

Propagación de COVID-19: Metaheurística basada en el modelo TSP-Percolación

Spread of COVID-19: Metaheuristics based on the TSP-Percolation model

Yessica Yazmín Calderon-Segura^{1,2} , Gennadiy Burlak¹  y Martín Gerardo Martínez Rangel^{1,2} 

¹Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Avenida Universidad 1001, Colonia Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62209

²Facultad de Contabilidad, Administración e Informática, Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62209, México.
vcaldérons@uaem.mx

PALABRAS CLAVE: RESUMEN

COVID-19,
TSP, Virus,
Propagación

En este artículo se desarrolla una metaheurística con un algoritmo que simula la propagación de un de la infección por virus COVID-19 en una ciudad. Se considera el algoritmo del Agente Viajero (TSP) y la propagación se simula con el algoritmo de Percolación. La metaheurística busca la trayectoria óptima tomando muestras aleatorias en un espacio de decisiones. El objetivo de encontrar una trayectoria que sigue el individuo de su lugar de origen a su destino y minimizar la propagación del virus por ciudad. Se debe resaltar que en la actualidad se propaga el virus en distintas partes del mundo paralizando pueblos, ciudades y estados. Actualmente el problema de COVID-19 tiene una propagación espacial que puede infectar al vecino más cercano, considerando esta característica se mapea a un modelo espacial de percolación por enlaces y a través del Algoritmo del Agente Viajero. Se considera que los contagios entre los individuos son más rápidos por contacto, considerando que la propagación de dicha enfermedad tiene criterios de probabilidad crítica (p_c) se identifica el rebrote por región. La metaheurística se ha combinado TSP-Percolación con la finalidad de mostrar un rendimiento bastante notable en la predicción del camino óptimo y evitar más propagaciones por ciudad.

KEYWORDS: ABSTRACT

COVID-19,
TSP, Virus,
Propagation

This article develops a metaheuristic with an algorithm that simulates the spread of a COVID-19 virus infection in a city. The Travel Agent (TSP) algorithm is considered, and the propagation is simulated with the Percolation algorithm. The goal heuristic seeks the optimal trajectory by taking random samples in a decision space. The objective of finding a path that the individual follows from their place of origin to their destination and minimizing the spread of the virus by city. It should be noted that the virus is currently spreading in different parts of the world, paralyzing towns, cities and states. Currently, the COVID-19 problem has a spatial spread that can infect the closest neighbor, considering this characteristic, it is mapped to a spatial model of percolation by links and through the Traveling Agent Algorithm. It is considered that contagions between individuals are faster by contact, considering that the spread of said disease has critical probability criteria (p_c), regrowth is identified by region. The metaheuristics have been combined TSP-Percolation in order to show a quite remarkable performance in the prediction of the most optimal path and avoid more propagation per city.

• Recibido: 17 de julio 2021 • Aceptado: 21 de marzo 2022 • Publicado en línea: 23 de junio 2023

1. INTRODUCCIÓN

En este último periodo de año y medio, varias actividades en el mundo se encuentran restringidas por el auge masivo del contagio de la epidemia del virus COVID-19. La propagación de contagio puede proceder a través de numerosos medios [1], [2]. De hecho, una persona puede ser contagiada, el mismo día, incluso después de dos horas que el Agente contagiado ha pasado por esa ruta. A medida que una persona contagiada se desplaza de un destino a otro, continúa creciendo el número de contagios ya que el COVID-19 se puede transferir de forma directa e indirecta. Cuando se habla de un contagio directo es cuando una persona respira una partícula de virus donde el agente contagiado por COVID-19, no tiene precaución y al toser o estornudar contamina el ambiente; de esta forma se convierte en un ambiente indirecto contaminado ya que el virus es capaz de resistir y sobrevivir en la atmósfera fuera de un cuerpo humano quedando en manijas de puertas, mesas, sillas, teclados, vasos. El COVID-19 puede propagarse potencialmente por transmisión aérea, es decir, a través de partículas microscópicas de hasta $5\mu\text{m}$ que son lo suficientemente pequeños como para permanecer suspendidos en el aire durante horas [3]. El contagio se da a través de las manos o superficies contaminadas [4], [5]. El COVID-19 se ha convertido en un problema de salud mundial que causa graves infecciones del tracto respiratorio en los humanos. Distintos estudios se enfocan en medidas restrictivas impuestas por el gobierno, se han estudiado a las personas más propensas [6], [7], la transmisión aérea de COVID-19 en un lugar confinado en el entorno inmediato de la persona infectada [8]. La literatura indica que se han aplicado métodos computacionales para encontrar soluciones eficientes al problema de contagio como la investigación hecha por [9] de Machine Learning (ML) e Inteligencia Artificial para identificar las personas infectadas con COVID-19. El presente estudio tiene como objetivo investigar el curso de la

