

Simulación basada en agentes para predecir el comportamiento del COVID-19 y el impacto en sistemas de salud

Agent-based simulation for predicting COVID-19 behavior and impact on health care systems

Manuel José Rivera Chávez*, Juan Carlos Luna García**, María Fernanda Quijas Saldaña***, Betsy Areli Rodríguez Salcedo***, Leydi Arlett Villanueva Tapia***, Benjamín de Jesús Rodríguez Sámano***, Karla Lizette Rodríguez Monjaraz****

Artículo recibido: 27-02-2022

Artículo aprobado: 25-04-2022

Palabras clave:

simulación basada en agentes, SARS-CoV-2, sistemas complejos, pandemia, simulaciones.

Keywords:

agent-based modeling, SARS-CoV-2, complex system, pandemic, simulations.

Cómo citar este artículo

Rivera Chávez, M. J., Luna García, J. C., Quijas Saldaña, M. F., Rodríguez Salcedo, B. A., Villanueva Tapia, L. A., Rodríguez Sámano, B. de J., & Rodríguez Monjaraz, K. L. (2022). Simulación basada en agentes para predecir el comportamiento del COVID-19 y el impacto en sistemas de salud. *Entretextos*, 14(38), 1-15. <https://doi.org/10.59057/iberoleon.20075316.202238378>.

Resumen

La simulación basada en agentes (*agent-based modeling*) es una técnica para estudiar los sistemas complejos y representar problemas actuales, mostrando cómo las conductas individuales determinan la evolución de un sistema. Los modelos basados en agentes se usan en muchas disciplinas, entre ellas las ciencias de la salud, sin embargo, poco se sabe sobre cómo su aplicación, como modelo de simulación, puede ayudar a obtener resultados muy cercanos a la realidad. Por ejemplo, la pandemia por COVID-19 es un caso de salud pública vigente y con mucho potencial para aplicar un modelo de simulación en el que puedan mostrarse datos relacionados con la vacunación, el uso de cubrebocas, aislamiento, disminución de la movilidad, entre muchos otros, y cómo evolucionan los contagios y las muertes. La finalidad de este artículo es mostrar diferentes escenarios, construidos a través de modelos enfocados en la enfermedad COVID-19, respecto al uso de cubrebocas y otras medidas de control de contagios, como la cuarentena y la capacidad del sistema de salud para entender su comportamiento.

* Profesor del Programa de Divulgación Científica de la Universidad de Guanajuato.

** Médico Pasante del Servicio Social adscrito al Programa de Divulgación Científica de la Universidad de Guanajuato.

*** Licenciatura en Médico Cirujano de la Universidad de Guanajuato.

**** Licenciatura en Médico Cirujano de la Universidad de Guanajuato. Autora para correspondencia. Correo electrónico: kl.rodriguezmonjaraz@ugto.mx.

Abstract

Agent-based modeling is a technique for studying complex systems and representing actual problems, showing how individual behaviors determine the evolution of a system. Agent-based models are used in many disciplines, including health sciences, but little is known about how their application as a simulation model can help to obtain results that are very close to reality. For example, the COVID-19 pandemic is a current public health case with great potential to apply a simulation model that can show data related to vaccination, use of masks, isolation, reduced mobility, among many others, and how infections and deaths evolve. The purpose of this article is to show different scenarios, built through models focused on COVID-19 disease, regarding the use of masks and other infection control measures, such as quarantine and the capacity of the health system to understand their behavior.

Introducción

Complejo no es lo mismo que complicado, aunque a veces estas palabras se usan como sinónimos. Un *sistema complicado* está compuesto de muchos elementos diferentes entre sí que interactúan de formas muy distintas; por el contrario, un *sistema complejo* está constituido por elementos similares o iguales entre sí. En el ámbito científico, hay personas dedicadas al estudio y resolución de sistemas complejos. Su importancia es tal que en el 2021 se otorgó el Premio Nobel de Física a Klaus Hasselmann, Giorgio Parisi y Syukuro Manabe por trabajar con “sistemas complejos”, lo que marcó un antes y un después en la investigación.

Los sistemas complejos se definen como un gran número de elementos (personas, animales, procesos) relacionándose entre sí; estas interacciones resultan en un comportamiento grupal que influyen en cada elemento y se va observando su evolución a lo largo del tiempo. Es necesario mencionar la diferencia entre los sistemas complejos con los lineales, que son usados normalmente en las ciencias de la salud. Los sistemas lineales son predecibles, los resultados de los comportamientos se pueden repetir, los procesos ocurren en serie y cada elemento actúa por su parte. Las características de un sistema complejo se enlistan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de un sistema complejo.

Característica	Descripción
Está conectado	Lo que hace un elemento afecta a otro y los comportamientos de los elementos no podrían explicarse, si se estudiarán individualmente.
Se adapta	Responde a su entorno.
Mantiene relación con su origen	Su respuesta tiene que ver con las características con las que iniciaron y van evolucionando.
Tiene jerarquía	Mantiene organización en escala, según la importancia para la respuesta al problema.
Es ordenado	A pesar de esto, no es fácil predecir el comportamiento de los elementos.

Fuente: Elaboración propia.

