

N° 24-2019

Abril

BOLETÍN INFORMATIVO

Modelo SEIR para Colombia: Medidas de mitigación del virus

Modelo SEIR para Colombia: Medidas de mitigación del virus SARS-CoV-2

Marcos Emmanuel González Auhing*

Introducción

El presente informe utiliza el modelo determinista matemático SEIR para poder evaluar las distintas medidas que han tomado algunos países con respecto a la mitigación del virus SARS-CoV-2, aislamiento social y pruebas masivas para una mayor identificación, al caso de Colombia. Se muestra que ambas medidas son efectivas para disminuir la propagación del virus y se logra obtener una curva platicúrtica con la aplicación de las medidas. Se utiliza los datos con corte de 13 de abril de 2020 para realizar una simulación para los días posteriores. También, se realiza una simulación de una red aleatoria Erdős-Rényi de 1000 nodos para mostrar como el aislamiento social puede disminuir la propagación del virus SARS-CoV-2.

1. Antecedente

El virus SARS-CoV-2, causante de la enfermedad COVID-19, fue detectado por primera vez a finales de diciembre en la ciudad de Wuhan, China, donde se diagnosticaron pacientes con neumonía sin causa aparente. El 23 de enero, el Gobierno de la República Popular de China prohibió la entrada o salida de la ciudad para evitar que el brote se propague aún más dentro del país. Para el 29 de enero, todas las ciudades de la provincia de Hubei quedaron en cuarentena e implementaron toque de queda y otras provincias vecinas limitaron el movimiento de los ciudadanos, permitiendo a solo un miembro la salida cada dos días a comprar artículos de necesidad básica. Se construyeron 14 hospitales provisionales para ampliar la capacidad hospitalaria, logrando controlar la propagación y las autoridades de Wuhan anunciaron por primera vez, el 18 de marzo, cero casos locales positivos desde el inicio del brote. El gobierno ha anunciado que relajaran parcialmente los controles desde el 8 de abril. China se demoró 60 días en salir de la cuarentena y cerca de 90 días en eliminar los contagios dentro de la población, a la fecha reporta 83.213 casos y 3.345 fallecidos ¹.

El virus se propagó fuera de China y la Organización Mundial de la Salud lo declaró una pandemia el 11 de marzo, y hasta la fecha (13 de abril) se han reportado 1'860.011 casos confirmados y 114.983

fallecidos, siendo Estados Unidos el país con mayor número de contagios (557.590) y fallecidos (22.109)¹. La propagación ha provocado que varios países apliquen políticas de contención como cuarentenas, toque de queda, pruebas rápidas y suspensión de jornada laboral. Esto ha provocado que la economía de los países se paralice y el comercio exterior se vea afectado.

El 13 de marzo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró a Europa como nuevo epicentro de la pandemia. Con fecha de 13 de abril, Europa reporta un total de 881.110 casos, 76.768 fallecidos y 221.548 recuperados². Italia registra 156.363 casos y 19.899 fallecidos, el primer contagio se reportó el 31 de enero con la llegada de dos turistas provenientes de China que llegaron a Milán, para el 21 de febrero se detectó un conjunto de contagio de 16 personas en Lombardía y 60 casos adicionales para el 22 de febrero. Para frenar las olas de contagio, decidieron terminar anticipadamente el carnaval de Venecia. El 11 de marzo, el gobierno italiano prohibió las actividades comerciales, excepto supermercados y farmacias.

España, país más afectado por el brote de virus en la Unión Europea, registra 169.496 casos y 17.489 fallecidos². El primer caso confirmado fue en la isla La Gomera el 31 de enero, durante los días 24 y 25 de febrero, se reportaron algunos casos provenientes de Lombardía. La Comunidad de Madrid es la más afectada del país con 47.146 casos y 25.385 fallecidos, seguida por Cataluña, Castilla-La Mancha y Castilla y León. El 14 de marzo, el Gobierno de España declaró el estado de alarma limitando la libre circulación de los ciudadanos. El 9 de abril, el congreso autorizó una prórroga de la emergencia hasta el 26 de abril.

Korea de Sur ha reportado 10.537 casos y 217 fallecidos², menos casos que los países europeos a pesar de estar cerca de China. No han aplicado medidas de cuarentena ni suspensión laboral, pero se aconsejó a los ciudadanos mantener una distancia social y realizaron una gran cantidad de pruebas con el objetivo de detectar y aislar la mayor cantidad de contagiados. También, se desarrolla una política de seguimiento y divulgación de datos, que ha sido criticada por falta de privacidad pero ha logrado disminuir la propagación del virus.

