

Plan de ruteo para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria ante un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao

Renzo Benavente, Ingeniero Industrial¹, Christian Cornejo, Ingeniero Industrial²

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, renzo.benavente@pucp.pe

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, cscornejo@pucp.edu.pe

Abstract – *A critical scenario of a magnitude 8.0 Mw earthquake is presented with epicenter in Lima, after which it is necessary to distribute non-food humanitarian aid to 1 795 735 victims in Lima City and Callao. The scenario works under the assumption that there are 22 warehouses that will supply 42 proposed substations. Each substation will distribute the goods to 50 nodes located in nearby parks. The affected population will have to approach the selected park in order to receive three kits of aid goods. We examine three classic heuristics: the savings algorithm, the two-phase method and the nearest neighbor algorithm. The selected heuristic is the two-step method: first assigning the nodes into groups, using the sweep algorithm, and then determining the route using a TSP model. After performing the heuristic to each of the 42 substations, we find that it reaches the 72 hour norm after making a total of 70 800 kilometers. Additionally, we present scenarios evaluating a smaller number of vehicles in the substations that present time slacks.*

Keywords — *Humanitarian logistics, vehicle routing problem, earthquakes, routing heuristics.*

Resumen – *Se presenta un escenario crítico de un terremoto de magnitud 8,0 Mw con epicentro frente a Lima, ante el cual se busca realizar la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria a 1 795 735 damnificados en Lima Metropolitana y Callao. Se trabaja bajo el supuesto que se cuenta con 22 almacenes los cuales abastecerán a 42 subestaciones propuestas. Cada subestación distribuirá los bienes a 50 nodos ubicados en parques aledaños. La población damnificada deberá acercarse al parque seleccionado para recibir tres kits de bienes de ayuda. Se evalúan tres heurísticas clásicas: el algoritmo de ahorros, el método en dos fases y el algoritmo del vecino más cercano. La heurística seleccionada es el método en dos fases: asignando primero los nodos en grupos, usando el algoritmo de barrido, y luego determinar la ruta con ayuda de un modelo TSP. Luego de realizar la heurística a cada una de las 42 subestaciones, se concluye que sí se llega a cumplir con la norma de 72 horas realizando un recorrido total de 70 800 kilómetros. Adicionalmente, se presentan escenarios evaluando una menor cantidad de vehículos en las subestaciones que presenten holguras de tiempo.*

Palabras claves — *Logística humanitaria, ruteo de vehículos, terremotos, heurísticas de tiempo.*

I. INTRODUCCIÓN

Perú es uno de los países que se ubican en el Cinturón de Fuego del Pacífico y esto explica por qué en los últimos tres años se han registrado más de 200 sismos por año [1]. La superficie de Lima Metropolitana representa el 0.22% del territorio peruano; sin embargo, concentra el 32% de la población nacional. Se sitúa en la costa del país, y en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, frente al Océano

Pacífico. La capital peruana ha sido sacudida por sismos destructivos en 1908, 1932, 1940, 1966 y 1974, cuyas magnitudes varían entre 7° y 8.2° en la escala de Richter [2].

Existe un “silencio sísmico” desde 1974 lo cual indica que se viene acumulando energía subterránea, la cual podría ser liberada en cualquier momento a través de un gran terremoto de 8,0 Richter o superior. Los bienes de ayuda humanitaria no alimentaria tienen como objetivo reemplazar temporalmente una vivienda dañada otorgando a la familia una carpa, abrigo, utensilios de cocina, etc. Estos bienes deben ser suministrados de manera gratuita e inmediata a la población damnificada durante las primeras 72 horas de ocurrido un desastre [3].

El presente documento busca determinar cuáles serían las rutas convenientes para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria a la población damnificada tras la ocurrencia de un sismo de 8 Mw en la capital peruana.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Modelo matemático

Se denomina problema de ruteo de vehículos, en adelante VRP, a todo problema relacionado con la distribución de bienes entre depósitos y clientes. Se busca determinar un grupo de rutas, cada una ejecutada por un solo vehículo que inicia y finaliza el recorrido en un depósito, tal que todos los clientes sean atendidos, las restricciones operacionales satisfechas y el costo global minimizado [4].

