



Estrategias de optimización para hacer frente a la pandemia COVID-19

Ochoa-Barragán, Rogelio; Munguía-López, Aurora del Carmen; Ponce-Ortega, José María

Nanomateriales a la vanguardia para combatir el virus SARS-CoV-2

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 29, núm. 4. Número especial “SARS-CoV-2”, 2022 | **e181**

Espacio del Divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Ochoa-Barragán, R., Munguía-López, A. del C. y Ponce-Ortega, J. M. (2022). Estrategias de optimización para hacer frente a la pandemia COVID-19. CIENCIA *ergo-sum*, 29(4). Número especial “SARS-CoV-2”. <https://doi.org/10.30878/ces.v29n4a4>

Estrategias de optimización para hacer frente a la pandemia COVID-19

Optimization strategies to fight the COVID-19 pandemic

Rogelio Ochoa-Barragán

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

1207293g@umich.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-2187-5813>

Recepción: 23 de mayo de 2022

Aprobación: 8 de septiembre de 2022

Aurora del Carmen Munguía-López*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

1723704c@umich.mx

 <http://orcid.org/0000-0001-6347-3874>

José María Ponce-Ortega

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

jose.ponce@umich.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-3375-0284>

RESUMEN

Se dan a conocer distintas estrategias de optimización matemática que ayuden a combatir las problemáticas generadas por el COVID-19. Para tal fin, las estrategias presentadas emplean metodologías de optimización comúnmente aplicadas en otras áreas de la ciencia para atender la logística de vacunas, el consumo de energía, el impacto ambiental, el impacto económico y la gestión de los recursos sanitarios, entre otros. Impulsar el desarrollo de este tipo de estrategias permitirá estar mejor preparados ante la posibilidad de futuras pandemias.

PALABRAS CLAVE: optimización, COVID-19, recursos médicos.

ABSTRACT

The objective of this work is to present different mathematical optimization strategies that help combat the problems generated by COVID-19. To this end, different strategies are presented that use optimization methodologies commonly applied in other areas of science to address problems such as vaccine logistics, energy consumption, environmental impact, economic impact and management of health resources. Promoting the development of this type of strategy will allow us to be better prepared for the possibility of future pandemics.

KEYWORDS: Optimization, COVID-19, medical resources.

INTRODUCCIÓN

Debido al gran crecimiento de los países en desarrollo, existe también un aumento en el consumo de recursos no renovables, tales como combustibles fósiles, metales y minerales. En este campo resulta especialmente útil la optimización matemática para asegurar un correcto aprovechamiento de estos recursos tan limitados; sin embargo, sus aplicaciones no están restringidas a esas áreas, ya que la planificación eficiente es necesaria para garantizar una alta productividad en cualquier proceso.

A pesar de los avances tecnológicos en el campo médico, el fracaso en prevenir la propagación en el mundo del virus SARS-CoV-2 y la alta tasa de mortalidad, sorprendieron por la falta de previsión en el manejo de la salud. La pandemia COVID-19 no sólo trajo problemas de salud, sino también ambientales debido a la cantidad de

AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

*1723704c@umich.mx

desechos médicos y a un aumento dramático en el consumo de plásticos. El impacto económico se vio afectado sobre todo por la disminución de la capacidad de producción industrial, que también repercutió en la distribución de alimentos y suministros médicos (lo cual afecta de forma directa a las cadenas de suministro), además del impacto financiero en los mercados y empresas.

Desde una perspectiva más optimista, la respuesta a la pandemia mundial trajo consigo muchos avances en varios campos. Uno de los más notables es la espectacular mejora en el ámbito de las vacunas: anteriormente tardaban más de diez años en desarrollarse, mientras que la de COVID-19 fue en un tiempo récord de menos de un año (como las de Pfizer, Moderna, Gamaleya y AstraZeneca) (Silveira *et al.*, 2021). Otro avance innegable es el de la tecnología digital, que ha jugado un papel fundamental en la preservación de la economía y la educación mediante la creación de sistemas y plataformas de trabajo remoto. En la figura 1 se muestra cómo el COVID-19 ha afectado diversas actividades emprendidas por la sociedad.

