

# Route selection for emergency logistics management

Maximiliano Osorio<sup>1</sup>

Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.  
`mosorio@inf.utfsm.cl`

**Resumen** *Route selection for emergency logistics management* es uno de los problemas fundamentales en la gestión de logística en caso de emergencia. En la literatura el problema ha sido tratado considerando la velocidad de viaje entre los nodos constante, pero, la velocidad de viaje es variable con la extensión del desastre, especialmente en huracanes o inundaciones. En este documento presenta un modelo matemático para la selección de rutas para emergencia: un modelo de un objetivo que considera el efecto del desastre en tiempo de viaje entre cada arco, minimizando el tiempo total de viaje a lo largo del camino. Para la resolución del problema se propone un algoritmo basado en *Ant Colony System*.

**Keywords:** Route guidance system, Disaster simulation, Ant colony optimization

## 1. Introducción

En los recientes años, los frecuentes desastres naturales y no naturales han producido una gran daño a la población, por ejemplo en Chile: Terremoto de 2010 en Concepción y tsunami (27F), Gran Incendio de Valparaíso 2014, Inundación del Norte de Chile en 2015 e Incendio Zona Centro/Sur de Chile en 2017, a partir de esto se vuelve interesante observar los procedimientos de logística asociados a este tipo de desastres. La logística es una de las mayores actividades durante y después de la emergencia, el reparto de alimentos, medicamentos y abrigo deben ser entregados desde la zona de almacenamiento al área afectada de la manera más rápida posible. Es por esto que el diseño de rutas en casos de emergencia es un tema interesante de estudiar.

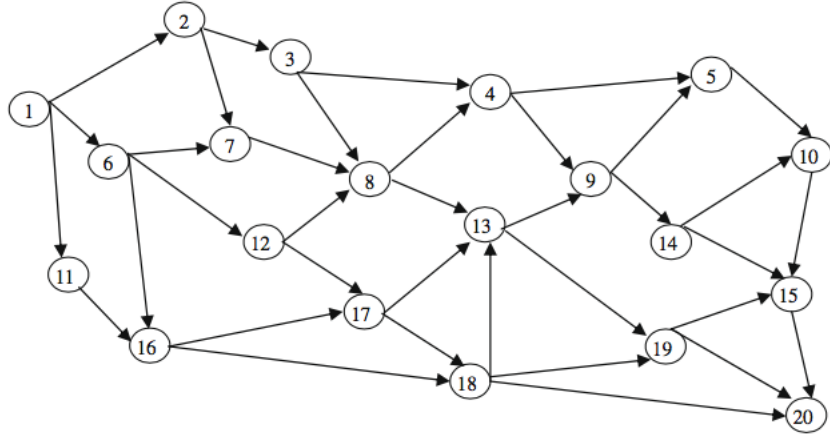
En este documento se busca entender las variables que afectan al problema, su historia, consideraciones a tomar y los avances que se han realizado en la literatura. Para luego, en las próximas secciones describir de manera más amplia el problema, sus modelos y sus estrategias de resolución.

## 2. Definición de problema

Definición de variables y parámetros para *route selection for emergency logistics management*:

## II

- $l_{ij}$  denota el largo de los arcos que se encuentra entre los nodos  $v_i$  y  $v_j$ , donde  $(v_i, v_j) \in A$ .
- $s_{ij}^0$  es la velocidad entre los arcos  $(v_i, v_j)$  en condiciones normales. Sea  $s_{ij}(t)$  es la velocidad de viaje en el arco  $(v_i, v_j)$  bajos las condiciones del desastre en el tiempo  $t$ .



**Figura 1.** Estructura de una red de emergencia

A partir de la observación de desastres como huracanes e inundaciones Se afirma que la velocidad de viaje en cada arco de la red decrece con el impacto del desastre [1]. La disminución de la velocidad de viaje es dependiente de la posición del arco, el tipo de desastre y otros. Sin pérdida de generalidad, la función de velocidad puede representarse como:

$$s_{ij}(t) = s_{ij}^0 \cdot \alpha_{ij} \cdot e^{-\beta_{ij} \cdot t} \quad (1)$$

donde  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  son los parámetros decrecientes que determinan la disminución de la velocidad del viaje  $s_{ij}(t)$ ,  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  pueden ser estimados de acuerdo a factores como la distancia desde arco  $(v_i, v_j)$  al centro del desastre, la vulnerabilidad del arco, el tipo de desastre, entre otros.

- Sea  $t_{ij}$  el tiempo necesario para viajar a través del arco  $(v_i, v_j)$ , se calcula como  $t_{ij} = t_j - t_i$ .
- Sea  $x_{ij}$  es variable de decisión del modelo  $x_{ij} = 1$  cuando el arco  $(v_i, v_j)$  es incluido en el camino y  $x_{ij} = 0$  cuando el arco  $(v_i, v_j)$  no es incluido en el camino.