Los primeros en dar una aplicación real al VRP buscaron optimizar el ruteo de una flota de camiones repartidores de gasolina a un gran número de estaciones de servicio, partiendo de un depósito central. En este caso los vértices representan el depósito y cada una de las estaciones de servicio a las que se debe abastecer, mientras que los arcos representan la distancia entre cada uno de estos nodos [5].

Generalmente, este problema es descrito en un gráfico cuyos arcos representan caminos y los vértices indican la ubicación del depósito y los clientes. Cada cliente tiene un requerimiento de bienes, los cuales deberán ser repartidos por una flota de vehículos, cuya cantidad y capacidad de carga son parámetros del problema. Cada arco se asocia a un costo, el cual generalmente representa la distancia entre nodos, o el tiempo que demora trasladarse de un punto a otro. A continuación se muestra el modelo VRP propuesto en la referencia [6] el cual tiene como base un gráfico completo definido por $G = (V, A)$, donde $V = (0, 1, 2, \dots, n)$ es el conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos posibles. Los vértices $i = 1, 2, \dots, n$

corresponden a los clientes, que a su vez pertenecen al subconjunto N ; mientras que el vértice 0 corresponde al depósito.

$$\text{Min } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

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

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

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = |K| \quad (4)$$

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq N, S \neq \emptyset \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (6)$$

Cabe indicar que x_{ij} es una variable binaria que vale 1 cuando por el arco (i, j) circula un vehículo, o cero en caso contrario. La función objetivo mostrada en (1) representa el costo total del recorrido, y el modelo buscará que sea el menor monto posible. La restricción (2) indica que cada cliente debe ser atendido solo por un vehículo y también garantiza que todos los clientes sean atendidos, mientras que la restricción (3) impone que el vehículo deberá partir de dicho cliente y seguir con su ruta. La restricción (4) indica que un número K de vehículos parten del depósito y que esta misma cantidad deberá retornar finalizando sus rutas. La restricción (5) impone los requerimientos de capacidad de carga para cada ruta. Finalmente, la restricción (6) define al modelo como uno entero binario.

B. Heurísticas de ruteo

Según la referencia [5], los VRP son clasificados como problemas NP-hard, pues es muy difícil resolverlos, así, un VRP con solo un vehículo y 15 clientes que abastecer, tendría más de seiscientos mil millones de rutas posibles. Esto se complica más al aumentar el número de vehículos y clientes. Es por este motivo que se sugiere recurrir a métodos heurísticos. A continuación se muestran 3 métodos heurísticos.

Uno de los algoritmos más difundidos para los VRP es el algoritmo de ahorros [7] el cual propone un procedimiento para obtener una solución óptima o una bastante cercana a la óptima, de manera rápida. El principio básico en esta heurística es la del ahorro que es la disminución en distancia obtenida al crear nuevas rutas con base en la activación de un arco. Por ejemplo, sea una red con vértices P_0 , que representa el depósito, y P_i que representan los clientes, con dos puntos P_y y P_z unidos a $P_{y \pm 1}$ y $P_{z \pm 1}$ respectivamente. Los puntos P_y y P_z pertenecen a rutas distintas y se evaluará el ahorro obtenido al unir dichos vértices. El máximo ahorro obtenido se selecciona siempre y cuando cumpla con la factibilidad operacional de carga, caso contrario se pasa al siguiente. Una vez unidos estos dos puntos se deberán recalcular los ahorros. Si un punto está unido a otros dos, sin contar P_0 , no deberá ser considerado para posibles uniones. Para tener una solución inicial factible se considera que cada ruta visita un único cliente y regresa al depósito. Luego de esto se calculará el ahorro para cada arco posible y se realizará el procedimiento descrito. Esto se repetirá hasta que ya no se encuentren ahorros positivos.

