

COVID-19 EN BOLIVIA: ESTUDIOS Y CONSECUENCIAS DEL MODELO EPIDEMIOLÓGICO SIRASD

COVID-19 IN BOLIVIA: STUDIES AND CONSEQUENCES OF THE SIRASD EPIDEMIOLOGICAL MODEL

M. L. PEÑAFIEL[†]

CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150, CEP 22290-180
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

G. M. RAMÍREZ-ÁVILA^{*}

Instituto de Investigaciones Físicas, Universidad Mayor de San Andrés
Campus Universitario, c. 27 Cota-Cota, Casilla 8635
La Paz, Bolivia

(Recibido 11 de octubre de 2020; aceptado 30 de noviembre de 2020)

RESUMEN

Se analiza el brote epidémico de COVID-19 en Bolivia usando un modelo epidemiológico compartimental que considera una población de infectados asintomáticos capaces de contagiar la enfermedad y, además, etapas temporales donde la transmisión de la enfermedad es variable debido a las diferentes medidas sociales instituidas a lo largo del desarrollo de la epidemia. Para validar el modelo estudiado se hace una estimación para el pico de infecciones usando una función de ajuste que funciona para las curvas epidemiológicas de varios países. Finalmente, se proponen diferentes escenarios sociales en los cuales pueden existir movilizaciones masivas de personas o la eventual imposición de una cuarentena rígida cerca del pico epidémico.

Descriptores: Sistemas Complejos — Sistemas Sociales — Enfermedades

Código(s) PACS: 89.75.-k, 89.65.-s, 87.19.xd

ABSTRACT

We analyze the outbreak of COVID-19 in Bolivia using a compartmental epidemiological model, which first considers a population consisting of infected and asymptomatic individuals, who are potential disease transmitters to susceptible people. Then, different periods, were studied where the infection rate can be either reduced or amplified due to public policies regarding quarantines and the people's engagement of these policies. Furthermore, to validate the model, we estimate a range for the epidemic peak occurrence using a function that fits the epidemic curve of several countries. Finally, we propose and explore different scenarios regarding massive mobilizations of people and an eventual implementation of a quarantine near the epidemic peak.

Subject headings: Complex Systems — Social Systems — Diseases

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia de la COVID-19 está teniendo consecuencias catastróficas a lo largo del mundo. Desde la notificación oficial de la detección de una nueva enfermedad ocasionada por un nuevo coronavirus, el mundo en su conjunto ha destinado una gran cantidad de recursos económicos y humanos para tratar de paliar la pandemia de la mejor manera. Más que

destacables son los esfuerzos internacionales para desarrollar una vacuna o tratamiento efectivo para la enfermedad como lo señalan Shih *et al.* (2020) y Alsuliman *et al.* (2020). Es encomiable también el estudio de los mecanismos de contagio del virus y las diferentes proyecciones de contagios existentes basadas en modelos epidemiológicos tales como el de Ndairou *et al.* (2020), entre otros. Por otro lado, es bien sabido que, al no tenerse un método efectivo para reducir los contagios y/o las muertes ocasionadas por la COVID-19, la forma más adecuada de proteger a la población del contagio y de no saturar los diferentes sistemas públicos de salud consiste en im-

[†]Email: mpenafiel@cbpf.br,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7700-1787>

^{*}<http://www.fiumsa.edu.bo/docentes/mramirez/>,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9012>

poner períodos de cuarentena en la población como lo mencionan Mitjà *et al.* (2020); es decir, cortar las vías de contagio.

Una pandemia de este tipo exige acciones urgentes por parte de los países afectados y, claramente, los países en desarrollo o subdesarrollados se encuentran en situación de desventaja debido a la falta de recursos económicos y humanos para implementar medidas políticas, económicas y científicas de una manera satisfactoria. La situación de los países latinoamericanos no es la más favorable para contener una epidemia de este tipo y, durante el desarrollo de la pandemia, el continente fue el epicentro de la enfermedad en diversos períodos de tiempo. Bolivia, a pesar de tener una población pequeña en relación con sus vecinos, ha sufrido una de las tasas de letalidad más altas de la región y, durante julio de 2020 se ha visto una situación calamitosa en la sociedad debida a la falta de espacio en hospitales, escasez de pruebas de diagnóstico y hasta falta de oxígeno medicinal.

Además de la falta de preparación del sistema sanitario, una característica alarmante de la sociedad boliviana tiene que ver con el hecho que una fracción significativa de la economía está basada en la informalidad.¹ La informalidad está directamente relacionada con las fuentes de trabajo eventuales y con el comercio en sí mismo; por tanto, los trabajadores del sector informal no gozan de beneficios laborales, entre los cuales se incluye la posibilidad de realizar el trabajo a distancia (o teletrabajo). El éxito de las medidas gubernamentales para asegurar que el contagio en la sociedad se ralentice depende directamente del grado de cumplimiento de las mismas por parte de la sociedad. Así, si una parte de la sociedad no puede cumplir con el mandato del aislamiento físico por razones meramente económicas, se torna muy difícil que dichas medidas sean exitosas, máxime cuando un alto porcentaje de la sociedad no recibe incentivos ni tolerancia para cumplir dichas medidas.

A lo largo de América Latina, se han realizado algunos esfuerzos locales (ver los trabajos de Fiesco-Sepúlveda & Serrano-Bermúdez (2020) y de Caicedo-Ochoa *et al.* (2020), así como las referencias contenidas en los mismos) para poder predecir los picos epidemiológicos tal como lo explican Tsallis & Tirnakli (2020) y explorar diferentes escenarios tanto políticos, económicos (como lo hacen Pires *et al.* (2020)) y de medidas sociales (expuestos por Bastos *et al.* (2020)) que pueden afectar el desarrollo de la enfermedad. Estos trabajos son de particular importancia pues muestran que, realizar un análisis exhaustivo de la realidad local, permite formular una ingeniería social como modo de encontrar las situaciones menos nocivas tanto para la salud pública como para la economía de los países.

