

## ESTRATEGIA CICLICA DE AISLAMIENTO Y ACTIVIDAD ECONOMICA DURANTE LA PANDEMIA COVID-19

### CYCLE STRATEGY OF LOCKDOWN AND ECONOMIC ACTIVITY DURING THE PANDEMIC COVID-19

F. E. Cornes<sup>1</sup>, G. A. Frank<sup>3</sup> y C. O. Dorso<sup>\*1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Pabellón I, Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Física de Buenos Aires, Pabellón I, Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Av. Medrano 951, 1179 Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 31/05/2020 ; Aceptado: 14/07/2020


En esta investigación se propone un esquema periódico de aislamiento y actividad económica durante la pandemia de COVID-19. Se sugiere un régimen de actividad económica intermitente compuesto por un ciclo de “actividad-aislamiento”  $4 \times 8$ , es decir, 4 días de actividad normal seguidos de 8 días de aislamiento obligatorio. También se propone dividir a la población en grupos que operen de manera alternada, para garantizar un nivel de actividad económica global continua. Concluimos que ambos escenarios mitigan la propagación de la misma, aunque el escenario de varios grupos se prefiere para mantener un nivel de actividad más uniforme. Además, el grado de efectividad de este esquema cíclico depende del momento de aplicación del mismo.

*Palabras clave: pandemia, COVID-19, economía.*

The investigation focuses on an on-off protocol for relieving the COVID-19 widespread. The protocol establishes a working period of 4 days for all the citizens, followed by 8 days of lock-down. We further propose splitting people into smaller groups that accomplish the on-off protocol, but shifted in time. This procedure is expected to regularize the overall economic activity. Our results show that either the protocol and the splitting procedure relieve the spreading. However, the latter seems to be better for economic reasons. Our simulations further show that the start-up time is a key issue for the success of the implementation.

*Keywords: pandemic, COVID-19, economy.*

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2020.31.4.150>

 ISSN 1850-1168 (online)

## I. INTRODUCCIÓN

La pandemia de coronavirus COVID-19 generó a lo largo de todo el mundo cientos de miles de muertos y más de cinco millones de personas infectadas (al 22 de Mayo de 2020) [1]. En ausencia de una vacuna, la única estrategia disponible de mitigación es el “aislamiento social”, que reduce los contactos entre individuos. Esto lleva a una reducción del índice de reproducibilidad (efectivo) del virus  $R$  por debajo de la unidad.

El “aislamiento social estricto” tiene consecuencias negativas para la actividad económica debido a que durante estos periodos las actividades se reducen a las esenciales. De este modo y dependiendo de la severidad y la duración de mismo, las consecuencias en la actividad económica pueden ser fatales. Por este motivo, muchos investigadores proponen estrategias que permitan acortar estos periodos de aislamiento [2] sugiriendo metodologías de levantamiento escalonado y progresivo.

Una de las características del coronavirus COVID-19 (y de otros virus) es su periodo de latencia. Una persona ex-

puesta puede incubar la enfermedad durante un periodo que varía entre 1 y 12.5 días, con una media estimada de 5-6 días [3, 4]. Esto indica que un aislamiento promedio eficaz no debería ser menor a una semana (7 días) por cada persona.

En la Ref. [2] se propuso por primera vez la aplicación de aislamientos intermitentes (hasta donde tenemos conocimiento). Se propuso alternar entre periodos de “aislamiento” de  $L = 10$  días y periodos contiguos de “actividad normal”  $W = 4$  días. La combinación de ambos suma exactamente 2 semanas. La idea subyacente es que una persona que se contagia durante el ciclo de actividad ( $W = 4$ ), adquiera su mayor capacidad de contagio durante el aislamiento ( $L = 10$ ). De este modo, infectará a un número reducido de individuos, y, a su vez, se mantendrá la actividad económica.

La estrategia anteriormente mencionada supone que todos los individuos trabajan ó descansan al mismo tiempo. Esto permite sostener la actividad económica aunque no de manera continua. Nuestra propuesta consiste en segmentar la población en grupos que operan de forma contraria: mientras algunos se encuentran en un periodo de “activi-

\* codorso@df.uba.ar

dad normal”, otros permanecen en “aislamiento social”. De esta manera, es posible mitigar la enfermedad y, a su vez, mantener una actividad económica constante a lo largo del tiempo.

Esta investigación supondrá un control del índice de reproducción efectivo  $R$  según el nivel de actividad económica. Somos conscientes de las dificultades que presenta la estimación de valores para el COVID-19, y de las múltiples hipótesis simplificadoras asociadas a cada “modelo de contagio”. Nuestro enfoque no insistirá en la problemática del modelado, sino en los siguientes principios básicos: se propondrá un modelo SEIR simple (ver Sección II) y se considerarán parámetros estimados provisionales, según la experiencia europea del COVID-19. El lector puede contextualizar este mensaje de cautela con la lectura de las Refs. [5-10].

En la Sección II se presenta el marco teórico que se utilizará para realizar las simulaciones. La forma en que se llevaron a cabo las mismas se presentan en la Sección III. Los resultados obtenidos se muestran en la Sección IV. En la Sección V se presentan las conclusiones del trabajo.

