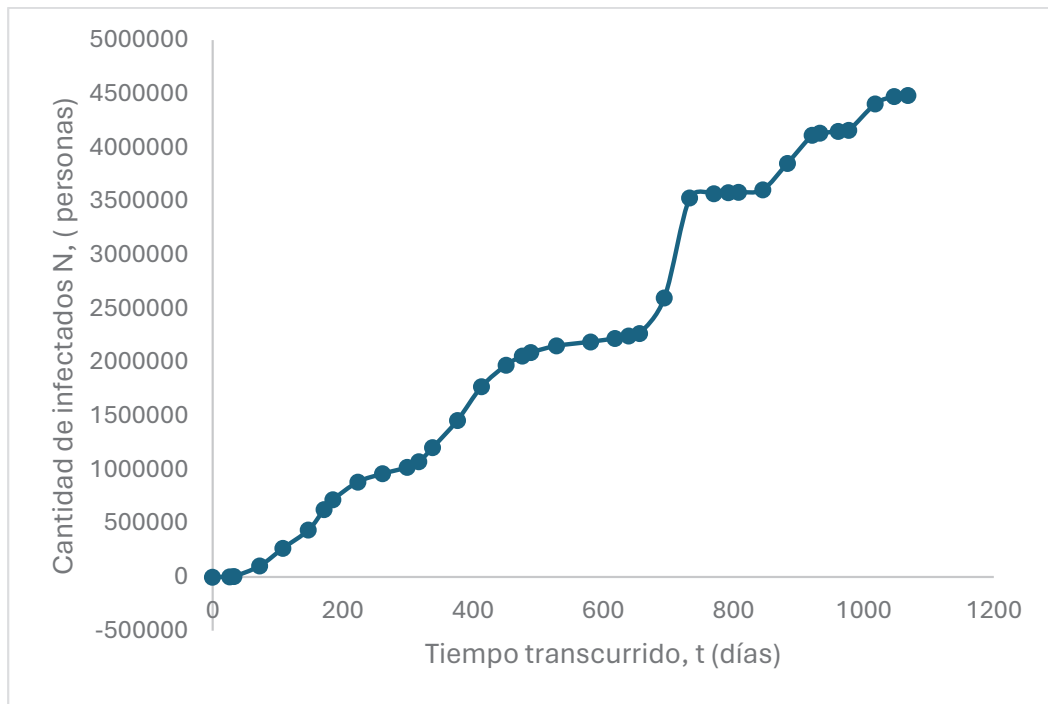
29/12/2020	299	1021027
16/01/2021	317	1073458
06/02/2021	338	1205292
16/03/2021	376	1459478
22/04/2021	413	1772469
30/05/2021	451	1974163
24/06/2021	476	2058668
07/07/2021	489	2092228
15/08/2021	528	2152038
22/09/2021	581	2191213
29/10/2021	618	2221820
19/11/2021	639	2244844
06/12/2021	656	2268879
13/01/2022	694	2600120
21/02/2022	733	3531837
31/03/2022	770	3571538
22/04/2022	792	3579630
08/05/2022	808	3583789
14/06/2022	845	3607745
22/07/2022	883	3853411
29/08/2022	921	4115436
10/09/2022	933	4133111
18/10/2022	961	4149389
05/11/2022	977	4159132
16/12/2022	1018	4405843
14/01/2023	1047	4474580
24/02/2023	1068	4485282

En la figura 1 se puede observar el comportamiento de la enfermedad COVID-19 en el Perú.

En relación al tratamiento estadístico, se empleó el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson y el error estándar de  $r$ , para concluir la relación entre el tiempo transcurrido,  $t$  (días) y el número de contagios  $N$  (personas), y la estimación del modelo predictivo y, la interpretación de los coeficientes de correlación ( $r$ ) y determinación ( $r^2$ ) de los dos modelos matemáticos predictivos tanto para estimar el número de personas contagiadas, así como estimar la velocidad con que ocurre la infección. Se siguió a Hernández *et al.* (2014) para calificar los valores de " $r$ " obtenidos.

### Aspectos éticos

Los autores señalan que se cumplieron todos los aspectos éticos a nivel nacional e internacional.



**Figura 1.** Comportamiento del número de personas infectadas por la COVID-19 en el Perú en función del tiempo transcurrido (días), entre el cinco de marzo del 2020 y el veinte y cuatro de febrero del 2023.