Se tiene como objetivo analizar el brote epidémico de COVID-19 en Bolivia usando un modelo epi-

demiológico confiable adaptado a la realidad nacional. Para este propósito se usa el modelo epidemiológico compartimental **SIRASD**, el cual considera que una parte de la población infectada está compuesta por individuos asintomáticos (lo que se corresponde bien con la COVID-19). En la Sec. 2 se revisa brevemente los modelos epidemiológicos compartimentales del tipo **SIR** haciendo especial énfasis en el modelo **SIRASD** utilizado en el presente trabajo; también se calculan los parámetros relevantes para el caso boliviano usando los datos correspondientes a la primera fase (fase temprana) de la propagación de la enfermedad en el país. A manera de poner a prueba el modelo epidemiológico usado, se proponen tres escenarios epidemiológicos correspondientes a la evolución libre y escenarios donde la dinámica social cambia, con períodos de cuarentena rígida alrededor del pico epidémico y con períodos de movilizaciones masivas de personas en distintos momentos de la evolución de la epidemia y con base en lo anterior, se propone un método de ingeniería social a fin de evitar el contagio excesivo y la suspensión prolongada de actividades económicas. En la Sec. 4 se dan las conclusiones y se proponen perspectivas para trabajos futuros. Finalmente, en el Apéndice A, se realiza un ajuste de la curva epidemiológica propuesto por Tsallis & Tirnakli (2020) a fin de estimar la fecha de ocurrencia del pico epidemiológico en el país. Lo anterior se hace con fin de corroborar que las fechas de pico previstas en el modelo epidemiológico coinciden con el ajuste en cuestión, el cual ha demostrado ser efectivo para las curvas epidemiológicas de varios países.

Es importante recalcar que el presente trabajo fue desarrollado antes de la ocurrencia del pico epidemiológico en Bolivia, más concretamente en julio de 2020 y que una versión preliminar del mismo ya fue puesta a disposición por los autores Peñafiel & Ramírez-Ávila (2020).

2. MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS

El estudio de enfermedades infecciosas, sean virales o bacterianas, desde un abordaje matemático puede remontarse a los estudios de Daniel Bernoulli sobre la viruela en el s. XVIII como lo apuntan Brauer & Castillo-Chavez (2001). Por ello, se deben construir modelos simples pero que no dejen de reflejar la realidad compleja que tienen este tipo de fenómenos como lo resalta Small (2012). Hoy en día, la mayor parte de modelos epidemiológicos deterministas son llamados *modelos compartimentales*. Los modelos compartimentales dividen la población en diferentes compartimientos, cada uno caracterizado por el estadio infeccioso en el que se encuentra, y deben su formulación inicial a Kermack y McKendrick (Brauer & Castillo-Chavez (2001)). En el modelo de Kermack-McKendrick simplificado (de aquí en adelante llamado modelo **SIR**) se considera un brote epidémico corto y no letal, donde el paso por la enfermedad otorga una inmunidad a la infección (lo que comúnmente ocurre con las infecciones virales). Así, el modelo **SIR** está constituido por tres compar-

¹ Según los datos oficiales del Fondo Monetario Internacional (FMI), en 2018 el 62,3% del Producto Interno Bruto (PIB) de Bolivia dependía de la economía informal como lo destacan Medina & Schneider (2018).

timientos: Susceptibles a enfermarse (**S**), Infectados (**I**) y Recuperados (**R**); y está constituido por el conjunto de ecuaciones diferenciales

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{S}{N} I, \quad (1a)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{S}{N} I - \gamma I, \quad (1b)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I. \quad (1c)$$

En este modelo se considera que la población no cambia durante la epidemia y el número total de individuos en el grupo social está dado por $N(t) = S(t) + I(t) + R(t)$. Los parámetros epidemiológicos β y γ tienen una interpretación inmediata: un número promedio de la población tiene contacto suficiente para contagiarse con β individuos infectados por unidad de tiempo, mientras que los individuos infectados dejan el grupo I (y pasan al grupo R) a una tasa γ .

La epidemiología, al lidiar directamente con las políticas de salud pública, es una disciplina que debe estudiarse tanto cualitativa como cuantitativamente, debe considerar los modelos epidemiológicos más adecuados para el modelaje de la propagación de una enfermedad. Así, los modelos epidemiológicos compartimentales pueden complicarse a requerimiento de la enfermedad estudiada. En la siguiente sección se presenta un modelo que considera una población de infectados asintomáticos, lo que se ha comprobado importante para la diseminación del SARS-CoV-2.

2.1. Modelo **SIRASD**

El modelo epidemiológico compartimental usado en este trabajo toma en cuenta cinco compartimentos para la descripción de la propagación de una enfermedad, así se tienen los compartimentos de Susceptibles, Infectados Sintomáticos, Infectados Asintomáticos, Recuperados y Fallecidos, el modelo es conocido como **SIRASD** por sus siglas en inglés y fue expuesto por Bastos & Cajueiro (2020). Más aún, dadas las particularidades socioeconómicas de los países latinoamericanos, el modelo puede generalizarse para incluir dos poblaciones diferenciadas por su base económica tal como lo plantean Pires *et al.* (2020). La importancia de dividir a la población en dos grupos diferenciados por su sustento económico reside en el simple hecho que una fracción de la población que tiene como base una economía informal es más proclive a no cumplir con las normas de aislamiento y distanciamiento propuestas por los gobiernos locales, pues el estricto cumplimiento de estas normas, en muchos casos, implicaría serias consecuencias económicas para familias sin un sustento económico confiable. Por otro lado, la fracción de la población que vive basada en una economía más formal puede, en principio, cumplir correctamente las políticas gubernamentales para ralentizar los contagios.

El modelo **SIRASD** está dado por el siguiente con-

junto de ecuaciones:

$$\frac{dS_j}{dt} = - \sum_{k=1}^2 \phi_j \phi_k (\beta_A A_k + \beta_I I_k) \frac{S_j}{N}, \quad (2a)$$

$$\frac{dA_j}{dt} = (1-p) \sum_{k=1}^2 \phi_j \phi_k (\beta_A A_k + \beta_I I_k) \frac{S_j}{N} - \gamma_A A_j \quad (2b)$$

$$\frac{dI_j}{dt} = p \sum_{k=1}^2 \phi_j \phi_k (\beta_A A_k + \beta_I I_k) \frac{S_j}{N} - \gamma_I I_j, \quad (2c)$$