## II. MARCO TEÓRICO

### Modelo SEIR con un único grupo

A lo largo del trabajo se utilizará el modelo epidemiológico SEIR con el fin de modelar la evolución de la enfermedad. Este modelo considera que una población de tamaño fijo  $N$  se encuentra compuesta por individuos que pueden estar en cuatro estados distintos:

- susceptibles  $S(t)$ : se pueden contagiar en contacto con un infectado.
- expuestos  $E(t)$ : portan la enfermedad pero todavía no poseen la capacidad de infectar a los demás.
- infectados  $I(t)$ : pueden transmitir la infección a individuos de la población susceptible en el caso de entrar en contacto.
- recuperados o removidos  $R(t)$ : no poseen la enfermedad y son inmunes a la misma.

con  $S(t) + E(t) + I(t) + R(t) = N$ . Destacamos que a diferencia de otros modelos epidemiológicos (SIS, SIR, etc.), el modelo SEIR se adapta mejor al comportamiento de la epidemia del coronavirus COVID-19. Esto se debe a que este modelo incluye a individuos que portan la enfermedad pero, al hallarse en su periodo de incubación, no son capaces de infectar a otros individuos.

El modelo SEIR de cuatro estados supone que las tasas de propagación de la epidemia son constantes e independientes del tiempo de permanencia en cada estado. Las ecuaciones diferenciales del modelo SEIR (simple) para una única población homogénea son las siguientes

$$\begin{cases} \dot{s}(t) &= -\beta i(t)s(t) \\ \dot{e}(t) &= \beta i(t)s(t) - \sigma e(t) \\ \dot{i}(t) &= \sigma e(t) - \gamma i(t) \\ \dot{r}(t) &= \gamma i(t) \end{cases} \quad (1)$$

siendo  $s(t) = S(t)/N$ ,  $e(t) = E(t)/N$ , etc. las variables normalizadas por unidad poblacional. Como se mencionó  $\beta$ ,  $\sigma$  y  $\gamma$  son parámetros fijos.

Las hipótesis respecto de las tasas de propagación y de los tiempos de permanencia en cada estado conducen que éstos se distribuyan estadísticamente de manera exponencial. La relajación de estas hipótesis implicaría dividir los estados en sub-estados, que en conjunto tendrían tiempos de permanencia distribuidos de manera Gamma. Hay evidencias de que esta última descripción es más “realista” para el caso del virus SARS y otros [5]. No tenemos conocimiento de estimaciones correspondientes para el COVID-19. Según se mencionó en la Sección I, nos guiaremos por el principio del modelo más simple posible que capture los efectos de “latencia” (E) e “infección” (I) en un único estado cada uno.

El parámetro  $\beta$  (tasa de infección) depende de dos magnitudes. Por un lado, de la cantidad de contactos de una persona y por el otro, de las características del agente infeccioso. Este parámetro es menor para individuos con mayor grado de aislamiento (ej. en cuarentena), y mayor si entran en contacto frecuente. En cambio, los parámetros  $\sigma$  y  $\gamma$  representan la tasa de incubación y de recuperación, respectivamente. Destacamos que estas dos magnitudes dependen exclusivamente de la enfermedad a diferencia de  $\beta$ .

Una de las magnitudes más importantes es la tasa básica ó número de reproducción  $R_0$  [11]

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \quad (2)$$

La misma representa el número de nuevos infectados producidos por un único infectado considerando a toda la población susceptible. De esta manera, cuanto más chico es el valor de  $R_0$  más lentamente evolucionará la epidemia. En el caso particular de  $R_0 < 1$ , la epidemia se extingue con el paso del tiempo.

El control del proceso de propagación permite cambiar el número de nuevos infectados a medida que va cambiando el número de susceptibles a la epidemia. Esto se cuantifica por medio de un número de reproducción “efectivo”  $R$ , similar al  $R_0$  pero dependiente del tiempo (y aplicado a una población susceptible menor). En adelante sólo consideraremos la magnitud “efectiva”.

### Modelo SEIR de 3 grupos con estrategia cíclica

El modelo SEIR presentado en la Sección II corresponde a la propagación del COVID-19 sobre una población homogénea. Un grupo homogéneo de individuos puede estar en contacto con otros grupos (supuestos también homogéneos) y propagar la infección entre ellos. El tipo de vínculo entre grupos determinará un número de reproducción “inter-grupo”, distinto del número “intra-grupo”. Éste dependerá del grado de aislamiento entre ellos. Si los grupos están completamente aislados entre sí, el número de reproducción “inter-grupo” es nulo, y la infección sólo circulará “intra-grupo”. Sin embargo, si se produce la permeabilidad de ese aislamiento, los modelos de propagación SEIR de cada grupo (homogéneo) deberán integrarse en un modelo más amplio, bajo la condición  $s + e + i + r = 3$ . La Fig. 1 representa cualitativamente el diagrama de vínculos.

