



## CIENCIAS BIOMÉDICAS

### Artículo original de investigación

# Comportamientos temporales de los casos activos y acumulados durante el segundo y tercer rebrotes epidémico de la COVID-19 para la provincia Santiago de Cuba

Erick Eduardo Ramírez Torres <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9482-2819>  
Antonio Rafael Selva Castañeda <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5436-1897>  
Luis Enrique Bergues Cabrales <sup>2\*</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8094-392X>  
Henry Bory Prevez <sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5508-0501>  
Luis Eugenio Valdés García <sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1613-4305>  
Diana Sedal Yanes <sup>5</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9546-5366>  
Yuri Alcantara Oliveros <sup>6</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7208-4229>  
Sandy Sánchez Domínguez <sup>5</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3788-8413>  
Adriana Rodríguez Valdés <sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6862-8713>  
Hilda María Morandeira Padrón <sup>7</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9465-4093>

<sup>1</sup> Departamento de Biomédica, Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones, Informática y Biomédica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

<sup>2</sup> Departamento de Investigación e Innovación, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

<sup>3</sup> Departamento de Control, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

<sup>4</sup> Centro Provincial de Higiene, Epidemiología y Microbiología. Santiago de Cuba, Cuba

<sup>5</sup> Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

<sup>6</sup> Departamento de Ciencia de la Computación, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

<sup>7</sup> Dirección Provincial de Salud. Santiago de Cuba, Cuba

\*Autor para la correspondencia: lbergues@uo.edu.cu, berguesc@yahoo.com

## RESUMEN

### Palabras clave

COVID-19; modelo susceptible-expuesto-infectado-recuperado; casos activos y acumulados.

**Introducción.** Este estudio muestra los comportamientos temporales de los casos activos y acumulados durante el segundo y tercer rebrotes del COVID-19 para la provincia Santiago de Cuba (1 de noviembre de 2020 al 29 de septiembre de 2021). Los valores de los parámetros de este modelo se reportan en diferentes instantes de tiempo de este período y muestran los reportados en la primera ola epidémica del COVID-19 en esta provincia. **Métodos.** A diferencia de esta primera ola epidémica, la estimación de los parámetros del modelo confirma que estas 2 olas epidémicas se han caracterizado por una alta transmisión del virus y movilidad de los individuos, y bajas percepción del riesgo, responsabilidad social y efectividad de las medidas gubernamentales implementadas. **Resultados.** Se concluyó que este modelo y los algoritmos bayesianos describieron los datos oficiales reportados por el Ministerio de Salud Pública de la República de Cuba para la provincia Santiago de Cuba y constituyó un útil instrumento para la toma de decisiones por el Consejo de Defensa Provincial y la Dirección Provincial de Salud Pública. La percepción del riesgo y responsabilidad social de los individuos



## Time behaviors of the active and accumulative cases during the second and third COVID-19 epidemic reappearances for Santiago de Cuba province

### ABSTRACT

#### Keywords

COVID-19; susceptible-exposed-infected-recovered model; active and accumulative cases.

**Introduction.** This study shows time behaviors of the active and accumulative cases during the second and third COVID-19 epidemic reappearances for Santiago de Cuba province (November 1, 2020 to September 29, 2021). The parameter values of this model are reported at different time instant of this period and shown those reported in the first COVID-19 epidemic wave in this province. **Methods.** Unlike of this first epidemic wave, the estimation of model parameters confirms that these two epidemic waves characterize by a high virus transmission and individual mobility, and low risk perception, social responsibility and effectiveness of implemented governmental actions. **Results** It is concluded that this model and Bayesian algorithms describe official data reported by the Ministry of Public Health of the Republic of Cuba for the Santiago de Cuba province and it constitutes a useful tool to take decisions by the Provincial Defense Council and Provincial Office of Public Health. The risk perception and social responsibility of individuals influence markedly in the attenuation/increase of COVID-19 transmission.

## INTRODUCCIÓN

El coronavirus SARS-COV-2 es el causante del COVID-19, que comenzó en Wuhan en 2019 y se ha extendido por todo el mundo. La enfermedad se ha caracterizado por su rápida transmisión y contagiosidad, y alto número de fallecidos. <sup>(1)</sup> La comunidad internacional prioriza y aborda esta pandemia desde diferentes puntos de vistas, como el sanitario, <sup>(2)</sup> social, <sup>(3)</sup> clínico-epidemiológico, <sup>(2,4,5)</sup> y teórico, <sup>(6,7)</sup> entre otros. <sup>(8-10)</sup> En la actualidad, los investigadores han dirigido sus esfuerzos al desarrollo y aplicación de diferentes tipos de candidatos vacunales anti-SARS-COV-2. En este sentido, Cuba tiene un rol destacado a nivel mundial con prometedoras investigaciones y resultados en la aplicación de biofármacos (por ejemplo, el Nasalferon, Biomodulina-T y Hebertrans) y 5 candidatos inmunogénicos (por ejemplo, vacunas Soberana-02 y Abdala aprobadas). <sup>(11,12)</sup> En la actualidad, se le presta especial atención a las secuelas que induce el SARS-COV-2 después que el paciente ha sido infectado. <sup>(13,14)</sup>

La modelación matemática tiene un rol esencial para describir y pronosticar el comportamiento del COVID-19 en las olas epidémicas por la que han transitado diferentes países. <sup>(6,7)</sup> En Cuba, los modelos propuestos han sido usados para la toma de decisiones oportunas a nivel nacional y en cada provincia. <sup>(8,9)</sup> Ramírez-Torres y colaboradores <sup>(10)</sup> adaptaron el modelo matemático susceptible-expuesto-infectado-recuperado (SEIR) propuesto por Lin y colaboradores <sup>(6)</sup> para

describir la primera ola epidémica (marzo-mayo de 2020) en la provincia Santiago de Cuba.

El modelo SEIR documentado por Lin y colaboradores <sup>(6)</sup> incluyó términos que describieron la zoonosis y la movilidad. Sin embargo, el modelo SEIR que reportó Ramírez-Torres y colaboradores <sup>(10)</sup> no contempló estos 2 términos porque el origen de la epidemia no fue a partir de los animales y la movilidad de los individuos se comportó a bajos niveles, debido a las restricciones gubernamentales (cierre de frontera, limitación de las transportaciones interprovincial e intermunicipal). Estos 3 momentos se consideraron en este modelo, aspecto que lo diferencia de los reportados en la literatura. <sup>(6-9)</sup>

El modelo propuesto para Santiago de Cuba permitió:

- Describir y pronosticar el comportamiento del COVID-19 para 49 casos sintomáticos confirmados con SARS-COV-2 por la técnica reacción de cadena de la polimerasa, PCR (del inglés, *polimerase chain reaction*);
- pronosticar el número máximo de casos activos (mediados de abril de 2020) y el fin de la ola epidémica (mayo de 2020) desde los primeros días de abril;
- estimar el número total de casos acumulados y el 22 % de casos no detectados en la pesquisa epidemiológica (asintomáticos o sintomáticos con SARS-COV-2);
- revelar el predominio de los casos asintomáticos en la cinética de crecimiento del COVID-19;

- predecir la ocurrencia de 2 olas epidémicas adicionales y más de 10 000 casos con COVID-19.

