



Análisis de las propiedades topológicas del riesgo por pandemia de COVID-19 en México

Bermeo Fernández, Luis Antonio¹; Leo Paniagua, Rodrigo¹

Profesor: Dorantes Gilardi, Rodrigo¹

(1) El Colegio de México, Centro de Estudios Económicos

Carretera Picacho Ajusco 20 Ampliación, Fuentes del Pedregal, 14110 Tlalpan, CDMX,
México

22 de mayo de 2021

Resumen: El rápido crecimiento de la pandemia de COVID-19 en la mayor parte del mundo ha exhibido nuestra vulnerabilidad ante nuevos agentes infecciosos y motivado a un rápido crecimiento de la literatura que ayude a mejorar nuestro conocimiento y decisiones ante este tipo de eventos. En México la pandemia ha cobrado la vida de mas de 200,000 personas, y provocado importantes costos económicos debido a las restricciones impuestas por el gobierno para “planar la curva”; los costos económicos, sociales y en vidas humanas han motivado a la nueva literatura a considerar nuevas técnicas que permitan superar la limitaciones de los modelos epidemiológicos tradicionales, en este sentido en este trabajo se estudia la implementación de un modelo de red para analizar el riesgo sistemático de una pandemia en México parecido a los modelos aplicados al sistema financiero. Los datos fueron obtenidos de la Dirección de Epidemiología de la Secretaría de Salud, el análisis de red se ha hecho mensual y se ha estudiado a nivel estatal.

Palabras clave: Pandemia, México, COVID-19, Análisis topológico, riesgo de contagio sistemático

1. Introducción

En Diciembre del 2019 se identificó en la ciudad de Wuhan de la provincia de Hubei, China un agente infeccioso etiológicamente desconocido, en Febrero del 2020 el virus se había dispersado por China continental y algunos otros países como Tailandia, Estados Unidos, Italia, Japón, entre otros, el 13 de Marzo la OMS declaró iniciada la pandemia de COVID-19, actualmente el virus se ha dispersado por todos los continentes generando importantes costos económicos y de salud [1] [2]. El comité internacional en taxonomía de virus nombró el 11 de Febrero a este agente infeccioso como SARS-CoV-2 y se determinó causante de la enfermedad de COVID-19. El SARS-CoV-2 es un RNA virus de cadena simple positiva, como otros coronavirus infecta las células capilares del epitelio pulmonar, provoca una fuerte respuesta inflamatoria, síndrome agudo de dificultad respiratoria, choque séptico e incluso la muerte [4]. El SARS-CoV-2 se transmite principalmente persona a persona y se ha documentado la fácil perdida de sus factores de virulencia bajo condiciones am-

bientales lo cual hace poco viable su transmisión por otras vías, asimismo la rápida dispersión del virus, la elevada tasa de mortalidad, la saturación de los servicios médicos y la falta de fármacos eficientes contra el virus ha obligado a los gobiernos de todo el mundo a la implementación de intervenciones no farmacéuticas con el objetivo de disminuir el impacto de la pandemia. [3] [4]

En primer caso reportado en México fue el 27 de Febrero del 2020 en la Ciudad de México en un paciente con antecedentes de haber viajado a Italia, un día después se detectaron dos nuevos casos uno en la Ciudad de México y otro en Sinaloa, ambos con antecedentes de haber viajado a Italia. Con base a la información disponible, el gobierno de México diseñó una estrategia en 3 etapas: 1) Importación viral 2) Dispersión comunitaria 3) Fase de epidemia. El 24 de Marzo se declaró iniciada la fase 2 e implementó el cierre de actividades no esenciales (las cuales se determinaron como aquellas que no afectan la operación de las empresas, organizaciones y gobierno),

la estrategia de confinamiento se basó en la mitigación más que en la supresión con el objetivo de «aplanar la curva». El 30 de Marzo el gobierno estableció: «Emergencia sanitaria por causa de fuerza mayor», finalmente el 21 de Abril se inició la fase 3 la cual se encuentra vigente a la fecha. [5] [6]