De una forma más sencilla, Meléndez (2021) lo traslada a la vida cotidiana al observar cómo las hormigas y sus hormigueros funcionan como un sistema complejo. Cada hormiga, evaluada de forma individual, es muy simple, sin embargo, una colonia de hormigas es capaz de ser muy compleja. La estructura organizacional de la colonia no está controlada por la hormiga reina; la complejidad de la colonia de hormigas surge de las interacciones entre ellas al seguir un rastro de feromonas, una sustancia química que les indica que encontraron comida y dejan en su camino de regreso al hormiguero. Si otras hormigas no siguen este camino, el sendero desaparecerá, pero cuando el camino se refuerza por el paso de otras puede surgir una carretera de hormigas.

Por otro lado, en los modelos computacionales, se puede observar cómo se transforma el comportamiento, modificando las tasas de evaporación y de propagación de la feromona. Gracias a estas simulaciones, se entiende mejor el comportamiento de las hormigas. No obstante, el potencial de los modelos basados en agentes (o simulación basada en agentes) es muy amplio, ya que auxilia en el estudio de otras situaciones que impactan en la vida cotidiana. En la figura 1, los círculos en color azul representan los hormigueros de donde salen las hormigas para conseguir su comida y van dejando su camino de feromonas para guiar a otras hormigas (camino de color blanco con verde). Si se perdiera este camino, a las hormigas les causaría problemas encontrar comida y tendrían que hacerlo en lugares más lejanos.

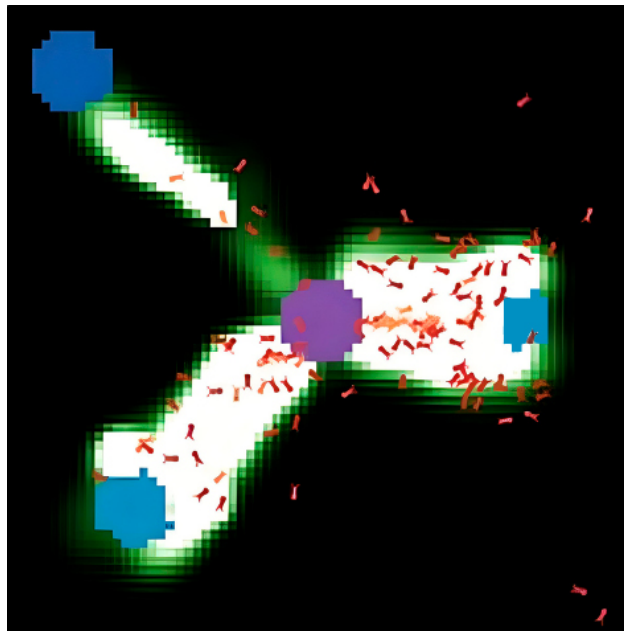


Figura 1. Simulación del comportamiento de las hormigas.

Fuente: Meléndez (2021).

En este contexto, los modelos basados en agentes son una técnica computacional para el estudio de los sistemas complejos, que permiten generar experimentos virtuales que predicen el comportamiento de un sistema.

La plataforma NetLogo —creada en 1999 por Uri Wilensky y que ha estado en continuo desarrollo en el Centro de Aprendizaje Conectado y Modelado Basado en Computadoras, ubicado en Illinois, Estados Unidos— ofrece un lenguaje de programación para simular un entorno adaptado a la realidad que permite recrear situaciones en donde intervienen múltiples agentes, cómo se relacionan entre ellos y muestra modelos prácticos para los estudiantes de licenciatura. Para facilitar su uso, NetLogo posee una extensa documentación y tutoriales, así como una Biblioteca de Modelos, una gran colección de simulaciones elaboradas previamente que pueden ser usadas y modificadas.

Existen otras plataformas —como Mason, Repast y Swarm— que facilitan un entorno para diseñar y organizar simulación basada en agentes, cada una con su respectivo lenguaje y biblioteca. Estas plataformas pueden usarse en el ámbito educativo; por ejemplo, con la simulación basada en agentes, se logra que los alumnos de ciencias de la salud apliquen sus conocimientos en escenarios de la vida real y que, de esta manera, puedan obtener y comprender los determinantes que afectan la salud de las personas. Así, se enseña a los miembros de un equipo, virtudes y habilidades como la coordinación, el liderazgo y la comunicación en situaciones críticas, de emergencia o con complicaciones vitales.

Modelos basados en agentes para el estudio de la pandemia por COVID-19

Los modelos basados en agentes se usan en muchas ciencias, pero en medicina se han aplicado, casi de forma exclusiva, para estudiar cómo se transmiten y controlan las enfermedades infecciosas en la población, como en el caso de la pandemia por el virus SARS-CoV-2. La Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) define a la enfermedad del coronavirus 2019 (COVID-19) como una entidad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2, catalogada como una emergencia de salud pública de importancia internacional y la pandemia más devastadora de la actualidad (WHO, 2022).

El organismo internacional de salud establece que el virus SARS-Cov-2 pertenece a la gran familia de los coronavirus, los cuales infectan a seres humanos y a algunos animales, causando enfermedades que van desde un resfriado común hasta un Síndrome Respiratorio Agudo Severo (SARS, por sus siglas en inglés) (WHO, 2020). Los coronavirus se dividen en cuatro géneros: alfa, beta, gamma y delta, distinguiéndose los primeros dos por causar únicamente infecciones en los seres humanos (estos géneros no deben ser confundidos con los nombres de las variantes aparecidas desde el 2021).