Hallazgos que se revelan en 1 de los posibles escenarios que reporta el modelo, el cual no ocurrió porque la transmisión del COVID-19 se cortó. Este posible escenario evidencia que la segunda ola epidémica tendría larga duración y podría comenzar entre los meses de agosto-septiembre (para La Habana) y octubre-noviembre (para Santiago de Cuba). Estas predicciones se corroboran con el decursar del tiempo. <sup>(10)</sup>

La contribución científica del modelo propuesto por el MSc. Ramírez-Torres fue el uso de la distribución gamma del error entre casos totales y casos con COVID-19 detectados, lo que condujo a la necesidad de utilizar la computación bayesiana aproximada (ABC; del inglés, *Approximate Bayesian Computation*) debido a la complejidad de la verosimilitud. Este investigador propuso las técnicas ABC SMC (del inglés, ABC Monte Carlo) y algoritmo ABC H (del inglés, Hybrid version of ABC techniques, as a hybrid of rejection sampler (ABC RS) and Markov chain Monte Carlo (ABC MCMC) approaches), con sus respectivas leyes de errores. <sup>(10)</sup> El uso de estas técnicas bayesianas hizo que el estudio de Ramírez-Torres y colaboradores <sup>(10)</sup> se diferenciara de los documentados en la literatura. <sup>(6-9)</sup>

A partir del 1 de noviembre de 2020 hasta la actualidad (septiembre de 2021) ocurrieron 2 olas epidémicas bien definidas en la provincia Santiago de Cuba, como predijo el modelo reportado Ramírez-Torres y colaboradores. <sup>(10)</sup> Las condiciones en que se desarrollaron estas 2 olas epidémicas fueron muy diferentes a las de la primera: no hubo cierre de frontera, movi- lidades interprovincial e intermunicipal, entre otros aspectos.

A pesar de la diversidad y factibilidad de modelos matemáticos aplicados al COVID-19 en Cuba y otros países, <sup>(6-10)</sup> los autores de este estudio decidieron continuar con las ideas que se reportaron en Lin Q, Zhao S, Gao D, Lou Y *et al.* <sup>(6,7)</sup> para describir estas 2 olas epidémicas porque han descrito y pronosticado bien la epidemia en la provincia Santiago de Cuba, resultados que influyeron en la toma de las medidas gubernamentales por parte del Consejo de defensa provincial. Consecuentemente, la intención de este estudio no es comparar cual modelo describe mejor los datos en la provincia. El objetivo de este estudio es describir los comportamientos del segundo y tercer rebrote epidémico del COVID-19 para la provincia Santiago de Cuba. Para esto, se utilizó el modelo SEIR que se reportó para Wuhan. <sup>(6)</sup>

## MÉTODOS

### Modelo SEIR

El período de análisis es desde el 1 de noviembre de 2020 hasta el 29 de septiembre de 2021. En este período ocurrió la

segunda (noviembre de 2020 hasta finales de mayo de 2021) y tercera (junio hasta finales de septiembre de 2021) olas epidémicas.<sup>1</sup>

Lin y colaboradores <sup>(6)</sup> justificaron matemáticamente su modelo SEIR y el mismo se usó en el estudio pero no se incluyó el término de la zoonosis por la razón anteriormente mencionada, lo que resultó

$$\begin{cases} S' = -\frac{\beta(t)SI}{N} - \mu S, \\ E' = \frac{\beta(t)SI}{N} - (\sigma + \mu)E, \\ I' = \sigma E - (\gamma + \mu)I, \\ R' = \gamma I - \mu R, \\ N' = -\mu N, \\ D' = d\gamma I - \lambda D, \\ C' = \sigma E, \end{cases} \quad (1)$$

Con

$$\beta(t) = \beta_0(1 - \alpha) \left(1 - \frac{D}{N}\right)^k \quad (2)$$

donde S, E, I, R, N y C (C = I + R) son las poblaciones de individuos susceptibles, expuestos, infectados, retirados (recuperados más fallecidos), total y acumulados, respectivamente. D representa la percepción del riesgo de los individuos. Los apostrofes de S, E, I, R, N, D y C significan sus respectivas derivadas en el tiempo. Los parámetros

$$\mu, \sigma^{-1}, \gamma^{-1}, d, \lambda^{-1}, \beta(t), \beta_0, \alpha \text{ y } k$$

son la movilidad de los individuos, el período latente promedio, el período de infección promedio, la proporción de casos severos, la duración promedio de la reacción del público, la razón de transmisión dinámica del COVID-19, la razón de transmisión inicial del COVID-19, la efectividad en la implementación de las medidas gubernamentales y la intensidad de la respuesta social individual, respectivamente.

El método de integración numérica para las ecuaciones (1) y (2) es el integrador de propósito general que usa LSODA (*Solucionador Livermore* para ecuaciones diferenciales ordinarias con métodos automáticos de conmutación para problemas rígidos y no rígidos). Este algoritmo comenzó inicialmente con método no rígido y al terminar cada paso de integración se monitorearon automáticamente los datos para decidir con qué método se continuaría. Este método adaptó dinámicamente el paso por medio del cálculo del error de in-

1 Los datos aparecen reportados en el sitio <http://covid19s-cu.uo.edu.cu/>

tegración. Para esto, se usó el paquete *Scipy.integrate.odeint* que está implementado en el lenguaje de programación Python (*Python software foundation*, programa libre, versión 3.6).

En la primera ola epidémica se usaron diferentes técnicas ABC para el ajuste del modelo SEIR porque los datos tenían mucho ruido por el pequeño número de casos reportados (49 en total).<sup>(10)</sup> A diferencia de esta primera ola, los datos resultaron menos ruidosos debido al mayor número de casos en la segunda y tercera olas epidémicas, lo que permitió el ajuste del modelo directamente a los datos. En este caso, el uso de ABC no es necesario y la estimación bayesiana se realizó con el método de Monte Carlo que usó DRAM (del inglés, *delayed-rejection-adaptive-Metropolis*)<sup>(11)</sup>. Para esto se utilizó el paquete *Pymcmcstat* que está implementado en Python. La ley de errores para este método también se calcula.<sup>(10)</sup>

En la tabla 1 se muestran los valores de partida de los parámetros para los cálculos durante la segunda ola epidémica a partir del 1 de noviembre de 2020. Para este segundo rebrote del COVID-19 las condiciones iniciales de C y R en  $t = 0$  satisfacen  $C(0) = R(0) = 82$ . Los valores de la tabla 1 son los mismos para la tercera ola, excepto los valores de  $I(0) = 709$ ,  $R(0) = 11\,815$  y  $C(0) = 12\,524$ , a partir del 1 de junio de 2021.

El criterio de información de Akaike se usó para seleccionar el mejor ajuste de los datos experimentales (número de casos activos). Estos datos se reportaron diariamente a partir de los reportes epidemiológicos pero el análisis de los mismos se realizó semanalmente (los viernes). Este ajuste permitió estimar los valores de

$$\mu, \sigma^{-1}, \gamma^{-1}, d, \lambda^{-1}, \beta_0, \alpha, k \text{ y } D_0$$

(percepción del riesgo inicial de los individuos). Además, se calculó el número reproductivo efectivo ( $R_e$ ) a partir de la razón  $R$ . En este estudio solo se mostraron los valores de

$$\mu, \beta_0, \alpha, k, D_0 \text{ y } R_e$$

porque son los que más influyeron en la toma de decisiones del Consejo de Defensa provincial durante estas dos olas epidémicas.

