



CIENCIAS BIOMÉDICAS

Artículo Original de Investigación

Contribuciones de la epidemiología, la modelación y los sistemas de información en el enfrentamiento de la COVID-19

Pedro Mas Bermejo ^{1,6*} <https://orcid.org/0000-0002-5350-657X>
Liset Sanchez Valdés ² <https://orcid.org/0000-0001-7747-1052>
María Vidal Ledo ³ <https://orcid.org/0000-0002-0293-5999>
Armando Seuc Jo ⁴ <https://orcid.org/0000-0002-2231-0822>
Yudivian Almeida Cruz ⁵ <https://orcid.org/0000-0002-2345-1387>
Nancy Pérez Rodríguez ⁵ <https://orcid.org/0000-0001-9786-0872>
Raúl Guinovar Díaz ⁵ <https://orcid.org/0000-0001-7702-6063>
Waldermar Baldoquin ¹ <https://orcid.org/0000-0001-9231-7109>
Wilfredo Morales Lezca ⁵ <https://orcid.org/0000-0003-1189-6773>
Isidro A. Abelló Ugalde ⁵ <https://orcid.org/0000-0001-6015-4261>
Ricardo Remond Noa ⁵ <https://orcid.org/0000-0002-6969-3453>
Alejandro Lage Castellano ^{5,6} <https://orcid.org/0000-0003-1499-4256>

¹ Instituto Pedro Kourí. La Habana, Cuba

² Centro de Inmunología Molecular. La Habana, Cuba

³ Escuela Nacional de Salud Pública. La Habana, Cuba

⁴ Instituto de Higiene y Epidemiología. La Habana, Cuba

⁵ Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

⁶ Titular de la Academia de Ciencias de Cuba

*Autor para la correspondencia: pmasbe@infomed.sld.cu

Revisores

Pastor Castell Florit-Serrate
Director de la Escuela Nacional de Salud.
La Habana, Cuba

Santa Jiménez Acosta [†]
Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología. La Habana, Cuba

Editora

M. Sc. Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Dr. C. Yoan Karell Acosta González
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

RESUMEN

Introducción. Este trabajo resume el aporte del Grupo Técnico de Modelación y Epidemiología para el enfrentamiento de la COVID-19. El objetivo del trabajo fue generar conocimiento y evidencias científicas en apoyo a la toma de decisiones del Gobierno, el sistema de salud y otros sectores. **Método.** Se realizó investigación de implementación con un enfoque transdisciplinar, con la epidemiología como guía. Se desarrollaron herramientas que permitieron la identificación de la magnitud y la diseminación de la COVID-19 en el país, el análisis de riesgo de enfermar y de severidad, así como para la evaluación de las medidas implementadas. **Resultados.** Se realizaron mejoras a los sistemas de información y se creó la plataforma Covid19CubaData para la estandarización y visualización de los datos. Se desarrollaron modelos matemáticos de pronósticos. Se emplearon los Sistemas de Información Geográfica para identificar grupos poblacionales vulnerables y estratificar intervenciones. El impacto de las acciones fue evaluada desde el análisis clínico-epidemiológico, el uso de técnicas de *big data* de la movilidad y la estimación en tiempo real del número reproductivo efectivo. Modelos multinivel y de inteligencia artificial permitieron la comparación del comportamiento de la pandemia en Cuba y el mundo. Se propusieron indicadores para el des-escalado de las acciones y se evaluó la equidad en la respuesta del país ante la COVID-19. En conclusión, la investiga-



ción epidemiológica realizada, con el apoyo de la modelación y los sistemas de información, sirvieron para la toma de decisiones del Gobierno y el Ministerio de Salud Pública en el enfrentamiento efectivo a la COVID-19.

Palabras clave: COVID-19; Epidemiología; Modelación; Sistemas de información

Epidemiology, modelling and information systems in the COVID-19 control in Cuba

ABSTRACT

Introduction. This paper summarizes the contribution by the Technical Group for Modelling and Epidemiology to face COVID-19. The objective was to create knowledge and scientific evidence to support the Government's decision making, the health system and other sectors. **Methods.** Implementation research from a transdisciplinary perspective was carried out, with epidemiology providing the guidelines. Tools were developed to identify the magnitude and dissemination of COVID-19 in the country, as well as the analysis of the risk to get sick and severity; also, tools for the evaluation of the measures implemented. **Results and Discussion.** Improvements were made to the information systems and the Covid19CubaData platform was created to standardize and visualize the data. Prognosis mathematical models were developed. Geographical information systems were used to identify vulnerable population groups and stratify interventions. The impact of the actions was evaluated with a clinical-epidemiological analysis, as well as the use of big data techniques on mobility and real time estimation of the effective reproductive number. Multilevel and artificial intelligence models allowed for comparing the behavior of the pandemic in Cuba and the world. Indicators were brought forward for the de-escalation of the actions. The equity in the country's response to COVID-19 was evaluated. Conclusions: the epidemiological research done, supported by modelling and the information systems, was useful for the government and the Ministry of Public Health to effectively face COVID-19.