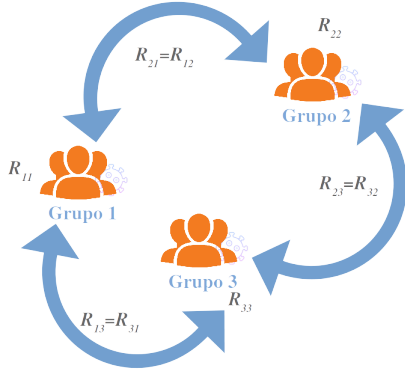


FIG. 1: Diagrama de vínculos para un sistema multi-grupo. El modelo de contagio corresponde al tipo SEIR.

En un modelo multi-grupo, cada grupo se identifica con el índice  $i = 1 \dots N$ . Los estados susceptible, expuesto, infectado y removido corresponden a arreglos (columna) de la forma

$$(s_1, \dots, s_N), (e_1, \dots, e_N), (i_1, \dots, i_N), (r_1, \dots, r_N) \quad (3)$$

respectivamente. La cantidad total de individuos en cada estado es la suma de los elementos del correspondiente arreglo.

La reproducción puede darse entre el grupo  $i$  con sí mismo (“intra-grupo”) o bien entre el grupo  $i$  y el grupo  $j$  (“inter-grupo”). El número de reproducción será  $R_{ii} = \beta_{ii}/\gamma_i$  y  $R_{ij} = \beta_{ij}/\gamma_i$ , respectivamente. La condición de mezcla entre grupos se resume por medio de los siguiente índices

$$\delta_{ijk} s_k \beta_{jl} i_l = \begin{pmatrix} s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & s_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{11}i_1 + \dots + \beta_{1N}i_N \\ \vdots \\ \beta_{N1}i_1 + \dots + \beta_{NN}i_N \end{pmatrix} \quad (4)$$

donde  $\delta_{ijk}$  es el tensor de Kronecker y  $i, j, k, l = 1, \dots, N$ . De este modo, el modelo SEIR completo resulta

$$\begin{cases} \dot{s}_i(t) &= -\delta_{ijk} \beta_{jl} s_k(t) i_l(t) \\ \dot{e}_i(t) &= \delta_{ijk} \beta_{jl} s_k(t) i_l(t) - \sigma_{ij} e_j(t) \\ \dot{i}_i(t) &= \sigma_{ij} e_j(t) - \gamma_{ij} i_j(t) \\ \dot{r}_i(t) &= \gamma_{ij} i_j(t) \end{cases} \quad (5)$$

donde  $\sigma_{ij} = \text{diag}(\sigma_{11}, \dots, \sigma_{NN})$  y  $\gamma_{ij} = \text{diag}(\gamma_{11}, \dots, \gamma_{NN})$ .

### III. SIMULACIONES

Las simulaciones se realizaron utilizando un código escrito en lenguaje C. Se aplicó el método de Runge Kutta de orden 4 para integrar las ecuaciones diferenciales. El paso de integración fue de 0.1 (días).

Como se mencionó en la Sección II, los parámetros  $\sigma$  y  $\gamma$  representan la tasa de incubación y de recuperación. Por lo tanto,  $\sigma^{-1}$  y  $\gamma^{-1}$  representan el tiempo medio de incubación y recuperación, respectivamente. En este sentido, y

de acuerdo a estimaciones, para el coronavirus COVID-19 resultan  $\sigma^{-1} = 3$  días y  $\gamma^{-1} = 4$  días [12].

### Estrategia aislamiento-actividad

De la misma manera que en Ref. [2], se implementó la estrategia aislamiento-actividad. La misma consiste en un ciclo alternado de aislamiento (lock-down) y de actividad (work). Como se mencionó en la Sección II,  $\beta$  es el único parámetro del modelo que es posible modificar por medio de políticas de aislamiento. Recordemos que uno de factores que determinan el valor de este parámetro es la cantidad de contactos entre personas. Por lo tanto, medidas como el aislamiento permiten reducir el valor de este parámetro. Y en consecuencia, el valor de  $R$  (ver Ec. 2).

Este ciclo de aislamiento-actividad está representado por  $W$  días de actividad y  $L$  días de aislamiento ( $W, L$ ). Debido al hecho de que el número de contactos, en principio, puede ser diferente durante el “aislamiento” que en la “actividad”, tendremos dos tasas de infección ( $\beta$ ): la asociada a la etapa aislamiento ( $\beta_L$ ) y la correspondiente a la etapa actividad normal ( $\beta_W$ ). Y a su vez, dos números de reproducción:  $R_L$  y  $R_W$  (ver Ec. 2). Al igual que en la Ref. [2], se asumirá que  $R_L = 0.6$  y  $R_W = 1.5$  (o superior).

### IV. RESULTADOS

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos. La misma se divide en dos etapas. En primer lugar, se analiza el caso en donde no se aplica ninguna restricción frente a la epidemia (Sección IV). En segundo lugar, se estudia el caso en donde se interviene durante la epidemia por medio de un ciclo aislamiento-actividad (Sección IV).