Los valores de los parámetros del modelo

$$(\mu, \beta_0, \alpha, k, D_0 \text{ y } R_e)$$

y los gráficos de los números de activos y acumulados se reportaron todos los viernes de cada mes en las reuniones técnicas de la Dirección Provincial de Salud y el Consejo de Defensa Provincial. En este estudio, los valores de  $\mu, \dots$  y se muestran para el 22 de diciembre de 2020 (primer reporte de la segunda ola epidémica), 3 de enero de 2021 (primer reporte después de fin de año), 19 de enero (evaluación del efecto de las fiestas navideñas a más largo plazo), 7 de febrero (el Consejo de Defensa adopta un conjunto de importantes medidas para contener el COVID-19), 23 de febrero (predicción de la existencia de al menos dos variantes de SARS-CoV-2 en la provincia Santiago de Cuba), 16 de marzo (predicción del número máximo de casos activos y meseta del COVID-19 para Santiago de Cuba), 7 de abril (evaluación de los efectos del evento epidemiológico no deseado ocurrido el 16 de marzo de 2021 y de otras variantes del virus) y 5 de mayo (situación al momento de terminación de la escritura de este documento científico). Similares gráficos se muestran para la tercera ola epidémica (junio-septiembre de 2021). Además, estos valo-

Tabla 1. Valores de partida de los parámetros para los cálculos

Parámetros	Valor prefijado o distribución a priori
$\beta_0$	U(0,01; 2)
$\alpha$	U(0,1; 1)
k	U(1; 10 <sup>5</sup> )
$\mu$	U(-0,5; 0,5)
$\sigma$	U(0,01; 1)
$\gamma$	U(10 <sup>-6</sup> ; 1)
d	U(0,1; 100)
$\lambda$	U(10 <sup>-6</sup> ; 1)
E(0)	U(1; 100)
I(0)	1
R(0)	82
D(0)	U(0,1; 100)

(razón de transmisión inicial de la COVID-19),  $R_e$  (efectividad en la implementación de las medidas gubernamentales), y  $R_e$  (intensidad de la respuesta social individual),  $\mu$  (movilidad de los individuos), -1 (periodo latente promedio), -1 (periodo de infección promedio), d (proporción de casos severos), -1 (duración promedio de la reacción del público). E(0), I(0), R(0) y D(0) son los valores iniciales para la población de expuestos, activos, recuperados y percepción del riesgo, respectivamente.

res se contrastan con los reportados por Ramírez-Torres (10) para la primera ola epidémica. Por otra parte, se muestran los gráficos temporales de los números de casos activos y acumulados reportados el 22 de diciembre de 2020, 7 de abril y 5 de mayo de 2021 (segunda ola epidémica); y 29 de septiembre de 2021 (tercera ola epidémica).

Todos los cálculos, ajustes y pronósticos a partir de los datos de los números de casos activos y acumulados para la provincia Santiago de Cuba y sus municipios se realizaron en un procesador de alta resolución de 256 núcleos (HPC) con 256 GB de RAM usando Python 3.6. Todos los algoritmos bayesianos mencionados en este estudio y los no bayesianos (algoritmo de Levenberg-Marquardt, polinomio de Hermite y diferentes criterios de calidad de ajuste, entre otros) han sido desarrollados e implementados para el ajuste de datos experimentales medidos en diferentes sistemas biológicos por el grupo de bioelectricidad (interdisciplinario y multisectorial que investiga en el cáncer desde los puntos de vistas experimentales y modelación físico-matemática).<sup>(10,12,13)</sup> Estos algoritmos fueron usados en este estudio y en Ramírez-Torres EE *et al.*<sup>(10)</sup> por la prioridad, emergencia y respuesta rápida que impuso la COVID-19 en Santiago de Cuba.

## RESULTADOS

La tabla 2 muestra los valores de  $\mu$ ,  $\beta_0$ ,  $\alpha$ ,  $k$ ,  $D_0$  y  $R_e$ ,

obtenidos del ajuste de los datos experimentales, para diferentes instantes de tiempo durante la segunda ola epidémica (1 de noviembre de 2020 al 5 de mayo de 2021) en la provincia Santiago de Cuba. La misma reveló que esta segunda ola epidémica se caracterizó por:

- Una disminución de los valores de  $\beta_0$  y  $\alpha$  hasta el 7 de abril de 2021 y luego un incremento de estos 2 parámetros;
- una significativa disminución de  $k$ , siendo notable para los días después de fin de año, y a partir del 23 de febrero de 2021 se observó una tendencia a su incremento;

- incrementos de los valores de  $\mu$  y  $R_e$ , fundamentalmente a partir del 23 de febrero de 2021;
- alta movilidad de los individuos, siendo notable para los días festivos de fin de año y de San Valentín (14 de febrero de 2021).

La figura 1 muestra los comportamientos temporales de los números de casos activos (figuras 1 a, c, e, g) y los números de acumulado total (figuras 1b, d, f, h) reportados durante la segunda ola epidémica para la provincia Santiago de Cuba, correspondiente al 22/12/2020 (figuras 1a, b), 16 de marzo de 2021 (figuras 1c, d), 7 de abril de 2021 (figuras 1e, f) y 5 de mayo de 2021 (figuras 1g, h).

El 24 de enero de 2021 se pronosticó que el número máximo de casos activos se alcanzaría alrededor de los 120 días a partir del primero de noviembre de 2020 y la meseta de la segunda ola epidémica se alcanzaría entre la segunda quincena de marzo y la primera quincena de abril de 2021. Además, en esa fecha se pronosticó que el fin de la segunda ola epidémica podría acontecer entre la segunda quincena de mayo y la primera quincena de junio de 2021. En el mes de marzo se corroboró este pronóstico para el número máximo de casos activos (figura 1c) y la meseta (figura 1d).