La transmisión del virus se identificó por primera vez en diciembre de 2019; las investigaciones han mostrado que ocurre cuando los pacientes con enfermedad COVID-19 hablan, tosen, estornudan o simplemente respiran y las partículas líquidas en el aire (aerosoles) son inhaladas por otras personas. Con el aumento de casos de COVID-19 a nivel mundial a inicios del 2020, los países se vieron en la necesidad de utilizar medidas de protección contra esta pandemia como los cubrebocas, el distanciamiento social, la cuarentena y la vacunación.

La WHO explica que un caso sospechoso es aquel en donde el paciente estuvo en contacto con un caso confirmado y presenta síntomas como fiebre y tos; tiene una enfermedad respiratoria aguda severa; no tiene síntomas clínicos ni tuvo contacto epidemiológico, pero presenta una prueba de antígenos positiva. Un *caso probable* es definido como un paciente que presenta síntomas y estuvo en contacto con un caso positivo, aunque también puede presentarse como un fallecimiento inexplicado de un adulto con enfermedad respiratoria y que tuvo contacto con un caso probable o confirmado. Finalmente, un *caso confirmado* de infección por SARS-CoV-2 es definido como un paciente con una prueba en Reacción de Cadena de Polimerasa (PCR) sin presentar síntomas o contactos cercanos de contagio, o cualquier persona con una prueba de antígenos positiva con síntomas.

La elaboración de modelos computacionales relacionados con la pandemia por SARS-CoV-2 permiten explorar y acercarse al problema estudiándolo como un sistema complejo mediante las interacciones entre el virus, su propagación, las personas y los aspectos médicos, así como sociales e institucionales. Existen muchos modelos relacionados con la enfer-

medad COVID-19 disponibles en la plataforma NetLogo, de los cuales, para fines de este artículo, se eligieron dos que se basan en el uso de cubrebocas y el cumplimiento de la cuarentena para observar el comportamiento de la pandemia.

Modelo 1. Eficacia en el uso de cubrebocas

En este primer modelo, el objetivo es mostrar la eficacia del uso de cubrebocas como única medida de prevención de contagio. Los parámetros utilizados y modificables son los siguientes: una población de 83 personas (agentes) representadas con tres colores. El número de personas inicialmente infectadas es de dos con una sociabilidad del 3.2 (si este valor fuera más alto, los agentes se moverían a mayores distancias) y la transmisibilidad del cubrebocas es de 0.9, éstos se demuestran en el apéndice 1. Como se observa en la figura 2A, las personas encerradas en un círculo de color rojo son las que están infectadas, considerando que las demás portan cubrebocas; conforme pasa el tiempo, se puede observar que los infectados se recuperaron porque cambiaron de color rojo a blanco demostrando que ya son inmunes al virus y no generaron más contagios en el resto de la población, tal como se ve en la figura 2B.

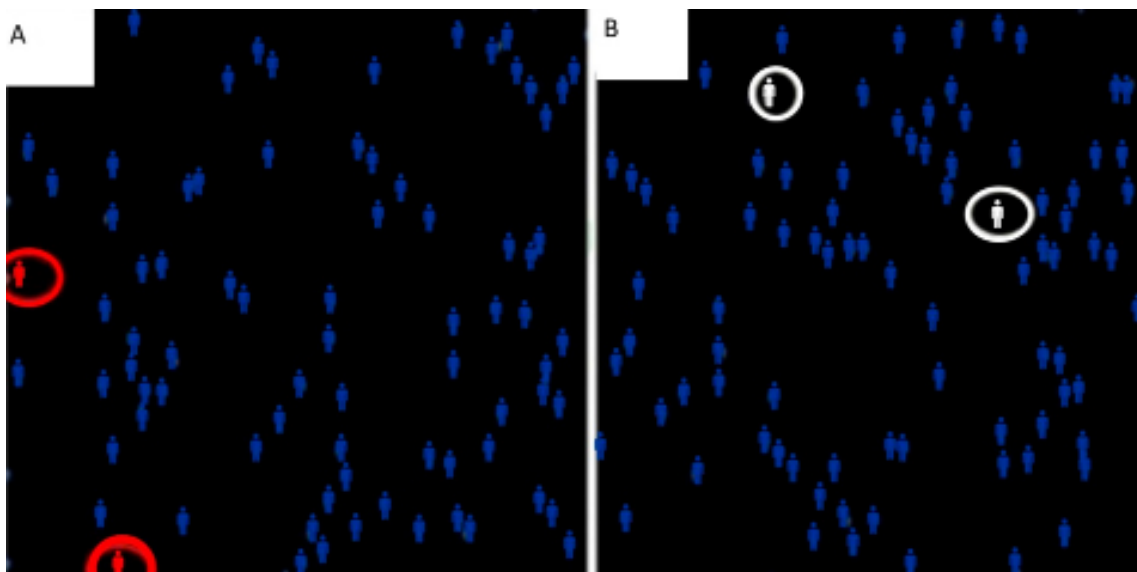


Figura 2. Resultados del primer modelo (situación 1).