Keywords: COVID-19; epidemiology; modelling; information systems

INTRODUCCIÓN

La pandemia de la COVID-19, causada por el coronavirus SARS CoV-2, mostró tener mecanismos de propagación que favorecieron su rápida expansión a nivel mundial. ⁽¹⁾ Hasta el 1 de octubre de 2020 generó más de 34 millones de casos confirmados en 185 países y 1 millón de fallecidos, para una letalidad de 2,98 %. ⁽²⁾ En la región de las Américas se reportaron más de 16 millones de casos confirmados con más de 560 mil fallecidos para una letalidad de 3,33 %. ⁽³⁾ Ante estas espectaculares cifras, los gobiernos han demostrado capacidades de respuesta muy variables. Los servicios de salud, en muchas grandes ciudades y países, fueron puestos en tensión llegando, en ocasiones, a desbordar su capacidad resolutoria y originando en las poblaciones humanas pánico y desesperación. ⁽⁴⁾

En enero, con el primer reporte de casos de COVID-19 en las Américas, aparecieron las primeras señales de una potencial crisis, a lo que el Gobierno cubano, de conjunto con el Ministerio de Salud Pública (MINSAP) y con la participación de todos los sectores económicos y sociales invo-

lucrados, respondió con el despliegue de la gestión gubernamental orientada a movilizar las importantes capacidades científicas, tecnológicas y profesionales para el enfrentamiento de la pandemia. ⁽⁵⁾

El 20 de marzo, 9 días después de haberse detectado los 3 primeros casos importados, se activó el Grupo Técnico Nacional, integrado por expertos -académicos y especialistas de universidades, centros de investigación y servicios asistenciales- con la misión de asesorar y colaborar con el primer nivel de dirección del Estado para la identificación de la magnitud y la diseminación de la enfermedad en el país, su riesgo y su severidad. ⁽⁵⁾

Como parte de este grupo, el Grupo Técnico de Modelación y Epidemiología para el enfrentamiento de la COVID-19, integrado por epidemiólogos, matemáticos, especialistas de ciencias de la computación, físicos y geógrafos, lideró investigaciones que permitieron aportar criterios para la evaluación de las intervenciones, la planificación de recursos y el análisis de la situación epidemiológica en Cuba y en el contexto internacional. Además, participó en el análisis y la pro-

puesta de las medidas para el enfrentamiento de la enfermedad, la modelación de escenarios y la creación de un tablero interactivo para el seguimiento y el control de la epidemia. ⁽⁶⁾

El presente trabajo resume el aporte del Grupo Técnico de Modelación y Epidemiología para el enfrentamiento de la COVID-19 a partir de los estudios realizados desde el inicio de la pandemia en Cuba hasta el 31 de octubre de 2020 como parte de las acciones de enfrentamiento a este proceso epidemiológico. El mismo tuvo como objetivos: generar nuevo conocimiento y aportar evidencias científicas en apoyo a la toma de decisiones y medidas del Gobierno, del sistema nacional de salud y otros sectores de la sociedad; y proponer y desarrollar herramientas para su evaluación

MÉTODOS

Los aportes al conocimiento expuestos en este trabajo, se describen a través de una secuencia de estudios que siguen la metodología de la investigación de implementación, lo que permitió incrementar la utilización sistemática de los resultados de investigación en la práctica, maximizar su efectividad e impactar las políticas sociales y gubernamentales.

A partir del diagnóstico de la información requerida para la toma de decisión, la identificación de las fuentes de datos y el flujo de información requerida se hicieron sugerencias para el perfeccionamiento del sistema de estadísticas del MINSAP, se organizó el chequeo y validación de la calidad de los datos y la mejora de las bases de datos existentes.

Se utilizaron los datos de casos confirmados reportados diariamente de COVID-19 desde el 11 de marzo de 2020 hasta el 1 de octubre de 2020, por las 15 provincias y 168 municipios. Para cada provincia y cada municipio, se registró el número de casos acumulados, así como los recuentos de población en grupos de edad de 5 años. Los datos demográficos sobre el tamaño de la población, la densidad de población, la urbanización, el índice de masculinidad y el índice de envejecimiento fueron proporcionados por la Oficina Nacional de Estadísticas. Utilizamos las estimaciones medias de la población para 2019.

El seguimiento de la cadena epidemiológica de casos se obtuvo a partir de las encuestas epidemiológicas realizadas por profesionales de la salud a nivel local. Para la mayoría de los pacientes fue posible descubrir la fuente de infección. Se identificó si la transmisión ocurrió en la provincia o fue importada de otros lugares. Para ello se utilizaron los datos oficiales de los departamentos de estadística del Ministerio de Salud. Los datos relativos a la prevalencia de las comorbilidades asociadas (hipertensión arterial, cardiopatía isquémica, cáncer, diabetes mellitus, asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica) se obtuvieron de la Dirección de Registros Médicos y

Estadísticas del Ministerio de Salud Pública y las Direcciones Provinciales de Salud y de Higiene y Epidemiología.

Todos los datos se relacionaron con coordenadas geográficas mediante un código de municipio único. La latitud y longitud del centro de cada municipio se extrajo de los datos cartográficos de GEOCUBA en una escala de 1:25000. Las características demográficas de los países utilizados para la comparación con Cuba en el estudio se obtuvieron del sitio web: <http://www.woldometer.info>. Los casos notificados confirmados para los países se obtuvieron de <http://pomber.github.io/covid19>.

Modelación de la pandemia en Cuba

La asociación ciencia-política establecida por la máxima dirección del país permitió definir mutuamente las prioridades en término de preguntas de investigación que fueron variando según el avance de la epidemia. ^(7,8) Se utilizó estrategias de modelación dinámica, estadística, inteligencia artificial, técnicas computacionales intensivas para el análisis de grandes volúmenes de datos y modelación espacial. ⁽⁹⁾

Los modelos dinámicos fueron la base de los pronósticos de la epidemia de COVID-19 en Cuba. Los mismos permiten considerar el número de casos activos cada día, así como predecir el número de recuperados en la población. Una ventaja de estos métodos, es que proporcionan una visión global del tiempo de duración de la epidemia, de los picos hospitalarios; así como, ayudar a conocer el número de camas y otros recursos de la salud necesarios en cada etapa. Además del modelo SIR (susceptible-infectado-recuperado) con coeficientes temporales y SIR con demografía, ⁽¹⁰⁻¹²⁾ se implementaron 2 variantes de modelos SEIR: a) con la finalidad de representar la dinámica de transmisión de la COVID-19 entre las poblaciones de infectados sintomáticos y asintomáticos, con funciones que simulan las acciones gubernamentales e individuales; b) para incorporar y evaluar el efecto de la percepción de riesgo, la cuarentena y la hospitalización de casos. ^(12,13)