propagación del COVID-19 por ciudad. El análisis se ha vuelto muy complejo debido a que existen Agentes asintomáticos y portadores del virus [10], [11], por tal motivo se propone un método formal llamado el Agente Viajero aplicado con la teoría de percolación basando nuestro algoritmo en la optimización de procesos descrito en [12]. Para conocer el crecimiento de contagios por región en términos de volumen. Se busca conocer la probabilidad crítica de contagios COVID-19 por ciudad, con la finalidad de evitar más contagios en las ciudades más cercanas a las afectadas. Cualquier epidemia se propaga regularmente por virus, bacterias, prion, micro plasma, protozoo, hongos, etc. Considerando la información descrita en [13], se analiza el contagio es a través de un algoritmo del Agente Viajero y la teoría de percolación. La propagación del virus COVID-19 siempre tienen una cierta probabilidad de contagio acertada considerando el contacto con la persona infectada debido al aumento de la movilidad de aquella persona asintomática realizado en un día.

En este artículo mostramos un modelo de simulación de transmisión constante por contacto considerando la distancia del individuo y el recorrido de la trayectoria entre ciudad de origen-destino, casa-trabajo. Se aplica una simulación para evaluar si es probable que la distancia entre personas influya en la propagación y aumenten los contagiados por zona; considerando que toda epidemia representa una amenaza para la vida humana [14]. La epidemia se describe de forma teórica y mediante una simulación de la propagación con la teoría de percolación se inicia de una enfermedad altamente infecciosa transmitida por contacto al vecino cercano. Se considera una población de 1000 individuos. Cada vecino cercano representa a las personas con defensas débiles y susceptible. Se representa una dinámica que considere la distancia entre individuos más cercanos se hace un mapeo del entorno real para llevar a cabo el ambiente simulado.

En la figura 1 se representa la trayectoria del Agente Viajero asintomático portador de COVID-19. El cual se traslada de su casa-trabajo. Podemos observar y considerar que cuando se toma un transporte público no siempre se guarda una distancia, debido a la población debe salir a trabajar y se aglomeran las personas en cierta hora pico del tráfico donde puede propagar el virus. Si, el individuo que tiene un trayecto casa-trabajo, no guarda una distancia específica y las precauciones necesarias la probabilidad de contagiarse es más acertada. El primer círculo punteado, representa la ciudad aleatoria. Los círculos internos punteados son los posibles puntos que representan los medios de propagación, como son transporte público, aviones, metros, autobuses y taxis. Aplicando el uso del Método formal del Agente viajero y considerando la teoría de percolación por enlace (filtración del virus por contacto) se implementa una simulación de dicha propagación del virus. Se identifica al individuo y se representa en forma de nodo la ciudad que recorre, este modelo se prueba en una red agrupada que debe contener una correlación entre los nodos, con el objetivo de representar el contagio del vecino más cercano.

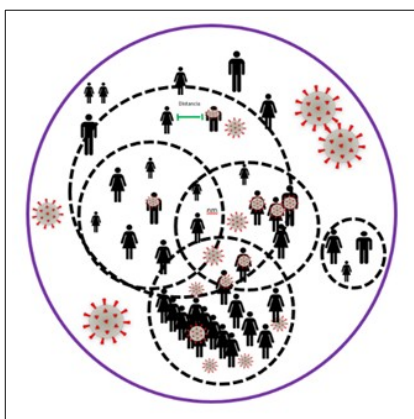


Figura 1. Ambientes Laboral-casa, transporte-casa, origen-destino de propagación del virus COVID-19.

La ciudad es representada por un grafo no dirigido, los nodos presentan las estaciones de transporte público en la ciudad que el Agente Viajero ha hecho y el contagio se simula considerando la teoría de percolación

con la probabilidad que exista contagio, considerando la problemática actual que presenta nuestra sociedad. En la figura 2, muestra varios círculo de color negro que representa un ambiente labora, transporte público y ambiente familiar. La distancia mínima entre individuo que debe existir es de 0.6 m para evitar contagios.

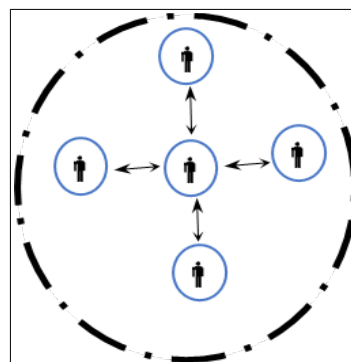


Figura 2. Distancia entre individuos para evitar la Propagación del virus también llamado Mapeo TSP-Percolación.

La figura 3 se hace la representación de una ciudad, mediante un grafo no dirigido. Cada individuo debe trasladarse de un punto Origen puntos destino. Por ejemplo, Una joven administradora sale de casa, primer encuentro con la sociedad se representa con un artículo punteado representa tomar el autobús, siguiente parada sería tomar el metro, última parada su trabajo, pero llegando al trabajo no puede estar aislada. Ella tiene contacto con su compañeros de trabajo, los cuales también se representa con un círculo punteado.