$$\frac{dR_j}{dt} = (1-r) \gamma_I I_j + \gamma_A A_j, \quad (2d)$$

$$\frac{dD_j}{dt} = r \gamma_I I_j, \quad (2e)$$

$$\frac{dN_j}{dt} = -2r \gamma_I I_j, \quad (2f)$$

donde S_j representa la fracción de la población que es susceptible a contraer la enfermedad, A_j es la fracción de individuos asintomáticos, I_j la fracción de individuos sintomáticos (que es más propensa a tener un diagnóstico positivo a través de los medios de control usuales), R_j la fracción de la población infectada que llega a recuperarse y D_j es la fracción de la población que acaba falleciendo por la enfermedad, como la fracción de infectados asintomáticos llevan una enfermedad imperceptible, la fracción de fallecidos está compuesta solamente por individuos que previamente formaron parte del grupo de infectados sintomáticos (S_j). El parámetro r está relacionado con la tasa con la que el grupo de infectados sintomáticos (I) pasa al grupo de fallecidos (D). Por otro lado, el parámetro p , específico del modelo **SIRASD**, corresponde a la fracción de la población del grupo de susceptibles que pasa a infectarse y presenta síntomas, por tanto la fracción de la población que pasa a desarrollar una enfermedad asintomática lo hace con una tasa $1-p$. El subíndice j toma en cuenta el grupo social que se está estudiando; consecuentemente, para nuestro caso j puede tomar los valores de 1 o 2. Finalmente, como el sistema dinámico estudiado asume que existe una fracción de la población que muere a raíz de la enfermedad, el número total de componentes del grupo social no será constante a lo largo del tiempo, por tanto se tiene $N(t) = N_1(t) + N_2(t) = \sum_{j=1}^2 (S_j + I_j + A_j + R_j - D_j)$ que lleva a la Ec. (2f). Finalmente, el parámetro ϕ_j representa el grado de no cumplimiento de las medidas de distanciamiento social correspondiente al grupo j (Pires *et al.* (2020)). Nótese que el conjunto de Ecs. (2) toma en cuenta tanto interacciones intragrupalas ($\phi_j \phi_j$) como interacciones intergrupales (entre miembros de grupos diferentes) ($\phi_j \phi_k$, $j \neq k$).

Para poder estimar los parámetros relevantes del modelo, primeramente es necesario usar el modelo más simple denominado **SIRD** (Bastos & Cajueiro (2020)). Este modelo asume que el compartimiento de personas infectadas será único; es decir, no distingue entre infectados sintomáticos y asintomáticos.

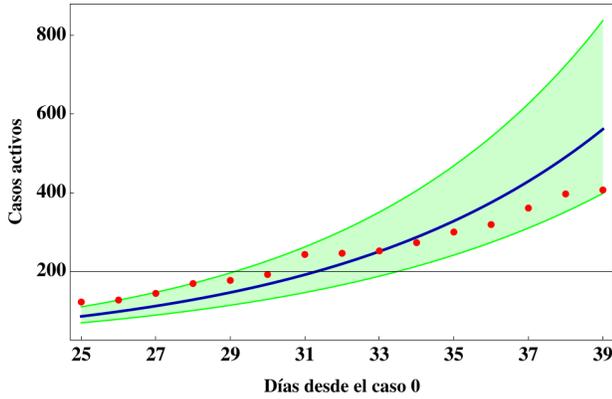


FIG. 1.— Evolución temprana de individuos infectados para los parámetros estimados con el modelo **SIRASD** asumiendo una sola población. Los puntos rojos representan los datos reales para los casos de infecciones activas, la línea azul es la curva de infecciones estimada, mientras que la región verde representa el intervalo de confianza al 95% para los parámetros estimados.

El modelo **SIRD** está dado por un conjunto de ecuaciones similar a las Ecs. (2), con la excepción que el compartimiento A_j es suprimido, al igual que los parámetros correspondientes β_A y γ_A (Bastos & Cajueiro (2020)).

2.2. Escenarios de aplicación del modelo **SIRASD** en Bolivia

En Bolivia, los primeros dos casos de COVID-19 fueron diagnosticados el 9 de marzo de 2020. Casi inmediatamente después, el gobierno determinó ciertas medidas de distanciamiento social como ser la suspensión de clases presenciales a todos los niveles en el país y una cuarentena parcial que consistía en una reducción del horario laboral tanto en establecimientos públicos como privados, así como también la suspensión de eventos deportivos, culturales y religiosos. Sin embargo, a pesar de tener en vigor estas medidas gubernamentales, las aglomeraciones y diversos eventos de contagios potenciales no fueron prohibidas. El conjunto inicial de medidas adoptadas por el gobierno en marzo duró por 13 días, hasta el 22 de marzo. A partir de ese día, una cuarentena rígida fue establecida la cuál, entre otras cosas, solamente permitía la circulación de personas una vez por semana, un horario reducido de apertura de comercios esenciales e instituciones bancarias y una restricción total para el transporte tanto público como privado. Este paquete de medidas fue relajado a partir del inicio de junio de 2020, entrando en un período conocido como *cuarentena dinámica* el cual consistió en una retomada parcial de la actividad económica en la gran mayoría de los sectores.

Para el cálculo de parámetros del modelo epidemiológico estudiado, se asume que las diferentes medidas paliativas para la epidemia son reflejadas en los datos con un retraso de alrededor de dos semanas; por tanto, se realiza la estimación de los parámetros usando los primeros 27 días de datos epidemiológicos.

Para estimar los parámetros relevantes, es necesario resolver el sistema de ecuaciones diferenciales

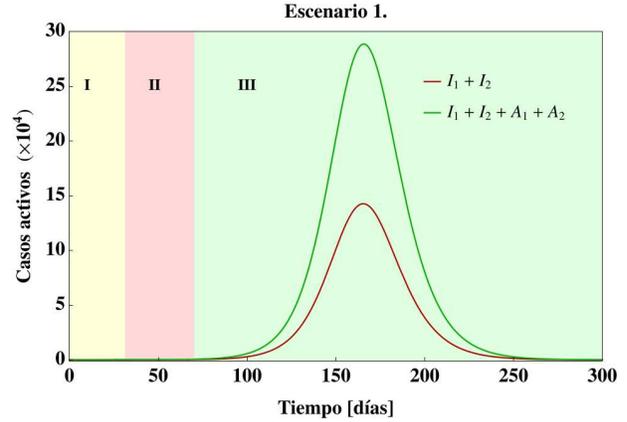


FIG. 2.— Escenario 1. La región I corresponde a $\phi_1 = \phi_2 = 1$, la región II corresponde a $\phi_1 = 0.8$, $\phi_2 = 0.9$ y la región III a $\phi_1 = 0.87$, $\phi_2 = 0.98$.

no lineales para el modelo en cuestión; es decir, las Ecs. (2) para el modelo **SIRASD**) y minimizar el error cuadrático con respecto a los parámetros en cuestión como lo especifican Bastos & Cajueiro (2020). Por tanto, los parámetros estimados con los primeros datos de la epidemia usando el modelo **SIRD**² se obtienen los parámetros $\beta_I \sim 0.457868$, $\gamma_I \sim 0.345233$, $r \sim 0.0677$. Reemplazando estos parámetros en la Ec. (2) podemos calcular el resto de parámetros para el modelo **SIRASD** como $\beta_A \sim 0.437923$, $\gamma_A \sim 0.280624$, $p \sim 0.544546$. La Fig. 1 muestra la curva de infecciones para la evolución inicial de la epidemia para el caso del modelo **SIRASD** con una sola población, adicionalmente se muestran los intervalos de confianza al 95% para estos parámetros. Como el objetivo del presente trabajo no tiene que ver con un seguimiento epidemiológico y sí con una descripción cualitativa de cómo los distintos comportamientos sociales pueden afectar el desarrollo de la epidemia, el resto de figuras de este artículo son presentadas sin los intervalos de confianza.