Los modelos fenomenológicos han sido otro tipo de modelos desarrollados y fueron utilizados para realizar pronósticos a corto plazo a nivel nacional y para guiar las intervenciones a nivel provincial. ⁽¹⁴⁾ Se realizó una adaptación innovadora al modelo que permitió la estimación y predicción en tiempo real de la ocurrencia de múltiples olas. Adicionalmente, se desarrolló un modelo no lineal con efectos mixtos que permitió incorporar la heterogeneidad a nivel provincial. ^(15,16)

En cuanto a los modelos de simulación se utilizaron 2 abordajes. El primero usando procesos de ramificación y el segundo con técnicas de inteligencia artificial. Los procesos de ramificación tienen especial interés en la etapa inicial de una epidemia o cuando ocurre un rebrote. Permiten simular el

número medio de individuos infectados y acumulados en un instante de tiempo y estimar la probabilidad de que la transmisión se extinga. Los modelos basados en micro simulaciones fueron otro tipo de modelos utilizados tanto para pronosticar el comportamiento de la epidemia como para poder proyectar las distintas intervenciones. En este caso, se modelan el comportamiento de cada persona y los procesos por los que pasa durante la enfermedad. ⁽¹⁶⁻¹⁸⁾

El comportamiento de la tasa del total de casos confirmados en Cuba se compara con el de otros países, utilizando modelos multinivel para datos longitudinales. ⁽¹⁹⁾ El objetivo fundamental es obtener predicciones de la evolución esperada de este indicador en nuestro país a partir de lo ocurrido en países con condiciones similares a la de Cuba. Este modelo es complementado con modelos de inteligencia artificial que, a partir de los datos en 188 países, determina un conjunto de países similares a Cuba agregando diferentes métricas de similitud basadas en datos demográficos, intervenciones no farmacológicas y la evolución de las curvas epidemiológicas. ⁽²⁰⁾

En la modelación espacial de la pandemia, varios sistemas de información geográfica fueron utilizados para la representación cartográfica y análisis espacial de los datos relacionados con la COVID-19. Los modelos se estructuraron en 3 dimensiones. La primera, se refiere al estudio de los grupos de riesgos de personas con 60 años y más, y que padecen enfermedades crónicas [hipertensión arterial, diabetes mellitus, cardiopatía isquémica, asma bronquial, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y cáncer]; por la posibilidad que tienen una vez contraída la enfermedad de la COVID-19, de desarrollar un cuadro clínico que transite de forma rápida a las fases de grave, crítico y culminar con el fallecimiento. ⁽²¹⁾ En la segunda etapa se identifican para la provincia La Habana las áreas de salud más vulnerables a la transmisión del virus, teniendo en cuenta la densidad de población, los centros que generan aglomeraciones de personas, el hacinamiento poblacional y la presencia de barrios precarios. ⁽²²⁾ En la tercera etapa se incorporó el estudio de la distribución geográfica de la incidencia acumulada por 100 000 habitantes, y su relación con la vulnerabilidad a la COVID-19. ⁽²³⁾ Se calcularon las razones de incidencia estandarizadas (RIE) para la incidencia de COVID-19 para las 15 provincias y los 168 municipios del país. Para los municipios se estimaron los riesgos relativos (RR) suavizados y las probabilidades *a posteriori* (PP) del exceso de riesgo ($RR > 1$) usando un modelo bayesiano condicional autorregresivo. ⁽²⁴⁾ Posteriormente se ajustaron modelos de regresión para estudiar la relación del riesgo de transmisión con las características demográficas. ⁽⁹⁾

Estimación de parámetros y evaluación de intervenciones

Estimar la fuerza de las epidemias es de gran preocupación para los encargados de formular políticas cuando comienza la

transmisión. El número reproductivo básico (R_0) es la medida más común de esta fuerza. Representa el número medio de casos nuevos que se producen tras la introducción de un individuo infectado en una población totalmente susceptible. Este parámetro determina si la transmisión terminará naturalmente ($R_0 < 1$) o evolucionará a una epidemia ($R_0 > 1$). En el curso de la epidemia, el valor del número reproductivo cambia debido a la implementación de medidas de control, entre otros factores, por lo que resultó importante hacer la estimación de este parámetro en el tiempo (R_t). ^(7,25)

Con la finalidad de contribuir a las decisiones relativas a los protocolos clínicos implementados, se realizó el análisis clínico-epidemiológico descriptivo de la incidencia de casos confirmados, casos graves y fallecidos en diferentes períodos de tiempo. ⁽²⁵⁾ A partir del ajuste de modelos de regresión logística se estimó el riesgo [*odds ratios* (OR)] de severidad de la enfermedad y de morir. ⁽²⁶⁾ Se realizó el análisis de la serie de tiempo de la letalidad por semanas epidemiológicas para determinar los cambios en el tiempo y evaluar el efecto de los cambios en los protocolos clínicos implementados. ^(27,28)

Por su parte el empleo de técnicas de *big data* en el análisis de los datos de los registros de las torres de telefonía móvil permitió generar por primera vez en Cuba indicadores de movilidad de la población globales y agregados para evaluar el efecto de las medidas adoptadas por el gobierno para reducir la movilidad. ⁽²⁹⁾

Para determinar los efectos agregados de las intervenciones que se realizan de manera simultáneas se entrenó con técnicas de inteligencia artificial un modelo de regresión logística que consideró el número de casos activos en el tiempo como variable dependiente en función de las medidas implementadas. El modelo se ajustó con la información de 188 países y permitió extraer los pesos relativos asociados a cada intervención. Si diferentes países aplican las mismas intervenciones con resultados positivos similares, las intervenciones correspondientes recibirán un gran peso positivo, y viceversa. ^(10,30)