Estados Unidos, el país más afectado a la fecha, ha implementado medidas económicas históricas para frenar el impacto de la propagación del virus. El congreso de Estados Unidos llegó a un acuerdo para un rescate económico de 2.2 billones de dólares, que representa cerca de un 10% del PIB estadounidense, triplicando así la ayuda aprobada en el 2009 por la crisis financiera. New

* Integrante del Grupo de Estudios en Economía y Empresa (GEE) Universidad EAFIT. Email: megonzalea@eafit.edu.co

¹ Datos reportados por Corona Resource Center de la Universidad Johns Hopkins a la fecha de 13 de abril, 6 am. disponible en: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>

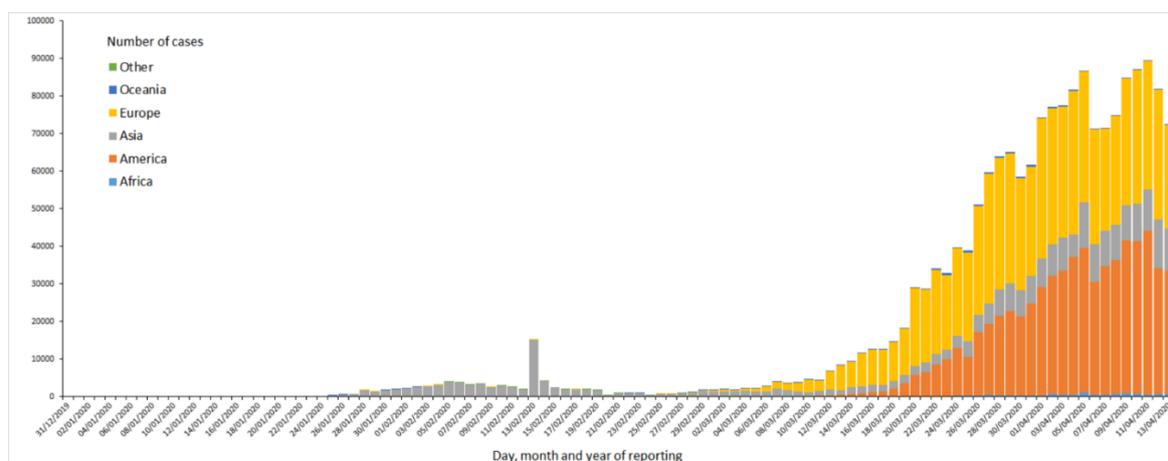
York, la ciudad más afectada del país, recibió el buque hospital USNS Comfort para poder ampliar la atención médica. A pesar de la cantidad de contagio, las autoridades no creen necesario una implementación de medidas de contención en New York, New Jersey y Connecticut, pero no descartan la posibilidad de imponer un aislamiento de corto plazo.

En Latinoamérica², Brasil es el país más afectado a la fecha con 22.318 casos y 1.230 fallecidos, pero no se han implementado una cuarentena a nivel nacional e incluso el gobierno central ha criticado las medidas de contención realizadas en ciertas gobernaciones locales. Chile reporta 7.213 casos, pero no ha decretado cuarentena a nivel nacional, y el Ministerio de Salud decretó el 29 de marzo una cuarentena solo para las ciudades de Chillán y Osorno.

En Ecuador, que reportó su primer caso el 29 de febrero y hasta la fecha ha reportado 7.466 casos, 333 fallecidos confirmados por COVID- 19 y 384 probables fallecidos por la enfermedad, se decretó el estado de emergencia sanitaria, tomando medidas para disminuir la propagación como cuarentena total, suspensión de la jornada laboral, toque de queda, declaración de la provincia de Guayas como zona de seguridad, movilización de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional y activación del Centro de Operaciones de Emergencia Nacional. También, el país ha reportado un número elevado de fallecidos, teniendo la mayor cantidad de fallecidos per capita de la región. El gobierno está ampliando su capacidad de realizar las pruebas; con compras de 100.000 pruebas rápidas y la misma cantidad para pruebas PCR, y la donación recibida de una Plataforma de Biología Molecular que facilitará el procesamiento de las pruebas, se han sumado también los laboratorios privados, la Universidad San Francisco de Quito y la Universidad Católica para aumentar el número de exámenes.

² Datos reportados por Corona Resource Center de la Universidad Johns Hopkins a la fecha de 13 de abril, 6 am. disponible en: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>