Nota. La imagen de la izquierda (A) muestra, en color rojo, a los individuos contagiados y la de la derecha (B), en color blanco, cuando ya se habían recuperado.

Fuente: Brown (2021).

Dentro del mismo modelo, se simula otra situación cuyos parámetros se describen en el apéndice 2, donde se reduce el uso del cubrebocas, ahora con la mitad de la población sin usarlo, representados en color gris (figura 3). A pesar de esto, los resultados no fueron desfavorables, ya que, considerando que los infectados sí portaron el cubrebocas y que la población fue pequeña con un bajo nivel de sociabilidad, no incrementó el número de contagios, a diferencia de lo que ocurriría si se realizara un aumento en estos parámetros.

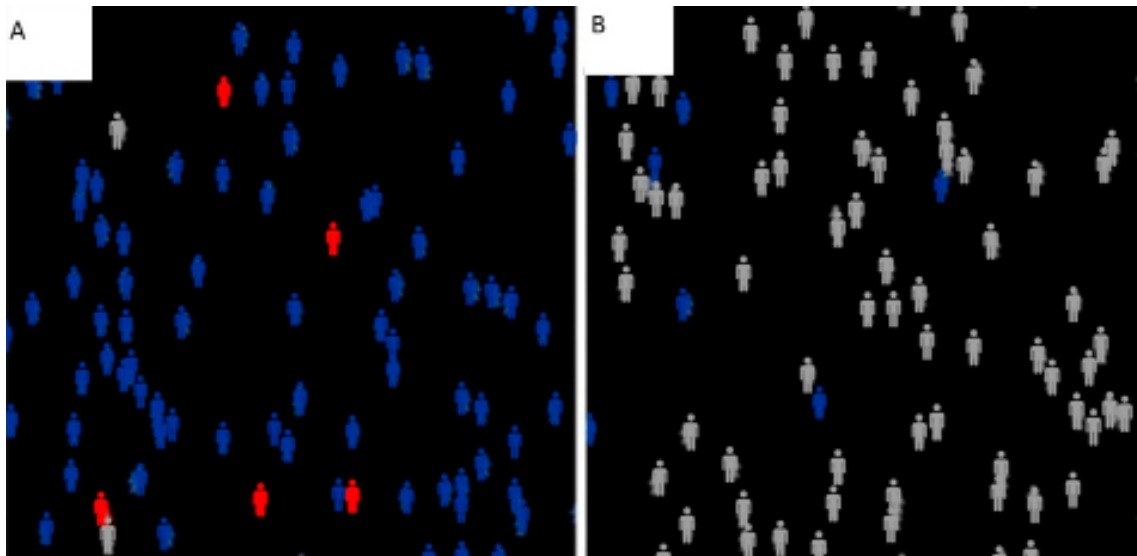


Figura 3. Resultados del primer modelo (situación 2).

Nota. Las personas sin cubrebocas se muestran de color gris y las que sí lo usan de color azul. Como se observa en (A) los individuos contagiados están en color rojo, y en (B) de color gris, cuando ya se habían recuperado.

Fuente: Brown (2021).

La importancia del modelo radica en que, al evaluar parámetros como la proporción de personas no infectadas, se obtiene un porcentaje cercano al 100 % cuya interpretación determina la eficacia alta del uso del cubrebocas. Además, el número de fallecimientos y el número de casos promedio en 5 días se mantuvieron en cero.

El modelo expone el motivo por el que, por ejemplo, en un salón de clases no se han visto consecuencias desastrosas debido a que los niños no se consideran un grupo de riesgo (comparado con los adultos mayores), y el número de alumnos por salón no es tan elevado, además de que cumplen casi todo el tiempo con el uso del cubrebocas. Sin embargo, esta no es la única medida que se debe cumplir en todo momento, también deben ventilarse los salones de clases, guardar la sana distancia, vacunar a todas las personas y, como se vio en este modelo, tener un número muy bajo de personas infectadas inicialmente, lo que incluso demuestra por qué el regreso a clases debió darse en el momento donde ya existía un control de casos.

Modelo 2. Medidas para el control de la enfermedad COVID-19: cuarentena y capacidad del sistema de salud

Durante esta simulación se proponen dos situaciones para analizar el impacto de la cuarentena y la capacidad de atención del sistema de salud sobre control de los casos y muertes. Para ambas simulaciones, los agentes en color rojo representan a los contagiados del virus SARS-CoV-2, los de color azul simbolizan a personas que no lo están y los de color gris son las personas infectadas que se recuperaron, tienen inmunidad y ya no pueden contagiar. De esta forma, para la primera situación se establecieron valores a los parámetros que el modelo nos permite modificar, como una población con 83 personas, donde dos estaban inicialmente infectadas por SARS-CoV-2, el porcentaje de la población que tiene apego a la cuarentena que se definió como el 50 %, la capacidad del sistema de salud, la cual se definió en poder atender al 25 % de los individuos y que existiera inmunidad después de pasar el periodo de infección. El resto de los parámetros se muestra en el apéndice 3.