Finalmente, con el objetivo de documentar la respuesta eficaz y con equidad en el enfrentamiento a la COVID-19 en Cuba se realizó el análisis de indicadores relevantes seleccionados y su comparación por estratos determinados según condiciones de vida. Se consideró el número de médicos por 100 000 habitantes, número de pruebas PCR realizadas por millón de habitantes, tasa de incidencia por 100 000 habitantes, número de contactos estudiados, de ellos el número que resultó positivo a SARS-CoV-2, el número de fallecidos, la tasa de letalidad y el índice Oxford que evalúa la respuesta del Gobierno a la pandemia y permite la comparación con otros países. ⁽²⁹⁾ Se hace un análisis de casos identificados por la Red de las Américas para la equidad en salud que contribuyen a la equidad en salud o que requieren acción. ⁽³¹⁾

RESULTADOS

A partir del diagnóstico de la información requerida para la toma de decisión se creó la plataforma computacional Covid19CubaData para la estandarización y visualización de los datos (ver figura 1).⁽³⁰⁾ Esta plataforma no solo muestra los detalles de la información oficial relacionada con la cantidad de casos diagnosticados, recuperados, evacuados y fallecidos, en tiempo real, sino que realiza un procesamiento estadístico en función de variables como edad, sexo, grupo etario, localización del caso y estado clínico. También se le incorporaron salidas gráficas útiles para la comparación de Cuba con la situación internacional, el seguimiento de los eventos, de indicadores y parámetros epidemiológicos y la evaluación de la respuesta del gobierno a través del índice Oxford.

La figura 2 ilustra ejemplos de las salidas gráficas de algunos de los modelos implementados. Puede observarse que durante la primera onda epidémica el reporte de casos se comportó dentro de lo pronosticado para el escenario favorable del modelo SIR implementado. A pesar de la variabilidad de los datos, el modelo fenomenológico mostró su utilidad en la predicción del comportamiento general multionda de la pandemia y permitió predecir el control de la pandemia en Cuba, que se mantiene hasta la actualidad. Por su parte en los paneles c y d se muestran salidas de los modelos de inteligencia artificial y modelos multinivel que permitieron la comparación del comportamiento de la pandemia en Cuba con lo ocurrido en otros países con características sociodemográficas similares a Cuba.

Los sistemas de información geográfica y los análisis espaciales desarrollados permitieron determinar las áreas con mayor vulnerabilidad a la COVID-19. La figura 3 muestra como las áreas clasificadas como de muy alta y alta vulnerabilidad se sitúan tanto para Cuba como para La Habana en el cinturón central coincidiendo con los espacios de mayor envejecimiento poblacional. Los puntos rojos en la figura 3B) repre-

sentan la localización espacial de los casos. Se aprecia que la mayor transmisión ocurrió justo en las áreas definidas por el modelo como de alta vulnerabilidad, teniendo en cuenta de manera integral tanto aspectos biológicos como la prevalencia de enfermedades y estructura etaria de la población como los factores sociales y de condiciones de vida.

La figura 4 muestra los resultados de a) la estimación del número reproductivo efectivo en Cuba, b) del índice de movilidad para 4 provincias occidentales del país desde el 11 de marzo hasta el 1 de septiembre y c) la tasa de incidencia de casos confirmados de COVID-19 e índice de rigor de Oxford para Cuba, de 11 de marzo del 2020 a 30 de septiembre del 2020. Estos indicadores resultaron de gran utilidad en el seguimiento del comportamiento de la pandemia, reflejan la efectividad de las medidas de control y la respuesta del Gobierno a la pandemia.

Revisando la equidad en las estructuras y los procesos que existen y se reproducen en el contexto del sistema de salud, reflejados en el enfrentamiento a la pandemia de la COVID-19 en Cuba podemos mencionar que el Sistema Nacional de Salud, con cobertura universal basada en la estrategia de la Atención Primaria de Salud, dispone de 449 policlínicos y 26 173 consultorios médicos. Para la COVID-19 se cerraron capacidades hospitalarias, tales como 1103 camas para centros de atención a sospechosos y de los centros de aislamiento; 3636 en centros de vigilancia para contactos y 4039 para viajeros, todas en función de las necesidades y la situación epidemiológica de los territorios. La baja tasa de letalidad, fue reflejo de la calidad del protocolo utilizado y evidencia el cumplimiento con los principios de equidad al ofrecerse atención médica y tratamientos de manera gratuita a quienes lo requirieron.

La preparación de un plan nacional único, la utilización de estrategias particulares para la pesquisa, diagnóstico y rastreo de casos en la Atención Primaria de Salud, la imple-



Fig. 1 Salidas gráficas del tablero Covid19CubaData

mentación de un protocolo único de actuación y la respuesta gubernamental e intersectorial permitieron el control de la enfermedad desde la perspectiva de equidad en salud. (31)

DISCUSIÓN

Los resultados encima descritos han tenido impacto científico, contribuyendo a la identificación de la magnitud y diseminación de la epidemia, su riesgo y severidad, la evaluación de las intervenciones, la planificación de los recursos del sistema nacional de salud para su enfrentamiento y el análisis de la situación epidemiológica de Cuba en el contexto internacional.

Las diversas investigaciones fueron dirigidas a la predicción, el diseño de los modos de enfrentamiento, el perfeccionamiento de los protocolos terapéuticos, así como la gestión de enfrentamiento a la pandemia y el perfeccionamiento de los modelos de actuación para la reducción de riesgos y vulnerabilidades.

Los modelos dinámicos se incorporaron a la campaña de concientización de la población acerca de la necesidad de las medidas antiepidémicas y en la comunicación al personal médico, especialmente los epidemiólogos, quienes utilizaron esta herramienta en el trabajo cotidiano para el control de la epidemia del país.

Gracias al trabajo científico desplegado fue construida una base de conocimientos que ha devenido referente y apoyo a la gestión del gobierno en el enfrentamiento a la pandemia, confirmando la capacidad y la conveniencia de lograr una estrecha colaboración entre los grupos científicos y el Gobierno.