Razón de transmisión inicial de COVID-19 ( $\beta_0$ ), efectividad en la implementación de las medidas gubernamentales ( $\alpha$ ), percepción inicial del riesgo de los individuos ( $k$ ), intensidad de la respuesta social individual ( $\mu$ ), movilidad total de viajeros ( $\mu$ ) y número reproductivo efectivo ( $R_e$ ). Los valores de estos parámetros para la primera ola epidémica son

$$\beta_0 = 0,48; \alpha = 0,90; D_0 = 163; k = 3430; \mu = 0 \text{ y } R_e = 0,068.^{(10)}$$

Los pronósticos realizados de los casos activos y acumulados en diferentes instantes de tiempos, a partir del 1<sup>er</sup> de noviembre de 2020, revelaron que el tiempo pronosticado para el fin de la segunda ola epidémica en la provincia Santiago de Cuba se desplazó en el tiempo. Por ejemplo, el 22 de diciembre de 2020 (día 52), 16 de marzo de 2021 (día 136), 7 de abril de 2021 (día 158) y 5 de mayo de 2021 (día 186)

**Tabla 2.** Valores de los parámetros del modelo en la segunda ola epidémica para la provincia Santiago de Cuba

Parámetros del modelo	Segunda ola epidémica							
	22/12/20	03/01/21	19/01/21	07/02/21	23/02/21	16/03/21	07/04/21	05/05/21
$\beta_0$	0,36	0,39	0,37	0,39	0,51	0,59	0,68	1,00
$\alpha$	0,63	0,30	0,40	0,22	0,20	0,23	0,37	0,54
$k$	9,95	1,43	0,35	37,4	82,4	82,6	82,6	87,47
$D_0$	1 713	225,64	62,0	65,2	64,2	63,7	321,6	731,9
$\mu$	0,018	0,037	0,035	0,010	0,040	0,031	0,028	-0,002
$R_e$	1,79	1,46	2,26	2,79	2,85	3,83	4,25	6,18

se pronostica que el fin de esta ola ocurriría a los 180; 197; 359 y 385 días, a partir del 1 de noviembre de 2020, respectivamente. Además, el modelo pronostica el tiempo para el cual se prevé el número máximo de casos activos, desde el comienzo de la segunda ola epidémica. Por ejemplo, el 22 de diciembre de 2020 (día 52) y 16 de marzo de 2021 (día 136) se pronosticó que este número máximo se alcanzaría a los 50 y 120 días, respectivamente.

El desplazamiento del fin de la ola y el fallo en el pronóstico del número máximo (el estimado el 22 de diciembre de 2020) se debió a la ocurrencia de diversos eventos epidemiológicos no deseados (por ejemplo, focos y eventos de casos con COVID-19 en comunidades e instituciones) que se pudieron originar por las actividades festivas, indisciplina social y la no realización de estudios epidemiológicos profundos. Los eventos epidemiológicos no deseados conllevaron al significativo incremento de número de casos (indicados con números en la figura 1): 1 (154 casos reportados el 12 de enero de 2021); 2 (115 casos reportados el 24 de enero de 2021); 3 (170 casos reportados el 3 de febrero de 2021); 4 (76 casos reportados el 16 de marzo de 2021) y 5 (175 casos reportados el 26 de marzo de 2021). Los casos reportados el 24 de enero y 3 de febrero de 2021 trajeron consigo cifras record de 195 y 200 casos infectados al siguiente día, respectivamente.

Un evento epidemiológico no deseado ocurrió en una institución cerrada (más de 300 casos confirmados) el 16 de marzo. Este brusco evento afectó el pronóstico de la terminación de la segunda ola epidémica para la provincia de Santiago de Cuba para la segunda quincena de junio, como se muestra en las figuras 1 c, d. Se observa la tendencia al incremento de los casos activos y acumulados y rápidas variaciones del número de casos activos después de esta fecha (figuras 1e-h). Estos hallazgos marcaron las diferencias de esta segunda ola epidémica con la primera. (10)

El evento índice de la primera y segunda olas epidémicas es la entrada a Cuba de viajeros internacionales procedentes de países con alta transmisión de COVID-19. Sin embargo, el brusco evento epidemiológico ocurrido el 16 de marzo es el evento índice de la tercera ola epidémica. La figura 2 muestra los comportamientos de los casos activos (figura 2a) y acumulados (figura 2b) durante la tercera ola epidémica (1 de junio hasta 29 de septiembre de 2021) para la provincia Santiago de Cuba. El modelo pronosticó el número máximo de casos activos entre el 5 y 10 de agosto de 2021, a partir del 15 de junio de 2021, como ocurrió en la realidad (7 de agosto de 2021). Además, se predijo el fin de esta tercera ola 200 días después del 1 de junio de 2021. Desde el 10 de agosto de 2021 el modelo vaticinó, dentro del escenario más probable, las posibles tendencias de la disminución de casos activos

que están confinadas entre las señalizadas con (1) y (2), como se muestra en la figura 3a. Las tendencias (1) y (2) representan las disminuciones más lenta y rápida de los casos, respectivamente. Las mismas comienzan a separarse a partir del 1 de septiembre de 2021 y luego convergen al final de esta tercera ola epidémica.

Para el corte del 29 de septiembre de 2021 en la provincia Santiago de Cuba,

$$\mu = 0,022; \beta_0 = 0,70; \alpha = 0,33; k = 319,3; D_0 = 69; \text{ y } R_e = 3,89.$$

Además, el modelo también se aplicó para el análisis de los casos activos y acumulados durante la tercera ola epidémica en cada uno de los municipios de la provincia Santiago de Cuba (figura 3). En esta figura se muestran los comportamientos para los municipios cabecera (figuras 3 a,b) y II Frente (figuras 3 c,d). Para el corte del 29 de septiembre de 2021 en el municipio Santiago de Cuba,

$$\mu = 0,043; \beta_0 = 0,43; \alpha = 0,15; k = 14,6; D_0 = 528; \text{ y } R_e = 2,02.$$

Sin embargo, para el municipio II Frente

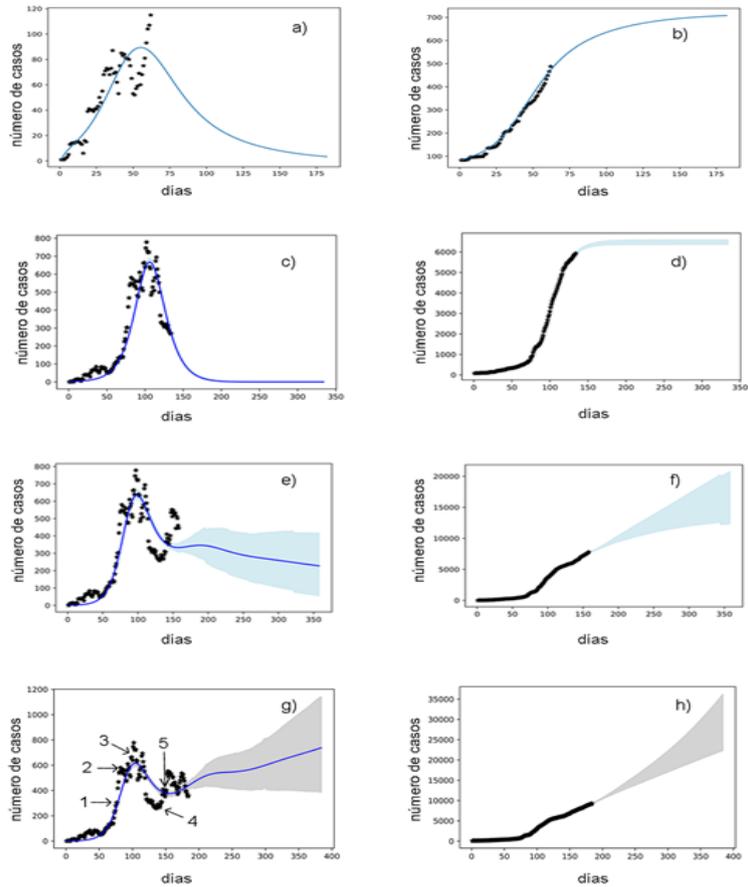
$$\mu = 0,018; \beta_0 = 1,36; \alpha = 0,25; k = 231,32; D_0 = 1725; \text{ y } R_e = 4,86$$

Las figuras 3b y b, d muestran los datos epidemiológicos (representados por \*) y el ajuste de los mismos con el modelo (línea azul) para los casos acumulados. Además, el modelo estimó el número total de casos acumulados (línea roja). La diferencia entre el total de casos y los casos reportados experimentalmente o estimados por el modelo puede significar la cantidad de casos (sintomáticos o asintomáticos) no detectados en la pesquisa. Si esta diferencia es pequeña, la pesquisa realizada es efectiva, de lo contrario no.