Gráfica 1: Casos diarios por continente



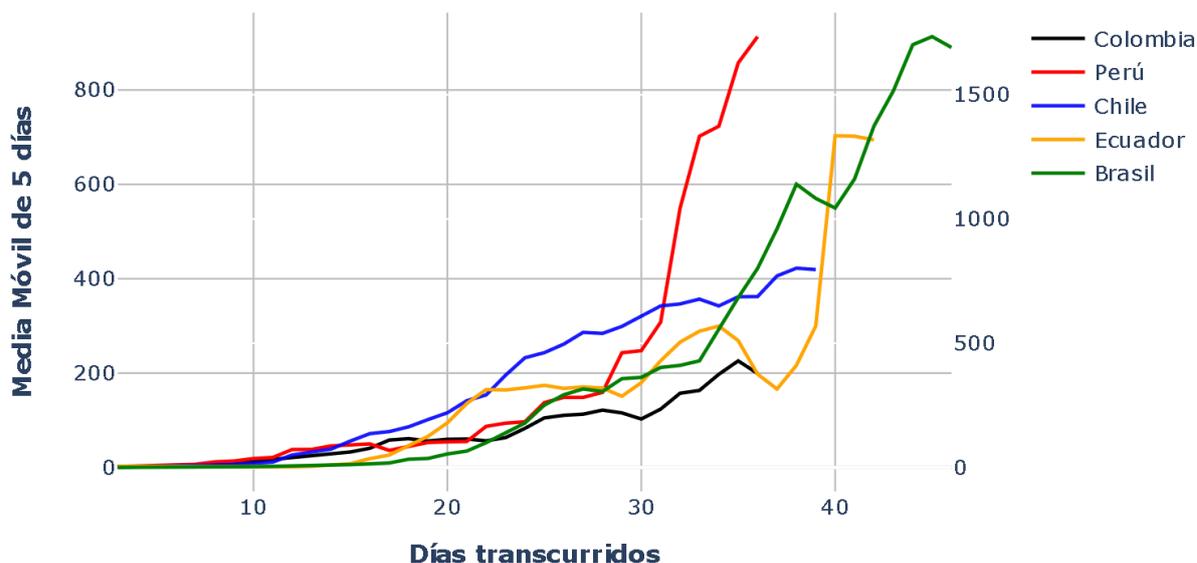
Fuente: European Centre for Disease Prevention and Control (13/4/2020)

1.1 Situación de Colombia con respecto al COVID-19

Colombia² reportó su primer caso el 6 de marzo y reporta hasta la fecha 2.776 casos y 109 fallecidos, siendo la ciudad de Bogotá con el mayor porcentaje de caso, 44%. El 17 de marzo, el gobierno cerró las fronteras terrestres, marinas y fluviales para prevenir la entrada de casos importados. Sin embargo, el 31 de marzo, el Ministerio de Salud confirma contagio comunitario y la entrada en la fase de mitigación de la pandemia. El ministerio anunció que un 11% de los casos registrados no tienen nexos con los casos importados. La cuarentena, decretada por el gobierno, inicio el 24 de marzo y tiene vigencia hasta el 27 de abril.

La Universidad de Johns Hopkins utiliza una media móvil para evaluar el porcentaje de cambio en el avance del virus dentro de un país. Este enfoque ayuda a evitar que eventos importantes (como un cambio en los métodos de informe) sesguen los datos. En la grafica 2, se muestra la media móvil de Colombia con respecto a los países de América Latina con la mayor cantidad de contagios; Brasil, Perú, Chile y Ecuador, tomando en cuenta los días que han transcurrido desde los primeros casos de cada país. Colombia ha mantenido la curva en niveles bajos, sin embargo, continua con cambios positivos en la media móvil.

Gráfica 2 Media Móvil de Colombia vs otros países latinos



Brasil, media móvil en el eje derecho. Ecuador, Perú, Chile y Colombia, en el eje izquierdo

Fuente: Elaboración propia con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

2 Difusión de una enfermedad

Las personas pueden contraer el virus mediante la interacción con una persona infectada, la posibilidad de interacción puede ser aleatoria y también puede tomar condiciones específicas para la transmisión de la enfermedad. Se supone también que una persona sana recientemente infectada pueda aumentar el contagio con interacciones con otros individuos (Jackson, 2008).

Para Matthew Jackson (2008), los modelos de propagación pueden responder a ciertas preguntas como: ¿En qué condiciones se propagará un brote inicial a una parte no trivial de la población?, ¿Qué porcentaje de la población eventualmente se infectará?, ¿Qué sucede si varias personas son inmunes a la enfermedad o requieren diferentes frecuencias de interacción para infectarse?, ¿Cómo la inmunización de la población afectaría la propagación de la enfermedad? Existen dos estrategias fundamentales para controlar la difusión de una enfermedad: mitigación, que se enfoca en desacelerar, pero no necesariamente detener, la propagación de la epidemia, reduciendo la demanda máxima de atención médica y protegiendo a las personas con mayor riesgo de enfermedad grave de la infección; y supresión, que tiene como objetivo revertir el crecimiento epidémico, reduciendo el número de casos a niveles bajos y manteniendo esa situación indefinidamente (Ferguson, y otros, 2020).

2.1 Revisión de la literatura recientes

Ferguson et al. (2020) realiza un estudio donde muestra como distintas medidas; solo cerrar escuelas y universidades, cuarentena, distancia social y aislamiento, pueden disminuir la propagación de la pandemia en el Reino Unido. Realizaron la estimaciones utilizando un R_0 de 2.4, tomando en cuenta que el periodo infeccioso dura en promedio 6.5 días y asumen un periodo de incubación de 5.1. Con una pandemia incontrolada, estimaron que Estados Unidos puede llegar 2.2 millones fallecidos y Reino Unido a 510 mil.