**RESULTADOS**

Aplicando la metodología planteada en materiales y métodos se procedió calcular y obtener el valor

$$M = \frac{A \times B - I^2}{A + B - 2I} \dots(1)$$

$$M = \frac{2\ 191\ 213 \times 4\ 485\ 282 - 3\ 583\ 512^2}{2\ 191\ 213 + 4\ 485\ 282 - 2(3\ 583\ 512)} = 6\ 143\ 062 \text{ personas}$$

Realizando los cálculos descritos en el procedimiento se obtienen los dos modelos; el de estimación del número de personas infectadas y el de estimación de la velocidad de infección de las personas, por la COVID-19 en el Perú. El primer modelo es:

$$\hat{N} = \frac{6\ 143\ 062}{1 + 116,9103 \times e^{-0,0079 \times t}} \dots(2)$$

Con un coeficiente de correlación  $r = -0,79$ . Y el segundo es:

$$\frac{d\hat{N}}{dt} = \frac{4\ 294\ 033,4750 \times e^{-0,0079 \times t}}{(1 + 116,9103 \times e^{-0,0079 \times t})^2} \dots(3)$$

El propósito en esta parte es determinar el tiempo crítico ( $t_c$ ) para la cual la velocidad de las personas contagiadas es máxima, determinando  $t_c = 740$  días y la velocidad máxima es

$$\left(\frac{d\hat{N}}{dt}\right)_{\max} = 6\ 934,9307 \text{ personas/día}$$

Calendarizando el proceso de personas contagiadas por la COVID-19 en todo el mundo el 28 de febrero del 2022, fecha en la que hubo la máxima velocidad de contagio.

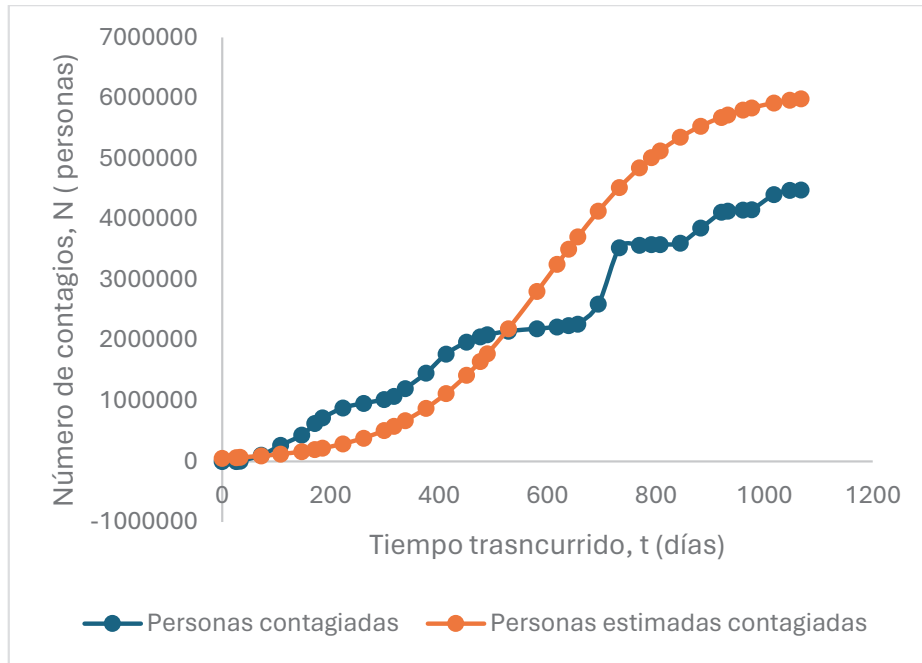
El número de personas estimadas contagiadas por la COVID-19 queda determinada por la ecuación (2) y la razón de cambio o velocidad de personas estimadas contagiadas por la COVID-19 en el Perú queda determinada por la ecuación (3).

Los datos mostrados en la tabla 2 muestra el tiempo transcurrido (días) (columna I), las personas contagiadas ( $N$ ) (columna II), las personas estimadas contagiadas (modelo 2) ( $\hat{N}$ ) (columna III), y estimación de la velocidad de personas contagiadas (modelo 3) ( $d\hat{N}/dt$ ) (columna IV); por la COVID-19 en el Perú.