- P denota el camino realizado, o sea la secuencia de nodos en la red que se elige. Sea  $p_k$  el número de la secuencia del nodo  $v_{p_k}$  en la red, entonces P puede ser presentado como  $(v_{p_1}, v_{p_2}, \dots, v_{p_k}, \dots, v_{p_K})$  donde  $1 \leq p_k \leq n$  y  $k$  es la secuencia del nodo  $v_{p_k}$  en el camino P. P debe iniciar en el nodo inicial  $p_1 = 1$  y  $p_K = n$ . Y no deben existir ciclos.
- Sea  $ET(P, v_{p_k})$  el tiempo de viaje desde  $v_{p_1}$  que termina en  $v_{p_k}$  a lo largo de  $(v_{p_1}, v_{p_2}, \dots, v_{p_k})$  donde  $1 \leq p_k \leq n$ . A partir de esto se determina que:

$$ET(P, v_{p_k}) = \sum_{m=1}^{k-1} t_{p_m p_{m+1}} = (t_{p_2} - t_{p_1}) + (t_{p_3} - t_{p_2}) + \dots + (t_{p_k} - t_{p_{k-1}}) = t_{p_k} \quad (2)$$

A partir de lo anterior podemos calcular el tiempo de un camino, dado que:

$$t_{p_1} = t_1 = 0 \quad (3)$$

$$\int_{t_{p_{k-1}}}^{t_{p_k}} s_{p_{k-1}p_k}(t) dt = l_{p_{k-1}p_k} \quad 2 \leq k \leq K \quad (4)$$

En la ecuación (4) conocemos el límite inferior de la integral, el integrando  $s_{p_{k-1}p_k}$  y el resultado de  $l_{p_{k-1}p_k}$ , por lo tanto, se puede obtener el límite superior  $t_{p_k}$ . Por recursividad se puede obtener los valores de  $t_{p_k}$  para los nodos  $v_{p_k}$  con  $1 \leq p_k \leq n$ .

### 2.1. Modelo matemático

A continuación se resume la notación utilizada para modelar el problema *route selection for emergency logistics management*

#### Notación

- $i$  índice para los nodos en la red
- $v_i$  nodo  $i$  de la red
- $(i, j)$  arco desde  $i$  a  $j$
- $x_{ij}$  variable de decisión del modelo,  $x_{ij} = 1$  cuando el arco de los nodos  $(v_i, v_j)$  es incluido en el camino, en caso contrario  $x_{ij} = 0$
- $l_{ij}$  largo del arco desde  $i$  a  $j$
- $s_{ij}^o$  velocidad entre los arcos  $(v_i, v_j)$  en condiciones normales
- $s_{ij}(t)$  velocidad entre los arcos  $(v_i, v_j)$  en el tiempo  $t$
- $\alpha_{ij}$  parámetro decreciente para manipular la velocidad
- $\beta_{ij}$  parámetro decreciente para manipular la velocidad
- $t_{ij}$  tiempo necesario para viajar entre  $i$  y  $j$

Considerando lo descrito por [2,3] se diseñan dos modelos con distintos objetivos: el primero busca la minimización del tiempo y el segundo busca múltiples objetivos: la minimización del tiempo y de la cantidad de nodos en la ruta.

**Minimizaci3n del tiempo:** La formulaci3n del *route selection for emergency logistics management* se describe de la siguiente manera:

El objetivo del modelo es minimizar el tiempo empleado en el camino. Las ecuaciones (14), (15) y (16) son parte de la f3rmula de recursi3n del tiempo total para el camino. En la ecuaci3n (17) la funci3n decreciente de la velocidad de viaje en el arco  $(v_i, v_j)$ . La restricci3n (18) asegura un camino factible desde  $v_1$  hasta  $v_n$  y la restricci3n (19) asegura que no existan ciclos.

$$\text{mín} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_{ij} \quad (5)$$

$$\int_{t_i}^{t_j} s_{ij}(t) dt = l_{ij} \quad (6)$$

$$t_{ij} = t_j - t_i \quad (7)$$

$$t_1 = 0 \quad (8)$$

$$s_{ij}(t) = s_{ij}^0 \cdot \alpha_{ij} \cdot e^{-\beta_{ij} \cdot t} \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ji} = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ -1 & i = n \\ 0 & eoc \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = \begin{cases} \leq 1 & i \neq n \\ = 0 & i = n \end{cases} \quad (11)$$

$$x_{ij} = 0, 1; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

### 3. Estado del Arte

*Route selection for emergency logistics management* es uno de los problemas fundamentales de logística. En los recientes ańos, los frecuentes desastres naturales ha incentivado la investigaci3n en el 3rea. El primer trabajo sobre enrutamiento de vehículos fue propuesto por [4] donde se optimiza el reparto de combustible usando camiones que distribuyen desde una terminal hasta múltiples estaciones de servicios. En [5] se propone un modelo para el diseńo de rutas en caso emergencias, el objetivo es minimizar la demanda insatisfecha en la ruta planeada. El plan logístico de emergencia incluye los puntos 3ptimos donde recoger y entregar los materiales en las rutas, estas rutas son regeneradas mientras nuevos materiales y modos de transportes se vuelven disponibles, pero este trabajo no considera que el tiempo de viaje puede variar segun el efecto de la catástrofe sobre los caminos. Segun [6,1] es importante considerar el efecto de la catástrofe sobre los caminos dado que las condiciones de viaje entre los nodos pueden verse fuertemente afectadas por la extensi3n del desastre, especialmente

en desastres como huracanes e inundaciones que se extienden en tiempo y espacio. Otros trabajos como [7] construyeron un modelo para expresar el efecto de la extensión de un desastre en los caminos, el efecto es representado con la variación de la velocidad de viaje. Para la resolución de este problema se utilizan dos técnicas: la primera basada en el algoritmo de Dijkstra, donde la idea es encontrar el camino más corto paso a paso y la técnica es un algoritmo basado en *Ant system*, el conocimiento heurístico para el movimiento es la función de velocidad  $s_{ij}(t) = s_{ij}^0 \cdot \alpha_{ij} \cdot e^{-\beta_{ij} \cdot t}$  si que un camino posible entre el nodo  $i$  y  $j$ .

sin mostrar valores de los parámetros. Los resultados experimentales fueron realizados con 20 nodos evaluando las dos técnicas: Dijkstra y ACO, donde ACO obtuvo mejores resultados en comparación con Dijkstra. Además ACO obtuvo rutas con menor tiempo de viaje de la instancia sin especificar el tiempo de ejecución. Las instancias utilizadas por Dijkstra y ACO son las mismas.