Otra heurística es la del método en dos fases que obtiene una solución factible cercana a la óptima rápidamente para mediana y gran escala [8]. Este método divide el procedimiento en dos etapas: en una primera instancia busca agrupar clientes en clústeres, respetando las restricciones de capacidad de carga de los vehículos, los cuales pertenecerán a una misma ruta; finalizada esta etapa, se procederá a crear una ruta que minimice la distancia total recorrida para cada clúster. Uno de los métodos más elementales es el de barrido que consiste en formar agrupaciones factibles de clientes al rotar un radio con centro en el depósito, para luego crear una ruta para cada agrupación. Cuando ya todos los clientes estén agrupados en clústeres, se obtendrá una ruta óptima para cada clúster por separado. Estas rutas pueden ser optimizadas resolviendo el TSP o problema del agente viajero (por sus siglas en inglés *Traveling Salesman Problem*) que puede ser descrito como un VRP en el cual se dispone de un solo vehículo. En la referencia [9] se propone un modelo de programación lineal entera mixta mostrado a continuación:

$$\text{Min } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} x_{ij} \quad i \neq j \quad (7)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (9)$$

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1 \quad 1 \leq i \neq j \leq n \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (11)$$

$$u_i \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in N \quad (12)$$

Donde N es el conjunto de clientes por visitar, no incluye el depósito, mientras que V es el conjunto $N \cup \{0\}$. Las restricciones (8) y (9) indican al modelo que todos los clientes sean visitados una vez y la restricción (10) es la encargada de garantizar que no se generen *subtours*. La variable u_i representa el acumulado de clientes a los que ya ha visitado al partir del nodo i . En otras palabras, si el vehículo se dirige del nodo i al nodo j , $x_{ij}=1$, se debe cumplir la restricción $u_i - u_j = -1$. Caso contrario, siempre debe cumplirse que $u_i - u_j = n - 1$, donde n es el número de clientes visitados en la ruta.

Finalmente, la tercera heurística es la del vecino más cercano aplicado para un VRP que consiste en armar una ruta basándose en el nodo más cercano hasta alcanzar con el límite de capacidad del vehículo para luego empezar otra ruta [10]. Se empieza desde el depósito y luego se dirige al cliente más cercano para cumplir con la demanda de ese nodo, luego dirigirse al cliente más cercano partiendo del cliente recientemente visitado y así sucesivamente.

III. APLICACIÓN DEL MODELO

A. Estudios previos

En la referencia [11] se realizó un estudio de microzonificación sísmica para determinar el riesgo sísmico de los distritos de Lima Metropolitana y Callao. Con base en ese estudio, en la referencia [12] evaluó cómo impactaría un sismo de gran magnitud al espacio geográfico descrito en el estudio.

Se concluyó que 34 zonas urbanas se encuentran en muy alto riesgo; 29 en alto riesgo; 20 en mediano riesgo y 23 zonas en bajo riesgo. Además, a causa del movimiento sísmico, colapsarían 200 347 viviendas y 348 329 resultarían altamente afectadas.

Con estos resultados, en la referencia [13] evaluó la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria a la población damnificada para determinar si el número de almacenes y su ubicación eran los adecuados. En primer lugar calculó la población afectada que necesitaría de estos recursos, multiplicando la cantidad de viviendas que quedarían inhabitables con el promedio de personas por vivienda en cada distrito. Para determinar la ubicación de los almacenes se empezará descartando los distritos con alto riesgo sísmico o que estén muy cercanos al litoral por el riesgo de tsunami. Para la realización del modelo de optimización, se elaboró una red donde cada nodo era un distrito y los arcos eran las distancias entre ellos. El resultado de esta investigación respetaba el presupuesto que disponía en 2013 el INDECI de 110 millones de nuevos soles, con de 22 almacenes y logra atender a más de trece veces el número de damnificados comparado con la situación actual, y recorriendo una distancia total que representa menos del 5% de lo que recorrería en el escenario de la situación actual [13].