#### Evolución de la pandemia sin intervención

En primer lugar se analiza el caso en el cual la epidemia de COVID-19 evoluciona libremente. Es decir, en ausencia de restricciones como por ejemplo distanciamiento social. Se asumirá un número de reproducción  $R_0$  igual a 3, de acuerdo a Ref. [12]. En la Fig. 2 se muestra la evolución del número de susceptibles, expuestos, infectados y removidos a lo largo del tiempo. En la misma puede observarse que la cantidad de personas susceptibles disminuye monótonamente debido a la propagación del virus. En cambio, el efecto opuesto puede observarse en el caso de las personas removidas (recuperadas).

Por otro lado, en el caso de las personas expuestas e infectadas podemos ver un comportamiento similar (tipo campana), mas allá de un desplazamiento horizontal entre ambas curvas. En este caso, se puede observar un crecimiento del número de expuestos e infectados hasta aproximadamente la semana 5 (pico de la curva) y luego el decrecimiento de los mismos. La altura y extensión del pico de infectados depende, entre otras cosas, del valor de  $R_0$ . En este sentido, cuanto mayor sea el valor del mismo, más alto será el pico y, a su vez, más angosto.

#### Evolución de la pandemia con intervención cíclica

A continuación se analizan los resultados al aplicar el ciclo aislamiento-actividad durante la pandemia. Utilizaremos el término grupo homogéneo para definir a un conjunto de individuos que se encuentra en un único estado. En este sentido, un grupo homogéneo es aquel que se encuentra en

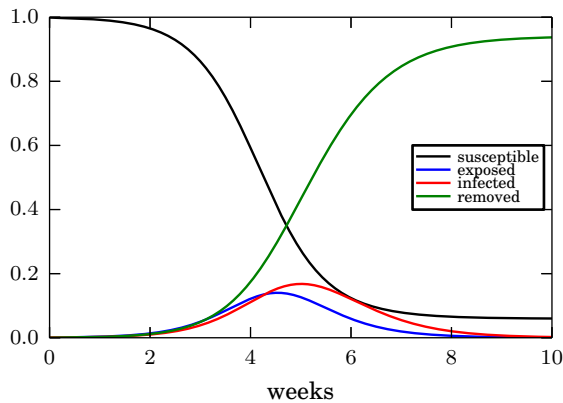


FIG. 2: Evolución de la epidemia. Se utilizaron  $\sigma^{-1} = 3$  días,  $\gamma^{-1} = 4$  días y  $\beta = 0.75$  ( $R_0=3$ ) [12]. La condición inicial es  $s(0) = 1, s(0) = 0, i(0) = 1 \times 10^{-3}$  y  $r(0) = 0$ .

un estado de “aislamiento” o de “actividad”, pero no en ambos. A continuación se analizarán dos posibles escenarios:

- Único grupo homogéneo: Existe una única población de individuos.
- Tres grupos homogéneos (multi-grupo): La población se encuentra dividida en tres grupos de personas del mismo tamaño. Las personas de cada grupo interactúan con los de su mismo grupo ( $R_{ii}$ ). A su vez, cada persona puede interactuar con las personas de otro grupo ( $R_{ij}$ ). Cabe destacar que, en este caso, un grupo puede estar en estado de “aislamiento”, mientras que los otros dos grupos en el estado de “actividad”.

### Comparación entre los ciclos (4-8) y (4-10) con un único grupo

La Fig. 3 muestra la evolución de los infectados al aplicar el ciclo aislamiento-actividad (curva azul) para dos estrategias diferentes (4-8 días y 4-10 días). Cabe destacar que dicho ciclo se aplica cuando el número de infectados equivale a un 10% del total de la población. En la misma se grafica el caso en el cual se aplica un aislamiento estricto o continuo (línea de color negro). En ambos casos, podemos observar que la mejor estrategia en términos del número de infectados es el “aislamiento continuo”. En este caso se produce una disminución monótona del número de infectados en el tiempo.

En cambio, en la Fig. 3 podemos ver que al aplicar la estrategia cíclica (línea de color azul) se produce un aumento en el número de casos debido a la inclusión de la etapa “actividad” (equivalente a la liberación del aislamiento). En este sentido, podemos observar que durante esta etapa (ver barras de color naranja) el número de infectados crece, a diferencia de lo que ocurre en la etapa “aislamiento” (barras de color verde).

Finalmente, podemos observar un comportamiento similar al aplicar los ciclos (4-8) y (4-10) en término del número de infectados. Cabe destacar que resultados similares se obtienen para el caso de los susceptibles, expuestos y recuperados (no se muestran). De esta manera, podemos con-

cluir que aplicar un ciclo (4-8) es similar al caso (4-10). Sin embargo, como veremos a continuación el primer caso nos permite un ciclo continuo de “actividad” si se consideran tres grupos de individuos. En la siguiente sección nos enfocaremos en el estudio del ciclo (4-8).