Ruiyun et al. (2020) estimaron como los infectados no documentados, es decir no detectados, afectaron en la propagación del virus SARS-CoV-2 en Wuhan, China. Utilizaron los casos reportados dentro de China y junto con los datos de movilidad infirieron características epidemiológicas asociadas al virus, utilizando un modelo de metapoblación dinámica en red e inferencia bayesiana. Estimaron que el 85% de todas las infecciones eran indocumentadas (con un intervalo de confianza de 95% [82% - 90%]) antes de las restricciones de viaje impuesta por el gobierno. Además, estimaron que las infecciones no documentadas fueron la fuente de infección para el 79% de los casos documentados, resaltando la importancia de realizar la mayor cantidad de pruebas posibles.

Wesley Pedden y Maria Chikina (2020) a través de la tesis de transmisión heterogénea que busca disminuir la cantidad de personas fallecidas variando la tasa de transmisión según los grupos vulnerables, concluyen que, al ignorar la distinción del perfil de edad de la cohorte final de individuos infectados, las estrategias que se centran en minimizar las tasas de transmisión en la mayor medida posible en toda la población podrían aumentar las muertes entre todos los grupos de edad.

Castro et al (2020) realizan simulaciones de modelos para estimar la propagación de la pandemia tomando en cuenta la cantidad de infectados no documentados, presentando recomendaciones para mejorar el modelo matemático y proponiendo recomendaciones para el diseño de política públicas que ayuden a minimizar los efectos negativos de la pandemia de la población en Ecuador. Los autores concluyen que el aislamiento social y la detección temprana son factores que pueden incidir en la reducción de la propagación.

3 Modelo de propagación SEIR

El modelo SEIR muestra cómo una enfermedad se propaga a través de una población. Es un acrónimo de Susceptible, Expuesto, Infectado, Recuperado. Es una extensión del modelo SIR expuesto por Kermack y McKendrick (1927). Teniendo las siguientes ecuaciones:

$$N = S + E + I + R \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\beta SI \quad (2) \quad \frac{\partial I}{\partial t} = \alpha E - \gamma I \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \beta SI - \alpha E \quad (3) \quad \frac{\partial R}{\partial t} = \gamma I \quad (5)$$

Donde:

N es el tamaño total de la población

α es el inverso del período de incubación ($1 / t_{\text{incubación}}$).

β es la tasa de contacto promedio en la población.

γ es el inverso del período infeccioso medio ($1 / t_{\text{infeccioso}}$).

Los parámetros que se utilizan son; el inverso del período de incubación (α), la tasa de contacto promedio en la población (β) y el inverso del periodo infeccioso medio (γ). Con la división de los dos últimos parámetros, se calcula el R_0 que es un término matemático e indica cuán contagiosa es una enfermedad, es decir, el número promedio de personas que contraerán una enfermedad de una persona contagiada. El parámetro va cambiando con el tiempo y el objetivo es que el R_0 sea menor a 1 para controlar la infección dentro de una población.

Para poder realizar el modelo SEIR, se utilizó un R_0 de 2.5 que fue estimado por el Centro Chino para el Control y Prevención de Enfermedades, que concuerda con los datos publicados por Antoni Trilla (2020) donde indica que el R_0 puede estar entre 1.5 y 2.5. Según Wang et al. (2020), el periodo medio de que una persona puede pasar de infectada a recuperada (o fallecida) es de 15 días, obteniendo un parámetro de 0.066 (γ). Andrew Atkeson (2020), fija el periodo de incubación de 5.2 días, obteniendo un parámetro de 0.19 (α).

Para tomar en cuenta cómo la distancia social puede afectar el número de contagiados y cómo la rápida detección de los casos infectados y su aislamiento puede ayudar a disminuir la propagación, se agregaron dos parámetros; ρ que corresponde al aislamiento social y va entre 0 (total aislamiento) y 1(sin aislamiento), y θ que corresponde a inverso de los días que han

transcurrido desde el periodo de incubación hasta el resultado de la prueba y su posterior aislamiento, es decir, con una mayor cantidad de pruebas realizadas podemos disminuir el tiempo de detección. Teniendo como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\rho\beta SI \quad (6) \quad \frac{\partial I}{\partial t} = \alpha E - \theta I \quad (8)$$

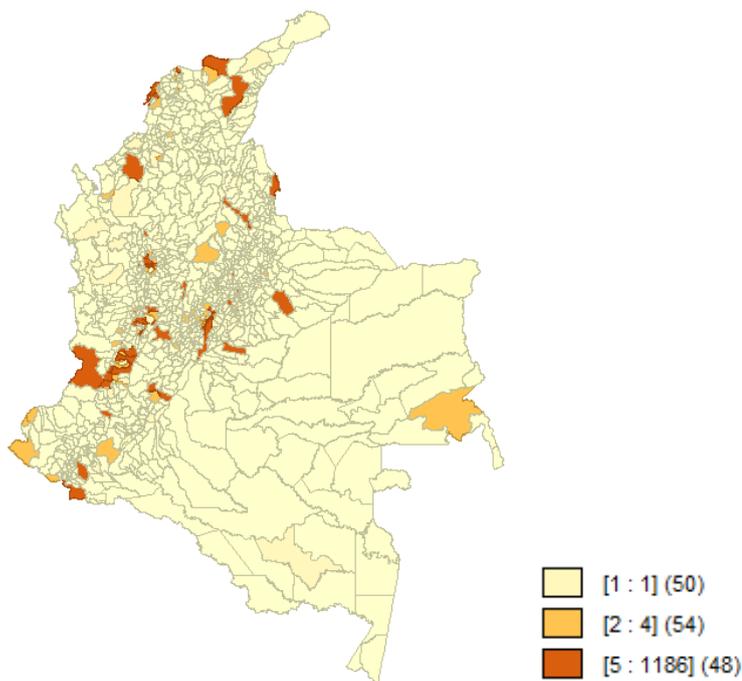
$$\frac{\partial E}{\partial t} = \rho\beta SI - \alpha E \quad (7) \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = \theta I - \gamma Q \quad (9)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \gamma Q \quad (10)$$