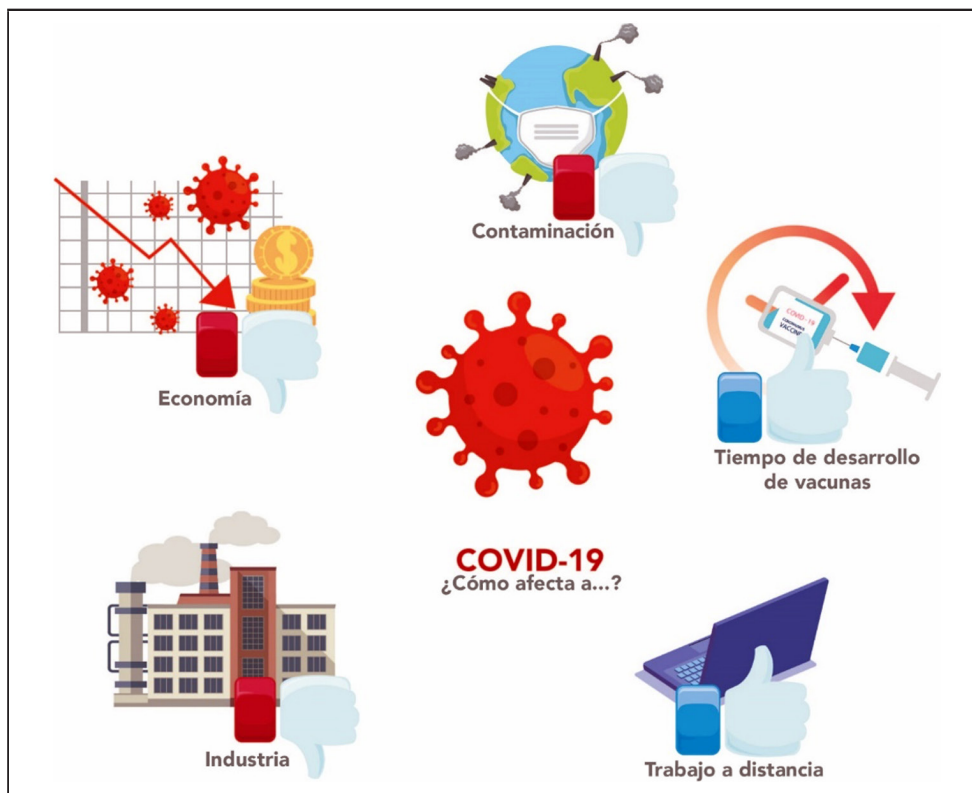


FIGURA 1
Ámbitos afectados por el COVID-19
Fuente: elaboración propia.

La implementación correcta y creativa de la optimización matemática en los diversos campos afectados por la pandemia del COVID-19 puede ayudar en gran medida a preservar la calidad de vida humana; por este motivo, este artículo presenta diversas aplicaciones de optimización matemática para estos fines.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 1 se da un breve preámbulo a la optimización matemática y a sus metodologías que resultan útiles para abordar problemáticas que se desencadenaron por el COVID-19. En la sección 2 se muestra el uso de esquemas de justicia aplicados a la distribución de vacunas. En la sección 3 se presenta la aplicación de estrategias basadas en el nexo agua-energía-alimentos para aprovechar los nuevos residuos producidos a raíz de la pandemia. El uso de técnicas de optimización metaheurística para la distribución de recursos médicos disponibles bajo condiciones de pandemia se expone en la sección 4. Por último, las conclusiones y recomendaciones se plantean en la sección 5.

1. OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA

La optimización matemática es una gran herramienta para resolver problemas de gestión, toma de decisiones, planificación y predicción (Gunantara, 2018). Para solucionar cualquier inconveniente de esta herramienta, *a*) se debe plantear el problema y realizar un diagrama que contemple todas las configuraciones posibles del proceso seleccionado (comúnmente se le conoce como *superestructura*), *b*) establecer sus variables para después generar ecuaciones que relacionen dichas variables, *c*) asignar un conjunto de restricciones que delimitan la región factible del modelo y *d*) establecer una o más funciones objetivo para encontrar un conjunto de soluciones que sean de utilidad en la resolución del problema.