Como resultado, el modelo arrojó que, durante el tiempo simulado, se detuvo el contagio en esta población, pues los que se habían enfermado y tenían inmunidad ya no eran contagiosos para la población susceptible (no contagiada) que al final fue del 95 % y además no hubo muertes (figura 4).

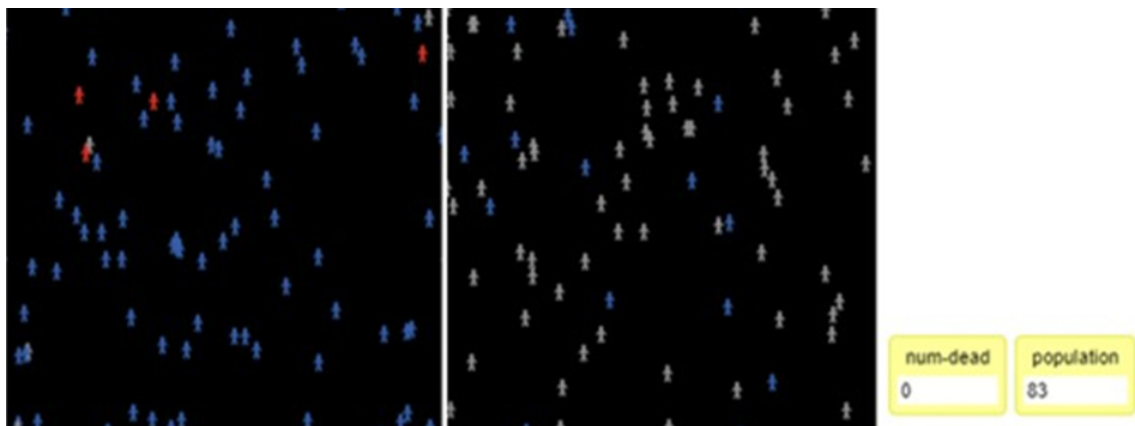


Figura 4. Primer caso (la mitad de la población respetó la cuarentena).

Nota. Podemos observar que el número de muertes (num-dead) fue de 0. Las personas de color gris se contagiaron y recuperaron.

Fuente: Martin (2020).

Para la segunda situación, los parámetros se cambiaron; en este caso la población se mantuvo en 83 personas, donde dos estaban inicialmente infectadas por SARS-CoV-2, el porcentaje de la población que tiene apego a la cuarentena se definió como el 3 %, la capacidad del sistema de salud se definió en poder atender al 7 % de los individuos y se

estableció que existiera inmunidad después de pasar el periodo de infección. El resto de los parámetros se muestran en el apéndice 4.

En contraste con la primera situación (el impacto de la cuarentena), en ésta hubo resultados distintos, comenzando por el tiempo en el que en el modelo se detuvo el contagio, donde la población susceptible o personas que no se infectaron fue solo de 10 %, mientras que si se presentaron muertes con 11 personas, reduciendo así la población a 72 (figura 5).

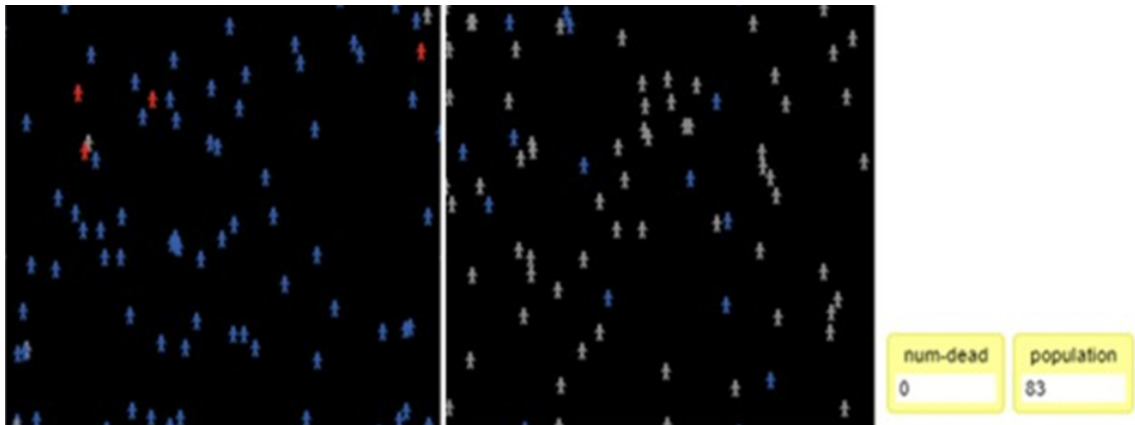


Figura 5. Segundo caso (solo muy pocas personas respetaron la cuarentena: 3 % de la población total).

Nota. Podemos observar cómo el número de muertes (num-dead) fue de 11 personas.

Fuente: Martin (2020).

Uno de los indicadores de utilidad para evaluar la importancia en este modelo es el número de fallecimientos, que refleja la calidad de la atención en el sistema de salud y el impacto de la pandemia en la población; otro indicador es la proporción máxima de personas infectadas en porcentaje y la proporción de personas no infectadas, que evidencia el poder del virus para diseminarse y provocar contagios, todos éstos basados en el tamaño actual de la muestra para la simulación. Como se puede observar, los modelos pueden ser muy avanzados para tomar en cuenta varios aspectos o parámetros, los cuales pueden utilizarse en muchas situaciones, debido a que cada usuario puede simular la problemática que necesite en cuestión, llevando los datos lo más cercano a su entorno para así poder hacer útiles y aplicables los resultados de la simulación a su razonamiento, como parte de su solución.