La investigación mostró su utilidad para la formulación y evaluación de las políticas públicas dando sustento científico a la toma de decisiones tomadas. Este resultado científico al igual que otros, han dado al país una alta visibilidad y ha contribuido al prestigio de Cuba, como referente en el enfrentamiento a la COVID-19.

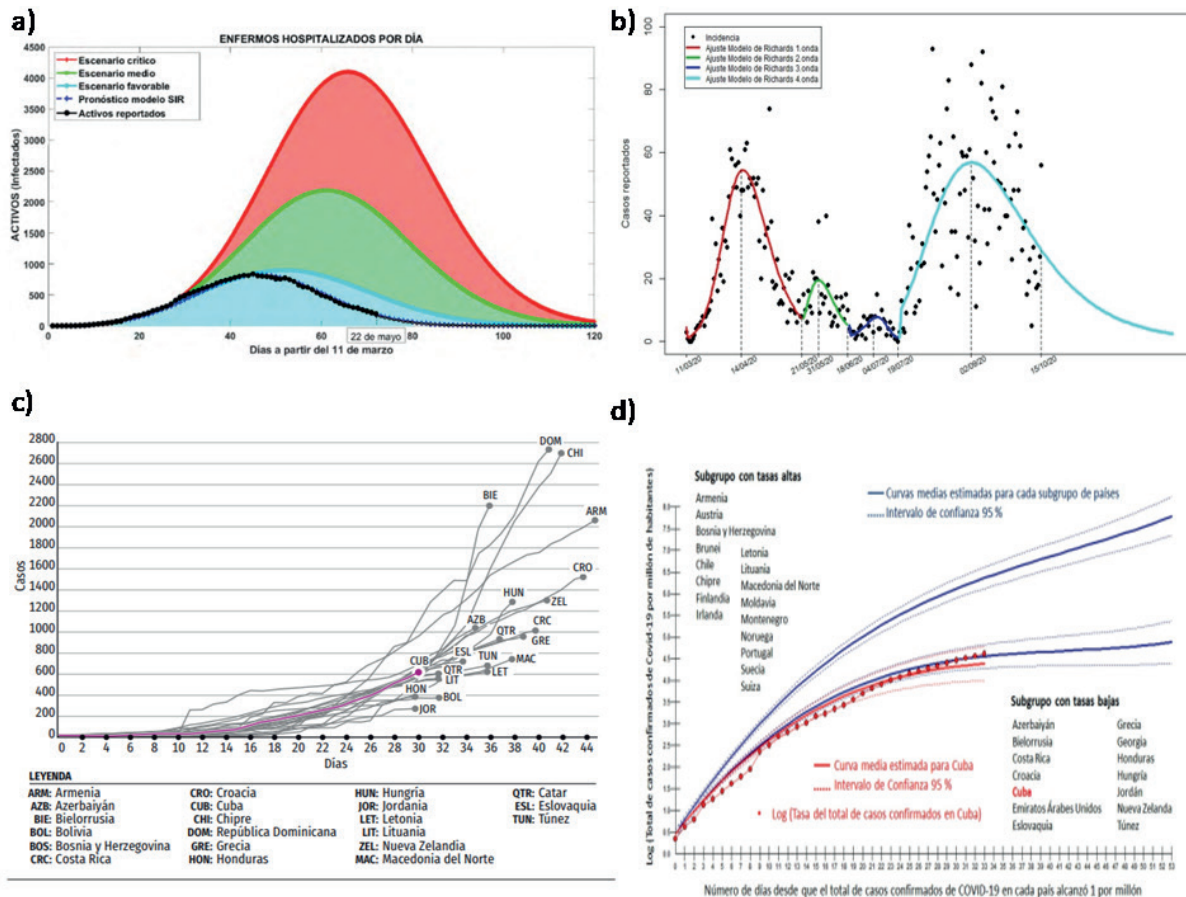


Fig. 2 A) Escenarios crítico (rojo), medio (verde) y favorable (azul) simulados con el modelo SIR con demografía en las primeras semanas de pandemia. En negro los datos reales, que abarcan el período desde el 11 de marzo hasta el 22 de mayo de 2020. B) Ajuste y predicción del modelo fenomenológico multionda implementado para los datos del período del 11 de marzo al 15 de octubre con predicción hasta diciembre. C) Curva de casos activos de COVID-19 en Cuba obtenida por el modelo de simulación con técnicas de inteligencia artificial a partir de los 20 países más similares a Cuba. D) Comparación de la tasa del total de casos confirmados en Cuba con respecto al crecimiento promedio de 2 subgrupos de países con características similares a Cuba.