4 Resultados

Para fijar el porcentaje de la población infectada, expuesta y recuperada, se utilizó la información publicada por el Instituto Nacional de Salud de Colombia (INS) con fecha de 13 de abril: 2776 casos confirmados, 270 recuperados y 109 fallecidos. El tamaño de la población susceptible, asumiendo que durante la cuarentena no existan desplazamiento entre departamentos, es el total de la población de los municipios que han confirmado casos positivos, es decir, 26`128.023 personas.

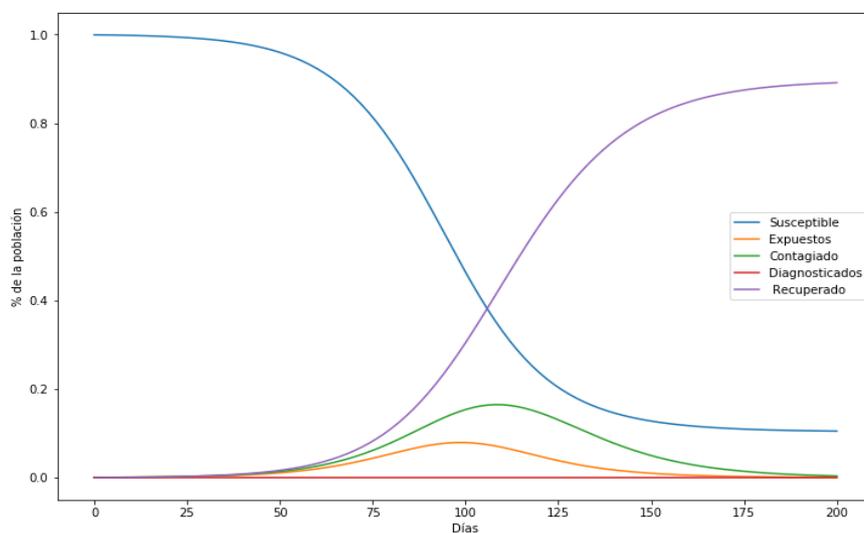
Ilustración 1: Municipios con casos de COVID - 19 reportados



Fuente: Elaboración propia con datos hasta el 13/04/2020 del Instituto Nacional de Salud (INS)

Las simulaciones de los casos se la realizaron en Python 3 utilizando los parámetros mencionados anteriormente y partiendo desde la fecha 13 de abril de 2020. En la grafica 3, se muestra el modelo SEIR sin ninguna intervención, es decir, hasta que la población alcance una inmunidad de colectiva con respecto al virus (situación donde hay una cantidad suficiente de persona que adquieren inmunidad contra una infección). Esta inmunidad se comienza a alcanzar cuando la curva acumulada de recuperados supere a la curva de la población total susceptible, esto provoca que la cantidad de infectados diarios llegue a su máximo y comience a disminuir los infectados nuevos.