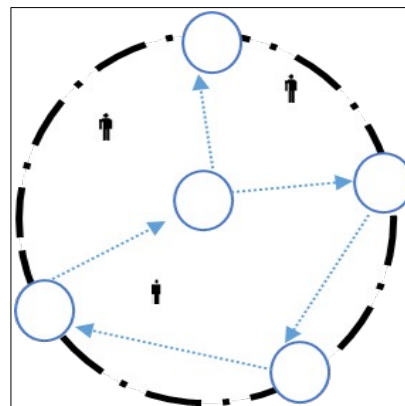


Figura 3. Grafo dirigido del Agente Viajero.

La literatura nos demuestra que se puede hacer la simulación de un problema de la vida real aplicando métodos formales por medio de modelos matemáticos que garantizan su eficiencia para ser tratados por Optimización combinatoria [15]. La estructura de este documento es la siguiente: Introducción, Percolación por enlaces, Problema del Agente Viajero (TSP), Modelo Matemático, Adaptación de la técnica de optimización, Algoritmo TSP-Percolación, Resultados numéricos, Conclusiones y Referencias.

2. PERCOLACIÓN POR ENLACES

La percolación por enlace es también llamada percolación por medio (enlace) o filtración por contacto. En este trabajo se considera la propagación del virus usando la teoría de percolación por enlace, considerando la distancia y la probabilidad de crítica (p_c) por individuo que pueda ser contagiado $p_c < p = 0.6m$. Se consideran los enlaces entre sitios (individuos) de forma aleatoria, los enlaces representan la distancia entre cada individuo. Dos enlaces pertenecen al mismo clúster si, el individuo no guarda su distancia, ni las medidas de sanidad, el virus comienza a propagarse por contacto. Considerando que un clúster es un grupo de individuos que se contagian. El individuo que propaga la enfermedad se considera asintomático, dada su necesidad de trasladarse a su lugar de trabajo o a su casa iniciando el proceso de contagio. Mediante la teoría de percolación y el algoritmo del Agente Viajero se genera un algoritmo híbrido llamado TSP-Percolación.

3. PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO (TSP)

La teoría del Problema del Agente Viajero (Traveling Salesman Problem, TSP por sus siglas en inglés) consiste en encontrar la ruta más corta de un Agente Viajero que comienza desde una ciudad de origen, visitando una serie de ciudades predeterminadas y regresar de nuevo a su ciudad de partida [10]. La

distancia recorrida depende obviamente del orden en que visite dichas ciudades, es aquí donde el problema surge al tratar de encontrar la ruta óptima en el cual el orden de las ciudades visitadas produzca la distancia menor posible. Su restricción consiste en no poder regresar a ninguna ciudad que ya haya sido visitada; Sin embargo, el TSP es un problema NP-Completo. Para un grafo no dirigido completo de n vértices el tamaño del espacio de búsqueda es de $(n-1)!/2$. En la literatura existe un gran número de aproximaciones para resolverlo tanto con técnicas exactas como con técnicas heurísticas y metaheurísticas. Considerando el concepto principal del TSP y la teoría de percolación, el individuo es el que propaga la infección al vecino más cercano desde su ciudad de origen hasta la ciudad destino. La teoría de percolación nos permite saber la propagación del COVID-19 que se propaga entre los individuos en cada ciudad considerando un área específica. El algoritmo del agente viajero optimiza la condición de la probabilidad crítica p define el denominado umbral de la epidemia $p \in [0,1]$. Sea p la variable principal para identificar al Agente Viajero si está o no contagiado se representa como $p=1$ individuo contagiado de COVID-19 y $p=0$ individuo No contagiado. Cuando la probabilidad de que un individuo enfermo p se desplace por varios lugares sin saber que es asintomático. Se considera en la simulación que la variable p es lo suficientemente grande, existe un clúster de percolación que se extiende por toda la área analizada, pero si p es pequeño, significa que el individuo no tiene contacto con su vecino cercano, el contagio del virus puede ser interrumpido, si continuamos el análisis, aparece una probabilidad crítica p_c a partir de la cual comienza a crecer el número de configuraciones posibles que permiten la simulación de la circulación de la infección. Si $p > p_c$ nos indica que la infección del virus puede penetrar en el individuo más cercano y si $p_c < p$, nos indica que el individuo no puede continuar infectando a los demás.

4. MODELO MATEMÁTICO TSP

Para encontrar la solución al problema del Agente Viajero en una población simulada, se generó un grafo que represente los individuos en el sistema. Sea un grafo $G=(V, E)$, donde V define los vértices que representan la ciudad $V=\{1, \dots, n\}$ y E son las aristas que representan el contacto entre la posible población. De esta manera el problema del Agente Viajero encuentra una ruta (ciclo Hamiltoniano) en G . La suma de los costos de las aristas o conexiones de la ruta sea lo más pequeña posible. Se asume que G es un grafo completo. En este trabajo se considera una matriz de pesos que representan las distancias entre cada ciudad. La matriz se define como $C=(C_{ij})_{n \times n}$ donde el valor (i,j) corresponde a C_{ij} que es el costo o distancia entre personas i con el nodo j en G . A continuación se muestra la formulación matemática para el Agente Viajero. Función objetivo (1) y sus restricciones (2), (3), (4).