La pandemia de COVID-19 ha mostrado nuestra vulnerabilidad ante los patógenos infecciosos, el COVID-19 ha generado importantes costos humanos y económicos no observados en al menos 100 años, por este motivo ha habido un rápido crecimiento en la literatura disponible para estudiar que permita estudiar la dinámica de las enfermedades infecciosas con el objetivo de que los gobiernos pueden actuar con mejor precisión y de forma eficiente a futuras infecciones, los modelos epidemiológicos tradicionales carecen de considerar el comportamiento de los individuos y la estructura social a cambio de una mayor tratabilidad analítica, la nueva literatura se ha enfocado principalmente en 2 ejes, el primero, incluye dentro de un modelo epidemiológico cuantitativo una tasa de infección endógena que busque simular la influencia del comportamiento y estructura social en la dinámica de la infección; el segundo, un enfoque empírico en el cual se estudian las respuestas y los resultados que la implementación de estrategias de mitigación, supresión y descentralizadas tienen en la dinámica de la pandemia y sus costos económicos [7] [8] [9]. Sin embargo, estos enfoques carecen de resolver algunos hechos estilizados observados durante la pandemia de covid-19, es por eso que algunos autores han implementado modelos de red con el objetivo de simular la estructura de los contactos reales entre los individuos, aunque la estructura de una red social está muy lejos de una red con propiedades topológicas algunas características como la del mundo pequeño podrían explicar el tipo de forma que han tomado la evolución de la infección. [10]

La teoría de redes se ha usado ampliamente en la medicina para estudiar la coexpresión genes, la evolución genética de las enfermedades, estudiar la relación virus huésped, la coexistencia de enfermedades, y recientemente estudiar la dinámi-

ca de las infecciones [12] [2], algunos artículos han buscado explicar la influencia de los contactos en la dispersión y control del MERS-CoV del 2012 y SARS-CoV del 2002 [11]; otros modelos de redes pueden explicar la existencia del equilibrio endémico de algunas infecciones como el VIH, Cantin y cols [13], demuestran la coexistencia de un equilibrio libre de pandemia y el equilibrio endémico, encuentran además que existe una estructura óptima que minimiza los contagios y permite alcanzar el equilibrio libre de pandemia, estos resultados por lo tanto podría ser de ayuda al diseño de nuevas políticas de salud pública. Por otro lado, Mike So y cols [2] [14] propone en dos artículos recientes el uso de modelos de red para estudiar el riesgo sistémico de desarrollar un pandemia, la motivación que da origen a su modelo es una observación de la interconectividad del sistema financiero, en particular como esta puede colapsar a través de una propagación de insolvencia, falta de liquidez y perdidas como la ocurrida durante la crisis del 2008.[10]

En este trabajo se retoma la metodología propuesta por Mike So y cols [2] [14] para estudiar la el riesgo sistemático de contagio en México durante la pandemia de COVID-19 y entender mejor la dinámica que ha seguido. La estructura del trabajo se divide de la siguiente forma: En el capítulo 2 haremos una descripción de la base de datos y las variables utilizadas para nuestro modelo, posteriormente en el capítulo 3 mencionaremos la metodología utilizada para estudiar el riesgo sistemático de contagio, así como los índices utilizados para la evaluación del modelo; en la parte 4 presentaremos los resultados obtenidos así como las redes por períodos de 1 mes para estudiar de manera visual el transcurso de la pandemia y compararla con la dinámica de casos diarios. Finalmente las conclusiones se presentan en la sección 5.