Queda claro que un paquete de medidas, *a priori*, tan drásticas como la cuarentena rígida impuesta entre marzo y junio no puede ejecutarse por mucho tiempo, más aún considerando la fragilidad del sistema económico boliviano donde según datos del Fondo Monetario Internacional (FMI), alrededor del 62,3% de la población vive con base en una economía informal. Así, puede considerarse que estas medidas de cuarentena rígida efectivamente dejaron de ser respetadas en el país antes del relajamiento de la misma.

Con el fin de evaluar y analizar el comportamiento de la epidemia en Bolivia según el modelo epidemiológico en cuestión, se exploraron tres diferentes escenarios de comportamientos sociales:

1. La evolución libre de las curvas epi-

² Por simplicidad se asume que durante el inicio de la epidemia, dada la precariedad del sistema de salud, el miedo de la población y la falta de pruebas y laboratorios, todos los infectados detectados fueron sintomáticos. Por tanto, el modelo relevante para el inicio de la epidemia es el modelo **SIRD**.

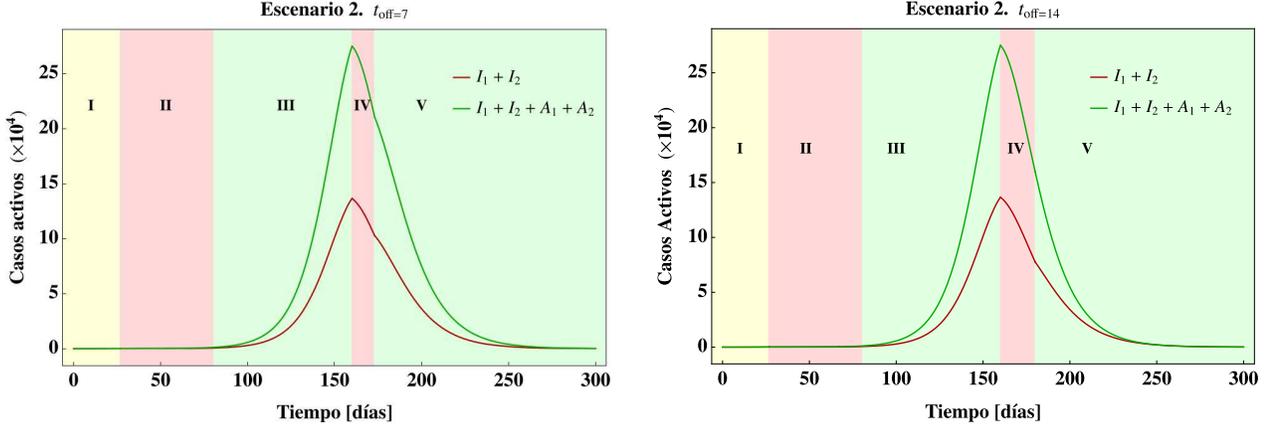


FIG. 3.— (Izquierda) Escenario 3 con $t_{\text{off}} = 7$. Para los parámetros escogidos para la región **IV** existe una bajada sustancial en el número de casos a lo largo de esta etapa. (Derecha) Escenario 3 con $t_{\text{off}} = 14$, para esta configuración no existe un segundo pico de infecciones después de la región **IV**. Para ambos casos se tiene $t_{\text{in}} = 160$.

demográficas, donde la región **I** comprende los primeros 27 días de la epidemia con $\phi_1 = \phi_2 = 1$; la región **II** engloba el período de cuarentena rígida en el país, es decir del día 27 hasta el día 67, y se fijan los parámetros de no cumplimiento de normas de aislamiento social a $\phi_1 = 0.8$, $\phi_2 = 0.9$. Finalmente, la región **III** comprende el resto de la evolución de la epidemia, donde se adoptan normas laxas de aislamiento social y distanciamiento físico, para este período se fijan $\phi_1 = 0.87$, $\phi_2 = 0.98$.

2. El escenario donde las medidas de aislamiento social, o cuarentena rígida, son impuestas cerca del pico epidemiológico y las mismas son levantadas en un determinado tiempo, t_{off} , después del pico (de la misma forma que en Pires *et al.* (2020)). La regiones **I** y **II** son determinadas por los mismos valores que en el escenario 1, mientras que la región **III** termina el día de ingreso en una nueva cuarentena, determinado por $t_{\text{in}} = t_{\text{peak}} - n$, $n \in \mathbb{N}$ con $t_{\text{peak}} = 166$. La región **IV** comienza en t_{in} y termina el día t_{off} , con t_{in} y t_{off} pudiendo ser valores variables. Finalmente, la región **V** comienza en t_{off} y dura hasta el final de la evolución de la epidemia. Los valores de ϕ_j para las tres primeras regiones son los mismos que los usados para el escenario 1, mientras que para la región **IV** se toman $\phi_1 = 0.85$, $\phi_2 = 0.94$ y para la región **V** se tienen $\phi_1 = 0.9$, $\phi_2 = 0.95$.

3. El escenario electoral, considerando dos fechas de ocurrencia de las elecciones nacionales: el día 6 de septiembre (que corresponde al día 181), y el día 18 de octubre (que corresponde al día 223 de la epidemia) y no se adopta ningún tipo de política extraordinaria de distanciamiento social durante el pico epidemiológico. Un evento democrático tal como una elección nacional implica movilizaciones masivas no sólo durante el día de las elecciones sino durante los días previos a la realización de las mismas, ya sea por actos proselitistas, de protesta, etc. Por lo anterior, se considera

que las movilizaciones masivas ($\phi_1 = \phi_2 = 1$) comienzan una semana antes de las elecciones y terminan una semana después de las mismas. Para este escenario se tiene que las regiones **I** y **II** son las mismas que en los escenarios anteriores y la región **III** abarca hasta el día 174 para los comicios en septiembre (y 216 para los comicios en octubre); para la región **IV** se fija $\phi = 1$ y dicha región llega hasta el día 188 para septiembre (y 230 para octubre). Finalmente, en la región **V** se recuperan los valores de ϕ para la región **III**, y dicha región dura hasta el final de la evolución de la epidemia.