$$\min z(x) = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

sujeto a

$$\sum_{\{i:(i,j) \in A\}} x_{ij} = 1, \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} = 1, \forall i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{\{(i,j) \in A: i \in U, j \in (V-U)\}} x_{ij} > 1, \quad 2 < |U| < |V| - 2 \quad (4)$$

La ecuación (1) corresponde al cálculo de la función objetivo. La restricción (2) indica que puede llegar a cada ciudad desde una única ciudad anterior. La restricción (3) indica que desde la ciudad i se puede pasar a una única ciudad (de la ciudad i se puede salir por un único camino). La restricción (4) evita que se generen un contagio.

5. ADAPTACIÓN DE LA TÉCNICA DE OPTIMIZACIÓN

Inicialmente se parte de una solución factible. ¿Qué significa una solución factible? Una solución factible es la trayectoria que un

Agente Viajero hizo para propagar la enfermedad desde su casa hasta el trabajo. El algoritmo rastrea y predice las rutas de contagio entre ciudades usando la teoría de percolación descrita en [11], que se pasan a un archivo de texto (txt). La tabla 1 muestra los datos para simular la trayectoria mínima que recorre un individuo casa-trabajo, casa-escuela y cualquier otra actividad que el individuo realice, utilizando una matriz de dos dimensiones (2D). Donde x_{ij} representa las distancias entre ciudades. La tabla 1 contiene los datos que representan las distancias entre las ciudades que recorre el Agente Viajero. La primer columna contiene las variables (N1, N2, ..., N10) que representan la ciudad origen y la ciudad destino es representada con la variable X_{ij} . Esta información fue recopilada de [11].

Tabla 1. Matriz de distancia para el algoritmo de TSP-Percolación.

| | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9 | N10 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| X_{ij} | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 11.85 | 6.15 | 9.11 | 3.13 | 5.09 | 3.35 | 10.6 | 7.62 | 11.72 |
| 2 | 11.85 | 0 | 9.22 | 9.13 | 11.93 | 11.53 | 10.86 | 3.89 | 10.34 | 4.37 |
| 3 | 6.15 | 9.22 | 0 | 11.83 | 8.62 | 9.94 | 3.03 | 6.23 | 11.29 | 11.38 |
| 4 | 9.11 | 9.13 | 11.83 | 0 | 6.77 | 4.95 | 10.93 | 11.16 | 2.08 | 5.66 |
| 5 | 3.13 | 11.93 | 8.62 | 6.77 | 0 | 2.08 | 6.24 | 11.7 | 4.94 | 10.64 |
| 6 | 5.09 | 11.53 | 9.94 | 4.95 | 2.08 | 0 | 7.95 | 11.98 | 2.97 | 9.52 |
| 7 | 3.35 | 10.86 | 3.03 | 10.93 | 6.24 | 7.92 | 0 | 8.62 | 9.91 | 11.97 |
| 8 | 10.6 | 3.89 | 6.23 | 11.16 | 11.7 | 11.98 | 8.62 | 0 | 11.76 | 7.76 |
| 9 | 7.62 | 10.34 | 11.29 | 2.08 | 4.94 | 2.97 | 9.91 | 11.76 | 0 | 7.41 |
| 10 | 11.72 | 4.37 | 11.38 | 5.66 | 10.64 | 9.52 | 11.97 | 7.76 | 4.41 | 0 |

6. ALGORITMO TSP-PERCOLACIÓN

A continuación, se enumeran los pasos del algoritmo TSP-Percolación.

Paso 1. La simulación es configurada en una matriz 2D mediante datos obtenidos en [11], que son almacenados en un archivo de texto.

Paso 2. Se establece el tamaño de la población y distancia entre cada persona, así como la probabilidad crítica $pc=0.6$, para predecir el contagio entre la población se aplica la teoría de percolación. La probabilidad crítica $pc=0.6$, se establece considerando lo descrito en [16].

Paso 3. Se analiza el desplazamiento de número de contagios en forma de grupos a este se le llama clúster de percolación que es un cúmulo de individuos que son contagiados. Considerando la distancia entre individuos que se encuentran en la ciudad x_{ij} . Se aplica una técnica de optimización de Recocido Simulado adaptada al Agente viajero y la teoría de percolación por enlace. En donde se genera un cambio aleatorio para mejorar la solución inicial ΔE .

Paso 4. Si el nuevo estado tiene un nivel más bajo de energía que el estado anterior, $\Delta E \leq 0$, el nuevo estado es tomado para la siguiente iteración. Sin embargo, si el nuevo estado mejora la solución anterior, este es aceptado con una probabilidad que depende de la temperatura. La cual disminuye con cada iteración del algoritmo de recocido simulado.