2. Datos

Los datos se obtuvieron de la red de datos abiertos de la Secretaría de Salud que la Dirección General de Epidemiología actualiza cada noche, se descargó la base datos correspondiente al archivo de datos abiertos covid 19, en este archivo se encuentra un registro de todas las pruebas realiza-

das en unidades médicas, un código de registro, el resultado de la prueba, datos demográficos y existencia de comorbilidades, adicionalmente registra si se requirió hospitalización, unidad de cuidados intensivos, intubación y si murió. El interés del proyecto es la construcción de redes estáticas basadas en la tasa contagio diarios, por lo tanto tomamos la variable *ENTIDAD_UM* como el lugar de residencia del individuo y usamos la variable *CLASIFICACION_FINAL* para identificar si el caso es positivo o negativo, en este estudio consideraremos que el resultado es positivo si satisface alguna de las siguientes condiciones: 1) El posible caso de COVID-19 confirmado por asociación clínica epidemiológica, 2) El posible caso de COVID-19 confirmado por comité de dictaminación o 3) Es un caso de SARS-COV-2 confirmado.

Para la base de datos construimos un *Data Frame* que contiene 3 variables; entidad, fecha y casos. La entidad y la fecha deben ser únicas correspondiente al estado y la fecha; mientras que el número de casos corresponde al total de resultados positivos para la fecha y estado correspondiente como se mencionó en el párrafo anterior, el lector puede consultar nuestra base de datos en el Apéndice online que se adjunta al archivo.

3. Metodología

Seguiremos una metodología similar a la propuesta por Mike So [14], el procedimiento general consta de tres pasos: 1) Calculo de correlaciones entre los estados por periodos de tiempo 2) Construcción de la red y 3) Calculo de las propiedades topológicas de la red.

3.1. Construcción de la Red

Sea $x_{i,t}$ el número de casos confirmados al tiempo t del estado i , definimos como el cambio diario por cada estado como $Y_{i,t} = \sqrt{X_{i,t}} - \sqrt{X_{i,t-1}}$. Calculamos la correlación entre el estado i y el estado j al tiempo t "que denotamos como $\rho_{ij,t}$ " como la correlación entre los cambios diarios de ambos estados para un periodo de tiempo $t + k_t$ donde k_t son los días de duración del mes correspondiente a t (i.e consideramos t como enero 2020, febrero 2020, y así sucesivamente hasta abril 2021). Para cada t construimos la

red correspondiente a dicho periodo como aquella cuyos nodos son los estados de la república, y usando la siguiente regla de correspondencia para las aristas:

$$A_{ij,t} = \begin{cases} 1 & \text{si } \rho_{ij,t} > 0,8 \\ 0 & \text{si e.o.c} \end{cases} \quad (1)$$

3.2. Propiedades topológicas

Denotamos como E_t al número de ejes al tiempo t . Definimos la densidad de la red al tiempo t que denotamos por D_t como sigue:

$$D_t = \frac{E_t}{496} \quad (2)$$

Como observación, dado que mantenemos el número de ejes fijo se tiene que la densidad es un rescalamiento del número de ejes. Definimos el "local clustering coefficient" c_{it} al tiempo t por el número dado por:

$$c_{it} = \frac{e_{it}}{\binom{k_{it}}{2}} \quad (3)$$

donde e_{it} es el número de pares conectados a través de sobre los vecinos del vértice i . El "average clustering coefficient" C_t se calcula como:

$$C_t = \frac{\sum_i \binom{k_{it}}{2} c_{it}}{n} \quad (4)$$

4. Análisis de Resultados

En la Figura 1 (para mejor visualización se recomienda acceder al apéndice online) se presenta una visualización de las redes estáticas creadas a partir de los datos obtenidos, esta visualización nos da una rápida idea de la evolución de la pandemia a lo largo y ancho de la república mexicana, se puede apreciar que durante el mes de Enero y Febrero, cuando no se registraba ningún caso todavía de SARS-CoV-2 el mapa aparece en blanco, como se mencionó en la sección 1 a finales de Marzo se confirmó el primer caso y aunque los casos seguían aumentando observamos gráficamente que el riesgo sistemático se mantenía bajo, como mencionamos en la sección 1 el 24 de marzo del 2020 se inició la segunda fase y se cerraron las actividades no esenciales, sin embargo como confirman la figura 2.b y 2.c a este periodo de tiempo tanto la densidad de la red como