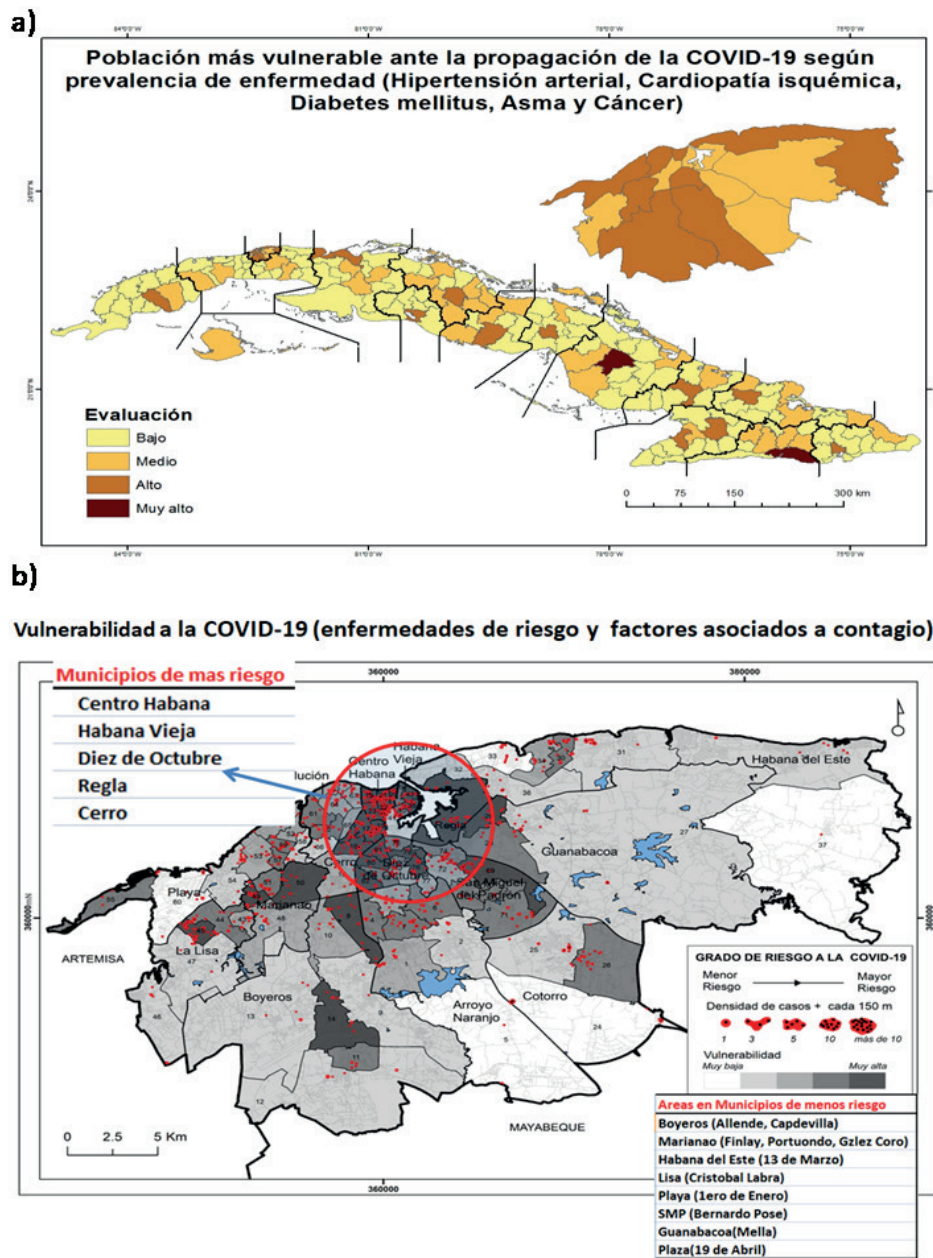


Fig. 3 Población más vulnerable ante la propagación de la COVID-19. A) para Cuba según prevalencia de enfermedades (hipertensión arterial, cardiopatía isquémica, diabetes mellitus, asma y cáncer); B) para la Habana según prevalencia de enfermedades y factores de riesgo (densidad de población, los centros que generan aglomeraciones de personas, el hacinamiento poblacional y la presencia de barrios precarios)

Conclusiones

La investigación epidemiológica realizada con el apoyo de la modelación y los sistemas de información sirvió para la toma de decisiones del gobierno y el ministerio de salud pública en el enfrentamiento efectivo de la COVID-19.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WHO. Coronavirus disease (COVID-2019) situation Reports. *World Health Organization*. [internet] 2020 [Consultado 21 May

2020]. Disponible en: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situationreports/>

2. Coronavirus update [Internet] 2020 [Consultado 30 Oct 2020]. Disponible en: <http://www.worldometers.info>
3. MINSAP. Gracias por salvar vidas. Sitio Web MINSAP. Ministerio de Salud Pública. [Internet] 2020 [citado 25 Nov 2020]. Disponible en: <https://salud.msp.gob.cu/>
4. New cases of COVID-19 in World countries. Have countries flattened the curve? [Internet]. Baltimore: Johns Hopkins Center for Systems Science and Engineering; [Consultado 8 Jul 2020] Disponible en: <https://coronavirus.jhu.edu/data/new-cases>