Paso 5. El sistema genera de forma aleatoria los posibles contagios, considerando que habrá un contagio siempre y cuando el individuo no cumpla con su sana distancia y las medidas sanitarias. La distancia entre ciudades se determina con la variable (W_{ij}) el sistema encuentra la trayectoria de visitas más cortas y el algoritmo de percolación establece el radio de la distancia entre cada individuo mediante una probabilidad crítica de la percolación por enlaces.

Paso 6. El sistema verifica si la probabilidad de contagio a través de la probabilidad crítica (pc) en un clúster de percolación, el clúster de percolación indica el contacto entre individuos infectados. Si la probabilidad de que exista una persona contagiada de COVID-19 es $p > pc$. La persona es contagiada, en caso contrario $p < pc$ la persona no está contagiada ya que el individuo cumple con el rango 0.6 m de distancia entre individuo.

Con esta simulación se identifica el trayecto del Agente Viajero y los contagiados. En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo utilizado.

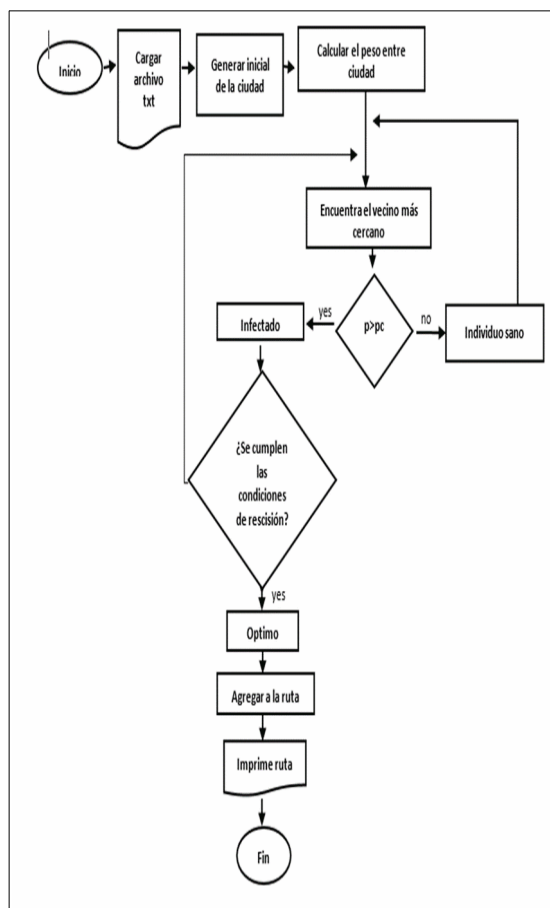


Figura 4. Algoritmo TSP-Percolación.

7. RESULTADOS NUMÉRICOS

Con el algoritmo propuesto TSP-Percolación requiere de una solución inicial S_0 . La solución inicial indica el recorrido que hizo el agente viajero contagiado. El algoritmo selecciona aleatoriamente la ciudad X_{ij} . El algoritmo encuentra la solución inicial que representa el trayecto hecho por el Agente Viajero Infectado considerando la probabilidad crítica. El algoritmo procede hacer el análisis de las posibilidades que tiene un individuo para contagiarse. Este análisis se implementa con datos aleatorios y distancias aleatorias entre individuos. Las condiciones iniciales son:

- Grafo generado: 106696
- Longitud Inicial: 36.288
- Permutación Natural: [10]→[4]→[14]→[9]→[12]→[13]→[15]→[3]→[1]→[11]→[5]→[2]→[7]→[8]→[6]→[10]
- Parámetro de control: 0.965
- Número de iteraciones: 105281
- Resultado en: 2 min. 10 seg.

Tabla 2. Permutaciones TSP.

| Numeración de pruebas | Interacción | Permutaciones | Instancia | Tiempo |
|-----------------------|-------------|--|-----------|---------------|
| 91 | 362833 | [3]→[9]→[10]→[8] →[4]→[7]→[5]→[2] →[6]→[1]→[3] | 70.37 | 2 min, 41 seg |
| 92 | 106696 | [3]→[8]→[2]→[10] →[4]→[9]→[6]→[5] →[1]→[7]→[3] | 36.789997 | 3 min, 55 seg |
| 93 | 1898 | [3]→[8]→[2]→[10] →[4]→[9]→[6]→[5] →[1]→[7]→[3] | 86.49 | 2 min, 10 seg |
| 94 | 1190 | [3]→[9]→[10]→[8] →[4]→[7]→[5]→[6] →[1]→[2]→[3] | 83.03 | 2 min, 10 seg |
| 95 | 1663 | [3]→[9]→[10]→[8] →[4]→[7]→[5]→[1] →[2]→[6]→[3] | 91.24 | 3 min, 02 seg |
| 96 | 1427 | [3]→[9]→[10]→[8] →[4]→[7]→[5]→[1] →[6]→[2]→[3] | 90.9 | 2 min, 10 seg |
| 77 | 2345 | [3]→[9]→[10]→[8] →[7]→[1]→[2]→[4] →[6]→[5]→[3] | 75.06 | 3 min, 33 seg |
| 98 | 3245 | [3]→[9]→[10]→[8] →[7]→[1]→[6]→[4] →[5]→[2]→[3] | 76.39 | 3min. 55 seg |
| 99 | 362095 | [3]→[9]→[10]→[8] →[7]→[1]→[6]→[4] →[2]→[5]→[3] [3]→[8]→[2]→[10] →[4]→[9]→[6]→[5] →[1]→[7]→[3] | 57.35 | 2min. 35 seg |
| 110 | 106696 | [10]→[4]→[14]→[9] →[12]→[13]→[15]→ [3]→[1]→[11]→[5] →[2]→[7]→[8]→[6] →[10] | 63.640003 | 2 min. 56 seg |
| 111 | 105281 | [10]→[4]→[14]→[9] →[12]→[13]→[15]→ [3]→[1]→[11]→[5] →[2]→[7]→[8]→[6] →[10] | 36.288 | 2min. 10 seg |
| 112 | 370683 | [10]→[13]→[3]→[1] 4]→[1]→[11]→[7]→ [8]→[12]→[5]→[2] →[9]→[15]→[4]→[6]→[10] | 48.0 | 2min. 18 seg |