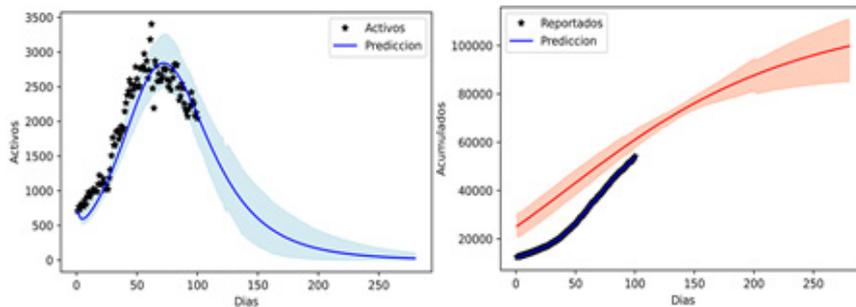
El valor del criterio de información de Akaike se reporta en cada ajuste de los datos experimentales realizado semanalmente durante las 3 olas epidémicas. El mayor de todos estos valores es 1819,1497555430992 El análisis semanal de estos datos permitió pronosticar el número máximo de casos activos y fin de cada ola epidémica.

## DISCUSIÓN

Los parámetros del modelo para la primera ola epidémica son  $\mu = 0,48$ ;  $\beta_0 = 0,90$  (alta efectividad en la implementación de las medidas gubernamentales, mayor que 0,60);  $k = 163$  (buena percepción del riesgo, mayor que 100);  $D_0 = 3430$  (alta responsabilidad social, mayor que 2 000);  $\alpha = 0$  (baja movilidad por el cierre de frontera, limitación de los viajes interprovinciales e intermunicipales) y  $\beta(t) = 0,068$ .<sup>(10)</sup> Estos valores de  $\mu$ ,  $\beta_0$  y  $\beta(t)$  hacen que  $(1 - \alpha) \rightarrow 0$  y  $(1 - D/N)^k \rightarrow 0$  en la Ecuación (2) y por lo tanto,  $\beta(t) \rightarrow 0$ . Esto significa el corte de la transmisión de la COVID-19 desde el punto de vista epidemiológico, como realmente aconteció en la provincia Santiago de Cuba. <sup>(14)</sup>



**Fig. 1.** Comportamientos temporales de los números de casos activos y acumulados totales reportados durante la segunda ola epidémica para la provincia Santiago de Cuba. a) Casos activos contra días (22 de diciembre de 2020). b) Acumulado total contra días (22 de diciembre de 2020). c) Casos activos contra días (16 de marzo de 2021). d) Acumulado total contra días (16 de marzo de 2021). e) Casos activos contra días (7 de abril de 2021). f) Acumulado total contra días (7 de abril de 2021). g) Casos activos contra días (5 de mayo de 2021). h) Acumulado total contra días (5 de mayo de 2021). En la figura 1g, los números 1; 2; 3; 4 y 5 representan los instantes de tiempos en que ocurrieron los eventos epidemiológicos no deseados más representativos durante la segunda ola epidémica hasta el 5 de mayo de 2021.



**Fig. 2.** Comportamientos de los casos activos y acumulados durante la tercera ola epidémica. a) casos activos. b) casos acumulados.

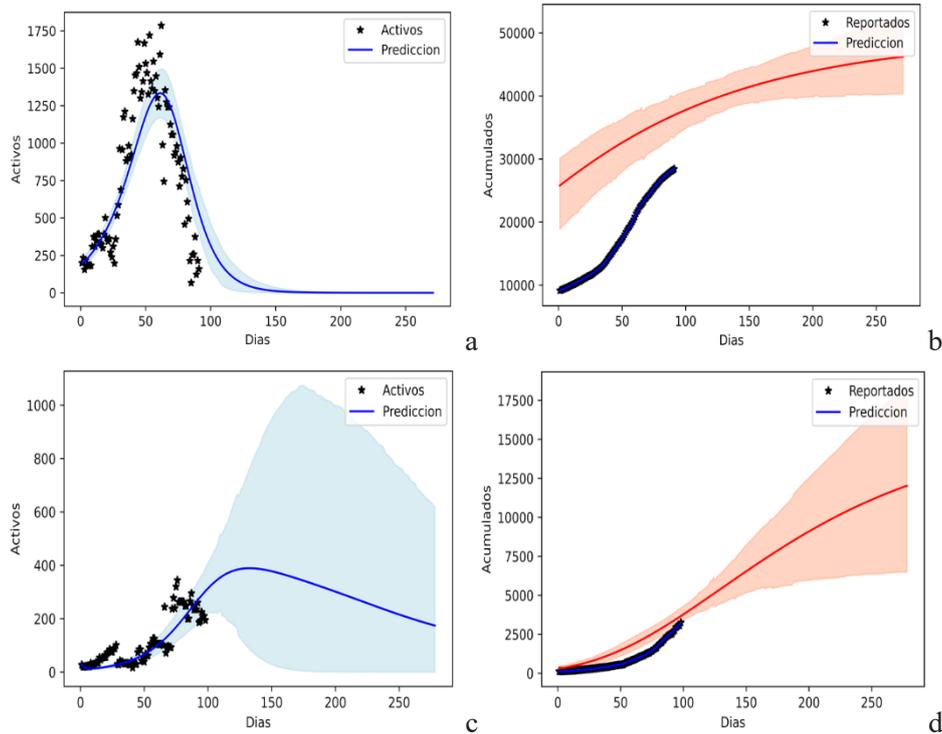


Fig. 3. Comportamientos de los casos activos y acumulados durante la tercera ola epidémica en los municipios de la provincia Santiago de Cuba. a) Casos activos y b) casos acumulados para el municipio Santiago de Cuba. c) Casos activos y d) casos acumulados para el municipio II Frente.

A diferencia de la primera ola epidémica, las segunda y tercera olas epidémicas se caracterizaron por incrementos de  $\alpha$  y  $\beta$ , importante movilidad de los individuos (fundamentalmente entorno a los días festivos), valores de  $\beta$  menores que 0,6 (baja efectividad en la implementación de las medidas gubernamentales), valores de  $\alpha$  mucho menor que la cantidad total de personas susceptibles (baja percepción del riesgo de los individuos) y valores de  $k$  menores que 2 000 (baja responsabilidad social de los individuos). Estos hallazgos fueron más notables en la tercera ola epidémica.