3. RESULTADOS

La población inicial de Bolivia es fijada en $N_0 = 11677580$. Para resolver el conjunto de ecuaciones (2) se considera la siguiente condición inicial para el compartimiento de susceptibles $S_0^{(j)} = f_j N_0 - A_j(0) - I_j(0) - R_j(0) - D_j(0)$. De acuerdo con la información divulgada por el Ministerio de Salud, se tienen las condiciones iniciales $I_1(0) = 2$, $A_1(0) = 2$ y para el resto de compartimientos se fija la condición inicial igual a cero. El parámetro f_j representa la fracción de la población que pertenece a determinado grupo social j ; por tanto, para el caso estudiado se tiene $1 = f_1 + f_2$. De acuerdo con la información disponible, se consideran $f_1 = 0.38$ y $f_2 = 0.62$ para el caso de Bolivia, asumiendo que el grupo 2 consiste exclusivamente de la fracción de la población que vive con base en una economía informal, de acuerdo con los datos oficiales del FMI como lo señalan Medina & Schneider (2018).

El escenario 1 está mostrado en la Fig. 2. este escenario muestra un comportamiento muy similar al comportamiento de los datos *oficiales* para los casos notificados³. En este escenario, asumiendo que los parámetros epidemiológicos se mantienen constantes durante la epidemia, el pico epidemiológico está proyectado para ocurrir alrededor del día 166 (i.e., alrededor del 22 de agosto). Esta proyección

³ Para una información actualizada acerca del estado de la epidemia en Bolivia ver el sitio <https://www.boliviasegura.gob.bo>

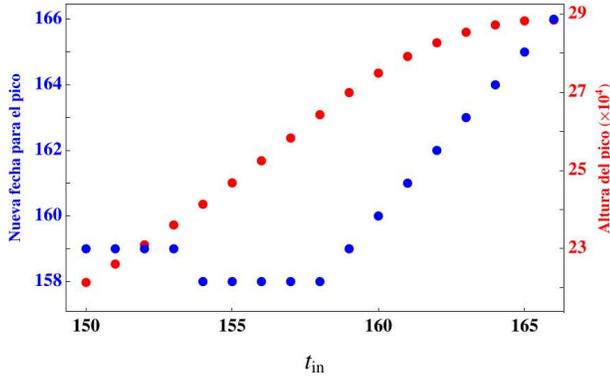


FIG. 4.— Dependencia de la altura del pico y del día de ocurrencia del mismo con respecto a t_{in} .

para el pico también coincide con el rango de fechas para la ocurrencia del pico usando un ajuste de curvas basado en una función q -exponencial en el Apéndice A, al igual que con la información oficial divulgada sobre las proyecciones del Ministerio de Salud de Bolivia.

Diferentes configuraciones para t_{off} en el escenario 2 con $t_{in} = 160$ se muestran en la Fig. 3. Para los valores escogidos para el parámetro ϕ en la región IV en este escenario, es posible ver que el pico epidémico del escenario 1 es evitado y también el pico puede ser adelantado para ocurrir antes del pico inicial predicho en el escenario 1. La Fig. 4 muestra este comportamiento, donde se varía la fecha de inicio de una cuarentena rígida alrededor del pico y se muestra que tanto la fecha del pico como la altura del mismo pueden ser disminuidos al variar el tiempo de inicio de la cuarentena rígida, t_{in} . De hecho, para el escenario estudiado es posible desarrollar una ingeniería social para instituir una cuarentena optimizada. Por ejemplo, en la Fig. 4 existe un día óptimo para el inicio de la cuarentena rígida, donde el pico epidémico ocurre antes del pico inicial sin medidas sociales y existe una reducción considerable en el número de casos activos durante el pico, lo que constituiría una ventaja tanto para el sistema de salud - al tener menos casos que atender y, por ende, una mayor posibilidad de atenderlos - y para la economía, pues se permitiría un tiempo menor de cuarentena rígida y se tendría así una reapertura del comercio más temprana. Para el caso de la Fig. 4 tal valor óptimo para el inicio de una cuarentena rígida es $t_{in} = 152$.

Más aún, una vez determinado el tiempo óptimo para el inicio de una cuarentena antes del pico epidémico, puede analizarse el comportamiento de las curvas epidemiológicas una vez que la cuarentena ha sido relajada en un determinado tiempo t_{off} . La Fig. 5 muestra el comportamiento de la curva de infectados cuando se varían el día de inicio de la cuarentena, t_{in} , y el día del fin de la misma, t_{off} . Para t_{in} en cualquier momento existe una disminución significativa en el número de individuos infectados en los días posteriores. Por otro lado, para t_{off} muy cerca del inicio de la cuarentena (es decir, para cuarentenas cortas), existe la posibilidad de la ocurrencia de un segundo pico de infecciones; mientras que un se-

gundo pico puede evitarse alargando la duración de la cuarentena.

El escenario de la elección nacional es mostrado en la Fig. 6. Para el caso en el que las elecciones nacionales se hubiesen llevado a cabo el 6 de septiembre, las movilizaciones populares antes, durante y después del evento democrático hubiesen inducido la ocurrencia de un segundo pico epidémico casi inmediatamente después del primero. Este tipo de comportamiento, aparte del hecho innegable de la sobresaturación del deficiente sistema de salud, hubiera podido conducir a una situación incontrolable desde el punto de vista del manejo de la enfermedad. Evidentemente, el haber descartado la mencionada fecha para la realización del plebiscito fue una decisión acertada. Por otro lado, la reprogramación del acto electoral para el 18 de octubre no tuvo mayores repercusiones tal como lo mostraron nuestros resultados. Este comportamiento se debe principalmente al hecho que el día de la elección estuviese programado para ocurrir bastante lejos del pico epidémico, con la consecuente menor incidencia en lo que a personas infectadas se refiere (sean estas sintomáticas o asintomáticas) movilizadas el día de los comicios. Las lecciones aprendidas de las últimas elecciones nacionales pueden coadyuvar a la toma de decisiones adecuadas en otros procesos electorales que deben realizarse en fechas alejadas del pico epidémico. Obviamente, el tener un acto electoral casi inmediatamente después del pico epidémico es una acción totalmente descabellada como lo mostraron los resultados de este trabajo, así como la evidencia empírica de lo acontecido en las elecciones.

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Las particularidades socioeconómicas de la sociedad boliviana juegan un papel importante en la dinámica de la epidemia. Como alrededor del 62% de la economía está basada en el trabajo informal, i.e. en una economía regida por el *día a día*, el éxito de cualquier medida de distanciamiento físico depende fuertemente en el compromiso con el cumplimiento de estas normas por parte del segundo grupo social en cualquier momento de la epidemia.