el Clustering coefficient permanecían bajos por lo que la decisión se considera adelantada, por otro lado como se observa en Abril la pandemia se acelera considerablemente como se observa en la figura 2 (la pendiente de las figuras es considerablemente alta), esta tendencia se observa un mes antes de que el país pasara completamente al semáforo rojo (mayo) y se mantiene los siguientes meses como se observa en la visualización el riesgo sistemático de contagio aumento rápidamente por lo que las restricciones impuestas durante estos periodos fueron insuficientes para frenar la dispersión. Con la aceleración de la pandemia el gobierno implementó medidas mas drásticas de mitigación que como se puede ver en la figura 2 tuvieron efecto en el mes de Julio, este efecto positivo que es observado también en la serie temporal de casos diarios motivó al gobierno a relajar las medidas de confinamiento con el objetivo de reactivar la economía, sin embargo como se observa en la figura 2 estas relajaciones se realizaron en un momento en el que el riesgo sistemático era alto por lo que rápidamente los coeficiente comenzaron a subir, el incremento de estos coeficientes se observa en el mes de octubre lo cuál presume una ventaja predictiva a la de muchos especialistas que detectaron el cambio de dirección en noviembre y la decisión tardía del gobierno en endurecer sus políticas de mitigación, esta reacción tardía llevó al país a una segunda oleada antes de terminar de mitigar la primera que alcanzó los niveles más altos en muertes y casos.

De acuerdo con Eichenbaum y cols [9] tomar decisiones tempranas de confinamiento implica costos económicos importantes, por otro lado trabajos como [7] y cols argumentan que un confinamiento total y temprano (antes de alcanzarse velocidades de infección por encima de $1/2$) es una elección óptima (sin considerar futuros rebrotes y suponiendo que se puede vigilar exitosamente la trayectoria de infección) por lo que la importante aceleración ocurrida a finales de abril habría privado la oportunidad de realizar un confinamiento eficiente. Por lo tanto, este modelo de visualización de red ofrece una alternativa para poder adelantar la tendencia de la pandemia y evaluar el riesgo sistemático con el objetivo de diseñar mejores políticas públicas durante el trans-

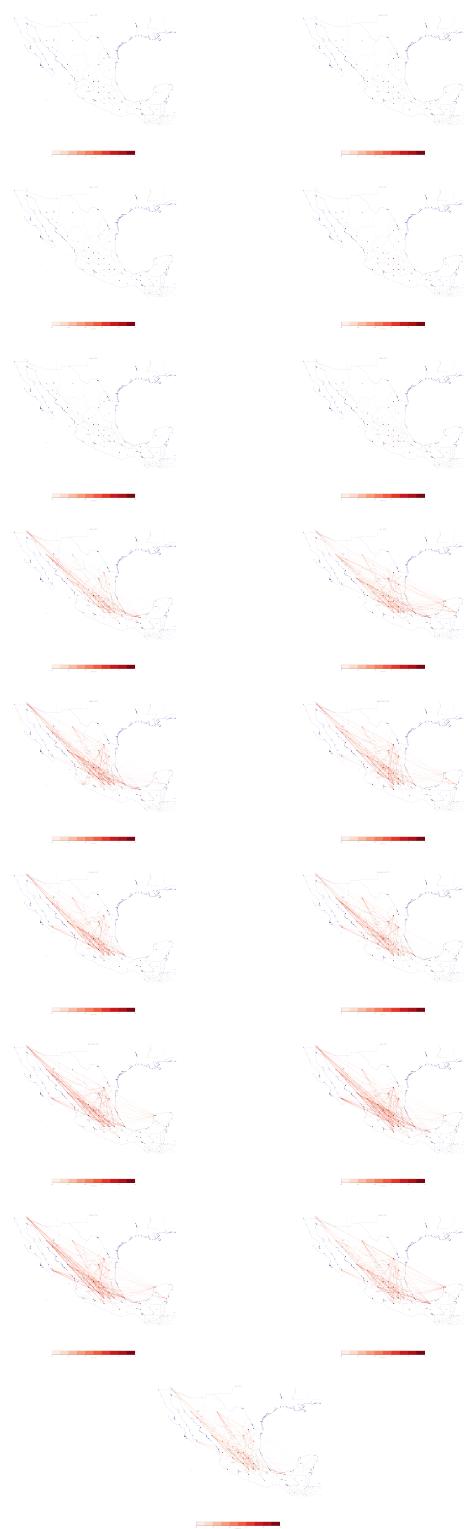


Figura 1: Evolución de la pandemia en México

curso de la infección.