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  que se reportaron en la tabla 2 indican la tendencia de  $(1 - \alpha) \rightarrow 1$  y  $(1 - D/N)^k \rightarrow 0$  en la ecuación (2) y por ende el incremento de  $\beta$ . Como resultado, la compleja situación epidemiológica de la provincia Santiago de Cuba durante el transcurso del segundo y tercer rebrote de COVID-19. Esto se hizo notable con los cambios del agente SARS-CoV-2 probablemente relacionados con la introducción de nuevas variantes del virus. Estas alteraciones de las variantes del virus se asociaron con la mayor patogenicidad, virulencia, infectividad, difusibilidad, transmisibilidad, mutagenicidad y antigenicidad de la enfermedad.

Los cambios de la variante SARS-CoV-2 se pueden predecir con el modelo mediante los incrementos de  $\alpha$  y  $\beta$  a partir del 23 de febrero de 2021. Los mismos se confirmaron con los resultados de los estudios de biología molecular realizados en el Instituto Pedro Kourí que revelaron la presencia de las

variantes de Wuhan (marzo de 2020 - mediados de febrero de 2021); Wuhan y Reino Unido (segunda quincena de febrero y marzo 2021); Wuhan, Reino Unido, California y Sudáfrica (mayo 2021); Sudáfrica (junio de 2021); delta (julio y agosto de 2021). Aunque no se reportó la circulación de nuevas variantes del virus, mediante la vigilancia virológica en el mes de abril, el modelo predijo cambios del agente SARS-CoV-2 en ese mes.

Lo arriba mencionado significó que  $(1 - \alpha)(1 - D/N)^k$  es un modulador de  $\beta$ . Para el caso de la primera ola epidémica,  $(1 - \alpha)(1 - D/N)^k$  tiene un efecto antagónico al producido por  $\beta$ , lo que disminuye la transmisibilidad del COVID-19. En contraste,  $(1 - \alpha)(1 - D/N)^k$  tiene un efecto sinérgico al producido por  $\beta$  durante las segunda y tercera olas epidémicas, lo que favoreció la transmisibilidad del COVID-19. Cuando  $\alpha \rightarrow 0$  (ninguna efectividad en la implementación de las medidas gubernamentales),  $D \rightarrow 0$  (ninguna percepción del riesgo de los individuos) y  $k \rightarrow 0$  (ninguna responsabilidad social de los individuos),  $\beta(t) \rightarrow \beta_0$ . Los países que han reportado alta transmisibilidad por COVID-19 han cumplido simultáneamente  $\alpha \rightarrow 0$  y  $\beta \rightarrow \beta_0$ . Los países que han cortado radicalmente la transmisibilidad del COVID-19 han cumplido simultáneamente  $\alpha \rightarrow 1$ ,  $D \approx N \cdot \gamma \cdot k > 2000$ . Consecuentemente,  $\alpha$  y  $\beta$  influyen en la disminución o incremento de la transmisibilidad del COVID-19.

Los bajos valores de  $R$  no significan que los protocolos implementados por el gobierno de la República de Cuba sean errados o inefectivos, sino que la efectividad de las medidas gubernamentales está modulada por las bajas percepción del riesgo y responsabilidad social de los individuos (observadas en las segunda y tercera olas epidémicas), aspecto que contrarresta importantemente todo el esfuerzo y la cantidad de recursos financieros, materiales y humanos que el gobierno de la República de Cuba, el Ministerio de Salud Pública y la ciencia cubana han materializado para contrarrestar/cortar la transmisión del COVID-19 en Cuba. <sup>(15-17)</sup>

Cuba se ha destacado como uno de los países más capaces del mundo para combatir la epidemia del SARS-COV-2 y ha decidido desarrollar sus propios candidatos vacunales anti-COVID-19 seguros, inmunogénicos y que inducen eventos adversos mínimos en el paciente (por ejemplo, Soberana 02 y Abdala aprobadas como vacunas). Se hizo uso de los mismos para vacunar completamente a la población cubana antes que finalizara el 2021, a pesar del férreo bloqueo económico y financiero impuesto por Estados Unidos contra Cuba. <sup>(15)</sup> Además, estos candidatos vacunales y otros en desarrollo contribuirán a que disminuyan los números de casos activos y acumulados, y menor cantidad de pacientes lleguen a sus estados de gravedad o crítico. Independientemente de esto, es necesario mantener las medidas higiénico-sanitarias (por ejemplo, lavado de las manos, uso de mascarillas, baños potabilizados, el distanciamiento entre individuos). <sup>(17,18)</sup>

Aunque los resultados de las simulaciones de la ecuación (2) no se muestran en este estudio, se puede verificar que por mucho que incremente  $R$  no se logra que  $R > 1$ , si se tiene en cuenta el complejo contexto socio-económico que enfrenta Cuba durante la evolución de la segunda ola epidémica. Además, estas simulaciones evidencian que el incremento de los valores de  $R$  y  $R_0$ , fundamentalmente, si logran que  $R > 1$ , para todo valor de  $R_0$ . Esto significa que la percepción del riesgo y la responsabilidad social de los individuos influyen esencialmente en el comportamiento del COVID-19, siendo la segunda la que tiene el rol predominante, en concordancia con Díaz-Canel y Núñez, <sup>(19)</sup> y Fernández Ríos. <sup>(20)</sup>

El fallo de los pronósticos del número máximo de casos activos y fin de la segunda ola epidémica (22 de diciembre de 2020) se debe a la ocurrencia de diferentes eventos epidemiológicos no deseados durante y después de fin de año. Aunque el número máximo de casos activos y la meseta se predicen para el mes de marzo, desde el mes de enero, el corrimiento del fin de la segunda ola epidémica se debe a dichos eventos no deseados (por ejemplo, días próximos al de San Valentín), los cuales son esencialmente debidos a la baja percepción del riesgo y responsabilidad social de los individuos. Com-

portamiento similar al que ocurre el Día de las Madres. Estos días festivos y otros que requieran de mayor movilidad incrementan aún más los valores de casos activos y acumulados predichos por el modelo. Estos eventos epidemiológicos no deseados condujeron a la tercera ola epidémica.

La segunda ola epidémica en la provincia Santiago de Cuba se caracterizó por una alta dispersión de los casos positivos, lo que explicó el comportamiento oscilatorio/fluctuante de los casos activos positivos. Fluctuaciones u oscilaciones en sistemas/fenómenos no lineales, como los sistemas biológicos (especialmente en el hombre como especie) significan inestabilidades en ellos y por ende pueden evolucionar de forma impredecible. Por eso, el peligro de esta enfermedad. Estas inestabilidades justifican por qué la epidemia no ha podido controlarse desde el 16 de marzo de 2021 y la compleja situación epidemiológica que atraviesan la provincia Santiago de Cuba y el resto del país, hasta el 29 de septiembre de 2021.

El pronóstico de la disminución de casos con el uso del modelo, a partir del 10 de agosto de 2021, se corroboró con los datos epidemiológicos oficiales que se reportaron para Santiago de Cuba desde esa fecha hasta el momento de la terminación de la escritura de este documento. Desde el punto de vista epidemiológico, las tendencias identificadas por (1) y (2) (figura 3a) pueden ser interpretadas como el control no adecuado y correcto del COVID-19 en esta provincia, respectivamente.