B. Escenario crítico

Para determinar el escenario crítico se ha tomado como base el estudio hecho por la referencia [12] el cual indica la magnitud máxima del probable sismo, así como el estudio de microzonificación el cual indica el grado de vulnerabilidad y riesgo sísmico de Lima Metropolitana y Callao. El evento sísmico de gran magnitud que podría ocurrir en Lima Metropolitana y Callao sería de magnitud 8 Mw con una intensidad máxima de VIII en la escala Mercalli modificada. Tendría epicentro frente a Lima con una profundidad de 33 kilómetros, lo cual podría desencadenar un tsunami con olas de 6 metros de altura y 200 kilómetros de ancho, a una velocidad de 400 km/h.

En la Tabla I se muestra la estimación de la cantidad de personas damnificadas en los distritos más críticos si es que ocurriese el desastre descrito. Estas cifras fueron calculadas teniendo como información los censos poblacionales de Lima Metropolitana y Callao. A cada una de estas personas le correspondería un *kit* de ayuda humanitaria no alimentaria, cuyo contenido es el siguiente: frazada, colcha, muda de ropa, bidón de plástico, caja de utensilios de cocina, *kit* de higiene y una carpa familiar.

Se deberá repartir *kits* de ayuda humanitaria no alimentaria a un total de 1 795 535 damnificados en los 49 distritos de Lima Metropolitana y Callao, siendo San Juan de Lurigancho el distrito más crítico con una población damnificada de 314 519 habitantes, lo cual representa casi la quinta parte del total afectado.

TABLA I
POBLACIÓN DAMNIFICADA POR DISTRITO

Distrito	Población damnificada
San Juan de Lurigancho	314 549
Comas	242 235
Callao	195 954
Puente Piedra	144 323
Villa María del Triunfo	133 171
San Juan de Miraflores	128 435
Carabayllo	127 612
Villa El Salvador	113 993
Lurigancho	74 186
Ate	69 954
Chorrillos	51 918
Lurín	36 312
Otros	128 943
Total	1 795 735

C. Consideraciones

Actualmente se cuentan con solo 4 almacenes adelantados destinados para abastecer a Lima Metropolitana y Callao en un desastre como el descrito; sin embargo, no son suficientes para satisfacer la demanda de población damnificada ante el impacto de un sismo de gran magnitud en este espacio geográfico. Es por esto que se emplearán los 22 almacenes que es la cantidad óptima según la referencia [13]. Cada depósito tiene como objetivo abastecer de ayuda humanitaria a un espacio geográfico determinado, el cual se denominará clúster, y abarca uno o varios distritos. En la Fig. 1 se muestra que el almacén ubicado en San Isidro abastecerá al clúster conformado por los distritos de Jesús María, Lince, Magdalena del Mar, Miraflores, San Isidro y Surquillo.

La alternativa de comprar una cantidad de vehículos para usarla exclusivamente para la distribución de los bienes de ayuda humanitaria sería una inversión con elevado costo de oportunidad porque la flota estaría inmovilizada gran parte de su periodo de vida útil ya que los periodos de tiempo de la ocurrencia de terremotos en Lima y Callao son largos. Otra opción sería establecer una alianza con una entidad privada que se encargue de la prestación del servicio de distribución en el caso de que ocurra un terremoto, pero bajo la supervisión de las entidades públicas peruanas encargadas de la organización del reparto.

Para obtener una mejor gestión se deberá reducir la demanda de cada nodo dentro de un clúster y esto se logrará tomando tres medidas: creación de subestaciones por almacén, realizar más de un viaje de un vehículo a un mismo nodo y dividir al *kit* en grupos de bienes.