En [8] se propone un algoritmo inspirado en la biología observando y modelando el comportamiento de las ameboides para calcular las rutas de emergencia donde la velocidad de los arcos es variable. Los experimentos fueron realizados con 20 nodos donde se obtuvieron las mejores soluciones respecto a tiempo de las instancias sin especifica el tiempo de ejecución.

Por otra parte, investigaciones relacionadas [2,3] han mostrado que las mayores congestiones de un desastre son producidas en las intersecciones de dos arcos en una ruta de emergencia, produciendo un nuevo problema *Lane-based routing* donde la estrategia busca eliminar los cruces en las intersecciones. Además, en [9] se propone un método para resolver una evacuación considerando el cruce de intersecciones (*lane-based*), la técnica utilizada es tabú search y relajación lagrangiana, a diferencia de *route selection for emergency logistics management* modela el número de vías en un camino (camino con varias vías), capacidad de flujo del camino y demanda del nodo, siendo un problema mayor complejidad. El algoritmo es aplicado en un red de 100 nodos modelando la evacuación Monticello, Minnesota. El algoritmo converge entre las 350 y 450 iteraciones. En [10] se propone un modelo de programación entera para determinar la ruta óptima en caso de evacuación modelando la capacidad de los refugios donde las personas serán evacuadas, además modela la posibilidad de bloqueo por congestión. El algoritmo es evaluado en una instancia con tres áreas a evacuar, la red se encuentra compuesta de 31 nodos. En [11] entrega rutas de evacuación incluyendo planes para la distribución de vehículos considerando: las capacidades, emisiones de gases, costos económicos, entre otros. Estos son trabajados por un modelo difuso de evaluación basado en parámetros. Las simulaciones son realizadas con 8 nodos. Dada la incertidumbre y complejidad del ambiente en la emergencia, estos modelos tienen serias limitaciones en manejar el proceso de evaluación basado en los comportamientos individuales [12].

En [13] describe una emergencia considerando múltiples aspectos: minimizar el camino de salida en un edificio con múltiples salidas y niveles, utiliza *Ant Colony System* modificado para encontrar una ruta factible para resolver el problema. Define distintos tipos de agentes según el sector: agente señal de salida,

agente de pasillo, agente de escaleras y agente habitante. La evaluación es realizada en uno edificio de la Universidad Tecnológica de Petronas en Malaysia, el edificio tiene cuatro pisos, cada piso con cuatro bloques de piezas y cada bloque tiene doce piezas. La función a minimizar es el tiempo de evacuación  $T_{clear}$  y el número de ocupantes seguros. El autor realiza una comparación con el software IntelSign y el algoritmo propuesto. Finalmente el algoritmo obtiene mejores resultados que IntelSign respecto al tiempo de evacuación total. En [14] se presenta un algoritmo *ant colony system* multi-objetivo para resolver problemas de evacuaciones de automóviles y peatones considerando los aspectos como congestión, número de automóviles y peatones. El autor considera dos objetivos: minimizar el tiempo total de la evacuación y minimizar el número de arcos en camino total. Los experimentos son realizados con una simulación del estadio *Wuhan Sports Center* representada por 157 nodos dentro del estadio, 319 caminos fuera del estadio y 8 zonas de seguridad. Los parámetros utilizados son:  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 3$ ,  $\rho = 0,7$ ,  $w = 1$ ,  $k = 0,5$  Como continuación al trabajo anterior en [15] se utiliza modelo *multi-ant colony system* para considerar la evacuación de automóviles y peatones. En este caso, *Multi-ant colony system* [16] utilizada dos tipos de hormigas, una colonia encargada en la evacuación de peatones y otra colonia para la evacuación de vehículos, ambas colonias pueden comunicarse utilizando las feromonas. Los experimentos son realizados en las mismas condiciones y mismos parámetros, finalmente el autor concluye que el algoritmo MACS puede obtener mejores soluciones en comparación a ACS. En [17] se desarrolla un ACO para optimizar evacuaciones de personas en caso de tsunami considerando la seguridad, la calidad y la pendiente de los caminos. La simulación se realiza en la ciudad de Penco Chile que se representa con 67 nodos y dos zonas de seguridad. El autor hace un análisis para una simulación específica (desde nodo 16 hacia la zona de seguridad 2), mostrando que el algoritmo alcanza su mejor valor a las 50 iteraciones y se mantiene estable después de 300 iteraciones utilizando 100 hormigas. Luego, realiza una simulación con personas reales para validar el modelo, agrupa dos grupos de personas de un total de 34 adultos jóvenes: el primer grupo posicionado de manera aleatoria sin ninguna información sobre rutas de escape y el segundo grupo posicionado de manera aleatoria con información de las rutas construidas por el algoritmo. El autor concluye que los tiempos del modelo y la realidad no presentan diferencias significativas y por lo tanto el modelo utilizado permite modelar efectivamente una evacuación en caso de tsunami. Realizando una comparación de tiempos entre los grupos existen diferencias a favor del modelo, presentando hasta 7 minutos menos de tiempo necesario para la evacuación.