Las aplicaciones de la optimización resultan bastante diversas, ya que van desde el campo económico como herramienta de estimación óptima para la explotación de recursos y su gestión (Mujkic *et al.*, 2018) hasta el diseño de intercambiadores de calor en el campo de la ingeniería, en donde se ve involucrada la minimización de costos considerando parámetros energéticos, económicos y mecánicos (Sessarego *et al.*, 2014).

Los retos económicos originados a raíz de la pandemia en el ámbito social y en el ambiental en apariencia son ajenos a la optimización matemática; sin embargo, dándoles el enfoque correcto, podrían ser abordados por metodologías de optimización aplicadas en otros sectores (Nonato *et al.*, 2022). En los apartados siguientes se mostrarán aquellas que son las más utilizadas en distintos campos de la ciencia enfocadas de forma creativa e innovadora para atender las problemáticas del COVID-19.

2. ESQUEMAS DE JUSTICIA

La asignación de recursos finitos no es sencilla, sobre todo cuando existen múltiples partes interesadas bajo diferentes contextos en un esquema de escasez. Una posible solución a este desafío involucra la aplicación de esquemas de justicia, los cuales han sido empleados en el diseño de sofisticadas redes de distribución de agua (para sistemas agrícolas y urbanos) considerando el almacenamiento y uso óptimos (Rubio-Castro *et al.*, 2016). Los esquemas de justicia permiten encontrar una distribución equitativa; en cuanto a eso, los de economía del bienestar, el de justicia de Rawls y el de justicia de Nash son a los que más se recurre. A continuación, se describen.

- a*) El análisis de la economía del bienestar tiene en cuenta la cantidad de ingresos totales disponibles en una sociedad (o equivalentemente el nivel medio de ingresos), así como su grado de desigualdad (Arrow, 1950).
- b*) El esquema de distribución de Rawls surge de la teoría de Rawls llamada justicia como justicia, donde se establece que las desigualdades sociales y económicas deben organizarse de una manera que beneficie más a los miembros menos favorecidos de la sociedad (Chung, 2017).
- c*) Para Cole y Gkatzelis (2018), el bienestar social de Nash consiste en maximizar la “felicidad” simultánea de todos los individuos. En este caso, la felicidad se entiende como una alta asignación de un recurso a un individuo. Este esquema busca la asignación óptima de Pareto, en donde no es posible beneficiar más a un individuo sin perjudicar a otro.

En el siguiente apartado se presenta un ejemplo de cómo estos esquemas de resultan bastante útiles para la distribución justa de vacunas en tiempos de pandemia.

2. 1. Asignación de la vacuna COVID-19

Una campaña de inmunización realizada sin la priorización correcta de ciertas personas podría evitar que las tasas de infección no disminuyan como se espera, lo que provocaría más muertes y tiempos de aislamiento más prolongados en

todo el mundo (WHO, 2022). En la actualidad, las vacunas existentes en el mercado superan el 70%, lo que implica que se puede descartar la variable de eficacia. Sin embargo, durante la mayor parte de esta pandemia la sociedad se ha enfrentado a una baja disponibilidad de vacunas en muchos países; por esta razón, la asignación de las que se encuentran disponibles para detener la progresión de la infección cobra especial relevancia. Munguía-López y Ponce-Ortega (2021) desarrollaron una estrategia que hace uso de esquemas de distribución basados en las teorías de la justicia social, en la de justicia de Rawls y en la de Nash. Esta estrategia tiene como objetivo lograr una solución óptima y equitativa a través de la evaluación de parámetros relevantes para el sector salud, tales como población afectada por enfermedades autoinmunes o población perteneciente a la tercera edad (grupo de población de mayor riesgo epidemiológico). Al categorizar a los interesados (en este caso los estados de México) por densidad de población y tasas de infección por COVID19, las soluciones encontradas muestran con claridad cómo distribuir las vacunas disponibles cada estado del país. Por ejemplo, el esquema de economía social favorece a los estados más poblados independientemente de otros parámetros. En este caso, el Estado de México (estado con mayor población) es el más beneficiado con cerca de 17.5 millones de vacunas (suficientes para todo el territorio), mientras que los estados con poblaciones menores son descartados. El esquema rawlsiano, de forma similar al anterior, también destina una gran cantidad de vacunas al Estado de México (16 millones), pero no excluye estados con poblaciones más pequeñas como Zacatecas o Nayarit, a los que les otorga cerca de un millón. En última instancia, el esquema de Nash proporciona una asignación no relacionada al tamaño de las partes interesadas (población), lo cual permite asignaciones de vacunas más parecidas entre cada estado al destinar cerca de dos millones de vacunas a cada uno, excepto a aquellos con población menor, como Colima, que no superan el millón de habitantes. Cada esquema es útil en diferentes contextos (figura 2). Esta estrategia se puede aplicar a cualquier estudio de caso, incluso de diferentes escalas o regiones.