En tabla 2, se muestran las 12 mejores permutaciones de 46,2880 iteraciones con 30 pruebas desarrolladas. Se observa que la permutación mejora visiblemente cuando la suma de las distancias con de 36.288 que representa el camino más corto del Agente

[10]→[4]→[14]→[9]→[12]→[13]→[15]→[3]→[1]→[11]→[5]→[2]→[7]→[8]→[6]→[10]. La tabla 1 indica que las columnas representan las ciudades origen y las filas las representan las ciudades visitadas. La tabla 3, representa el análisis computacional de la teoría de percolación representada en una matriz de 1 y 0. Se marca con 1, Si la matriz $X_{ij}=1$ Cuenta con un vecino cercano que no cumple con la $pc < p = 0.6$, donde $p=0.6$ es la distancia mínima para que un individuo sea infectado. En caso contrario la matriz $X_{ij}=0$, no existe contagio entre los individuos. Es importante señalar que la diversificación no se hace en forma aleatoria, sino mediante el análisis de la información recopilada por la matriz de distancias con el algoritmo del Agente Viajero. El óptimo se encuentra en la iteración 362095 con una distancia de 36.288 en 2 min. 10 seg. Ver en la tabla 2.

Tabla 3. Percolación aplicada

| X_{ij} | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 |

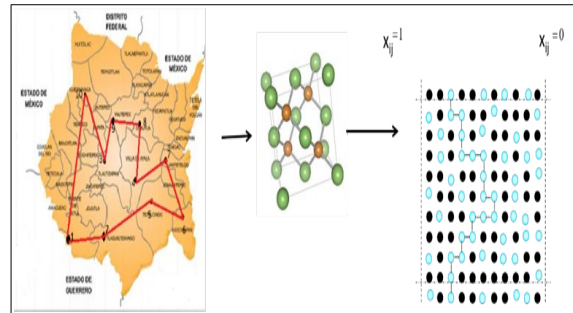


Figura 5. Escenario de transformación.

Para implementar la aplicación de TSP-Percolación, se utilizó una computadora MSI GP73 SONY 17.3, Nvidia GeoForce GTX 1070, 8GB, procesador Intel CORE i7-8750H, 16 GB de RAM DDR4, servidor HP endline EL1000.

Los resultados generados son casi idénticos con descritos en [11], son más del 95% idénticos. En [11] se obtiene una ruta óptima global de 36.79 en encontrar la ruta óptima del Agente Viajero y nuestros resultados fueron de 36.288 en la trayectoria

óptima del Agente Viajero. Considerando la teoría de percolación y el trabajo desarrollado en [16], se demuestra que un clúster de percolación se genera mediante un contacto entre dos vecinos con cierta distancia. Cuando $p > p_c$. La probabilidad crítica en este trabajo nos indica la probabilidad de un individuo al no guarda su distancia $p=0.6$ la probabilidad de que este se contagie es más segura. El programa utiliza una malla de dos dimensiones que representa las ciudades y la distancia entre ciudades visitadas por individuo asintomático. Experimentalmente la eficacia de la simulación depende de la sintonización del tamaño de la ciudad, distancia de entre individuos y el número de contagiados N .

El algoritmo del Agente Viajero permite encontrar la trayectoria óptima que el individuo hizo después de enterarse que es un portador de COVID-19 con ayuda del recorrido simulado se aplica el algoritmo de percolación por enlaces el cual simula la propagación del virus, considerando una distancia entre individuos. En la figura 6 se muestra una simulación con $L=300 \times 300$, con una probabilidad de $p_c=0.6$. Demostrando de esta forma que un individuo puede ser contagiado con una distancia mínima de 60 centímetros.