En [18] se propone un algoritmo *Max-Min Ant System*, que utiliza una nueva feromona llamada desodorante que elimina la feromona común de ACO cuando un camino peligroso ha sido encontrado, el objetivo de esta nueva feromona es poder entregar un mayor nivel de seguridad. La evaluación se realiza con un mapa de distrito de Shinjuku en Tokyo representada una matriz de 200x200, donde cada celda se categoriza como: Camino, área segura, área peligrosa y área no utilizable (murallas, edificios, etc). El área peligrosa aumenta de acuerdo al

porcentaje de personas evaluadas en el lugar. La evaluación se realiza con 500 iteraciones sin información de parámetros, finalmente el autor realiza una comparación con *Ant system* y concluye que el algoritmo propuesto permite evitar a nuevas zonas inseguras. En [12] se propone la utilización de *quantum ant colony algorithm (QACA)* utilizando conceptos y reglas de computación cuántica y ACO. El autor modela la evacuación desde una zona de peligro hacia una zona segura, cada zona presenta un número determinado de nodos y cada nodo tiene una capacidad máxima. El autor busca minimizar el tiempo de la evacuación y la densidad de personas en los nodos de la zona de seguridad. La evacuación se realiza en una red ficticia con 50 nodos donde se compara los resultados con una técnica ACO, el autor concluye que los resultados obtenidos por el algoritmo propuesto utilizando QACA presentan mejores soluciones considerando el tiempo total de la evacuación en comparación a ACO.

En [19,20] se propone el uso de *particle swarm optimization (PSO)* para la evacuación de peatones en áreas con alto tráfico, el uso de PSO busca poder utilizar la inteligencia individual y colectiva de los agentes. En [21] se presenta un modelo *discrete particle swarm optimization (DPSO)* para la evacuación de peatones y vehículos en caso de emergencia realizando un modelado y simulación de los movimientos de evacuación e interacción entre peatones y vehículos. Los experimentos son realizados utilizando el estadio *Wuhan Sports Center* que se representa con 157 nodos dentro del estadio, 319 caminos fuera del estadio y 8 zonas de seguridad. En la emergencia se realiza una evacuación de 10.000 peatones y 1.000 vehículos y se compara con ACO y MACO propuesto en [14,15] utilizando los siguientes parámetros para ellos  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 3$ ,  $\rho = 0,7$ ,  $Q = 100$ ,  $k = 1$  y el coeficiente de comunicación  $\lambda = 0,5$  para MACO. Los resultados muestran que los tiempos para los algoritmos PSO son mejores y el autor concluye que es debido a los mecanismos de aprendizaje de PSO. Por otro lado, el autor concluye que MACO presenta mejores resultados que ACO.

## 4. Descripción propuesta

### 4.1. Representación

Notación:

- $i$  índice para los nodos en la red
- $v_i$  nodo  $i$  de la red
- $(i, j)$  arco desde  $i$  a  $j$
- $x_{ij}$  variable de decisión del modelo,  $x_{ij} = 1$  cuando el arco de los nodos  $(v_i, v_j)$  es incluido en el camino, en caso contrario  $x_{ij} = 0$
- $l_{ij}$  largo del arco desde  $i$  a  $j$
- $s_{ij}^o$  velocidad entre los arcos  $(v_i, v_j)$  en condiciones normales
- $s_{ij}(t)$  velocidad entre los arcos  $(v_i, v_j)$  en el tiempo  $t$
- $\alpha_{ij}$  parámetro decreciente para manipular la velocidad
- $\beta_{ij}$  parámetro decreciente para manipular la velocidad
- $t_{ij}$  tiempo necesario para viajar entre  $i$  y  $j$

## VIII

La formulación del *route selection for emergency logistics management* se describe de la siguiente manera:

El objetivo del modelo es minimizar el tiempo empleado en el camino. Las ecuaciones (14), (15) y (16) son parte de la fórmula de recursión del tiempo total para el camino. En la ecuación (17) la función decreciente de la velocidad de viaje en el arco  $(v_i, v_j)$ . La restricción (18) asegura un camino factible desde  $v_1$  hasta  $v_n$ , la restricción (19) asegura que no existan ciclos y (18) muestra los dominios de las variables.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_{ij} \quad (13)$$

$$\int_{t_i}^{t_j} s_{ij}(t) dt = l_{ij} \quad (14)$$

$$t_{ij} = t_j - t_i \quad (15)$$

$$t_1 = 0 \quad (16)$$

$$s_{ij}(t) = s_{ij}^0 \cdot \alpha_{ij} \cdot e^{-\beta_{ij} \cdot t} \quad (17)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ji} = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ -1 & i = n \\ 0 & eoc \end{cases} \quad (18)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = \begin{cases} \leq 1 & i \neq n \\ = 0 & i = n \end{cases} \quad (19)$$

$$x_{ij} = 0, 1; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

### 4.2. Operadores/Movimientos

La decisión para la selección del siguiente nodo se realiza en base al movimiento definido por:

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{u \in S_k(i)} \{[\tau(i, u)]^\alpha [\eta(i, u)]^\beta\} & \text{if } q \leq q_0 \\ J & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

Donde  $J \in J_i^k$  se elige según la probabilidad:

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha_a} [\eta_{ij}]^{\beta_a}}{\sum_{h \in J_i^k} [\tau_{ih}(t)]^{\alpha_a} [\eta_{ih}]^{\beta_a}} \quad (22)$$

Para la sección de siguiente nodo se considera la heurística del tiempo expresada por  $\eta = \frac{1}{\text{tiempo.tour}}$ . En caso que el nodo sea un nodo seguro se selecciona el nodo y se finaliza la construcción del camino.