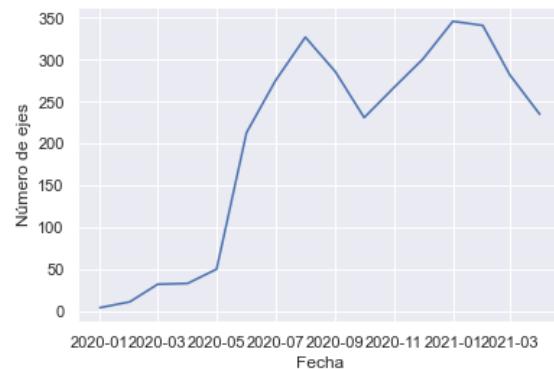
Por otro lado, una crítica constante que muchos autores critican de este tipo de modelos es el no considerar los costos económicos al momento de evaluar la dinámica de la pandemia y considerar únicamente la trayectoria de infección en la toma de decisiones, y por lo tanto tomar decisiones que no minimizan la caída del producto y las muertes por lo que futuras investigaciones podrían enfocarse a añadir los efectos económicos al modelo de red. Adicionalmente, una ventaja de este modelo es el estar libre de escala en el número de pruebas, esto debido que se comparan las tendencias en los casos confirmados entre los estados y no su valor absoluto, por lo tanto podría ser una ventaja principalmente en países donde el número de pruebas es limitado.

5. Conclusiones

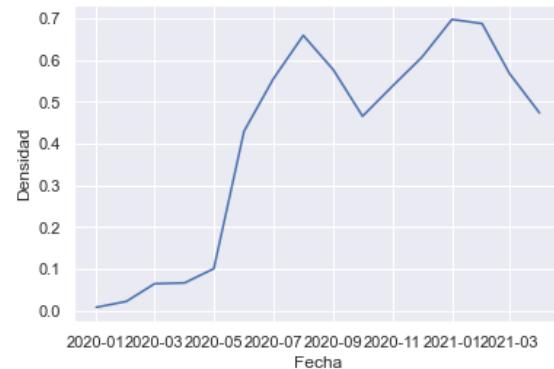
La pandemia de COVID-19 ha dejado en claro nuestra necesidad de mejorar los modelos epidemiológicos tradicionales con el objetivo que nos permitan actuar de forma más eficiente ante la dinámica de una infección a gran escala como la actualmente vivimos. En muchos países las estrategias retrasadas e insuficientes de los hacedores de política ha llevado a saturaciones y problemas de abastecimiento de los servicios médicos agudizando los efectos de la pandemia en la población, este modelo de visualización del riesgo sistemático ofrece un valor predictivo al considerar las tendencias que siguen el número de confirmados en lugar de sus valores absolutos por lo que podría ser de gran utilidad a corregir las políticas seguidas. El modelo resulta una forma sencilla y eficiente de entender la dinámica de la pandemia visto desde el punto de vista de un problema de redes. Finalmente es necesario mejorar el modelo para incluir la relación que existe entre el confinamiento y los costos de la pandemia y determinar de que forma el planeador social debería actuar ante el incremento del riesgo pandémico.