FIGURA 2

Estrategia para la asignación de vacunas con base en la implementación de esquemas de justicia

Fuente: adaptado de Munguía-López y Ponce-Ortega (2021).

3. NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

El nexo agua-energía-alimentos es un tema destacado de investigación para lograr un desarrollo sustentable. Este concepto explora las interacciones y sinergias entre los distintos recursos disponibles. Por ejemplo, la extracción, bombeo, recolección y transporte de agua requieren grandes cantidades de energía. Por otro lado, la producción agroalimentaria consume gran parte del agua fresca disponible, y también necesita

energía para el transporte, distribución y almacenamiento de los alimentos producidos, mientras que, de los alimentos y sus residuos es posible generar energía a través de la producción de biocombustibles. Por otra parte, la producción de energía requiere agua para procesos de extracción de materias primas o procesos de refrigeración, limpieza, entre otros (Cansino-Loeza y Ponce-Ortega, 2021). Sin embargo, dificultad determinante asociada a este nexo es el gran aumento de consumo de estos recursos debido a la gran urbanización y crecimiento de la población, por lo que su aprovechamiento óptimo es crucial para asegurar el bienestar social y ambiental.

En los últimos años la producción de residuos urbanos ha incrementado debido al COVID-19, principalmente la de residuos médicos, la cual ocasionó un gran problema ambiental (Peng *et al.*, 2021). Sin embargo, como se muestra en el siguiente apartado, es posible aprovechar los residuos en las estrategias del nexo agua-energía-alimentos.

3. 1. Gestión de residuos durante la pandemia COVID-19

El mundo ha visto cambios ambientales positivos gracias a la pandemia, como cielos y ríos más limpios. Desafortunadamente, estos beneficios no equivalen al incremento de la producción de más desechos sólidos (Loh *et al.*, 2021), lo que ha llevado a la adopción de nuevas leyes y medidas para reducir la contaminación (Capoor y Parida, 2021). Durante esta pandemia se multiplicaron diversos tipos de desechos peligrosos, entre los cuales se incluyen máscaras, guantes y otros equipos de protección contaminados con el virus. En relación con lo anterior, Zhao y You (2021) analizaron y desarrollaron un modelo matemático de optimización para el nexo agua-energía-alimentos y desechos que ayudaría con los problemas ambientales y de salud originados por el aumento de desperdicios alimentarios durante el COVID-19. Al respecto, este artículo propone un modelo de múltiples periodos y múltiples objetivos para la estimación y minimización de costos. Además, se considera que los residuos de alimentos pueden ser tratados para la producción de biogás a través de un tanque anaeróbico, lo que los convierte en una alternativa viable en áreas con grandes ciudades. El nexo entre agua-energía-alimentos y desperdicio propuesto por Zhao y You (2021) se describe en la figura 3.