### Análisis de la estrategia (4-8) para un único grupo

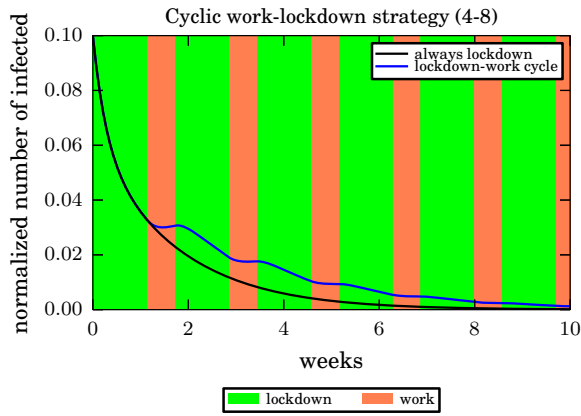
A diferencia del caso anterior, analizamos ahora los efectos de aplicar el ciclo aislamiento-actividad durante diferentes etapas de la epidemia. En la Fig. 4 se muestra la evolución de cada tipo de individuo (susceptibles, expuestos, infectados y recuperados) en función del tiempo. En la misma se grafica el caso en el cual se deja evolucionar libremente el sistema, equivalente a una “actividad continua” (línea de color rojo). Considerando dicha curva como referencia, se muestra el caso en donde se aplica el ciclo aislamiento-actividad en distintos momentos de la curva (líneas de color negro).

El número de susceptibles decrece monótonamente con el tiempo debido al contagio progresivo de los individuos. A su vez, podemos notar que una vez implementado el ciclo aislamiento-actividad, el número de susceptibles alcanza un régimen asintótico rápidamente (aproximadamente en cuatro semanas). Este comportamiento es similar al del número de personas recuperadas o removidas (Fig. 4d). Sin embargo, en este último caso, la cantidad de los mismos aumenta monótonamente con el tiempo.

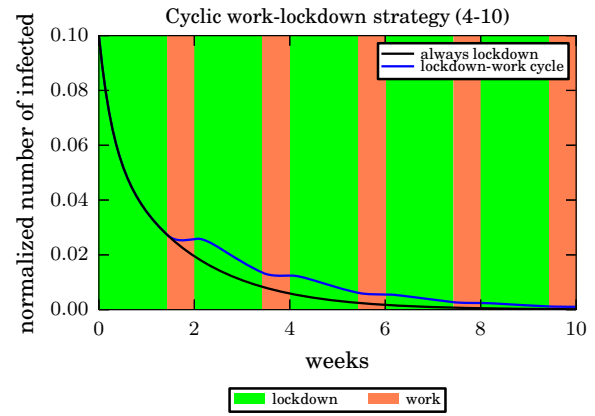
Además, podemos observar que, el comportamiento del número de susceptibles y recuperados no está afectado por la etapa en la que se encuentra el sistema. En este sentido, el número de susceptibles decrece monótonamente independientemente de si la población se encuentra en la etapa de aislamiento o de actividad (lo mismo ocurre en el caso de los recuperados). Sin embargo, podemos observar un comportamiento completamente diferente en el caso de los expuestos y los infectados. En este caso, podemos observar que el comportamiento de los mismos se ve afectado según la etapa en la que se encuentra el sistema. En el caso de los expuestos, durante la etapa “actividad” se puede observar un crecimiento de los mismos. Esto se explica si tenemos en cuenta que durante la etapa “actividad” aumenta la frecuencia de contactos entre susceptibles e infectados (a través de  $R_w$ ). Por lo tanto, se incrementa el número de personas contagiadas (a pesar de que no contagien a los demás y por ende, no contribuyen a propagar la infección). Lo opuesto ocurre en la etapa de aislamiento, en donde se produce una disminución del número de los mismos.

A su vez, es interesante observar que el comportamiento del número de infectados durante el ciclo de “actividad” depende del momento en que se interviene en la epidemia. En este sentido, podemos observar que, antes de la semana 11, el número de infectados aumenta durante la etapa trabajo. En cambio, este comportamiento se invierte (decrece) a partir de aproximadamente este punto. Es decir, “la vuelta a la actividad” no afecta al sistema en términos de un aumento del número de contagiados. Aún más, es necesario destacar que esto se produce antes de llegar al pico de la epidemia.

Hasta el momento se analizó cómo evoluciona la epide-

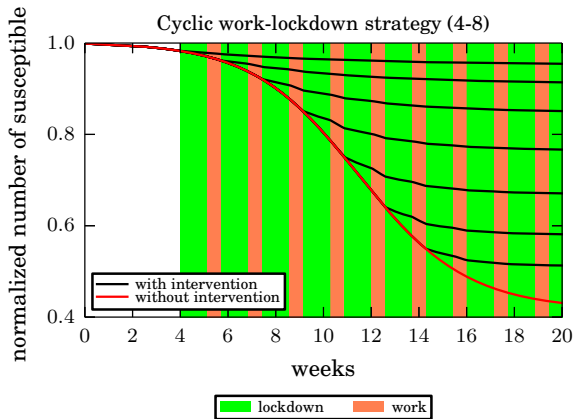


(a)