6. Agradecimientos y Apéndice online

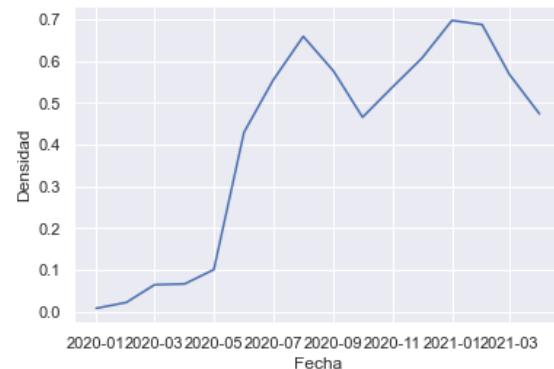
Agradecemos al Colegio de México y principalmente a los profesores Rodrigo Dorantes y Diana Terraza por su apoyo y conocimientos otorga-



(a) trayectoria del número de ejes



(b) trayectoria de la densidad



(c) trayectoria del Clustering average coefficient

Figura 2: Propiedades topológicas

dos para la realización de este trabajo. el apéndice online se accede a través de la siguiente liga: <https://github.com/r-leo/proyecto-redes>

Referencias

- [1] Huihui Wang, Xuemei L, et al. "The genetic sequence, origin, and diagnosis of SARS-CoV-2" *European Journal of Clinical Microbiology Infectious Diseases* Vol. 39 (2020) p. 1629–1635.
- [2] Mike K.P., et al. "Visualizing COVID-19 pandemic risk through network connectedness" *International Journal of Infectious Diseases* Vol. 96 (2020) p. 558-561.
- [3] Lvliang Lu., et al. " comparison of mortality-related riskfactors of covid-19, sars, and mers: A systematic review and meta-analysis." *Journalof Infection* Vol. 81(4) (2020) p. 558-561.
- [4] W. Joost Wiersinga, Andrew Rhodes. , et al. " Pathophysiology,transmission, diagnosis, and treatment of coronavirus disease 2019: A review" *JAMA* Vol. 324(8) (2020) p. 18-25.
- [5] José Salvador Aburto-Morales, Josefina Romero-Méndez. , et al. "México ante la epidemia de covid-19 (sars-cov-2) y las recomendaciones al subsistema nacional de donación y trasplante" *Revista Mexicana de Trasplantes* Vol. 9(1) (2020) p. 6-14.
- [6] Xavier Escudero, Jeannette Guarner, et al. "La pandemia de coronavirus sars-cov-2 (covid-19): situación actual e implicaciones para México" *Cardiovascular and Metabolic Science* Vol. 31(3) (2020) p. 170-177.
- [7] Cem C akmakli Selva Demiralbnem Kalemli O zcan Sevcan , et al. 'Covid-19 and emerging markets: An epidemiological model with international production networks and capital flows.' *IMF Working Papers* 20/133
- [8] VanVuren, T.A., et al. "How should policy responses to the covid-19 pandemic differ in the developing world?" *NBER Working Paper* 27273
- [9] Martin S. Eichenbaum, M. T., Sergio Rebelo."he macroeconomics of epidemics." *NBER Working Paper No. 26882*
- [10] Hanel, S. T. , et al. "network-based explanation of why most covid-19 infection curves are linear." *Proceedings of the National Academy of Sciences* Vol. 117 (37) p. 109-13.
- [11] Yang, C.H., Jung, H. "Topological dynamics of the 2015 South Korea MERS-CoV spread-on-contact networks" *Sci Rep* Vol. 10, 4327.
- [12] Lynn Law, Marcus J. Korth, Arndt G. Benecke, Michael G. Katze. "Systems virology: host-directed approaches to viral pathogenesis and drug targeting" *Nat Rev Microbiol* Vol. 11 (7) (2013), p. 455–466.
- [13] Guillaume Cantin, Cristiana J. Silva. "Influence of the topology on the dynamics of a complex network of HIV/AIDS epidemic models" *AIMS Mathematics* Vol. 4 (4) (2019), p. 1145-1169.
- [14] 2. So, M.K.P., Chu, A.M.Y., Tiwari, A. et al "On topological properties of COVID-19: predicting and assessing pandemic risk with network statistics" *Sci Rep* 11s, 5112 (2021)