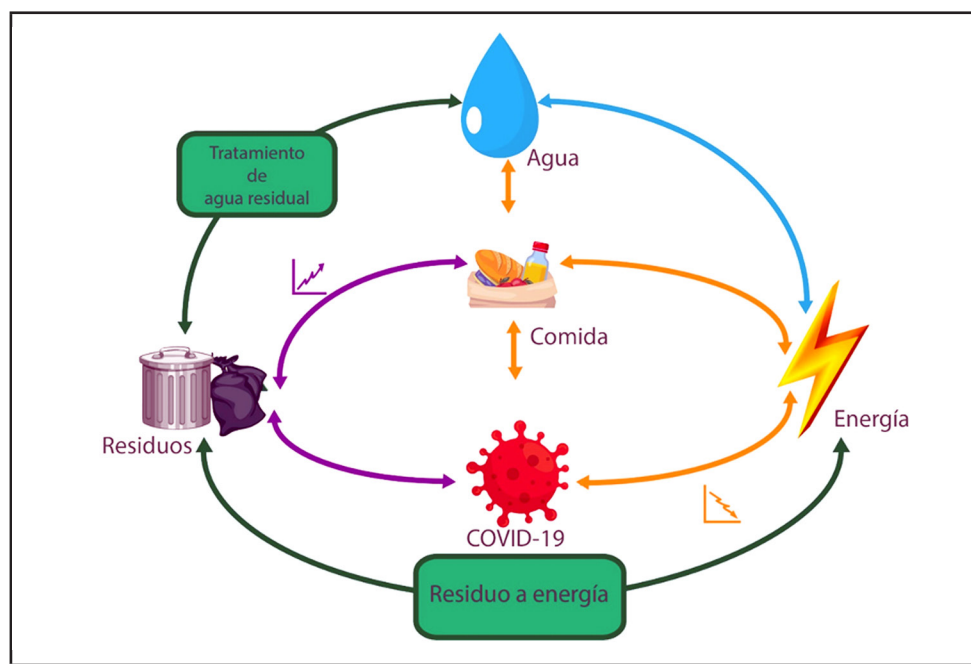


FIGURA 3

Diagrama de impacto de COVID-19 con el nexo entre agua-energía-alimentos y desperdicio.

Fuente: adaptado de Zhao y You (2021).

En este enfoque se presentan diferentes escenarios para diferentes niveles de desperdicio de alimentos procesados, los cuales muestran cómo se ve afectada la interacción entre los costos totales del proceso y los costos individuales del procesamiento de desperdicios de alimentos a través de digestores anaeróbicos. Con esta estrategia, las principales ventajas son visibles en la producción de electricidad y calor. Para el caso de estudio seleccionado (Nueva York), la solución óptima tiene potencial para reducir las cantidades de residuos alimenticios hasta en un 38% (aproximadamente 115 000 toneladas) de la cual se obtienen beneficios económicos de 890 000 dólares derivados de las ventas de biogás y energía eléctrica. En este aspecto, las ganancias corresponden a 11.9 dólares por cada tonelada de residuos alimenticios procesados, lo cual ayuda a mitigar el impacto social y ambiental a partir de la pandemia. Esta estrategia produce grandes resultados al tomar el desperdicio de alimentos como fuente de energía al convertirlo en una gran alternativa siempre que se cuente con una adecuada infraestructura de manejo de desperdicios en la región donde se realice.

4. OPTIMIZACIÓN METAHEURÍSTICA

Existen diversos problemas donde las técnicas tradicionales de optimización determinista presentan inconvenientes, sobre todo donde existen múltiples máximos y mínimos relativos o locales, puesto que estos métodos pueden quedar atrapados en una solución subóptima (Balandin y Kogan, 2016). Una alternativa para solucionarlos es el empleo de la optimización metaheurística, técnica de optimización basada en un conjunto de parámetros basados en el conocimiento para encontrar soluciones en el espacio de investigación de manera más eficiente que en los métodos tradicionales; además, se cuenta con la posibilidad de usar algoritmos genéticos, los cuales recurren a técnicas de optimización inspiradas en la evolución biológica con mecanismos como reproducción, mutación, mezcla de genes y selección; así también, está la optimización estocástica, la cual busca la mejor solución mediante el uso de la aleatoriedad para encontrar un resultado óptimo.