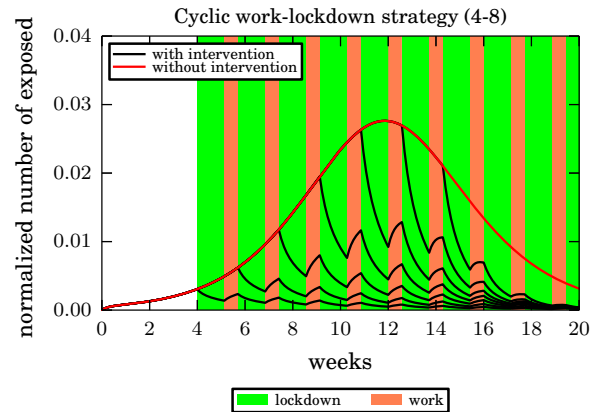


(b)

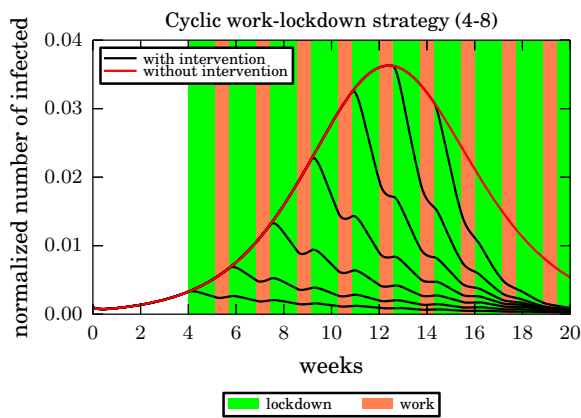
FIG. 3: Cantidad normalizada de infectados en función del tiempo. La condición inicial era  $s(0) = 0.9, s(0) = 0, s(0) = 0.1$  y  $s(0) = 0$ . El número de reproducción para la situación “always lockdown” es  $R_l = 0.6$ . En cambio, en el caso “lockdown-work cycle” se utilizaron  $R_w = 1.5$  y  $R_l = 0.6$ .



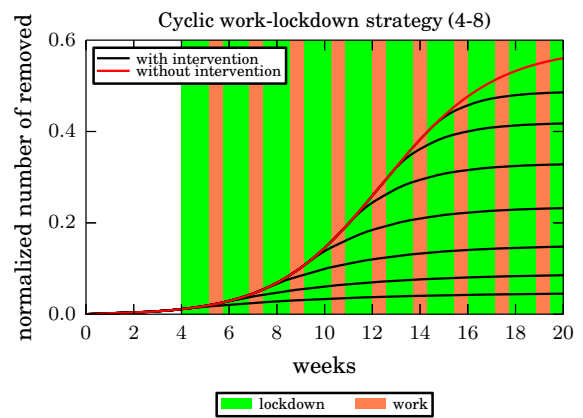
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 4: Cantidad normalizada de susceptibles (a), expuestos (b), infectados (c) y removidos (d) en función del tiempo. La condición inicial era  $s(0) = 1, e(0) = 0, i(0) = 1 \times 10^{-3}$  y  $r(0) = 0$ . El número total de individuos es 1000. Los números de reproducción para la situación “with intervention” son  $R_w = 1.5$  y  $R_l = 0.6$ . En cambio, en el caso “without intervention” se utilizó  $R = 1.5$ .

mia al considerar un único grupo de personas, el cual puede adoptar un comportamiento tipo “aislamiento” o “actividad”. A continuación se analiza cómo se modifican los resultados al considerar tres grupos de individuos. Como se mencionó previamente, este caso permite optimizar la estrategia (4-8).

### Análisis de la estrategia (4-8) para tres grupos

En esta Sección nos enfocamos en el escenario de una población segmentada en tres grupos  $i = 1, 2, 3$ . Recordamos que cada grupo alterna entre un periodo de “actividad normal” y otro de “aislamiento social”. El periodo de “aislamiento” se ajusta al tiempo de vida de la infección ( $L = 8$ ), mientras que la etapa de “actividad” se asimila (aproximadamente) a la semana laboral ( $W = 4$ ). Los ciclos  $4 \times 8$  de cada grupo se encuentran desfasados, según el calendario mostrado en la Fig. 5.

Grupo	Normal	Transición	Estrategia cíclica
1	●	●	●●●●●●●●
2	●	●	●●●●●●●●
3	●	●	●●●●●●●●

FIG. 5: Calendario de la estrategia cíclica. Los círculos de color naranja y celeste representan etapas de actividad y aislamiento, respectivamente. La columna “normal” corresponde al caso en que no se aplica ninguna estrategia (sólo actividad normal). La columna “transición” prepara cada grupo a la estrategia cíclica. El resto de las columnas corresponden a la estrategia cíclica de 4 días de “actividad” y 8 días de “aislamiento”.

La reproducción “intra-grupo”  $R_{ii} = \beta_{ii}/\gamma_{ii}$  depende de la conducta seguida por cada grupo cada día. Cada grupo puede elegir normas de conducta distinta que reproducen en mayor o menor medida el contagio. Consideramos dos posibles situaciones dentro del grupo: una conducta de actividad normal  $R_{ii} = R_w > 1$  (work) y una conducta de “aislamiento”  $R_{ii} = R_l < 1$  (lock-down). Adicionalmente, consideramos los casos de aislamiento completo entre grupos  $R_{ij} = 0$  ( $i \neq j$ ), o bien, de pequeña permeabilidad entre ellos  $R_{ij} \ll 1$  ( $i \neq j$ ).