### 4.3. Descripción de cada proceso

### 4.4. Pseudocódigo general

En general, el algoritmo implementado está basado en el algoritmo Ant Colony System [22]. A continuación se muestra un pseudocódigo del algoritmo 1.

### 4.5. Listado de parámetros del algoritmo

A continuación se presenta los parámetros utilizados por el algoritmo.

- Número de iteraciones:  $loops = 2000$
- Tamaño de la lista candidata  $cl = 15$
- Número de hormigas  $M = 10$
- Parámetro ACS  $\alpha_{ant} = 1$
- Parámetro ACS  $\beta_{ant} = 2$
- Selección  $q_0 = 0,5$
- Evaporación  $\rho = 0,5$
- Feromona inicial  $\tau_0 = 0,1$

## 5. Resultados preliminares

### 5.1. Objetivos experimentos

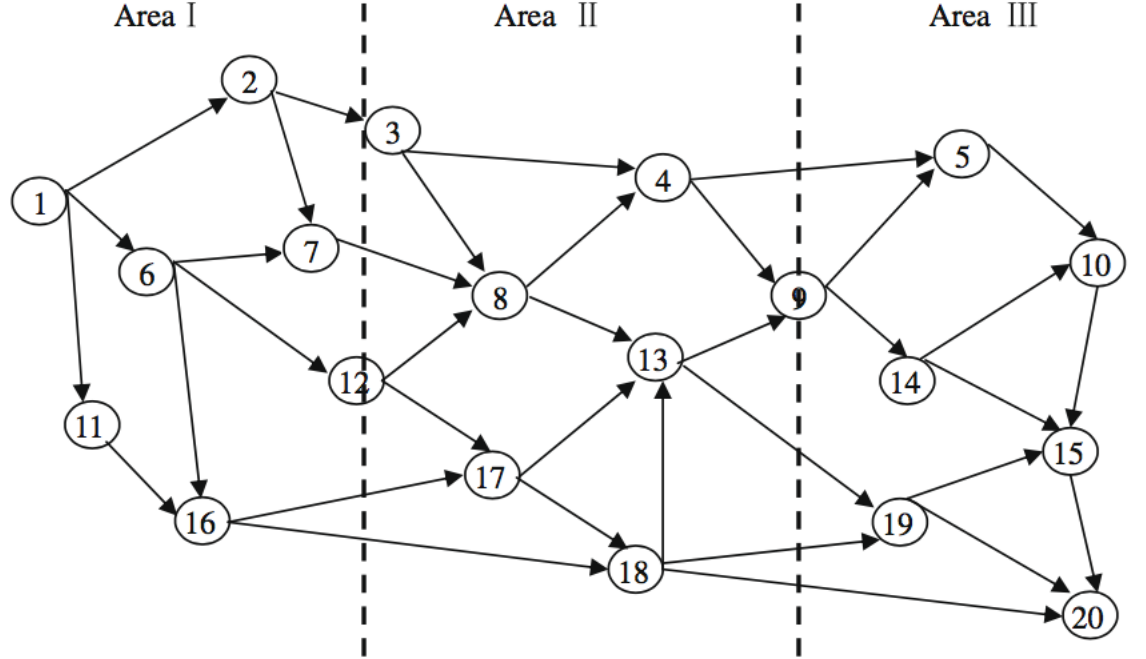
En esta sección de forma preliminar, se busca comparar la calidad de las soluciones obtenidas por algoritmo propuesto contra dos algoritmos de la literatura en [7].

### 5.2. Instancias de pruebas

En el [7] se presenta un red de 20 nodos divididos en 3 áreas que se muestra en la figura 2. En cada área los parámetros son generados de forma aleatoria, los cuales se observan en el cuadro 1. Para el desastre 0 es una situación sin ningún desastre y el desastre 4 es situación más compleja. Para las instancias propuesta por [7] se considera que el nodo 20 es un nodo seguro.

**Data:** Algoritmo propuesto  
inicializar;  
**for** *cada arco*  $(i,j)$  **do**  
|  $\tau_{ij}(0) = \tau_0$   
**end**  
**for**  $k=1$  *hasta*  $n$  **do**  
| Ubique la hormiga  $k$  en el primer nodo  
**end**  
Sea  $T^+$  el tour más corto encontrado desde el inicio;  
**for**  $t=1$  *hasta el número de iteraciones* **do**  
| **for**  $k=1$  *hasta*  $m$  **do**  
| | **while** *no se complete el tour* **do**  
| | | **if** *si existe un nodo*  $j \in cl$  **then**  
| | | | Elegir un nodo  $j$ ,  $j \in J_i^k$  entre  $cl$  nodos de la lista;  
| | | | 
$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{u \in J_i^k} \{[\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}]^\beta\} & \text{if } q \leq q_0 \\ J & \text{otherwise} \end{cases}$$
  
| | | | Donde  $J \in J_i^k$  se elige según la probabilidad;  
| | | | 
$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in J_i^k} [\tau_{ih}(t)]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta} \quad (23)$$
  
| | | | Y donde  $i$  es el nodo actual.  
| | | | **else**  
| | | | | elegir el nodo  $j \in J_i^k$  más cercana.  
| | | | **end**  
| | | | Luego se actualiza la feromona;  
| | | | 
$$t_{ij}(t) = (1 - \rho)t_{ij}(t) + \rho\tau_0 \quad (24)$$
  
| | | **end**  
| | | Calcular el tiempo  $T_k$  del tour de la hormiga  $k$   
| | **end**  
| | Salvar la mejor solución  $T^+$  encontrada hasta el momento  
| | **for** *cada arco*  $(i,j) \in T^+$  **do**  
| | | 
$$t_{ij}(t) = (1 - \rho)t_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t) \quad (25)$$
  
| | | donde  $\tau_{ij}(t) = \frac{1}{T^+}$   
| | **end**  
**end**

**Algorithm 1:** Algoritmo ACS.



**Figura 2.** División de una red de emergencia

En los cuadros 7, 8, 9 y 10 se muestran los valores correspondientes al nodo  $i$  y nodo  $j$ .  $l_{i,j}$ ,  $s_{i,j}^0$ ,  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  según los distintos grados de desastre.