4. 1. Gestión de recursos médicos en situaciones de emergencia

En situaciones de emergencia como las provocadas por el COVID-19 una buena gestión de los recursos disponibles es fundamental para mantener una buena calidad de vida. Por ejemplo, en China se designaron hospitales para enfermos graves o en estado crítico a causa de este virus. La mortalidad de los enfermos graves fue del 10.4% y la de los pacientes críticos fue del 39.6% (Wu y McGoogan, 2020). Esta alta tasa de mortalidad se relaciona principalmente con la sobresaturación de los hospitales y la escasez de recursos médicos, condición que se ha repetido en México y en muchas otras regiones, donde la falta de instalaciones médicas como hospitales y laboratorios ya estaba presente. Por tanto, la pandemia actual muestra la necesidad de financiar nuevos hospitales y laboratorios para afrontar futuras pandemias aprendiendo de los errores del pasado (Nawaz *et al.*, 2020).

Hernández-Pérez y Ponce-Ortega (2021) desarrollaron una estrategia de optimización multiobjetivo basada en programación matemática para escenarios de emergencia (como la pandemia actual) utilizando optimización metaheurística, así como algoritmos de optimización evolutiva y optimización estocástica. Esta estrategia se basa en la incertidumbre creada por el uso de factores aleatorios. En este trabajo se implementó el uso de ambas técnicas de optimización (determinista y metaheurística). Para hacerlo posible, se estableció un vínculo entre los algoritmos de cada enfoque y se desarrolló un código que permite vincular Microsoft, Excel y GAMS mediante archivos de intercambio de datos GAMS (GDX). La vinculación entre estos programas se obtiene mediante la acción de código o subrutinas desarrolladas en el entorno de Visual Basic. Gracias a una serie de algoritmos diferentes esta estrategia multiobjetivo (con metas sociales y económicas) ayuda a distribuir pacientes desde hospitales saturados a hospitales con espacio por medio de los mismos equipos médicos existentes o mediante la compra de nuevos equipos. De esta forma se minimiza el número de pacientes a los que se les

niega el ingreso hospitalario por falta de equipamiento, lo que contribuye indirectamente al número de vidas salvadas. En cuanto a la parte económica, busca reducir los costos asociados con el transporte y la adquisición de nuevos equipos médicos (figura 4).

Para probar la efectividad de esta estrategia, los autores seleccionaron como caso de estudio diversos hospitales que se encuentran dentro de las regiones de Nueva York, Nueva Jersey, Connecticut, Pensilvania y Delaware. Para la correcta distribución de pacientes, se clasificaron en dos tipos: aquellos que requieren camas hospitalarias y aquellos que requieren unidades de cuidados intensivos (UCI). La solución óptima de este modelo obtiene un costo total minimizado de 173 millones de dólares en gastos asociados pacientes del primer tipo y 42 millones de dólares para pacientes del segundo tipo. Por otro lado, los resultados de la aplicación de esta estrategia se traducen en 24 000 personas beneficiadas.