**Tabla 2.** Cantidades de personas contagiadas ( $N$ ), personas estimadas contagiadas por modelo 3 ( $\hat{N}$ ) y estimación de la velocidad de personas contagiadas (modelo 4)  $(d\hat{N})/dt$  por la COVID-19 en el Perú, en función del tiempo transcurrido,  $t$  (días).

Tiempo $t$ , (días)	$N$ (personas contagiadas)	$\hat{N}$	$(d\hat{N})/dt$ Personas / día
0	57	52099	308.8602
26	1317	63855	377.8226
33	4929	67446	398.8331
72	102374	91421	538.4719
108	267310	120904	708.6544
147	436810	163370	950.8103
171	627110	196386	1136.6509
185	720920	218536	1260.1398
223	884702	291421	1659.7472
261	961514	387028	2168.2461
299	1021027	511260	2802.4112
317	1073458	581983	3150.0101
338	1205292	675457	3594.4920
376	1459478	878146	4499.8830
413	1772469	1121836	5482.5442
451	1974163	1423599	6539.1769
476	2058668	1650908	7218.0576
489	2092228	1777793	7553.2712
528	2152038	2190538	8426.9067
581	2191213	2808780	9115.1309
618	2221820	3256816	9184.8115
639	2244844	3508833	8996.1994
656	2268879	3708695	8787.1907
694	2600120	4133480	8084.7094
733	3531837	4526078	7123.1260
770	3571538	4849620	6105.1682
792	3579630	5018184	5494.0802
808	3583789	5129716	5059.3392
845	3607745	5353545	4113.8244
883	3853411	5538128	3260.7210
921	4115436	5683264	2543.3611
933	4133111	5721000	2344.9682
961	4149389	5800903	1931.8195
977	4159132	5839523	1725.1832
1018	4405843	5920462	1282.6970
1047	4474580	5964716	1035.3693
1068	4485282	5991306	884.9307

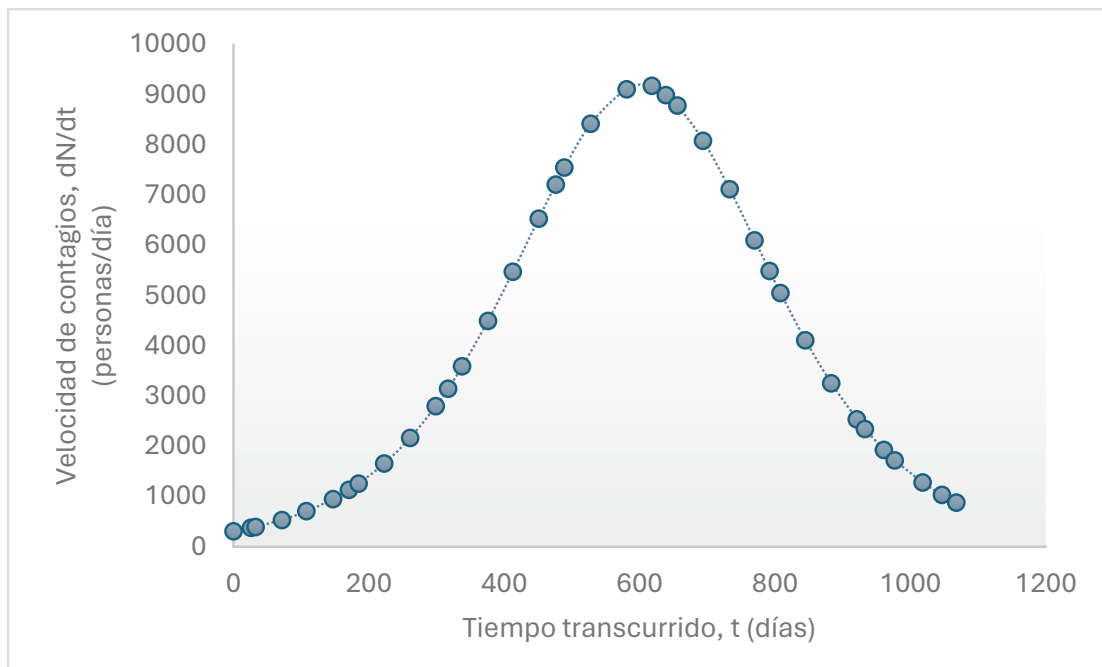




**Figura 2.** Representación gráfica del número de personas contagiadas y el número estimado de personas contagiadas, por la COVID-19 en el Perú, en función del tiempo transcurrido (días), durante el periodo entre el cinco de marzo del 2020 al veinte y cuatro de febrero del 2023.