Se mostró que la imposición de una cuarentena rígida en cualquier momento de la epidemia puede afectar la dinámica de la misma. Más aún, es posible evitar pasar por un pico epidémico a través de un diseño cauteloso de políticas de distanciamiento físico que incluyan el fortalecimiento de los recursos públicos destinados a la lucha y control de la epidemia y el comprometimiento general de la población para obedecer las normas de distanciamiento físico. Este tipo de medidas sociales puede tener efecto en el retraso del pico epidemiológico, lo cual sirve para preparar el sistema de salud para así lidiar con situaciones de saturación del propio sistema.

Se debe notar que los parámetros estimados en la Sec. 2 toman en cuenta solamente los primeros 27 días de la epidemia en Bolivia. En el país, las medidas de distanciamiento físico fueron impues-

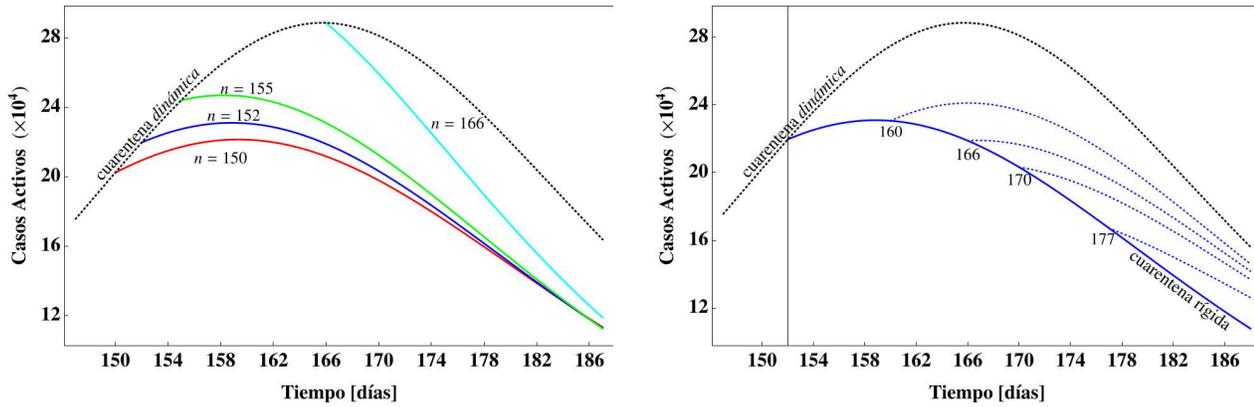


FIG. 5.— (Izquierda) Gráfica de diferentes fechas de inicio de una cuarentena rígida en el tiempo t_{in} , la línea punteada representa el escenario sin cuarentena impuesta y con restricciones parciales a las actividades económicas (cuarentena dinámica). (Derecha) Situación donde una cuarentena rígida es impuesta el día 152 y levantada en un determinado t_{off} . Puede observarse que para ciertos t_{off} existe un segundo pico epidemiológico.

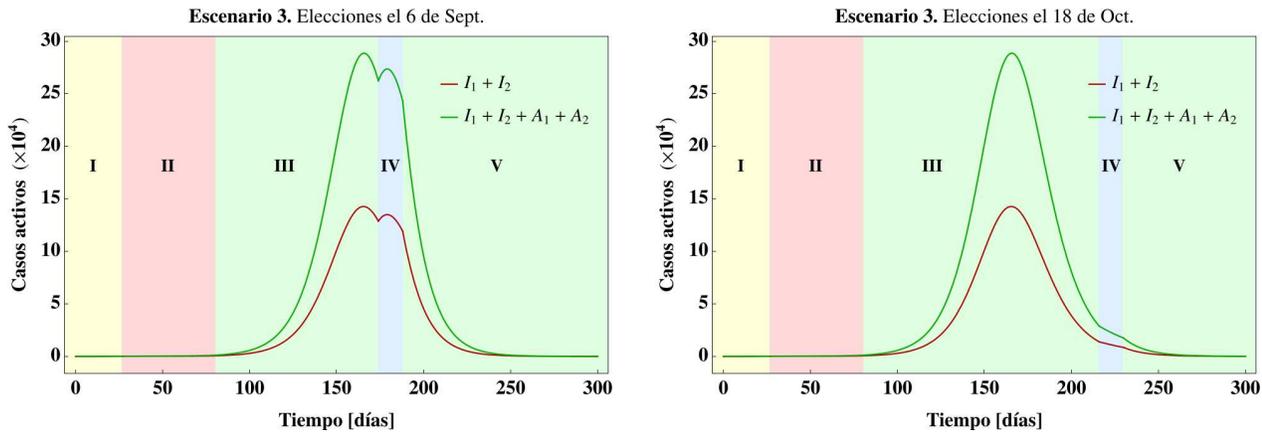


FIG. 6.— (Izquierda) Escenario 3 para la ocurrencia de elecciones nacionales el día 6 de septiembre. Debido a las movilizaciones masivas durante este evento, existe un segundo pico de infecciones. (Derecha) Escenario 3 para las elecciones nacionales el día 18 de octubre. Se puede observar que, debido a las movilizaciones masivas, la desescalada de casos se ralentiza.

tas muy temprano en el desarrollo de la epidemia; por lo tanto, los parámetros estimados no toman en cuenta una evolución totalmente libre para la enfermedad, sino que representan los parámetros estimados para medidas sociales leves de atenuación de la epidemia en la fase temprana (cierre de establecimientos educativos, horario laboral reducido) junto con algunas actividades no reguladas durante este período (aglomeraciones en transporte público, eventos culturales, etc.). Este hecho afecta el resto de la evolución para el modelo epidemiológico presentado en la Sec. 2, pues se fija $\phi = 1$ al inicio de la epidemia, que representa la situación social-epidemiológica en marzo de 2020 y cualquier otro escenario con $\phi < 1$ describe una situación en la cual las medidas de distanciamiento físico y la adopción de las mismas son más estrictas que en la fase inicial de la epidemia.

En lo referente al escenario electoral, se mostró que durante una epidemia, la mejor fecha posible para el desarrollo de elecciones corresponde a un tiempo lejano del pico epidémico. En el caso analizado aquí, y con base en los parámetros estimados (los cuales ofrecían proyecciones confiables para julio de 2020), el pico era esperado para ocurrir alrededor de mediados de agosto. Es necesario enfatizar que

este escenario podría haber cambiado drásticamente debido al comportamiento social en el interín. Por tanto, el pico podría fácilmente ser movido para ocurrir antes o después del día esperado; incluso, con las debidas medidas sociales, el pico podría ser reducido.