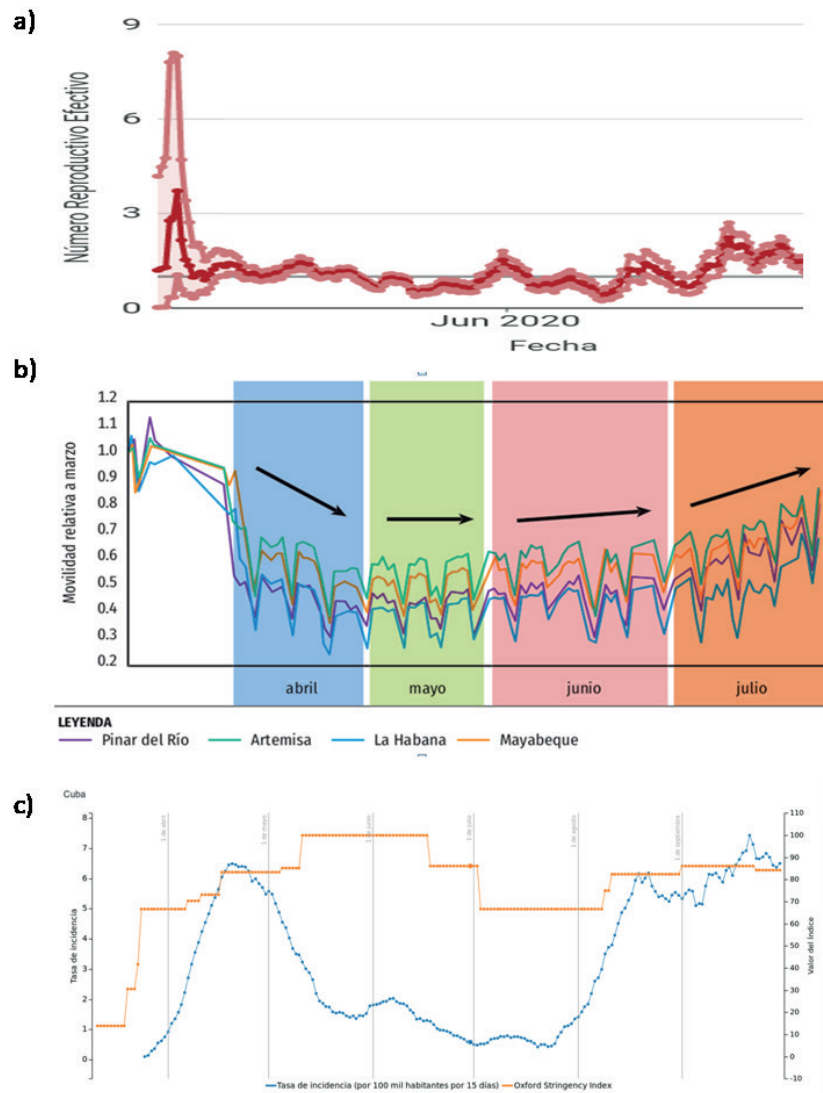


Fig. 4 Evolución del A) número reproductivo efectivo, B) índice de movilidad relativa a marzo de la población. Datos desde el 11 de marzo de 2020 al 31 de Julio de 2020, C) Tasa de incidencia de casos confirmados de COVID-19 e índice de rigor de Oxford en Cuba de 11 de marzo del 2020 a 30 de septiembre del 2020.

5. Díaz Canel M, Nuñez Jover J. Gestión gubernamental y ciencia cubana en el enfrentamiento a la COVID-19. [Internet]. An Acad Cienc Cuba. 2020 [citado 25 Nov 2020];10(2). Disponible en: <http://www.revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/881/887>
6. Más Bermejo PI. La COVID-19 y la práctica epidemiológica en Cuba. Rev Cubana HigEpidemiol [Internet] 2020 [citado 25 Nov 2020];57(0). Disponible en: <http://www.revepidemiologia.sld.cu/index.php/hie/article/view/307>
7. Más Bermejo P, Vidal Ledo MJ, Baldoquín Rodríguez W, Seuc Jo AH, Guinovart Díaz R, Noriega Bravo V, Pérez Rodríguez N, *et al.* Organización de la investigación epidemiológica para la lucha antiepidémica contra la COVID-19 en Cuba. INFODIR [Internet] 2020 [citado 25 Nov 2020];(32). Disponible en: <http://revinfodir.sld.cu/index.php/infodir/article/view/831>
8. Sánchez *et al.* COVID-19 in Cuba, The interplay of government and societal actions with statistics. Radical statistics 2020, Issue 126 Special Coronavirus Issue. Disponible en: <https://www.radstats.org.uk/no126/Cuba126.pdf>
9. Sánchez *et al.* How mathematical approaches could help decision-making to epidemic control: The successful experience against COVID-19 in Cuba. Disponible en: Social Science Research Network: <https://ssrn.com/abstract=3629271>
10. Universidad de La Habana. Modelación de la COVID-19 en Cuba. [Libro en prensa.]. Editorial UH. 2020
11. Guinovart Díaz R, Abelló Ugalde IA, Morales Lezca W. Modelo SIR para el seguimiento de la COVID-19 en Cuba, Ciencias Matemáticas. 2020;34(1).
12. Vidal Ledo MJ, Guinovart Díaz R, Baldoquín Rodríguez W, Valdivia Onega NC, Morales Lezca W. Modelos matemáticos para el control epidemiológico. Educación Médica Superior [Internet] 2020 [citado 25 Nov 2020];34(2):e2387. Disponible en: <http://www.ems.sld.cu/index.php/ems/article/view/2387> o http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412020000200026
13. Abello I *et al.* El modelo SIR básico con parámetros variables y políticas anti epidémicas de salud pública. Ejemplo de la COVID-19 en Cuba. Rev. Cubana de Salud Pública. Vol. 46 (2020) Suplemen-