Conforme ha pasado el tiempo desde el inicio de la pandemia, se ha observado cómo la enfermedad va afectando a más personas y cómo se tomaron medidas para disminuir los casos de la enfermedad COVID-19 desde el primer momento, sin embargo, las medidas también trajeron consecuencias negativas, por ejemplo, restringir la movilidad de las personas impactó el ámbito social y económico. Una interrogante ante tal situación

es si realmente promover el aislamiento ayudó a combatir la pandemia. Es por este tipo de preguntas que algunas simulaciones basadas en agentes pueden mostrar cómo pueden ayudar a tomar estas decisiones.

Los modelos de la plataforma NetLogo tienen relación con estudios publicados sobre el comportamiento de la pandemia; por ejemplo, el uso de cubrebocas en la gente para impedir el contagio de SARS-CoV-2. Investigaciones como la de Najmi *et al.* (2021) evidenciaron que medidas como la prohibición de viajes, cerrar escuelas y la cuarentena por largo tiempo son inconvenientes, debido a que generan consecuencias negativas para la economía que pueden llegar a ser irreversibles o, en el peor de los casos, llevar a un colapso económico.

Combinar el uso de cubrebocas con la sana distancia reduce la transmisión de las partículas infectadas y la posibilidad de contagiarse al participar en diferentes actividades al aire libre, y aún más si se suman otras estrategias de higiene y el rastreo de los contagios. Si el 80 % de la población se apega a estas medidas, pueden ser eficaces para reactivar la economía, pero tomando en cuenta que hay un punto en el que la sana distancia ya no se puede controlar, debido a que la interacción es una conducta necesaria a la que la gente ya no se apegaría por los trabajos, festividades, etc., el cubrebocas es la solución más adecuada que se debe implementar en todo momento.

Patel *et al.* (2021) hicieron la simulación. Compararon el impacto de la eficacia, así como la cantidad de vacunas que se aplican contra la enfermedad COVID-19 con y sin medidas de precaución (cubrebocas, cuarentena, sana distancia, ventilación) sobre el número de contagios, hospitalizados y muertes; los resultados de quitar estas medidas —mientras se ponen las vacunas— puede tener desagradables consecuencias. Esta es la importancia de que todas las medidas se mantengan.

Ahora, en un escenario donde sí aplican vacunas a un ritmo más rápido, aunque sean menos eficaces, y se mantienen las medidas de prevención, ayuda a que los contagios por el virus SARS-CoV-2 no sean tan altos, dándonos a entender que todas las vacunas tienen un impacto positivo en el comportamiento de la pandemia. Li *et al.* (2021) también realizaron otro estudio de gran relevancia. Simularon la transmisión del virus SARS-CoV-2 en lugares cerrados como restaurantes, salones de clase y oficinas. En estos sitios, las personas están conviviendo por varias horas y el contacto cercano entre ellos es frecuente, favoreciendo el riesgo de que el virus se propague, debido a que las partículas de aerosol, cargadas del virus, pueden permanecer en el aire durante varias horas, y cuanto más interactúe una persona con otros individuos y más larga esa interacción, mayor será el riesgo de propagación del virus SARS-CoV-2.

Para este modelo, se puso el ejemplo de tres familias, todas sentadas en mesas separadas, pero compartiendo el aire acondicionado, por lo que se consideraría que el lugar

está mal ventilado. Un cliente contagiado con el virus se sentó en una mesa de atrás-medio, exhalando y propagando el virus mediante gotas respiratorias que se movían a través del restaurante en las corrientes de aire (figura 6). Al tener un aire acondicionado de mala calidad, todos los aerosoles se esparcieron y provocaron que 10 clientes que se encontraban en la parte inferior del restaurante se contagiaran, sin importar si estaban a más de dos metros de distancia, ya que la tasa de ventilación normal recomendada en espacios comerciales debe ser de 10 l/s (litros por segundo) por persona y en este lugar el cálculo arrojó una tasa de 0.75-1.04 l/s por persona.

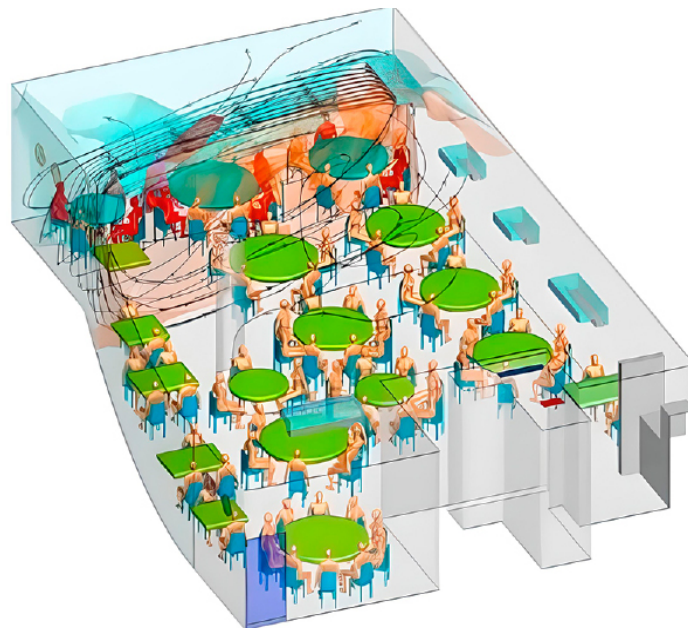


Figura 6. Simulación de la transmisión del virus SARS-CoV-2 en lugares cerrados.