La Fig. 6 muestra la evolución de infectados totales para tres grupos completamente aislados entre sí, o bien, con una pequeña permeabilidad entre ellos (ver texto en la figura). El color gris claro muestra la evolución sin estrategia cíclica (actividad normal permanentemente). Los colores rojo, naranja y azul corresponden a la aplicación de una estrategia de actividad-aislamiento de 4-8 días (ver detalles en la figura). La fecha de comienzo de aplicación de la estrategia cíclica se indica en la leyenda de la figura.

La estrategia cíclica muestra una caída sostenida de la cantidad de infectados a poco de aplicar la estrategia. En el caso en que los grupos están completamente aislados, la mitigación es más efectiva que en el caso de que existe una permeabilidad pequeña. En ambos casos, la aplicación de una estrategia cíclica parece mitigar notablemente la probabilidad de infección. Sin embargo, la aplicación tardía pierde efectividad.

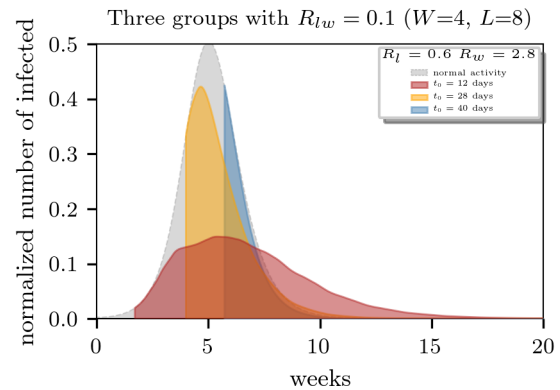
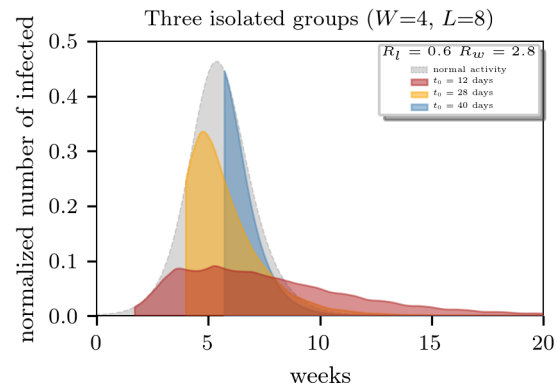


FIG. 6: Cantidad total de infectados ( $i_1 + i_2 + i_3$ ) en función del tiempo. La condición inicial es  $s(0) = 1, e(0) = 0, i(0) = 1 \times 10^{-3}$  y  $r(0) = 0$ . Los números de reproducción para la situación de “actividad normal” y de “aislamiento” son  $R_w = 2.8$  y  $R_l = 0.6$ , respectivamente. Los días de “actividad normal” son  $W = 4$  y los de aislamiento son  $L = 8$ . (a) Los grupos se encuentran completamente aislados entre sí ( $R_{ij} = 0$ ). (b) Los grupos permean parcialmente entre sí ( $R_{ij} = 0.1$ ).

La Fig. 7 muestra la aplicación de la misma estrategia que la Fig. 6 para un número de reproducción menos intenso (en actividad normal). Se observan resultados cualitativamente similares para ambas intensidades. Esto indica un nivel de robustez de la estrategia cíclica en relación con la intensidad del contagio.

### V. CONCLUSIONES

En esta investigación se propuso una estrategia cíclica de trabajo y aislamiento con el fin de preservar la salud y la actividad económica. Para ello, se analizó la evolución de la epidemia de coronavirus COVID-19 mediante un modelo epidemiológico por medio de simulaciones numéricas. Se investigaron varios escenarios de contagio por medio de un modelo SEIR simple (asumiendo una distribución exponencial de tiempos asociados a cada estadio).

Se utilizaron parámetros de contagio compatibles con el estado actual del conocimiento sobre el COVID-19. No consideramos estos valores de contagio como definitivos, ni aplicables a todas las sociedades. Basamos nuestro análisis en estimaciones provisionarias medidas durante la epidemia