- to Especial <http://www.revsaludpublica.sld.cu/index.php/spu/search/search>
14. Marrero Severo A, Menció Padrón D, Bayolo Soler G. Modelo SEAIR con percepción de riesgo para la COVID-19. Caso Cuba. *Ciencias Matemáticas*. 2020;34(1).
 15. Menció Padrón D, Bayolo Soler G, Marrero Severo A. Evolución de la COVID-19 a partir de un Modelo SAIRV con tasa de transmisión variable ante percepción de riesgo, cuarentena y hospitalización. Caso Cuba. *Ciencias Matemáticas*. 2020;34(1).
 16. Mesejo Chiong JA, Mireya León Mecías A. Modelos fenomenológicos aplicados al estudio de la COVID-19 en Cuba. *Ciencias Matemáticas*. 2020;34(1).
 17. Crespo Navas M. de la Cruz Cobas PP, Quevedo Caballero E, Valdes Castro JE Los procesos de ramificación y su aplicación al estudio de la transmisión de la COVID-19 en Cuba. *Ciencias Matemáticas*. 2020;34(1).
 18. Sebrango Rodríguez CR, Sánchez Valdés L, Baldoquín Rodríguez W, Norman Montenegro O, Guinovart R. Predicciones en tiempo real de la COVID-19 en Cuba y sus provincias. *Modelos fenomenológicos*. *Ciencias Matemáticas*. 2020;34(1).
 19. Montero Díaz M. Un modelo multinivel para la predicción del total de casos confirmados de COVID-19 en Cuba. *Ciencias Matemáticas*. 2020;34(1).
 20. Almeida Y. Aplicaciones de la inteligencia artificial ante la COVID-19 en Cuba. Libro UH en prensa 2020
 21. Pérez Rodríguez N, Guinovart Díaz R, Almeida Cruz Y, *et al.* Atlas de la COVID-19. [en prensa]. Editorial UH. 2020
 22. Distribución de la población vulnerable a la enfermedad COVID-19 en La Habana, Cuba. *Rev Cubana de Higiene y Epidemiología*. 2020;57(E371) Disponible en: <http://www.revepidemiologia.sld.cu/index.php/hie/article/view/371>
 23. Pérez Rodríguez N, Más Bermejo P. SIG y análisis espacial aplicados para identificar riesgos de COVID-19 en Habana, Cuba. *Journal Applied Geography* (En prensa). 2020
 24. Lorenzo Luaces P, Torres Reyes A, Fonte P, Pérez N, Sánchez L. Análisis espacial de la incidencia de COVID-19 en pequeñas áreas geográficas en Cuba. *Ciencias Matemáticas*. 2020;34(1).
 25. Vidal Ledo M, Baldoquín Rodríguez W, Duran García F, Más Bermejo P. Número Básico de Reproducción (Ro). [Internet]. *Educación Médica Superior* [En progreso.]. 2020 [citado 25 Nov 2020]; 34(4). Disponible en: <http://www.ems.sld.cu/index.php/ems/EDITOR/ISSUE/54>
 26. Guinovart Díaz R, Abelló Ugalde I, Morales Lezca W. La ocurrencia de rebrotes de la COVID-19 y su relación con el número reproductivo. *Rev Cubana HigEpidemiol* [Internet]. 2020 [citado 25 Nov 2020];57(0). Disponible en: <http://www.revepidemiologia.sld.cu/index.php/hie/article/view/308>
 27. Galban García E, Más Bermejo P. COVID-19 in Cuba. Assessing the National Response. [Internet]. *Medic Review*. 2020 [citado 25 Nov 2020];22(4). Disponible en: <https://medicreview.org/covid-19-in-cuba-assessing-the-national-response/>
 28. Castillo Sanz JU, Lorenzo Luaces P, Pereda Gonzalez R, Vidal Ledo MJ, Hidalgo Sánchez AO, Sabina RR, Sánchez Valdés L. Caracterización clínica y efectividad del tratamiento de pacientes ingresados por la COVID-19 en Terapias Intensivas en Cuba. (En prensa) *Rev. Cubana de Salud Pública*. 2020
 29. Funes Torres L, Mastrapa Noa T, Rojas Sardiñas Y. Análisis estadístico del comportamiento de la COVID-19 para la vigilancia epidemiológica en Cuba. [Tesis]. Facultad de Tecnología de la Salud Salvador Allende. 2020.
 30. Postdata. club, Juventud Técnica Magazine, School of Math and Computer Science of Havana University and collaborators, COVID19 Cuba Data Dashboard and Data[Sitio Web]. 2020 [citado 26 Nov 2020]. Disponible en: <https://covid19cubadata.github.io/>
 31. Mas Bermejo P, Sánchez Valdés L, Somarriba López L, Valdivia Onega C, Vidal Ledo MJ, Alfonso Sánchez I, et al. Equidad y respuesta del Sistema Nacional de Salud de Cuba ante la COVID-19. *Rev Panam Salud Publica*. 2020;44:exx. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2020.xx>

Recibido: 08/03/2022

Aprobado: 26/05/2022

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses entre ellos, ni con la investigación presentada.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Pedro Mas Bermejo, Raúl Guinovart Díaz, María Vidal Ledo

Curación de datos: María Vidal Ledo, Liset Sánchez Valdés, Nancy Pérez Rodríguez

Análisis formal: Raúl Guinovart Díaz, María Vidal Ledo, Liset Sánchez Valdés, Yudivian Almeida Cruz, Waldemar Baldoquín, Armando Seuc Jo, Wilfredo Morales Lezca, Nancy Pérez Rodríguez, Alejandro Lage Castellano, Isidro A. Abelló Ugalde

Investigación: Pedro Mas Bermejo, Raúl Guinovart Díaz, María Vidal Ledo, Liset Sánchez Valdés, Yudivian Almeida Cruz, Waldemar Baldoquín, Armando Seuc Jo, Wilfredo Morales Lezca, Nancy Pérez Rodríguez, Alejandro Lage Castellano, Isidro A. Abelló Ugalde

Metodologías: Pedro Mas Bermejo, Raúl Guinovart Díaz, Liset Sánchez Valdés, Wilfredo Morales Lezca, Nancy Pérez Rodríguez, Alejandro Lage Castellano, Isidro A. Abelló Ugalde

Administración de proyecto: Pedro Mas Bermejo, Raúl Guinovart Díaz

Recursos: Raúl Guinovart Díaz, Yudivian Almeida Cruz, Waldemar Baldoquín, Nancy Pérez Rodríguez, Alejandro Lage Castellano

Software: Raúl Guinovart Díaz, Yudivian Almeida Cruz, Waldemar Baldoquín, Nancy Pérez Rodríguez, Alejandro Lage Castellano

Validación: Pedro Mas Bermejo, Raúl Guinovart Díaz, María Vidal Ledo, Liset Sánchez Valdés, Nancy Pérez Rodríguez

Redacción-borrador original: Pedro Mas Bermejo, Raúl Guinovart Díaz, Liset Sánchez Valdés, Nancy Pérez Rodríguez

Redacción-revisión y edición: María Vidal Ledo, Liset Sánchez Valdés

Financiación

No se requirió financiamiento específico para la investigación.

Cómo citar este artículo

Mas Bermejo P, Sánchez Valdés L, Vidal Ledo M, Seuc Jo A, *et al.* Contribuciones de la epidemiología, la modelación y los sistemas de información en el enfrentamiento de la COVID-19. *AnAcadCiencCuba* [internet] 2022 [citado en día, mes y año];12(3):e1221. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1221>