Nota: Los gases (de color turquesa y naranja), así como las partículas de aerosol (líneas negras) parecen circular por el extremo inferior del restaurante contagiando del virus a los individuos marcados en color rojo.

Fuente: Li *et al.* (2021).

Desde que comenzó la pandemia en el 2020, los colegios y las universidades han tenido desafíos para ofrecer instrucción de manera presencial. Los directivos enfrentaron dificultades al abrir las instituciones durante la pandemia y al implementar las modificaciones necesarias a sus operaciones para proteger a los estudiantes y al personal administrativo y académico. Mukherjee *et al.* (2021) realizaron un estudio de simulación basada en agentes con un modelo al azar a gran escala, para determinar si la instrucción presencial podría continuar de manera segura durante la pandemia y evaluar la necesidad de varias intervenciones. Los resultados de las simulaciones indican que el rastreo de contactos y la cuarentena son componentes importantes de una estrategia exitosa para

contener los brotes en el campus. Mover las clases con grupos más grandes a una modalidad virtual, como se implementó en todo el mundo, fue crucial para controlar tanto el tamaño de los brotes como la cantidad de estudiantes en cuarentena.

Un último caso, donde se estudian los modelos basados en agentes, es el de Silva *et al.* (2020) en el que presentan una simulación con personas, casas, negocios, oficinas de gobierno, sistemas de salud y la forma en la que todos conviven, teniendo en cuenta la economía y el ámbito social. Todas las personas tienen la probabilidad de infectarse, enfermarse y morir por COVID-19, esto varía de acuerdo con la decisión de tomar o no las medidas de control como con un aislamiento completo, un aislamiento condicional, aislar solamente a personas infectadas o susceptibles con factores de riesgo, aislar solamente a una parte de la población, usar cubrebocas y la combinación de aislar a una parte de la población y usar cubrebocas.

Se demostró que el distanciamiento social ayuda a aplanar la curva o disminuir los casos, sin embargo, si se utilizaban algunas medidas se podía controlar el contagio con gran afectación a la economía o, en el caso contrario en donde sí se cuidaba el aspecto económico, saturar el sistema de salud. La conclusión a la que se llegó en este modelo es que combinar el aislamiento de una parte de la población más el uso de mascarillas es la medida eficaz y realista, porque así se ayudaba al sistema de salud a controlar los casos de personas infectadas y se cuidaba el aspecto económico; además, la población podía seguir las normas por más tiempo sin cansarse y abandonarlas. Así se ve cómo los modelos basados en agentes, y sus resultados, pueden ayudar a tomar decisiones para manejar diversas problemáticas, en este caso, una pandemia.

Hay muchos otros ejemplos de modelos que muestran cómo ayuda el distanciamiento social, tomando en cuenta varios aspectos, pero lo que genera un gran impacto en la investigación es que están al alcance de la población y que cualquier persona interesada en utilizarlos no necesita de entrenamientos o conocimientos especializados para entender estos modelos y aplicarlos con los datos que necesite para ajustarlos a su comunidad, región o país. Con este tipo de simulaciones se puede revisar la aplicación de todas las medidas de control para reducir el riesgo de propagación del virus SARS-CoV-2, si las personas y los empleados de lugares públicos las usan todo el tiempo y más cuando es difícil mantener las medidas de distanciamiento.

Conclusiones

Como se puede observar, los modelos basados en agentes tienen mucha utilidad en el estudio de la pandemia por el virus SARS-CoV-2, pero también se han aplicado desde hace mucho tiempo en la sociología y otras ciencias. En el ámbito del cuidado de la salud, su introducción es reciente como forma de estudio de los problemas que se presentan en la

población. Generalmente se aplican para describir enfermedades infecciosas, pero también funcionan en otras como la obesidad, el tabaquismo, el alcoholismo; en la educación al personal de la salud y al área administrativa de sistemas de salud.

Compartir el conocimiento sobre estas opciones de investigación es de gran valía al dar capacitaciones para manejar los programas computacionales avanzados, hacerlos más accesibles y usables para adaptar este método de simulación a entornos sin mayor problema; además, serviría como representación para tomar decisiones sobre políticas de salud pública acerca de qué medidas aplicar y cómo para prevenir enfermedades.