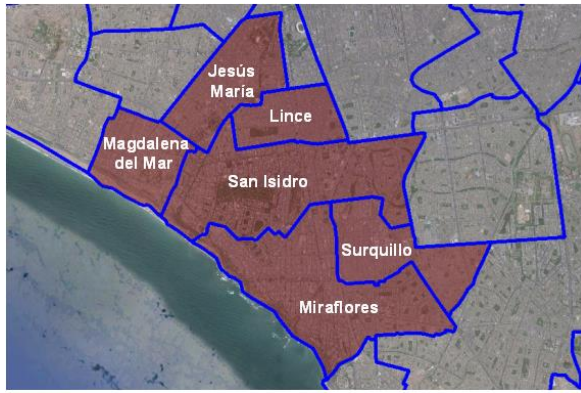


Fig. 1 Mapa del clúster con almacén en San Isidro

La primera medida consiste en crear subestaciones dentro de un mismo clúster y que de allí se reparta la ayuda a las zonas aledañas. Cabe resaltar que estas subestaciones no cumplen la función de almacén permanentemente sino que son locales prestados por la municipalidad con capacidad suficiente para almacenar temporalmente los *kits* suministrados por el almacén principal del clúster tras el sismo y su pronta distribución. No todos los clústers tendrán el mismo número de subestaciones, esto dependerá del número de *kits* que deberán de abastecer, incluso pueden haber clústers que no justifican tener subestaciones por tener baja demanda. El clúster con mayor demanda es Carabayllo con 300 000 *kits* por distribuir. Dividirlo en cinco subestaciones reduciría al 20% la demanda por nodo, lo cual lo pondría al mismo nivel que varios clústeres menores. El clúster de Ancón, con una demanda de 223 000 *kits*, sería más manejable dividiéndolo en cuatro subestaciones de 55 750 *kits* cada uno, similar a la demanda de cada estación del clúster de Carabayllo. Por esta razón, se considerará necesaria una subestación adicional por cada 60 000 *kits*.

La segunda medida consiste en que un vehículo visite más de una vez cada nodo y en cada visita entregue una porción del total demandado. Por ejemplo, en una red donde cada nodo tiene una demanda de 1 000 *kits* y cada vehículo tiene capacidad para transportar también 1 000 *kits*, según el modelo inicial, cada vehículo tendría una ruta con solo un nodo a visitar. Sin embargo, si existe la opción que los vehículos puedan hacer hasta cuatro viajes, la demanda por nodo se reduce a 250 *kits* por viaje y la ruta sería de cuatro nodos. De este modo, el número de vehículos necesarios por subestación será menor y también se utilizarán más los vehículos. Si bien es cierto, esta medida podría incrementar los costos; sin embargo, en el caso de ayuda humanitaria el objetivo de respuesta prima sobre el de minimizar costos como en empresas privadas [14].

Por último, la tercera medida es dividir el *kit* y repartirlo por separado para que un vehículo pueda abarcar una mayor población damnificada. El *kit* completo tiene un volumen de 0.07 metros cúbicos por persona, por lo que el vehículo con capacidad de 20 metros cúbicos podría transportar hasta 285 *kits* en cada ruta. Algunos de los bienes a repartir son para distribución personal, como las frazadas o colchas, mientras que otros bienes son familiares, como las carpas o bidones. Para

llevar un mejor control se dividirá en dos grupos: uno para bienes de uso personal, con un volumen de 0.017 metros cúbicos, y otro para bienes de uso familiar, con un volumen de 0.052 metros cúbicos; asumiendo que los bienes familiares se dividirán entre seis personas. Para que los grupos no difieran tanto, se dividirá el grupo familiar en dos, uno de 0.03 y otro de 0.022 metros cúbicos.