La amplia heterogeneidad de los ambientes y las distintas acciones paliativas llevadas a cabo a lo largo del país implican que cada una de las regiones de Bolivia posee un dinámica particular para el desarrollo de la epidemia. Sin embargo, la evidencia numérica obtenida en el presente trabajo muestra que el comportamiento general de los brotes epidémicos puede ser alterado con la imposición de medidas de distanciamiento físico en cualquier momento de la epidemia. Sin embargo, queda claro que el tener una cuarentena rígida alrededor del pico epidémico debido a la sobrecarga del sistema de salud en este período de tiempo. Es necesario resaltar que las medidas sociales no pueden ni deben ser implementadas individualmente, pues si no vienen acompañadas de medidas adecuadas para la preparación del sistema de salud - tanto desde el punto de vista paliativo como de control epidemiológico -, la ingeniería de medidas sociales para asegurar que las personas pertenecientes al grupo

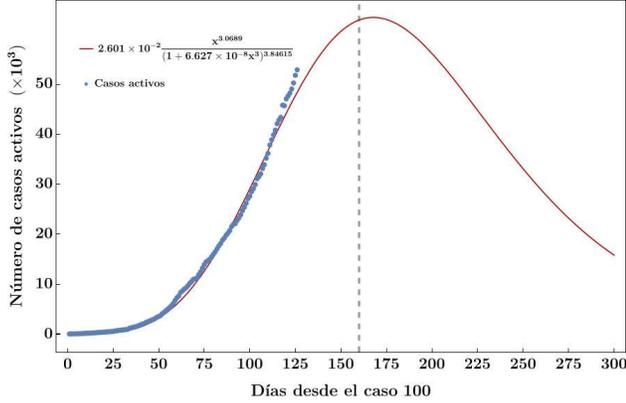


FIG. 7.— Datos oficiales para los casos activos en Bolivia hasta el 11 de julio. El ajuste corresponde a la función propuesta por Tsallis y Tirkakli. De acuerdo con este ajuste, el pico de infecciones era esperado para ocurrir en el día 160 de infección, es decir el 5 de septiembre.

social basado en economía informal puedan mantener una adecuada cuarentena, etc. la efectividad de las mismas puede ser drásticamente reducida.

Es necesario destacar que las fechas estimadas para la ocurrencia del pico según los parámetros para la diseminación de la enfermedad en una etapa temprana y los valores para ϕ propuestos en la Sec. 2 coinciden con los datos oficiales divulgados por el Ministerio de Salud donde el pico epidémico se dio, efectivamente, el 22 de agosto; lo que otorga validez al modelo epidemiológico estudiado en el presente trabajo como un modelo adecuado para el estudio de la COVID-19 y ofrece credibilidad a las conclusiones del mismo. Sin embargo, estamos concientes que una predicción exacta de la evolución de la pandemia es por el momento tarea imposible tal como lo señala adecuadamente Manrubia (2020) debido a que es un sistema muy complejo, en el cual los parámetros están variando continuamente y es fuertemente sensible a aspectos tales como los comportamientos sociales, factores político y económicos e incluso a aspectos migratorios y estacionales.

Respecto de futuros desarrollos del presente trabajo, se pretende generalizar el modelo estudiado para tomar en cuenta diferentes grupos etarios, imponiendo distintas medidas de aislamiento social a cada uno de los grupos, medida conocida coloquialmente como *cuarentena vertical*. Por ejemplo, los datos oficiales muestran que a lo largo de la etapa temprana de la epidemia la mayor parte de los casos reportados (y por ende, de las muertes) correspondían a personas mayores. Por otro lado, la situación epidemiológica a mediados de julio (después de haber retomado las actividades económicas gradualmente), la mayor parte de los casos correspondían a personas en edad laboral. Finalmente, dadas las últimas evidencias acerca de la duración de la inmunidad a esta nueva enfermedad y las sucesivas pruebas de casos de reinfección, se pretende incorporar el efecto de reinfección en el modelo.

AGRADECIMIENTOS

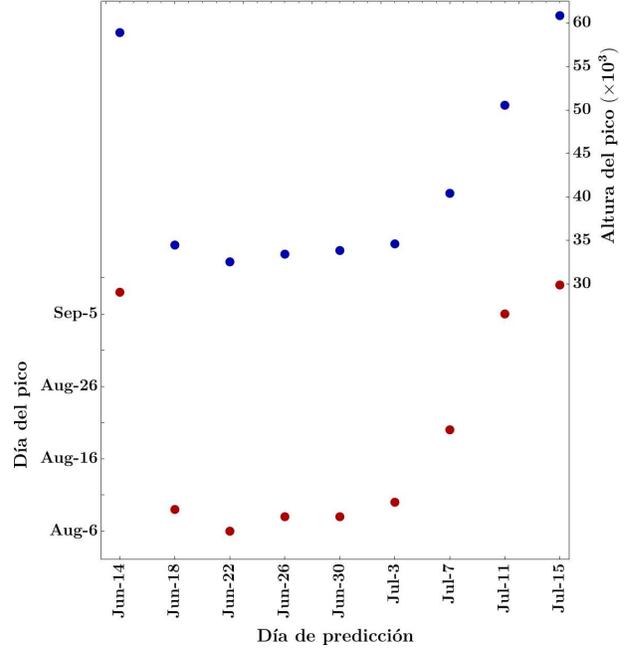


FIG. A1.— Proyecciones para la fecha del pico de casos activos y su altura correspondientes a los datos disponibles hasta una fecha determinada (en el eje de las abscisas).

MLP agradece el apoyo financiero de la Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Brasil.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

APÉNDICE

A. AJUSTE DE LOS DATOS BOLIVIANOS

El primer caso de COVID-19 en Bolivia fue diagnosticado el 9 de marzo de 2020 según lo reportan Escalera-Antezana *et al.* (2020) y, hasta el 12 de julio, las autoridades sanitarias locales detectaron un total de 47200 casos positivos. Los autores Tsallis & Tirkakli (2020), inspirados por un modelo originalmente formulado para el mercado accionario, propusieron, con el objetivo de pronosticar la ocurrencia de picos epidemiológicos, una función analítica que se ajusta a diversas curvas epidemiológicas *completas*⁴ en países tales como China, Corea del Sur, Francia, etc. Así, Tsallis y Tirkakli proponen la siguiente forma funcional para el comportamiento de los casos activos de COVID-19

$$N = C \frac{(x - x_0)^\alpha}{(1 + (q - 1)\bar{\beta}(x - x_0)^{\bar{\gamma}})^{1/(1-q)}}, \quad (\text{A1})$$

donde $C > 0$, $\alpha > 0$, $\bar{\beta} > 0$, $\bar{\gamma} > 0$, $q > 0$ y x representa el tiempo en días desde el primer caso medido. La Ec. (A1) es conocida como una función *q-exponencial*. Los parámetros en (A1) son interpre-