Referencias

- Brown, A. (2021). *Effects of Masks on Covid Spread* (model ID 6362). NetLogo Modeling Commons (versión 6.1.1) [software]. Modelingcommons.org. http://modelingcommons.org/browse/one_model/6362#model_tabs_browse_nlw.
- Li, Y., Qian, H., Hang, J., Chen, X., Cheng, P., Ling, H., Wang, S., Liang, P., Li, J., Xiao, S., Wei, J., Liu, L., Cowling, B. J. y Kang, M. (2021). Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Building and Environment*, 196, 107788. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107788>.
- Martin, N. (2020). *COVID-19 Virus Spread* (model ID 6282). NetLogo Modeling Commons (versión 6.0.2) [software]. Modelingcommons.org. http://modelingcommons.org/browse/one_model/6282#model_tabs_browse_nlw.
- Meléndez, A. (2021). Ejemplos Clásicos. En *Modelación basada en Agentes*. Bookdown.org. <https://bookdown.org/jamelende/LibroMobaBookDown/part-ejemplos-clasicos.html>.
- Mukherjee, U., Bose, S., Ivanov, A., Souyris, S., Seshadri, S., Sridhar, P., Watkins, R. y Xu, Y. (2021). Evaluation of reopening strategies for educational institutions during COVID-19 through agent based simulation. *Scientific reports*, 11(1), 6264. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84192-y>.
- Najmi, A., Nazari, S., Safarighouzhdi, F., Miller, E. J., MacIntyre, R. y Rashidi, T. H. (2021). Easing or tightening control strategies: determination of COVID-19 parameters for an agent-based model. *Transportation*, 49, 1265-1293. <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10210-7>.
- Patel, M. D., Rosenstrom, E., Ivy, J. S., Mayorga, M. E., Keskinocak, P., Boyce, R. M., Lich, K. H., Smith, R. L., Johnson, K. T. y Swann, J. L. (2021). *The joint Impact of COVID-19 Vaccination and Non-Pharmaceutical Interventions on Infections, Hospitalizations, and Mortality: An Agent-Based Simulation*. <https://doi.org/10.1101/2020.12.30.20248888>.
- Silva, P., Batista, P., Lima, H. S., Alves, M. A., Guimarães, F. G. y Silva, R. (2020). COVID-ABS: An agent-based model of COVID-19 epidemic to simulate health and economic effects of social distancing interventions. *Chaos, Solitons & Fractals*, 139, 110088. <https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.chaos.2020.110088>.
- World Health Organization. (2022, 22 de julio). *WHO COVID-19 Case definition*. https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-Surveillance_Case_Definition-2022.1.
- World Health Organization. (2020, 26 de marzo). *Origin of SARS-CoV-2*. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/332197/WHO-2019-nCoV-FAQ-Virus_origin-2020.1-eng.pdf.

Apéndice 1. Parámetros usados en el modelo 1. Situación 1.

Parámetros	Valores establecidos para la situación	Rango de valores que puede alcanzar en el modelo
Número de personas	83	1-10000
Inicialmente infectados	2	1-1000
Porcentaje sin cubrebocas	0	1-100
Sociabilidad	3.2	1-10
Transmisibilidad del cubrebocas	0.9	0-1

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 2. Parámetros usados en el modelo 1. Situación 2.

Parámetros	Valores establecidos para la situación	Rango de valores que puede alcanzar en el modelo
Número de personas	83	1-10000
Inicialmente infectados	2	1-1000
Porcentaje sin cubrebocas	50	1-100
Sociabilidad	3.2	0-10
Transmisibilidad del cubrebocas	0.9	0-1

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 3. Parámetros usados en el modelo 2. Situación 1.

Parámetros	Valores establecidos para la situación	Rango de valores que puede alcanzar en el modelo
Población inicial	83	1-1000
Número de infectados inicial	2	1-20
Velocidad de transmisión	0.7	0-1
Control estacionario (cantidad de personas que no se mueven en el espacio, representa el distanciamiento físico/ social)	13	0-1000
Movilidad (cuanta distancia se mueven las personas no estacionarias)	4.2	0-10
Tasa de recuperación	0.02	0-1
Inmunidad después de la recuperación	Sí	Sí-No

Parámetros	Valores establecidos para la situación	Rango de valores que puede alcanzar en el modelo
Personas con inmunidad inicial	0	0-1000
Personas estacionarias al volverse inmunes pueden moverse en el espacio	No	Sí-No
Apego a la cuarentena (porcentaje de población)	0.5	0-1
Capacidad del sistema de salud	0.25	0-1
Mortalidad de los infectados	0.3	0-1

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4. Parámetros utilizados en el modelo 2. Situación 2.

Parámetros	Valores establecidos para la situación	Rango de valores que puede alcanzar en el modelo
Población inicial	83	1-1000
Número de infectados inicial	2	1-20
Velocidad de transmisión	0.7	0-1
Control estacionario (cantidad de personas que no se mueven en el espacio, representa el distanciamiento físico/ social)	13	0-1000
Movilidad (cuanta distancia se mueven las personas no estacionarias)	4.2	0-10
Tasa de recuperación	0.02	0-1
Inmunidad después de la recuperación	Sí	Sí-No
Personas con inmunidad inicial	0	0-1000
Personas estacionarias al volverse inmunes pueden moverse en el espacio	No	Sí-No
Apego a la cuarentena (porcentaje de población)	0.03	0-1
Capacidad del sistema de salud	0.07	0-1
Mortalidad de los infectados	0.3	0-1

Fuente: Elaboración propia.