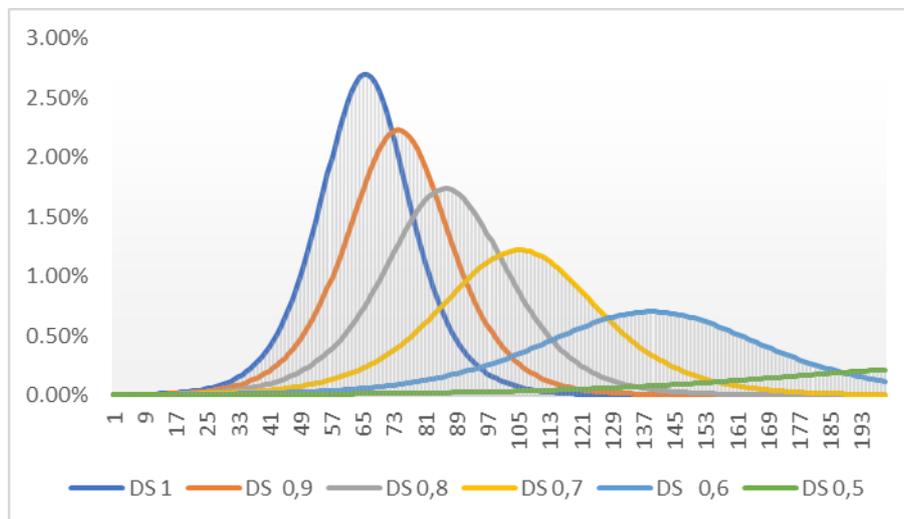
Gráfica 3 Modelo SEIR Colombia



Fuente: Elaboración por autor, simulación en Python

Para evaluar la distancia social, cambiando el parámetro ρ de las ecuaciones 6 y 7, se realizó una simulación con un parámetro de 1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 y 0.5. En la gráfica 4, la cantidad de contagiados por días se van disminuyendo con medida que se aumenta el parámetro de la distancia social. El objetivo de la distancia social es aplanar la curva para que no se llegue a colapsar el sistema de salud. Para identificar el aplanamiento de una manera estadística, se calcula la curtosis para demostrar si las curvas son leptocúrticas, mesocúrtica o platicúrtica. Las curvas leptocúrticas son aquellas que los datos están concentrados en la media y son alargadas, las curvas mesocúrticas tienen una distribución normal de los datos y las curvas platicúrticas tienen poca concentración de datos en la media y por lo tanto son más achatadas. Teniendo como resultado que las curvas con un distanciamiento social de 1, 0.9 y 0.8 son leptocúrticas, y las curvas de 0.7, 0.6 y 0.5 son platicúrtica.

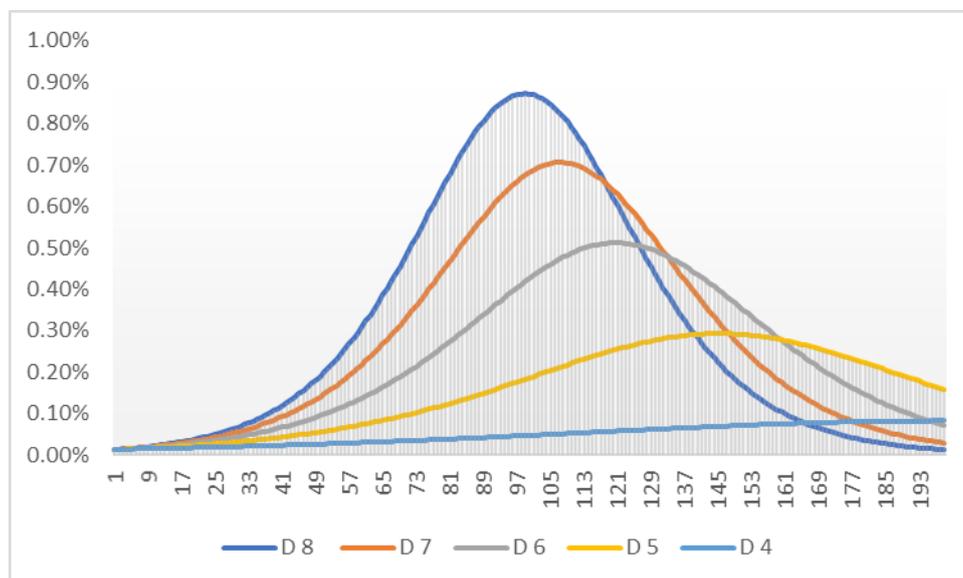
Gráfica 4 Infeccionados por día, aislamiento social.



Fuente: Elaboración por autor, simulación en Python

Ruiyun et al. (2020) identificaron que el 85% de los infectados no eran documentados antes de la cuarentena en Wuhan, también menciona que las infecciones indocumentadas fueron la fuente de infección para el 79% de los casos documentados. Demostrando la importancia de realizar pruebas para detectar y aislar a las personas contagiadas para poder frenar la propagación del virus. El parámetro θ que corresponde a inverso de los días que han transcurrido desde el periodo de incubación hasta el resultado de la prueba y su posterior aislamiento para evitar nuevas propagaciones. Dentro de la simulación se disminuyeron los días transcurrido progresivamente; 8, 7, 6, 5 y 4. En todos los casos, se logra disminuir los contagiados máximo por día comparando con solo la aplicación del aislamiento social.

Gráfica 5 Infectados diarios, desde el tiempo de incubación a resultado de las pruebas



Fuente: Elaboración por autor, simulación en Python

5 Difusión de una enfermedad a través de una red.

Una forma de analizar el proceso de propagación de una plaga es creando una red aleatoria y luego elegir al azar un nodo infectado que pueda infectar a los nodos vecinos con cierta intensidad. También, los nodos infectados pueden alcanzar un estado de recuperación o expulsión del sistema con alguna intensidad (Jackson, 2008). Red aleatoria hace referencia a una construcción probabilística de una red. Consiste en dos términos; los conjuntos de posibles redes que pueden ser formadas entre los conjuntos de nodos (n) y links (l), y una densidad de probabilidad τ especificando la probabilidad ex-ante con la que se selecciona una red (Vega-Redondo, 2007).