D. Supuestos del modelo

En cuanto a los depósitos centrales, se trabajará bajo el supuesto que los 22 almacenes ya se encuentran construidos, operativos y con la cantidad necesaria de bienes de ayuda humanitaria para satisfacer la demanda de damnificados estimada. La red se considerará simétrica, es decir, la distancia y tiempo empleado en dirigirse de un nodo “i” a un nodo “j”, será el mismo para ir de “j” a “i”. Así mismo, se considera que existe una ruta posible que conecte a cada nodo con todos los demás de la red y que los vehículos puedan transitarla. Para la distancia a recorrer entre nodos se tomará la distancia más corta entre los nodos y se multiplicará por un factor. Este factor representa el incremento en la distancia causado por la misma estructura de las calles por tomar alguna ruta alterna por algún bloqueo. Se considera la distancia más corta como la hipotenusa de un triángulo recto isósceles, y la distancia a recorrer es la suma de los catetos. Tras calcular la matriz con las distancias más cortas entre cada uno de los nodos se multiplicarán por el factor $\sqrt{2}$, para así obtener un resultado más real de lo que se recorrerá. La matriz inicial de distancias se calculó ubicando los nodos en los principales parques como se ilustra en la Fig. 2 con ayuda de la herramienta de Google Earth. Luego se extrajo las coordenadas convertidas en UTM para poder trabajarlas bajo un plano cartesiano y calcular las distancias entre cada par de nodos.

Así mismo, se asumirá que los vehículos en promedio son similares, de modo que la flota sea homogénea. Para este estudio se considerarán vehículos de 20 metros cúbicos de capacidad. Estos vehículos tendrán que lidiar con el tráfico y con algunas vías bloqueadas por lo que se considerará que viajarán a una velocidad promedio de 30 kilómetros por hora. Además, se considerará que los vehículos cuentan con combustible suficiente para realizar los viajes y no se detendrán en grifos para abastecerse. En cada nodo se encontrará personal que colabore con la descarga de los bienes provenientes de los vehículos. Estos ayudantes estarán ubicados en un lugar céntrico, como un parque, como se ilustra en la Fig. 2, y armarán una tienda para la distribución. Las personas afectadas de la zona deberán acercarse a esta tienda para la recepción de los bienes. Para recoger cada grupo de bienes deberán llenar una hoja de constancia de entrega.

El tiempo máximo que debe pasar desde que sucede el movimiento telúrico hasta que toda la población damnificada tenga el *kit* completo de ayuda humanitaria es de 72 horas. Se considerarán que las primeras 10 horas serán para realizar un censo general para determinar el número de damnificados y las coordinaciones necesarias previas a empezar la distribución propiamente de los bienes de ayuda humanitaria. Dentro de

estas 10 horas también se considera que los almacenes principales ya abastecieron cada subestación con bienes suficientes como para una ronda y que ya se encuentra personal listo para empezar la distribución en cada nodo.

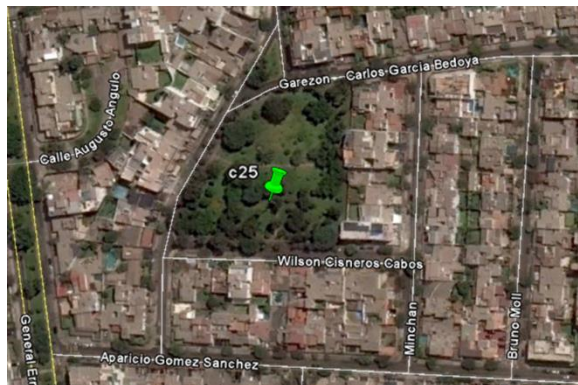


Fig. 2 Ejemplo de nodo en un parque

E. Elección de la heurística

Se optará por resolver los modelos utilizando heurísticas, pero como no es un método exacto, no podemos garantizar de antemano cuál es la mejor heurística. Por esta razón se seleccionará una muestra aleatoria de las subestaciones y se aplicarán las tres heurísticas descritas. Las subestaciones seleccionadas son: Ancón 1, Carabayllo 3, Cieneguilla 2, La Molina 1, Lurigancho 3 y Villa María del Triunfo 2. En la Tabla II se muestran los resultados luego de aplicar las tres heurísticas en cada subestación y también los resultados en LINGO obtenidos tras una hora de corrida.