La figura 2 muestra la tendencia y comportamiento de número de personas contagiadas y el número estimado

de personas contagiadas, por la COVID-19 en el Perú, en función del tiempo transcurrido (días).



**Figura 3.** Representación de la velocidad del número de personas estimadas contagiadas (personas/día), por la COVID-19 en el Perú, en función del tiempo transcurrido (días), durante el periodo entre el cinco de marzo del 2020 al veinte y cuatro de febrero del 2023.

La figura 3 muestra el comportamiento de la velocidad del número de personas estimadas contagiadas (personas/día), por la COVID-19 en el Perú, en función del tiempo transcurrido (días).

El coeficiente de correlación de Pearson fue  $r = -0,79$ , cuya relación entre el tiempo y personas contagiadas es aceptable y confiable; con diferencia no significativa a un valor de  $p = 0,059$ , y por lo tanto existe una “correlación muy fuerte” entre el tiempo transcurrido y el número de personas contagiadas; el coeficiente de determinación indica que el 63 % de la variancia en  $N$  es explicada por  $t$ ; para la pandemia de la COVID-19 en el Perú.

## DISCUSIÓN

El modelo logístico matemático predictivo para estimar el número de personas contagiadas por la COVID-19 en el Perú resultó ser aceptable, coincidiendo en la constante de proporcionalidad y la pendiente con el modelo determinado por ecuaciones integrales reportado por Florencio (2020). Con el modelo matemático de velocidad se calcula que el número máximo de personas estimadas contagiadas (personas/día) por la COVID-19 en el Perú es 6 934,9307 *personas/día*, cuya fecha calendarizada fue el 28 de febrero del 2022, coincidiendo en la distribución normal y comportamiento con lo reportado por Manrique *et al.* (2020) y Marín-Machuca *et al.* (2020). En el modelo matemático predictivo, la constante de proporcionalidad y los coeficientes de correlación y determinación son de gran importancia para analizar y estimar datos de fenómenos epidemiológicos y pandémicos (Hernández *et al.*, 2014). Para el modelamiento matemático estadístico de la COVID-19 existen otras posibilidades de modelado, desde expresiones de regresión logística (como el utilizado en esta oportunidad) hasta formas topológicas y mecanismos avanzados de modelamiento atípico de la COVID-19 basados en dinámica de sistemas, en agentes epidemiológicos y la simulación de eventos discretos (Zhang *et al.*, 2022). Los modelos utilizados para revelar el impacto de la vacunación de la dosis contra la COVID-19 mediante el uso de la derivada fraccional de Caputo se basa en el método matricial, realizando el análisis de estabilidad local y global tanto para el estado de equilibrio libre de enfermedad como para el endémico; donde el modelo se valida con datos reales de casos acumulados de COVID-19 en la República de la India (Joshi *et al.*, 2022).

Del estudio se concluye que la teoría de Bronshtein & Semendiaev (2018) se puede aplicar sin mayor

dificultad siempre y cuando se tome en cuenta en qué momento (tiempo) los procesos o fenómenos manifiestan comportamiento de que no siempre van a ascender o no siempre van a descender. Los modelos logísticos (factuales o lógicos) 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 del fenómeno. El tiempo crítico ( $t_c$ ), para los contagios a nivel mundial fue de 740 días, llegando a su velocidad máxima de contagio de 6 934,9307 *personas / día*; llegando a determinar resultados satisfactorios en cuanto a formas, estimaciones y cantidades (Marín-Machuca *et al.*, 2023).

Para tener una mejor estimación del modelo predictivo, se recomienda que los datos estadísticos, en cuanto a la variable dependiente (número de personas contagiadas por la COVID-19) deben estar en función de más variables independientes; los datos de la variable independiente deben estar igualmente espaciados para aplicar y mejorar otras técnicas de cálculo, análisis e interpretación. Estadísticamente se ha determinado que los coeficientes de correlación del modelo de estimación del número de personas contagiadas tienen una “correlación negativa muy fuerte” entre el número de contagios por la COVID-19 y el tiempo transcurrido (días) y el modelo de estimación de velocidad de personas contagiadas cumplen satisfactoriamente los objetivos planteados.

### Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

**OMM** = Olegario Marín-Machuca

**JIOG** = Julia Iraida Ortiz-Guizado

**FAAZ** = Fredy Aníbal Alvarado-Zambrano

**CEChB** = Carlos Enrique Chinchay-Barragán

**LGJA** = Luis Germán Jáuregui-del Águila

**RAAZ** = Ricardo Arnaldo Alvarado-Zambrano

**UMS** = Ulert Marín-Sánchez

**JECD** = José Eduardo Candela-Díaz

**MPRR** = María del Pilar Rojas-Rueda

**Conceptualization:** OMM, AQQ, JECD

**Data curation:** FAAZ, UMS

**Formal Analysis:** OMM, JECD, FAAZ

**Funding acquisition:** AQQ, JECD, CEChB

**Investigation:** OMM, MPRR, CEChB

**Methodology:** OMM, UMS, LGJA

**Project administration:** UMS, MPRR, CEChB



**Resources:** JIOG, LGJA

**Software:** FAAZ, JECD

**Supervision:** OMM, JECD, JECD

**Validation:** JIOG, JECD, FAAZ

**Visualization:** OMM, LGJA, MPRR

**Writing – original draft:** OMM, CEChB, FAAZ

**Writing – review & editing:** OMM, UMS, JIOG

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bronstein, I., & Semendiaev K. (2018). *Manual de matemáticas para Ingenieros y Estudiantes*. Editorial Mir, 4<sup>a</sup> ed.
- Chen, G., Zhang, W., Li, S., Zhang, Y., Williams, G., Huxley, R., Ren, H., Cao, W., & Guo, Y. (2017). The impact of ambient fine particles on influenza transmission and the modification effects of temperature in China: A multi-city study. *Environment International*, 98, 82-88.
- 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/>
- Guo, Y., Cao, Q., Hong, Z., Tan, Y., Chen, S., Jin, H., Tan, K., Wang, D., & Yan, Y. (2020). The origin, transmission, and clinical therapies on coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak- an update on the status. *Military Medical Research*, 7, 11.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Editorial McGRAW-HILL Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
- Joshi, H., Jha, B.K., & Yavuz, M. (2022). Modelling and analysis of fractional-order vaccination model for control of COVID-19 outbreak using real data. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 20, 213–240.
- Levison, E. (2020). *Early transmission dynamics in Wuhan, China*. Drexler University.
- Liu, X.X, Li, Y., Qin, G., Zhu, Y., Li, X., Zhang, J., Zhao, K., Hu, M., Wang, X.L., & Zheng, X. (2019). Effects of air pollutants on occurrences of influenza-like illness and laboratory-confirmed influenza in Hefei, China. *International Journal of Biometeorology*, 63, 51-60.
- Marín-Machuca, O., Chacón, R., Alvarez, N., Pesantes, P., Pérez, L., & Marín, O. (2023). Mathematical modeling of COVID-19 Cases and deaths and the impact of vaccinations during three years of the pandemic in Peru. *Vaccine*, 11, 1648.
- Marín-Machuca, Zambrano, A., García, E., Ortiz, J., Vivas, D., & Marín, O. (2020). Modelamiento matemático del comportamiento epidemiológico de la pandemia COVID-19 en China. *The Biologist (Lima)*, 18, 83-89.
- Tellier, R., Li, Y., Cowling, B., & Tang, J. (2019). Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC infectious diseases*, 19, 101.
- Sistema Informático Nacional de Defunciones (SINADEF) (2022). *Información de fallecidos del Sistema Nacional de Defunciones en el Ministerio de Salud*. <https://www.minsa.gov.pe/defunciones/>
- Zhang, W., Liu, S., Osgood, N., Zhu, H., Qian, Y., & Jia, P. (2023). Using simulation modelling and systems science to help contain COVID-19: A systematic review. *Systematic Research and Behavioral Science*, 40, 207-234
- World Health Organization (2020). *Report of the WHO-China Joint Mission on coronavirus disease 2019 (COVID-19)*. [https://www.who.int/publications/i/item/report-of-the-who-china-joint-mission-on-coronavirus-disease-2019-\(COVID-19\)](https://www.who.int/publications/i/item/report-of-the-who-china-joint-mission-on-coronavirus-disease-2019-(COVID-19)).

Received October 24, 2023.

Accepted December 19, 2023.