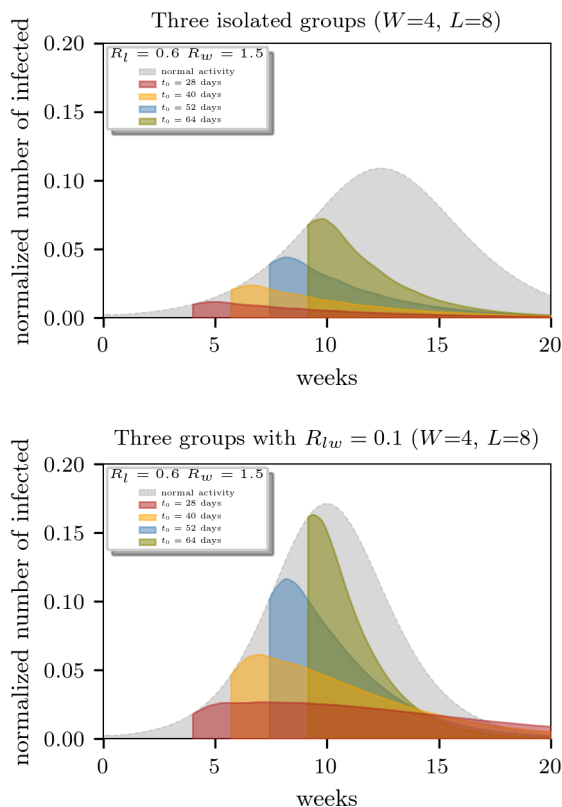


FIG. 7: Cantidad total de infectados ( $i_1 + i_2 + i_3$ ) en función del tiempo. La condición inicial es  $s(0) = 1, e(0) = 0, i(0) = 1 \times 10^{-3}$  y  $r(0) = 0$ . Los números de reproducción para la situación de “actividad normal” y de “aislamiento” son  $R_w = 1.5$  y  $R_l = 0.6$ , respectivamente. Los días de “actividad normal” son  $W = 4$  y los de aislamiento son  $L = 8$ . (a) Los grupos se encuentran completamente aislados entre sí ( $R_{ij} = 0$ ). (b) Los grupos permean parcialmente entre sí ( $R_{ij} = 0.1$ ).

en Europa.

Se propuso una estrategia cíclica de trabajo-aislamiento del tipo (4-8). La misma corresponde al ciclo continuo de 4 días de trabajo (actividad) seguido por 8 días de aislamiento. Se analizaron dos posibles escenarios. En el caso de considerar a la población como un grupo homogéneo, se observó que la aplicación de un “aislamiento” intermitente resulta efectivo en la mitigación de la enfermedad.

Se extendió el modelo SEIR al caso de múltiples grupos. Se consideró que los grupos pueden estar completamente aislados, o bien, que pueden tener un índice de reproducibilidad muy pequeño entre ellos (permeabilidad entre grupos). La aplicación de “aislamientos por tercios” de forma cíclica mostró efectividad en mitigar la epidemia con el agregado de mantener una actividad económica uniforme en el tiempo.

Concluimos a partir de los escenarios estudiados que la estrategia de “aislamiento intermitente” es aplicable a una variedad de situaciones. El grado de efectividad depende parcialmente del tiempo que se demore la aplicación del tratamiento.

## Reconocimientos

C.O. Dorso es Investigador Superior del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET) y Prof. Titular Regular Plenario del Depto. de Física-FCEN-UBA. G.A. Frank es Investigador Asistente del CONICET. F.E. Cornes es Lic. en Física egresado de la FCEN-UBA.

## REFERENCIAS

- [1] <https://coronavirus.jhu.edu/>.
- [2] O. Karin, Y. M. Bar-On, T. Milo, I. Katzir, A. Mayo, Y. Korem, B. Dudovich, E. Yashiv, A. J. Zehavi, N. Davidovich, R. Milo y U. Alon. Adaptive cyclic exit strategies from lockdown to suppress COVID-19 and allow economic activity. *medRxiv* (2020).
- [3] <https://www.who.int/es/health-topics/coronavirus>.
- [4] S. A. Lauer, K. H. Grantz, Q. Bi, F. K. Jones, Q. Zheng, H. R. Meredith, A. S. Azman, N. G. Reich y J. Lessler. The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application. *Ann. Intern. Med.* **172**, 577-582 (2020).
- [5] H. J. Wearing, P. Rohani y M. J. Keeling. Appropriate Models for the Management of Infectious Diseases. *PLoS Medicine* **2**, 0621-0627 (2005).
- [6] M. Choisy y P. Rohani. Mathematical Modeling of Infectious Diseases Dynamics. *Encyclopedia of Infectious Diseases: Modern Methodologies* **22** (2007).
- [7] Z. Feng. Final and Peak epidemic sizes for SEIR models with quarantine and isolation. *Math Biosci Eng.* **4**, 675-686 (2007).
- [8] R. Li, S. Pei, B. Chen, Y. Song, T. Zhang, W. Yang y J. Shaman. Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV-2). *Science* **368**, 489-493 (2020).
- [9] B. Tang, X. Wang, Q. Li, N. Bragazzi, J. Wu, S. Tang, Y. Xiao y J. Wu. Estimation of the Transmission Risk of the 2019-nCoV and Its Implication for Public Health Interventions. *J. Clin. Med.* **9**, 462 (2020).
- [10] J. Read, J. Bridgen, D. Cummings, A. Ho y C. Jewell. Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions. *medRxiv* (2020).
- [11] S. W. Park, B. M. Bolker, D. Champredon, D. J. Earn, M. Li, J. S. Weitz, B. T. Grenfell y J. Dushoff. Reconciling early-outbreak estimates of the basic reproductive number and its uncertainty: framework and applications to the novel coronavirus (SARS-CoV-2) outbreak. *J. R. Soc. Interface* (2020).
- [12] Y. M. Bar-On, A. Flamholz, R. Phillips y R. Milo. Science Forum: SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *eLife* **9**, e57309 (2020).