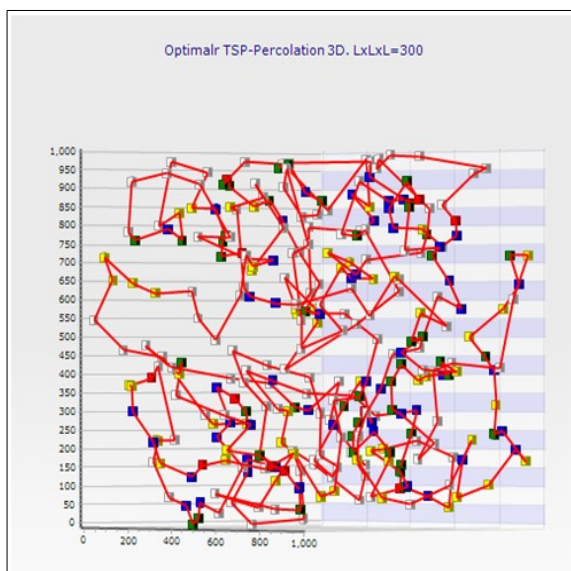


Figura 6. Simulación de la Propagación del virus mediante el algoritmo TSP-percolación.

6. CONCLUSIONES

En [17] se utiliza un método llamado COUNTERACT comienza a funcionar mediante la adquisición de datos espacio-temporales por GPS de los pacientes con COVID-19 desde un teléfono móvil. Pero si el infectado apaga su teléfono o lo pierde la información de una infección auténtica. El método aplicado solo localiza al usuario expuesto a la infección. El trabajo de investigación presentado no proporcionó ningún detalle relacionado con los problemas de privacidad del rastreo basado en GPS y la detección en tiempo real de sospechosos de COVID-19 utilizando datos de ubicación. En cambio nuestro algoritmo TSP-Percolación identifica la ubicación del sujeto COVID-19, analiza el trayecto en la ciudad en la que vive y predice los posibles contagios con una distancia de 60 centímetros.

AGRADECIMIENTOS

This work was supported in part by CONACYT Mexico under the grants No. A1-S-9201 and No. A1-S-8793.

REFERENCIAS

- [1] Ahmed, N., Michelin, R. A., Xue, W., Ruj, S., Malaney, R., Kanhere, S. S., Jha, S. K. A survey of COVID-19 contact tracing apps. *IEEE ACCESS*. 2020, 8, 134577-134601. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3010226](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010226).
- [2] Magklaras, G., López-Bojórquez, L. N. A review of information security aspects of the emerging COVID-19 contact tracing mobile phone applications. En: Clarke, N., Furnell, S. (eds) *Human Aspects of Information Security and Assurance*. HAISA 2020. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2020, 593. Springer, Cham. doi: [10.1007/978-3-030-57404-8_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57404-8_3).
- [3] Arias, F. J., De Las Heras, S. The mechanical effect of moisturization on airborne COVID-19 transmission and its potential use as control technique. *Environmental research*. 2021, 197, 110940. doi: [10.1016/j.envres.2021.110940](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110940).
- [4] Yao, K., Hasegawa, S., Tagashira, Y., Takamatsu, A., Uenoyama, Y., Shimizu, K., Kondo, T. Experience of 101 patients with coronavirus infectious disease 2019 (COVID-19) at a tertiary care center in Japan. *Journal of Infection and Chemotherapy*, 2021, 27(2), 413-417. doi: [10.1016/j.jiac.2020.11.024](https://doi.org/10.1016/j.jiac.2020.11.024).