Tipo	Área I	Área II	Área III
Desastre 0	$\alpha = 1, \beta = 0$	$\alpha = 1, \beta = 0$	$\alpha = 1, \beta = 0$
Desastre 1	$\alpha \in (0,9, 1,0)$ $\beta \in (0,00, 0,05)$	$\alpha = 1, \beta = 0$	$\alpha = 1, \beta = 0$
Desastre 2	$\alpha \in (0,8, 0,9)$ $\beta \in (0,05, 0,10)$	$\alpha \in (0,9, 1,0)$ $\beta \in (0,00, 0,05)$	$\alpha = 1, \beta = 0$
Desastre 3	$\alpha \in (0,7, 0,8)$ $\beta \in (0,10, 0,15)$	$\alpha \in (0,8, 0,9)$ $\beta \in (0,05, 0,10)$	$\alpha \in (0,9, 1,0)$ $\beta \in (0,00, 0,05)$
Desastre 4	$\alpha \in (0,6, 0,7)$ $\beta \in (0,15, 0,20)$	$\alpha \in (0,7, 0,8)$ $\beta \in (0,10, 0,15)$	$\alpha \in (0,8, 0,9)$ $\beta \in (0,05, 0,10)$

**Cuadro 1.** Intervalos de los parametros por área

### 5.3. Tablas comparativas respecto al estado del arte.

Para comparar los resultados obtenidos por el algoritmo (Propuesto) se usarán los resultados obtenidos por [7] donde utiliza dos algoritmos: *Best path Dijkstra*

y *Static shortest path*.

Como se muestra en los cuadros 2,3,4,5 Propuesto obtiene los mejores valores posibles del problema al igual que *Best path Dijkstra*. En comparación a *Static shortest path*, los valores obtenidos por el algoritmo propuestos son mejores.

Algoritmo	Camino	Tiempo [min]
Best path Dijkstra	1 → 6 → 12 → 17 → 18 → 20	3.136548
Static shortest path	1 → 11 → 16 → 18 → 20	3.196073
Propuesto	1 → 6 → 12 → 17 → 18 → 20	3.136548

**Cuadro 2.** Resultado grado 1

Algoritmo	Camino	Tiempo [min]
Best path Dijkstra	1 → 6 → 12 → 17 → 18 → 20	3.480311
Static shortest path	1 → 11 → 16 → 18 → 20	3.694391
Propuesto	1 → 6 → 12 → 17 → 18 → 20	3.480311

**Cuadro 3.** Resultado grado 2

Algoritmo	Camino	Tiempo [min]
Best path Dijkstra	1 → 6 → 12 → 17 → 18 → 20	4.544814
Static shortest path	1 → 11 → 16 → 18 → 20	4.954273
Propuesto	1 → 6 → 12 → 17 → 18 → 20	4.544814

**Cuadro 4.** Resultado grado 3

Algoritmo	Camino	Tiempo [min]
Best path Dijkstra	1 → 6 → 12 → 8 → 13 → 9 → 14 → 15 → 20	6.365086
Static shortest path	1 → 11 → 16 → 18 → 20	7.468316
Propuesto	1 → 6 → 12 → 8 → 13 → 9 → 14 → 15 → 20	6.365086

**Cuadro 5.** Resultado grado 4

Algoritmo	Camino	Tiempo [min]
Best path Dijkstra	1 → 2 → 3 → 4 → 9 → 14 → 15 → 20	12.323639
Static shortest path	1 → 11 → 16 → 18 → 20	19.297973
Propuesto	1 → 2 → 3 → 4 → 9 → 14 → 15 → 20	12.323639

Cuadro 6. Resultado grado 5

## 6. Conclusiones

*Route selection for emergency logistics management* es uno de los problemas fundamentales de logística en caso de emergencia, lo cual se puede observar en los múltiples trabajos y las diversas técnicas utilizadas para la resolución del problema en la literatura. De acuerdo al modelo propuesto en este trabajo, [7,8] presentan el mismo modelo y utilizan una instancia con 20 nodos donde cambia el nivel de desastre generando 5 tipos de riesgos, ambos algoritmos presentados en [7,8] obtienen los mejores resultados posibles, no obstante se debe considerar que el tamaño de la instancia es pequeña, la cantidad de instancias son pocas y la diversidad es baja. Por otro lado, en [14,15,21] se utiliza una instancia basada en el estadio *Wuhan Sports Center* siendo modelado por un red compuesta de 479 nodos en total, donde se observa que existe una alta complejidad, posicionándola como una instancia deseable para ser utilizada en *route selection for emergency logistics management*, aunque se debe considerar que es necesario adaptaciones al modelo o la instancia para que sean compatibles.