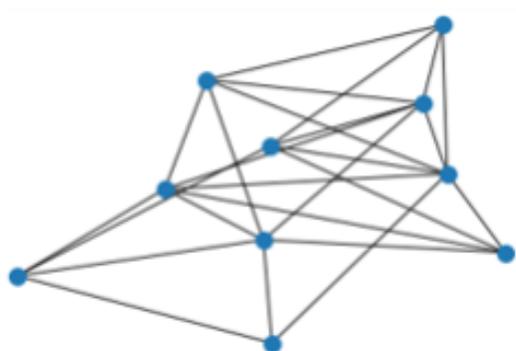
$$P(\tau) = \left(\frac{n(n-1)}{2l} \right)^{-1}$$

5.1 Simulación de difusión en una red aleatoria con el modelo SEIR

Se analizó la medida de aislamiento social mediante redes aleatorias Erdős-Rényi, con el objetivo de ejemplificar el esparcimiento del virus en las interacciones humanas y demostrar la

importancia de la distancia social en la disminución de la velocidad propagación de este. La distancia social se puede medir en la disminución de las conexiones entre los nodos, en este caso personas. En la ilustración 2 y 3, se muestran redes aleatorias de 10 nodos con y sin política de aislamiento. En la gráfica 4 y 5, se muestran las simulaciones de la difusión del virus a través de redes aleatorias de 1000 nodos cada una, pero con 4941 conexiones y 2546 respectivamente. Para la propagación del virus se utilizó un modelo SEIR con 300 iteraciones. Obteniendo como resultado que; una red aleatoria sin distancia social puede alcanzar un máximo diario de un 12% de la población infectada, y una red con distancia social puede alcanzar un máximo diario de un 0.4% de la población infectada.

Ilustración 2: 10 nodos sin política de aislamiento



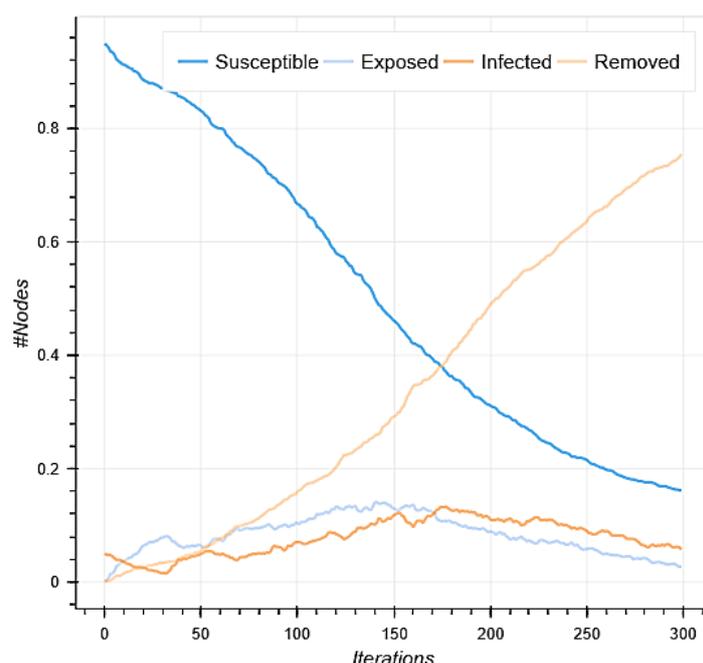
Fuente: Elaboración por autor, simulación de red aleatorio en Python.

Ilustración 3 : 10 nodos con política de aislamiento



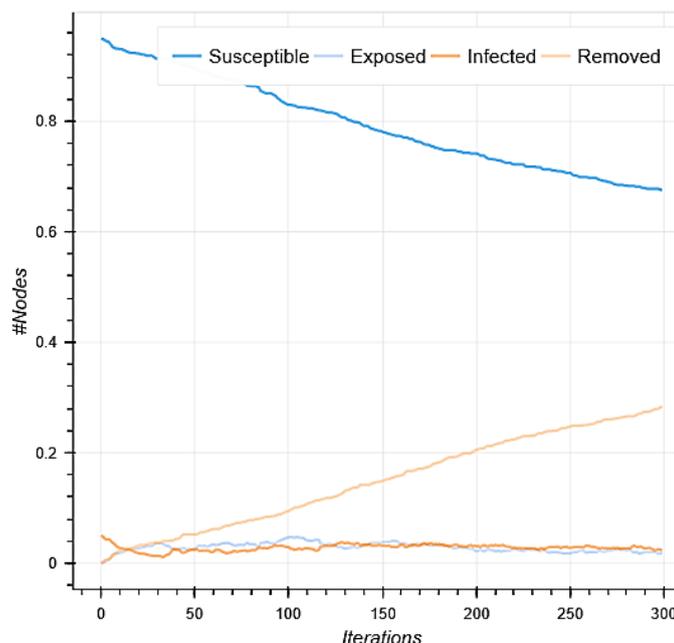
Fuente: Elaboración por autor, simulación de red aleatorio en Python.