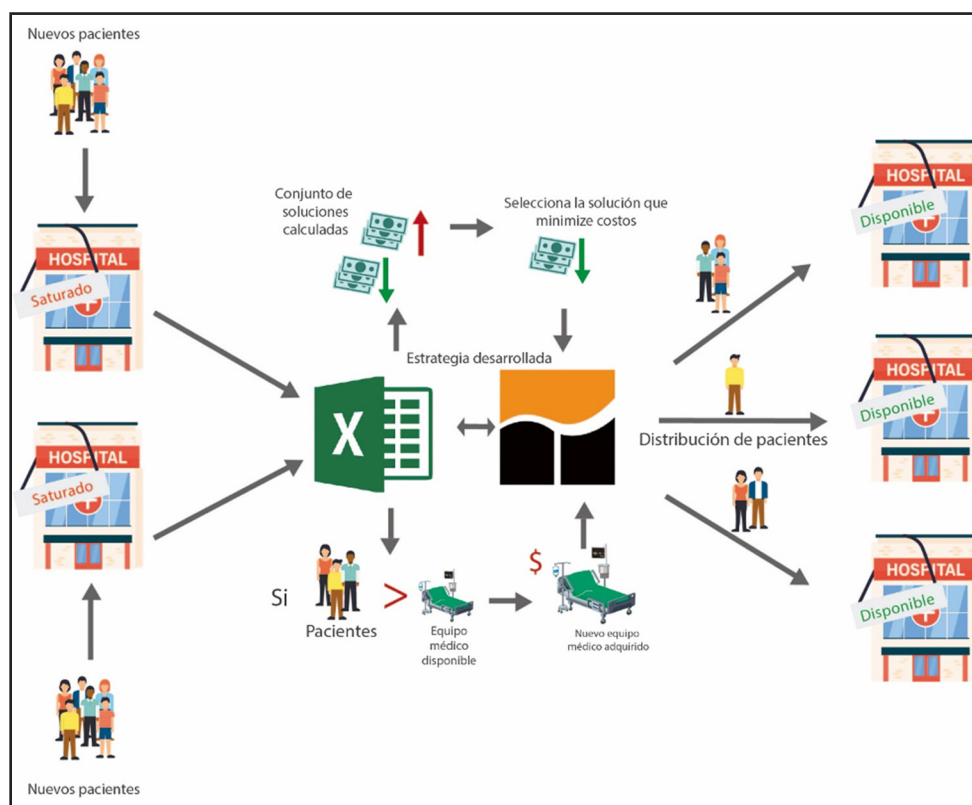


FIGURA 4

Esquema de distribución para pacientes que considera la minimización de costos y utiliza la optimización metaheurística

Fuente: adaptado de Hernández-Pérez y Ponce-Ortega (2021).

PROSPECTIVA

Se presentan estrategias de optimización empleadas para resolver las problemáticas que trajo consigo el COVID-19, las cuales han puesto en duda si la sociedad está preparada para hacer frente a una pandemia. Debido al daño social, económico y ambiental generado desde sus inicios, resulta de vital importancia el desarrollo de estrategias que permitan prevenir, detener y revertir los impactos causados a la población en general. De esta manera, la difusión de estrategias de optimización que aborden futuras crisis sanitarias aporta soluciones viables y un punto de partida de investigaciones posteriores de gran valor para preservar la calidad de vida en situaciones futuras similares.

CONCLUSIONES

Puede parecer que la optimización matemática es ajena a la lucha contra la pandemia; sin embargo, esto está lejos de la realidad porque la optimización es efectiva para preservar la calidad de vida en una situación de tal magnitud. Por otro lado, la inclusión de la optimización matemática en el campo médico relacionado con situaciones de emergencia (como la pandemia actual) aún no se ha explorado a fondo; este escenario motivaría nuevas propuestas y direcciones de investigación con enormes beneficios. A continuación, se presentan algunas ideas útiles para futuros trabajos:

- a) Modelos de distribución de vacunas (y otros recursos médicos) que consideren la existencia de múltiples vacunas a la vez bajo distintos periodos multivariados de tiempo.
- b) Modelos de optimización que incorporen máquinas de aprendizaje (modelos híbridos) a las estrategias del nexo agua-energía-alimentos-desperdicios y gestión de recursos médicos que propicien estimaciones a futuro y permitan mejorar la planificación estratégica.

Con el desarrollo de los modelos mostrados en este artículo y los que están por venir, la próxima vez que la sociedad se enfrente a una pandemia (lo cual es seguro que ocurra), estará mejor preparada no sólo por cómo utilizar herramientas como la optimización, sino también por el conocimiento generado en otros campos de la ciencia y la tecnología. Se recomienda consultar el artículo “Use of Mathematical Approaches for Addressing COVID-19 Pandemic — a Critical Review” (Ochoa-Barragán *et al.*, 2021), en donde se lleva a cabo una revisión exhaustiva y comparativa entre diferentes estrategias de optimización desarrolladas para atender problemáticas del COVID-19.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por Conacyt y CIC-UMSNH. Además, se agradecen los comentarios de los revisores de CIENCIA *ergo-sum* que ayudaron a mejorar y enriquecer el artículo.