- [5] Li, H., Liu, S. M., Yu, X. H., Tang, S. L., Tang, C. K. . Coronavirus disease 2019 (COVID-19): Current status and future perspectives, *International journal of antimicrobial agents*. 2020, 55(5), 105951. doi: [10.1016/j.ijantimicag.2020.105951](https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105951).
- [6] Vyklyuk, Y., Manylich, M., Škoda, M., Radovanović, M. M., & Petrović, M. D. Modeling and analysis of different scenarios for the spread of COVID-19 by using the modified multi-agent systems—Evidence from the selected countries, *Results in Physics*. 2021, 20, 103662. doi: [10.1016/j.rinp.2020.103662](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103662)
- [7] Castro, R. Coronavirus, una historia en desarrollo, *Revista médica de Chile*. 2020, 148(2), 143-144. doi: [10.4067/s0034-98872020000200143](https://doi.org/10.4067/s0034-98872020000200143).
- [8] Bhattacharyya, S., Dey, K., Paul, A. R., Biswas, R. A novel CFD analysis to minimize the spread of COVID-19 virus in hospital isolation room. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020, 139, 110294. doi: [10.1016/j.chaos.2020.110294](https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110294).
- [9] Shahid, O., Nasajpour, M., Pouriye, S., Parizi, R. M., Han, M., Valero, M., Sheng, Q. Z. Machine learning research towards combating COVID-19: Virus detection, spread prevention, and medical assistance. *Journal of Biomedical Informatics*. 2021, 117, 103751. doi: [10.1016/j.jbi.2021.103751](https://doi.org/10.1016/j.jbi.2021.103751).
- [10] Letchford, A. N., Nasiri, S. D., Theis, D. O. Compact formulations of the Steiner traveling salesman problem and related problems. *European Journal of Operational Research*. 2013, 228(1), 83-92. doi: [10.1016/j.ejor.2013.01.044](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.044).
- [11] López, E., Salas, Ó., Murillo, Á. El problema del agente viajero: un algoritmo determinístico usando búsqueda tabú. *Revista de Matemática: teoría y aplicaciones*. 2014, 21(1), 127-144. doi: [10.15517/rmta.v21i1.14142](https://doi.org/10.15517/rmta.v21i1.14142).
- [12] Papadimitriou, C. H., Steiglitz, K. Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Mineola, U.S.A.: Dover Publications, 1998.
- [13] Vig, V., Palekar, U. S. On estimating the distribution of optimal traveling salesman tour lengths using heuristics. *European Journal of Operational Research*. 2008, 186(1), 111-119. doi: [10.1016/j.ejor.2006.12.066](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.066).
- [14] Feng, H. M., Liao, K. L. Hybrid evolutionary fuzzy learning scheme in the applications of traveling salesman problems. *Information Sciences*. 2014, 270, 204-225. doi: [10.1016/j.ins.2014.02.098](https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.098).
- [15] Zhang, B., Qi, H., Ren, Y. T., Sun, S. C., Ruan, L. M. Application of homogenous continuous Ant Colony Optimization algorithm to inverse problem of one-dimensional coupled radiation and conduction heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013, 66, 507-516. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.054](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.054).
- [16] Burlak, G., Vlasova, M., Aguilar, P. M., Kakazey, M., Xixitla-Cheron, L. Optical percolation in ceramics assisted by porous clusters. *Optics communications*. 2009, 282(14), 2850-2856. doi: [10.1016/j.optcom.2009.04.030](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.04.030).
- [17] Fahey, R. A., Hino, A. COVID-19, digital privacy, and the social limits on data-focused public health responses. *International Journal of Information Mana-*

gement, 2020, 55, 102181. doi: [10.1016/j.ijinfomgt.2020.102181](https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102181).

ACERCA DE LOS AUTORES



Dr. Gennadiy Burlak, CIICAp de la UAEM. El Dr. Gennadiy Burlak ha trabajado como catedrático en la Universidad Nacional de Kiev, en el

Departamento de Física Teórica. Tiene los grados de doctor en: Ph. D. y D. of Sc. Desde 1998 es Profesor-Investigador Titular “C” del Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Es miembro del SNI desde 2000 y actualmente tiene el nivel III. El Dr. Burlak es autor y coautor de 14 libros y capítulos de libros y 170 artículos en revistas internacionales. Ha participado en más de 170 ponencias en Congresos Nacionales e Internacionales. Bajo de su dirección se han graduado: 16 tesis de doctorado, maestría y licenciatura. Ha impartido cursos de electromagnetismo, ecuaciones derivadas parciales y métodos numéricos en el posgrado y licenciatura del CIICAp de la UAEM. Es miembro de la Academia de Ciencias de Morelos (ACMOR) de American Physical Society. Se ha desempeñado como evaluador, árbitro del CONACyT y como referí de varias revistas internacionales como lo son: Phys.Rev.Lett., Chaos, JVSTA, MMA,PIER, entre otros. Sus temas principales de investigación son: Micro-esféricas multicapas, Optimización de radiación óptica en nanoestructuras, Dinámica no-lineal del Bose-Einstein condensate, Aplicaciones de redes neuronales en física cuántica y transición de fases en sistemas sólidos.



Dra. Yessica Yazmin Calderon Segura. La Dra. Yessica Yazmin Calderon Segura, cuenta con una experiencia en optimización de

algoritmos, modelos matemáticos, procesos para minimizar tiempos, sistemas de percolación, nanoestructuras y fenómenos electromagnéticos. Ha publicado artículos con coautoría en revistas internacionales y con alto factor de impacto. Así como otros conocimientos en los temas de procesamiento de imágenes, redes neuronales y sistemas. Actualmente es miembro del SNI, como candidata. Autora y coautora de 7 artículos en revistas internacionales. He participado en 22 ponencias en congresos nacionales e internacionales. Bajo de su dirección han graduado: 1 tesis de licenciatura FCAEI-UAEM. Actualmente 2 tesis de licenciatura FCAEI-UAEM en proceso, bajo su dirección.



Dr. Martín Gerardo Martínez Rangel. El Dr. Martín Gerardo Martínez Rangel es Doctor en Ingeniería y Ciencias aplicadas y Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación.

Prefesor-Investigador de tiempo completo titular "B" adscrito a la Facultad de Contaduría, Administración e Informática de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y miembro del SNI. Sus líneas de Investigación y generación del conocimiento se centran en la creación, mejora y desarrollo de algoritmos inteligentes para la optimización de recursos y el modelado de procesos para el desarrollo de sistemas de información en las organizaciones.