Gráfica 6: Red con 1000 nodos y 4941 conexiones



Fuente: Elaboración por autor, simulación de red aleatorio en Python.

Gráfica 7: Red con 1000 nodos y 2546 conexiones



Fuente: Elaboración por autor, simulación de red aleatorio en Python.

6 Comentario

Quaranta giorni, bali bali o "Nothing is shut down" ³

La gripe española representó la pérdida estimada de 50 millones de personas⁴, en ese tiempo fue completamente ignorada por los gobiernos para poder concentrar todos los recursos en la Primera Guerra Mundial. En ese entonces no había un desarrollo científico y tecnológico tan avanzado como lo tenemos ahora, el genoma del virus SARS-CoV-2 fue publicado en un tiempo récord por investigadores chinos e inmediatamente comenzó una carrera para alcanzar una vacuna que nos proteja. Sin embargo, el virus es completamente nuevo para la humanidad y

³ **Quaranta giorni**: origen italiano de la palabra cuarentena. Durante la peste bubónica, los buques eran obligados a estar 40 días sin poder desembarcar en el puerto para evitar la importación de infectados.

Bali: Rápido en coreano. Bali bali, hace referencia a la importancia de hacer pruebas y aislamiento rápidamente.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-51836302>.

"Nothing is shut down": declaración de Donald Trump, presidente de Estados Unidos, el 9 marzo de 2020
<https://www.bbc.com/news/world-us-canada-51818627>.

⁴ Pandemia de 1918 (virus H1N1), Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades: <https://www.cdc.gov/flu/pandemic-resources/1918-pandemic-h1n1.html>.

representa un desafío entre los gobiernos de distintos países y una cooperación mundial de gran magnitud, no vista desde la Segunda Guerra Mundial.

Esto ha provocado que los sistemas de salud colapsen en muchos países, dando paso a la posibilidad que los médicos seleccionen quién tiene la prioridad de una cama en UCI⁵. Un cuarentena total provoca grandes daños en la economía, pero los gobiernos no deberían minimizar la enfermedad comparándola con una simple gripe. Se deben tomar medidas de política económica que permitan sobrellevar la crisis sin descuidar la vida humana que es lo más importante.

El virus llegó a distintos países de Latinoamérica, manera distinta a cada país, dadas las condiciones sociales diferentes en cada uno. No obstante, es evidente que la mayoría de los países de América latina tienen un sistema de salud deficiente en comparación al europeo y norteamericano.

Como conclusión y comentario personal, la región necesita cooperar mutuamente, buscar ayuda internacional y una increíble actuación de la sociedad civil para afrontar la crisis. En Guayaquil, Ecuador, la crisis ha sobrepasado la capacidad de atención de los hospitales y ha llevado a un colapso de las funerarias lo cual ha provocado demoras en la recolección de los cuerpos de los fallecidos⁶. Todos debemos tener una participación dentro de la crisis; respetando la distancia social, respetando la cuarentena, evitando las compras de pánico y, especialmente, ayudar a las personas más vulnerables.

⁵ Reportaje de El Mundo: "Los médicos elegirán a quién ingresar en la UCI según su esperanza de vida": <https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/salud/2020/03/20/5e73dc15fdddf8e518b4640.html>.

⁶ Reportaje de DW: "La ciudad de Guayaquil, desbordada, no puede ni enterrar a sus muertos": <https://www.dw.com/es/la-ciudad-de-guayaquil-desbordada-no-puede-ni-enterrar-a-sus-muertos/a-52986490>.

Referencias bibliográficas

- Atkeson, A. (2020). What will be the economic impact of covid-19 in the us? Rough estimates of disease scenarios. *NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH*.
- Castro, P., De los Reyes, J. C., González, S., Merino, P., & Ponce, J. (2020). *Modelización y simulación de la propagación del virus sars-cov-2 en ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional de Ecuador .
- Ferguson, N., Laydon, D., Nedjati-Gilani, G., Imai, N., Ainslie, K., & Baguelin, M. (2020). *Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID19 mortality and healthcare demand*. Londres: Imperial College London.
- Jackson, M. O. (2008). *Social and Economic Networks*. New Jersey: Princeton University Press.
- Pegden, W., & Chikina, M. (2020). *Carnegie Mellon University*. Obtenido de Fighting COVID-19: the heterogeneous transmission thesis: <http://math.cmu.edu/~wes/covid.html>
- Ruiyun, L., Sen, P., Bin, C., Yimeng, S., Tao, Z., Wan, Y., & Shaman, J. (2020). Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2). *Science*.
- Trilla, A. (2020). Un mundo, una salud: la epidemia por el nuevo coronavirus COVID-19. *Medicina Clinica*.
- Vega-Redondo, F. (2007). *Complex Social Networks*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Wang, H., Wang, Z., Dong, Y., Chang, R., Xu, C., Yu, X., . . . Cai, Y. (2020). Phase-adjusted estimation of the number of Coronavirus Disease 2019 cases in Wuhan, China. *Cell Discovery*.