REFERENCIAS

- Arrow, K. (1950). A difficulty in the concept of social welfare. *Journal of Political Economy* *Journal of Political Economy*, 58(4), 328-346. <https://doi.org/10.1086/256963>
- Balandin, D. V., & Kogan, M. M. (2016). Pareto suboptimal solutions in control and filtering problems under multiple deterministic and stochastic disturbances. *European Control Conference*. <https://doi.org/10.1109/ECC.2016.7810628>
- Cansino-Loeza, B., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Sustainable assessment of Water-Energy-Food Nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125194>
- Capoor, M. R., & Parida, A. (2021). Current perspectives of biomedical waste management in context of COVID-19. *Indian Journal of Medical Microbiology*, 39(2), 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.ijmmb.2021.03.00>
- Chung, H. (2017). The instability of John Rawls’s “stability for the right reasons”. *Episteme*, 1-17. <https://doi.org/10.1017/epi.2017.14>

- Cole, R., & Gkatzelis, V. (2018). Approximating the Nash social welfare with indivisible items. *SIAM Journal on Computing*, 47(3), 1211-1236. <https://doi.org/10.1137/15m1053682>
- Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242>
- Hernández-Pérez, L. G., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Multi-objective optimization approach based on deterministic and metaheuristic techniques to resource management in health crisis scenarios under uncertainty. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5, 429-443. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00154-3>.
- Loh, H. C., Looi, I., Ch'ng, A. S. H., Goh, K. W., Ming, L. C., & Ang, K. H. (2021). Positive global environmental impacts of the COVID-19 pandemic lockdown: a review. *GeoJournal*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10475-6>
- Mujkic, Z., Qorri, A., & Kraslawski, A. (2018). Sustainability and optimization of supply chains: A literature review. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 11(4), 186-199. <https://doi.org/10.31387/oscm0350213>
- Munguía-López, A. C., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Fair allocation of potential COVID-19 vaccines using an optimization-based strategy. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5(1), 3-12. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00141-8>.
- Nawaz, A., Su, X., Barkat, M. Q., Asghar, S., Asad, A., Basit, F., & Raheel Shah, S. A. (2020). Epidemic spread and its management through governance and leadership response influencing the arising challenges around covid-19 in Pakistan—a lesson learnt for low income countries with limited resource. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.573431>
- Nonato, L. G., Peixoto, P., Pereira, T., Sagastizábal, C., & Silva, P. J. (2022). Robot dance: A mathematical optimization platform for intervention against COVID-19 in a complex network. *EURO Journal on Computational Optimization*, 10, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.ejco.2022.100025>
- Ochoa-Barragán, R., Munguía-López, A. del C., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Use of mathematical approaches for addressing COVID-19 pandemic—a critical review. *Process Integration and Optimization for Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s41660-021-00190-7>
- Peng, Y., Wu, P., Schartup, A., & Zhang, Y. (2021). Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(47). <https://doi.org/10.1073/pnas.2111530118>
- Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Cervantes-Gaxiola, M. E., Hernández-Calderón, O. M., Ortiz-del-Castillo, J. R., Milán-Carrillo, J., & Meza-Contreras, J. A. (2016). Optimal design of integrated agricultural water networks. *Computers & Chemical Engineering*, 84, 63-82. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.08.006>
- Sessarego, M., Dixon, K. R., Rival, D. E., & Wood, D. H. (2014). A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for wind-turbine blade optimization. *Engineering Optimization*, 47(8), 1043-1062. <https://doi.org/10.1080/0305215x.2014.941532>
- Silveira, E. A., N. Kliemann, M. Noll, N. Sarrafzadegan, & De Oliveira, C. (2021). Visceral obesity and incident cancer and cardiovascular disease: An integrative review of the epidemiological evidence. *Obesity Reviews*, 22(1), e13088. <https://doi.org/10.1111/obr.13088>.
- WHO (World Health Organization). (2022). Statement for healthcare professionals: How COVID-19 vaccines are regulated for safety and effectiveness. *World Health Organization*. Retrieved from <https://www.who.int/news/item/17-05-2022-statement-for-healthcare-professionals-how-covid-19-vaccines-are-regulated-for-safety-and-effectiveness>

- Wu, Z., & McGoogan, J. M. (2020). Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) Outbreak in China: Summary of a Report of 72 314 cases from the Chinese center for disease control and prevention. *Journal of the American Medical Association*, 323(13), 1239-1242. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.2648>.
- Zhao, N., & You, F. (2021). Food-energy-water-waste nexus systems optimization for New York State under the COVID-19 pandemic to alleviate health and environmental concerns. *Applied Energy*, 282, 116181. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116181>.

CC BY-NC-ND