Para partir de los resultados, *Ant Colony System* es una técnica muy adecuada para este tipo de problema, ya que el problema de *Route selection for emergency logistics management* tiene similitudes a *Traveling Salesman Problem* y al ser un problema de rutas, la adaptación del algoritmo es simple.

Pese a que los resultados muestran eficiencia y factibilidad del modelo y algoritmo. Se debe considerar que la instancia de prueba es pequeña por lo tanto no es posible asegurar la calidad del algoritmo para otros casos.

## 7. Referencias

1. S. Tufekci, "An integrated emergency management decision support system for hurricane emergencies," *Safety Science*, vol. 20, no. 1, pp. 39–48, 1995.
2. F. Southworth, "Regional evacuation modeling: a state-of-the-art review," 1991.
3. T. J. Cova and J. P. Johnson, "A network flow model for lane-based evacuation routing," *Transportation research part A: Policy and Practice*, vol. 37, no. 7, pp. 579–604, 2003.
4. G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.
5. L. Özdamar, E. Ekinici, and B. Küçükyazici, "Emergency logistics planning in natural disasters," *Annals of operations research*, vol. 129, no. 1, pp. 217–245, 2004.
6. K. Farahmand, "Application of simulation modeling to emergency population evacuation," in *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation*, pp. 1181–1188, IEEE Computer Society, 1997.

7. Y. Yuan and D. Wang, "Path selection model and algorithm for emergency logistics management," *Computers & industrial engineering*, vol. 56, no. 3, pp. 1081–1094, 2009.
8. X. Zhang, Z. Zhang, Y. Zhang, D. Wei, and Y. Deng, "Route selection for emergency logistics management: A bio-inspired algorithm," *Safety science*, vol. 54, pp. 87–91, 2013.
9. C. Xie and M. A. Turnquist, "Lane-based evacuation network optimization: An integrated lagrangian relaxation and tabu search approach," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, no. 1, pp. 40–63, 2011.
10. A. Stepanov and J. M. Smith, "Multi-objective evacuation routing in transportation networks," *European Journal of Operational Research*, vol. 198, no. 2, pp. 435–446, 2009.
11. Q. Tan, G. H. Huang, C. Wu, and Y. Cai, "If-em: An interval-parameter fuzzy linear programming model for environment-oriented evacuation planning under uncertainty," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 45, no. 4, pp. 286–303, 2011.
12. M. Liu, F. Zhang, Y. Ma, H. R. Pota, and W. Shen, "Evacuation path optimization based on quantum ant colony algorithm," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 30, no. 3, pp. 259–267, 2016.
13. A. Rahman and A. K. Mahmood, "Feasible route determination using ant colony optimization in evacuation planning," in *Research and Development, 2007. SCO-ReD 2007. 5th Student Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2007.
14. X. Zong, S. Xiong, Z. Fang, and W. Lin, "Multi-objective ant colony optimization model for emergency evacuation," in *Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference on*, vol. 6, pp. 2774–2778, IEEE, 2010.
15. X. Zong, S. Xiong, Z. Fang, and Q. Li, "Multi-ant colony system for evacuation routing problem with mixed traffic flow," in *Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
16. L. M. Gambardella, É. Taillard, and G. Agazzi, "Macs-vrptw: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows," 1999.
17. E. Forcael, V. González, F. Orozco, S. Vargas, A. Pantoja, and P. Moscoso, "Ant colony optimization model for tsunamis evacuation routes," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 29, no. 10, pp. 723–737, 2014.
18. A. Ohta, H. Goto, T. Matsuzawa, M. Takimoto, Y. Kambayashi, and M. Takeda, "An improved evacuation guidance system based on ant colony optimization," in *Intelligent and Evolutionary Systems*, pp. 15–27, Springer, 2016.
19. J. Izquierdo, I. Montalvo, R. Pérez, and V. Fuertes, "Forecasting pedestrian evacuation times by using swarm intelligence," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 388, no. 7, pp. 1213–1220, 2009.
20. Y. Zheng, J. Chen, J. Wei, and X. Guo, "Modeling of pedestrian evacuation based on the particle swarm optimization algorithm," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 391, no. 17, pp. 4225–4233, 2012.
21. X. Zong, S. Xiong, and Z. Fang, "A conflict-congestion model for pedestrian-vehicle mixed evacuation based on discrete particle swarm optimization algorithm," *Computers & Operations Research*, vol. 44, pp. 1–12, 2014.
22. M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, 1997.

## A. Instancias

inicio	fin	$l_{i,j}$	$s_{i,j}^0$	$\alpha_{i,j}$	$\beta_{i,j}$
1	2	50	100	0.9222	0.0381
1	6	30	60	0.9193	0.0143
1	11	70	110	0.9022	0.0499
2	3	30	60	0.9904	0.0277
2	7	40	70	0.9857	0.0305
6	7	30	65	0.9577	0.0123
6	12	60	105	0.906	0.0399
6	16	100	115	0.9049	0.0353
7	8	40	90	0.9153	0.0436
11	16	30	70	0.9967	0.0089
16	17	80	115	0.964	0.0491
16	18	110	120	0.9294	0.0327
3	4	80	100	1	0
3	8	60	95	1	0
4	5	110	120	1	0
4	9	40	75	1	0
5	10	60	110	1	0
8	4	40	85	1	0
8	13	30	75	1	0
9	5	70	110	1	0
9	14	40	90	1	0
10	15	50	105	1	0
12	8	30	65	1	0
12	17	40	100	1	0
13	9	30	80	1	0
13	19	110	120	1	0
14	10	80	115	1	0
14	15	60	105	1	0
15	20	30	90	1	0
17	13	40	80	1	0
17	18	40	75	1	0
18	13	60	115	1	0
18	19	70	110	1	0
18	20	120	120	1	0
19	15	40	75	1	0
19	20	70	105	1	0