En esta tercera ola epidémica, el correcto control de esta epidemia se pudo explicar por el posible sinergismo de dos acciones externas. La primera se correspondió con las efectivas medidas gubernamentales implementadas por el Consejo de defensa provincial en toda la provincia durante el mes de agosto y los primeros 15 días de septiembre. La segunda se relacionó con la culminación de la intervención vacunal (vacuna Abdala) en individuos entre 18 y 80 años de edad en cinco municipios (Songo-La Maya, San Luis, Palma Soriano, Contramaestre y Santiago de Cuba). Esta intervención vacunal culminó el 5 de agosto de 2021.

La tendencia (1) se puede explicar a partir del resto de la población no vacunada en estos 5 municipios y en los restantes municipios. Consecuentemente, el 10 de agosto de 2021 se sugirió al Consejo de defensa provincial la necesidad de acelerar el proceso de vacunación en los 4 municipios restantes (Mella, II Frente, III Frente y Guamá) en los que no se había intervenido con la vacuna Abdala, fundamentalmente en Mella y II Frente. Esto puede ser el por qué se observan marcadas diferencias entre los comportamientos temporales de los casos activos y acumulados en los municipios donde se intervino con la vacuna Abdala y aquellos en que no.

Aunque los resultados no se muestran, la tendencia a la disminución de los casos activos cambió a otra con una pendiente más negativa, hallazgo que se observa a partir del 26 de septiembre de 2021. Este cambio de pendiente sugiere la existencia de al menos 2 acciones externas sinérgicas que contrarrestan el crecimiento de la epidemia, acontecen simultáneamente y prevalecen en escalas de tiempo diferentes. Estas acciones externas pueden ser la implementación de las medidas gubernamentales (prevalece en el periodo 5 de agosto-26 de septiembre de 2021) y la intervención de la vacuna Abdala en la población de 2 años a 80 años que se acometió en todos los municipios de Santiago de Cuba (26 de septiembre hasta el momento de finalizar la escritura de este documento). Desde agosto, comenzó la intervención con esta vacuna en adultos de 18 años a 80 años en los 4 municipios no intervenidos. A partir de septiembre se inició la vacunación en la población de 2 años a 18 años en todos los municipios de Santiago de Cuba.

Lo mencionado en el párrafo anterior evidencia las altas eficacias de las vacunas Abdala y Soberana 02. Además de la implementación de las medidas gubernamentales y la intervención vacunal, la tendencia a la disminución de casos hacia (1) o (2) depende esencialmente de los valores de  $\mu$ ,  $\gamma$  y  $\beta$ . Si existe un sinergismo de las primeras 2 acciones externas con altas percepción del riesgo y responsabilidad social, y baja movilidad de los individuos, entonces la disminución de casos tiende a (1). De lo contrario, esta tendencia es hacia (2), lo que puede traer consigo un nuevo rebrote (cuarta ola) de la epidemia para Santiago de Cuba, como el modelo predice en 1 de sus posibles escenarios. Esto es válido para cualquier cambio de la variante de SARS-CoV-2 que se detecta con el modelo mediante los parámetros  $\mu$  y  $\beta$ .

Aunque la tendencia es a la disminución de los casos con COVID-19 en la actualidad, no puede haber violación de los protocolos sanitarios, medidas gubernamentales ni descuido de la población en general porque se puede favorecer la cuarta ola epidémica, como está ocurriendo en Europa (por ejemplo, Rusia, Bélgica). Esto es importante tenerlo en cuenta porque el modelo predijo la ocurrencia de 2 olas epidémicas (segunda y tercera) desde el mes de abril de 2020, a pesar del corte de la transmisión del COVID-19 en la primera ola epidémica.

La Organización Mundial de la Salud ha establecido vacunar al 90 % de la población mundial para alcanzar la inmunidad colectiva, aspecto de prioridad primordial del Gobierno cubano y que se acomete con calidad y celeridad. Para evitar la posible cuarta ola epidémica en Santiago de Cuba, se tiene que lograr este 90 % de vacunación, como mínimo, de la población en esta provincia; incrementar la vigilancia epidemio-

lógica, fundamentalmente a los viajeros internacionales; altas percepción del riesgo y responsabilidad de los individuos; y la toma oportuna de las medidas gubernamentales, acorde al perfil y dinámica de la epidemia.

Lo arriba discutido sugiere la necesidad imperiosa de incrementar la percepción del riesgo y la responsabilidad social de los individuos para el bien de todos. De lo contrario, otros eventos epidemiológicos no deseados ocurrirán, lo que puede traer consigo larga duración de la epidemia; retardo del tiempo de fin de la segunda ola epidémica; la ocurrencia de al menos 1 ola epidémica más; mayor cantidad de recursos financieros, materiales y humanos; cansancio/agotamiento/estrés del personal médico, paramédico y de los individuos; mayor número de casos infectados, hospitalizados y fallecidos; y más personas infectadas con SARS-COV-2 requerirán de la atención de otras especialidades médicas por los importantes efectos post-COVID-19 que se vienen reportando en Cuba y en otros países.

## Conclusiones

El modelo SEIR y el algoritmo bayesiano de Monte Carlo describió los datos oficiales reportados por el Ministerio de Salud Pública de la República de Cuba para la provincia Santiago de Cuba. Los resultados de los mismos influyeron en la toma de decisiones por el Consejo de defensa provincial y la Dirección provincial de salud pública, en cuanto a la restricción de la movilidad, profundizar en la pesquisa epidemiológica (por medio de la cantidad de casos no detectados que estima el modelo), apertura de nuevos centros de aislamientos y hospitales con el incremento de casos, y medidas relacionadas con los servicios en general y regulaciones en las instituciones.

## Agradecimientos

Los autores agradecen los valiosos y útiles comentarios de los revisores anónimos y de la Editora Ejecutiva Dr. C. Diana Elena Prieto Acosta que contribuyeron esencialmente a la mejora de este documento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Velázquez Pérez L. La COVID-19: reto para la ciencia mundial. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba, 2020;10(2):762. Disponible en: <http://www.revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/763/792>.
2. Ochoa Alonso AA, Selva Suárez LN, Eugenio de Souza L. Ciencia, salud y solidaridad para salvar vidas: un llamado a la acción contra la COVID-19. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba, 2020;10(2):879. Disponible en: <http://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/879/880>.
3. Zamora Matamoros L, Sagaró del Campo NM, Valdés García LE, Benítez Jiménez I. Entrada de viajeros y densidad poblacional en