⁴ Nótese que esta función, al igual que los modelos epidemiológicos compartimentales usuales, se ajusta solamente a un “ciclo” epidemiológico, es decir, no puede aplicarse para la proyección de segundas ondas o rebotes de la enfermedad.

tados, respectivamente, como: (C, x_0) parámetros triviales que dependen de la cantidad de población del lugar y el día inicial del brote epidémico con respecto a los datos de China⁵ respectivamente; $(q, \bar{\gamma})$ son parámetros específicos para la enfermedad, los cuales pueden contener información sobre aspectos biológicos del virus y su propagación y, según los diversos brotes analizados, pueden considerarse universales, siendo $q \approx 1.26$ y $\bar{\gamma} \approx 3$ (ver Tsallis & Tirnakli (2020)). Finalmente, el conjunto de parámetros (α, β) toma en cuenta las particularidades de la transmisión de la enfermedad en los locales analizados, estas particularidades pueden incluir las diversas políticas de distanciamiento social implementadas, un control y seguimiento epidemiológico adecuado a las personas infectadas por parte de las autoridades como también aspectos ambientales particulares que podrían influenciar tanto en la propagación de la enfermedad como en la gravedad de la misma (ver Arias-Reyes *et al.* (2020); Soliz *et al.* (2020)).

La Fig. 7 muestra los datos oficiales casos activos

ajustados con la función mostrada en la Ec. (A1). Los parámetros relevantes para este ajuste son: $C = 2.601 \times 10^{-2}$, $\alpha = 3.0689$, $\beta = 2.5492 \times 10^{-7}$, mientras que el par $(\bar{\gamma}, q) = (3, 1.26)$ fue fijado de acuerdo a los parámetros obtenidos para la China, pues el estado de la epidemia el 11 de julio estaba lejos de completar un primer ciclo. Puede observarse que el ajuste realizado con la propuesta de Tsallis y Tirnakli coincide con los datos disponibles. Obviamente, la precisión para dicho ajuste de parámetros mejora a medida que una mayor cantidad de datos está disponible para realizar el ajuste. Por tanto, a manera de prueba, es posible realizar el ajuste para diferentes conjuntos de datos y calcular tanto la altura del pico epidémico como el día de ocurrencia del mismo. La Fig. A1 muestra dicho cálculo para diferentes conjuntos de datos disponibles. De acuerdo con el ajuste realizado con la función de Tsallis-Tirnakli para los datos disponibles hasta julio, el pico epidemiológico en Bolivia estaba esperado para ocurrir entre las fechas [Ago-6, Sep-6], lo cual coincidía con la información divulgada por las autoridades locales en ese momento.

REFERENCIAS

- Alsuliman, T., Alasadi, L., Alkharat, B., Srour, M., & Alrstom, A. 2020, *Current Research in Translational Medicine*, **68**, 93
- Arias-Reyes, C., Zubieta-DeUrioste, N., Poma-Machicao, L., Aliaga-Raduan, F., Carvajal-Rodriguez, F., Dutschmann, M., Schneider-Gasser, E. M., Zubieta-Calleja, G., & Soliz, J. 2020, *Respiratory Physiology & Neurobiology*, **277**, 103443
- Bastos, S. B. & Cajueiro, D. O. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2003.14288
- Bastos, S. B., Morato, M. M., Cajueiro, D. O. & Normey-Rico, J. E. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2006.15268
- Brauer, F. & Castillo-Chavez, C. 2001, *Mathematical models in population biology and epidemiology* (New York: Springer)
- Cabo Bizet, N. G. & Cabo Montes de Oca, A. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2004.11352
- Caicedo-Ochoa, Y., Rebellón-Sánchez, D. E., Penaloza-Rallón, M., Cortés-Motta, H. F., & Méndez-Fandiño, Y.-R. 2020, *International Journal of Infectious Diseases*, **95**, 316
- Crokidakis, N. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2003.12150
- De Falco, I., Della Cioppa, A., Scafuri, U., & Tarantino, E. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2004.00553
- Escalera-Antezana, J. P., Lizón-Ferruffino, N. F., Maldonado-Alanoca, A., Alarcón-De-la Vega, G., Alvarado-Arnez, L. E., Balderrama-Saavedra, M. A., Bonilla-Aldana, D. K., Rodríguez-Morales, A. J., & LANCOVID. 2020, *Travel Medicine and Infectious Disease*, **35**, 101653
- Fiesco-Sepúlveda, K. Y. & Serrano-Bermúdez, L. M. 2020, *PeerJ*, **8**, e9332
- Georgiou, N., Delfabbro, P., & Balzan, R. 2020, *Personality and Individual Differences*, **166**, 110201
- González, R. E. R. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2004.01295
- Manrubia, S. 2020, *Physics*, **13**, 166
- Medina, L. & Schneider, F. 2018, Shadow Economies Around the World: What Did We Learn Over the Last 20 Years?, *IMF Working Papers* **18/17**, International Monetary Fund
- Mitjà, O., Arenas, À., Rodó, X., Tobias, A., Brew, J., & Benlloch, J. 2020, *The Lancet*, **395**, 1193
- Ndairou, F., Area, I., Nieto, J. J., & Torres, D. F. 2020, *Chaos, Solitons & Fractals*, **135**, 109846
- Peñafiel, M. L. & Ramírez-Ávila, G. M. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2008.06345
- Pires, M. A., Crokidakis, N., Cajueiro, D. O., Argollo de Menezes, M., & Duarte Queirós, S. M. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2005.09019
- Shih, H.-I., Wu, C.-J., Tu, Y.-F., & Chi, C.-Y. 2020, *Biomedical Journal*, **43**, 341
- Small, M. 2012, *Dynamics of biological systems* (Boca Raton: Chapman & Hall/CRC)
- Soliz, J., Schneider-Gasser, E. M., Arias-Reyes, C., Aliaga-Raduan, F., Poma-Machicao, L., Zubieta-Calleja, G., Furuya, W. I., Trevizan-Baú, P., Dhingra, R. R., & Dutschmann, M. 2020, *Respiratory Physiology & Neurobiology*, **279**, 103476
- Tsallis, C. & Tirnakli, U. 2020, *Frontiers in Physics*, **8**, 217
- Weill, J. A., Stigler, M., Deschenes, O., & Springborn, M. R. 2020, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **117**, 19658
- Zhou, X., Mulay, A., Ferrara, E., & Zafarani, R. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2006.05557

⁵ Como x_0 representa un desplazamiento en el origen de la epidemia en el lugar, por simplicidad puede tomarse $x_0 = 0$.