**Cuadro 7.** Parámetros para un desastre grado 1

inicio	fin	$l_{i,j}$	$s_{i,j}^0$	$\alpha_{i,j}$	$\beta_{i,j}$
1	2	50	100	0.9222	0.0381
1	6	30	60	0.9193	0.0143
1	11	70	110	0.9022	0.0499
2	3	30	60	0.9904	0.0277
2	7	40	70	0.9857	0.0305
6	7	30	65	0.9577	0.0123
6	12	60	105	0.906	0.0399
6	16	100	115	0.9049	0.0353
7	8	40	90	0.9153	0.0436
11	16	30	70	0.9967	0.0089
16	17	80	115	0.964	0.0491
16	18	110	120	0.9294	0.0327
3	4	80	100	0.9153	0.0216
3	8	60	95	0.9562	0.0114
4	5	110	120	0.989	0.0281
4	9	40	75	0.9984	0.0386
8	4	40	85	0.9746	0.0376
8	13	30	75	0.9999	0.0222
12	8	30	65	0.9345	0.0044
12	17	40	100	0.9846	0.0228
13	9	30	80	0.9094	0.0264
13	19	110	120	0.9326	0.0151
17	13	40	80	0.9077	0.035
17	18	40	75	0.947	0.0344
18	13	60	115	0.9669	0.0202
18	19	70	110	0.953	0.0059
18	20	120	120	0.9278	0.0021
5	10	60	110	1	0
9	5	70	110	1	0
9	14	40	90	1	0
10	15	50	105	1	0
14	10	80	115	1	0
14	15	60	105	1	0
15	20	30	90	1	0
19	15	40	75	1	0
19	20	70	105	1	0

Cuadro 8. Parámetros para un desastre grado 2



inicio	fin	$l_{i,j}$	$s_{i,j}^0$	$\alpha_{i,j}$	$\beta_{i,j}$
1	2	50	100	0.7544	0.1026
1	6	30	60	0.7666	0.1394
1	11	70	110	0.7561	0.1276
2	3	30	60	0.7071	0.1089
2	7	40	70	0.7527	0.1277
6	7	30	65	0.7001	0.1062
6	12	60	105	0.7145	0.1209
6	16	100	115	0.7234	0.1361
7	8	40	90	0.7242	0.108
11	16	30	70	0.7378	0.1281
16	17	80	115	0.7048	0.1197
16	18	110	120	0.7639	0.1365
3	4	80	100	0.8912	0.0844
3	8	60	95	0.8242	0.0571
4	5	110	120	0.8773	0.0552
4	9	40	75	0.8678	0.099
8	4	40	85	0.8801	0.067
8	13	30	75	0.8425	0.0987
12	8	30	65	0.8383	0.0543
12	17	40	100	0.8785	0.0786
13	9	30	80	0.8551	0.0707
13	19	110	120	0.873	0.057
17	13	40	80	0.8191	0.0778
17	18	40	75	0.8555	0.0781
18	13	60	115	0.8965	0.0653
18	19	70	110	0.8967	0.0694
18	20	120	120	0.8551	0.0948
5	10	60	110	0.9476	0.0343
9	5	70	110	0.9806	0.0484
9	14	40	90	0.9984	0.0219
10	15	50	105	0.9937	0.0091
14	10	80	115	0.9334	0.0486
14	15	60	105	0.9966	0.022
15	20	30	90	0.9517	0.0363
19	15	40	75	0.9547	0.0265
19	20	70	105	0.9849	0.029

Cuadro 9. Parámetros para un desastre grado 3

inicio	fin	$l_{i,j}$	$s_{i,j}^0$	$\alpha_{i,j}$	$\beta_{i,j}$
1	2	50	100	0.6396	0.1783
1	6	30	60	0.6815	0.1934
1	11	70	110	0.6204	0.1647
2	3	30	60	0.6244	0.1698
2	7	40	70	0.658	0.1674
6	7	30	65	0.6481	0.1515
6	12	60	105	0.6717	0.1957
6	16	100	115	0.6706	0.1672
7	8	40	90	0.6619	0.1864
11	16	30	70	0.6821	0.1645
16	17	80	115	0.6146	0.1858
16	18	110	120	0.6625	0.1918
3	4	80	100	0.7606	0.1184
3	8	60	95	0.7454	0.1348
4	5	110	120	0.7276	0.1178
4	9	40	75	0.7686	0.1192
8	4	40	85	0.7416	0.1484
8	13	30	75	0.7073	0.132
12	8	30	65	0.7911	0.1081
12	17	40	100	0.7222	0.117
13	9	30	80	0.7869	0.1274
13	19	110	120	0.7775	0.1477
17	13	40	80	0.7769	0.1329
17	18	40	75	0.7269	0.1441
18	13	60	115	0.711	0.1483
18	19	70	110	0.7779	0.1018
18	20	120	120	0.7046	0.127
5	10	60	110	0.8334	0.0652
9	5	70	110	0.8208	0.0519
9	14	40	90	0.8827	0.0574
10	15	50	105	0.8225	0.0678
14	10	80	115	0.8736	0.0859
14	15	60	105	0.8742	0.0662
15	20	30	90	0.8935	0.0502
19	15	40	75	0.8001	0.0811
19	20	70	105	0.8535	0.0919

Cuadro 10. Parámetros para un desastre grado 4