- la propagación de la COVID-19 en Cuba. *Revista Cubana de Medicina*, 2020;59(3):e1375. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/med/v59n3/1561-302X-med-59-03-e1375.pdf>.
4. Valdés García LE, León Bueno D, Neira Palacios A, Jaqueman Dussac Y. Características clinicoepidemiológicas de pacientes con evolución asintomática de la COVID-19 en la provincia de Santiago de Cuba. *Medisan*, 2020;24(5):810-22. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v24n5/1029-3019-san-24-05-810.pdf>.
  5. Céspedes Delis V, Valdés García LE, Cordoví Hernández VD. Características de los internamientos hospitalarios por la COVID-19 en la provincia de Santiago de Cuba. *Medisan*, 2020;24(6):1114-27. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v24n6/1029-3019-san-24-06-1114.pdf>.
  6. Lin Q, Zhao S, Gao D, Lou Y, Yang S, Musa SS, Wang MH, Cai Y, Wang W, Yang L, He D. 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*, 2020;93:211-216. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.02.058>.
  7. IHME COVID-19 forecasting team. Modeling COVID-19 scenarios for the United States. *Nature medicine*, 2020. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41591-020-1132-9>.
  8. Medina-Mendieta JF, Cortés-Cortés ME, Cortés-Iglesias M. Ajuste de curvas de crecimiento poblacional aplicadas a la COVID-19 en Cuba. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 2020;19. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1729-519X2020000400013&script=sci\\_arttext&lng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1729-519X2020000400013&script=sci_arttext&lng=en).
  9. Abelló-Ugalde IA, Guinovart-Díaz R, Morales-Lezca W. El modelo SIR básico y políticas antiepidémicas de salud pública para la COVID-19 en Cuba. *Revista Cubana de Salud Pública*, 2021;46:e2597. Disponible en: <https://www.scielosp.org/article/rcsp/2020.v46suppl1/e2597/>.
  10. Ramírez-Torres EE, Castañeda ARS, Rodríguez-Aldana Y, Sánchez-Domínguez S, Valdés-García LE, Palú-Orozco A, Oliveros-Domínguez ER, Zamora-Matamoros L, Labrada-Claro R, Cobas-Batista M, Sedal-Yanes D, Soler-Nariño O, Valdés-Sosa PA, Montijano JI, Cabrales LEB. Mathematical modeling and forecasting of COVID-19: experience in Santiago de Cuba province. *Revista Mexicana de Física*, 2021;67(1):123-36. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.67.123>.
  11. Miles PR. Pymcstat: A Python package for bayesian inference using delayed rejection adaptive metropolis. *Journal of Open Source Software*, 2019;4(38):1417. <https://doi.org/10.21105/joss.01417>.
  12. Goris NAV, González MM, Borges BO, Rodríguez JLG, Morales DF, Calzado EM, Castañeda ARS, Torres LM, Montijano JI, González VGS, Cabrales LEB. Efficacy of direct current generated by multiple-electrode arrays on F3II mammary carcinoma: experiment and mathematical modeling. *Journal of Translational Medicine*, 2020;18(1990):1-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12967-020-02352-6>.
  13. González MM, Morales DF, Cabrales LEB, Pérez DJ, Montijano JI, Castañeda ARS, González VGS, Posada OO, Martínez JA, Delgado AG, Martínez KG, Mon ML, Monzón KL, Ciria HMC, Beatón EO, Brooks SCA, González TR, Jarque MV, Mateus MAO, Rodríguez JLG, Calzado EM. Dose-response study for the highly aggressive and metastatic primary F3II mammary carcinoma under direct current. *Bioelectromagnetics*, 2018;39(6):460-75. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/bem.22132>.
  14. Palu Orozco A, Rafael Oliveros E, Valdés García LE, Cabrales LEB, Zamora Matamoros L, Bandera Jiménez D, Rodríguez Valdés A, Fernández Cairó CA, Rubio Rojas M, Castro Castro D. Identificación de clústeres de casos con COVID-19 en la provincia Santiago de Cuba. *Rev Cubana Med*, 2021;60(1):e1382. Disponible en: <http://revmedicina.sld.cu/index.php/med/article/download/1382/2023>.
  15. Martínez Díaz E, Pérez Rodríguez R, Herrera Martínez L, Lage Dávila A, Castellanos Serra L. La industria biofarmacéutica cubana en el combate contra la pandemia de COVID-19. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 2020;10(2):906. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/906>.
  16. Díaz-Canel M. ¿Por qué necesitamos un sistema de gestión del Gobierno basado en ciencia e innovación? *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 2021;11(1):1000. Disponible en: <http://www.revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/1000>.
  17. Molina-Molina M. Secuelas y consecuencias de la COVID-19, *Medicina Respiratoria*. 2020;13(2):71-7. Disponible en: <http://www.neumologiaysalud.es/descargas/R13/R132-8.pdf>.
  18. Martín-Aragón M, Terol-Cantero MC. Post-COVID-19 psychosocial intervention in healthcare professionals. *International Journal of Social Psychology*, 2020;35(3):664-9. <https://doi.org/10.1080/02134748.2020.1783854>.
  19. Díaz-Canel M y Núñez J. Gestión gubernamental y ciencia cubana en el enfrentamiento a la COVID-19, *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 2020;10(2):881. Disponible en: <http://www.revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/881>.
  20. Fernández Ríos O. En tiempos de pandemia: hablemos de responsabilidad. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 2020;10(2):771. Disponible en: <http://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/download/771/817>.

---

Recibido: 09/06/21

Aprobado: 20/09/21

---

#### Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses con la investigación presentada.

#### Contribuciones de los autores

Conceptualización: Erick Eduardo Ramírez Torres, Antonio Rafael Selva Castañeda, Luis Enrique Bergues Cabrales

Curación de datos: Yuri Alcantara Oliveros, Adriana Rodríguez Valdés  
Análisis formal: Erick Eduardo Ramírez Torres, Antonio Rafael Selva Castañeda, Luis Enrique Bergues Cabrales, Henry Bory Prevez, Luis Eugenio Valdés García.

Investigación: Erick Eduardo Ramírez Torres, Antonio Rafael Selva Castañeda, Luis Enrique Bergues Cabrales, Henry Bory Prevez, Luis Eugenio Valdés García

Metodología: Erick Eduardo Ramírez Torres, Luis Enrique Bergues Cabrales

Administración del proyecto: Luis Enrique Bergues Cabrales, Luis Eugenio Valdés García  
Software: Erick Eduardo Ramírez Torres,

Henry Bory Prevez, Sandy Sánchez Domínguez  
Supervisión: Luis Enrique Bergues Cabrales  
Validación: Erick Eduardo Ramírez Torres, Luis Enrique Bergues Cabrales  
Visualización: Erick Eduardo Ramírez Torres, Antonio Rafael Selva Castañeda, Luis Enrique Bergues Cabrales, Henry Bory Prevez, Luis Eugenio Valdés García, Diana Sedal Yanes, Yuri Alcantara Oliveros, Adriana Rodríguez Valdés, Sandy Sánchez Domínguez  
Redacción-borrador original: Erick Eduardo Ramírez Torres, Luis Enrique Bergues Cabrales  
Redacción-revisión y edición: Erick Eduardo Ramírez Torres, Luis Enrique Bergues Cabrales, Luis Eugenio Valdés García, Diana Sedal Yanes.

#### **Financiación**

No hay fuentes de financiamiento nacional e internacional que declarar.

#### **Cómo citar este artículo**

Ramírez Torres EE, Selva Castañeda AR, Bergues Cabrales AR, Bory Prevez H et al. Comportamientos temporales de los casos activos y acumulados durante el segundo y tercer rebrotes epidémico de la COVID-19 para la provincia Santiago de Cuba. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba [internet] 2022 [citado en día, mes y año];12(1):e1083. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1083>