TABLA II
RESUMEN DE RESULTADOS POR CADA HEURÍSTICA

Subestaciones	Método exacto ⁽¹⁾ (km)	Asignar primero rutear después (km)	Ahorros (km)	Vecino más cercano (km)
Ancón 1	95.93	45.06	43.51	48.09
Carabayllo 3	80.03	57.55	51.63	54.43
Cieneguilla 2	171.66	109.88	105.33	111.19
La Molina 1	97.41	66.55	63.62	71.15
Lurigancho 3	72.76	53.44	49.86	56.62
VMT 2	Infactible ⁽²⁾	50.72	52.02	58.19

⁽¹⁾ Se ejecutó el modelo durante una hora y aún no llegó al óptimo

⁽²⁾ Se ejecutó el modelo durante una hora y aún no obtuvo una solución factible

En los tres casos se obtiene un mejor resultado que el calcular tras ejecutar el modelo exacto por más de una hora en LINGO. Comparando entre las heurísticas propuestas, se observan ciertas variaciones y para determinar si es algo significativo se realizará una prueba de hipótesis pareada.

Se formularon tres pruebas de hipótesis para determinar si existe diferencia significativa entre las heurísticas. Como las muestras son pequeñas y se desconoce la normalidad de la variable distancia en la población, la prueba apropiada es el test no paramétrico de Wilcoxon que evalúa si existe una diferencia significativa entre dos muestras pareadas [15]. Las hipótesis son las siguientes:

H_{0a} : no hay diferencia entre la heurística de asignar primero y rutear después con el método de ahorros.

H_{1a} : sí hay diferencia.

H_{0b} : no hay diferencia entre la heurística de asignar primero y rutear después con el algoritmo del vecino más cercano.

H_{1b} : sí hay diferencia.

H_{0c} : no hay diferencia entre el método de ahorros con el algoritmo del vecino más cercano.

H_{1c} : sí hay diferencia.

Con estas tres hipótesis realizadas, se concluye que el algoritmo del vecino más cercano es el que tiene menor desempeño de los tres y que no hay diferencia significativa entre usar el método en dos fases de asignar primero y rutear después o el método de ahorros. En cuanto a sencillez, la heurística en dos fases es el más rápido de ejecutar por lo que se elegirá como heurística para el total de subestaciones.

IV. RESULTADOS

A. Distancia de recorrido

En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de las rutas calculadas para el clúster de San Borja. Las líneas de color rojo trazadas en el gráfico indican la secuencia de nodos a visitar en cada ruta mas no qué caminos tomar para llegar a cada nodo.

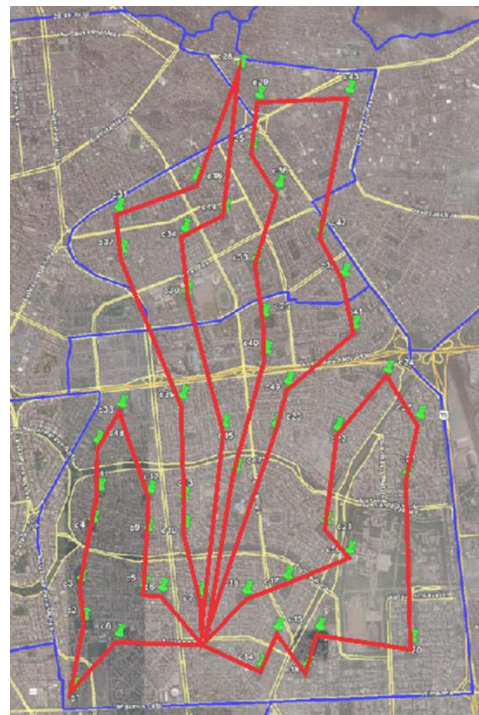


Fig. 3 Ejemplo de rutas en clúster San Borja

El camino dependerá de la disponibilidad de las vías debido al deterioro por el movimiento sísmico. Es por este motivo que se multiplicó a la distancia entre nodos por un factor que consideraba estos percances. Para este clúster en específico, se obtuvo cuatro rutas las cuales visitarán 13, 13, 12 y 12 nodos,

respectivamente, cuyo total es de 50 nodos visitados. En este ejemplo cada ruta tiene en promedio un recorrido de 12 kilómetros.

En la situación actual se tendría que recurrir a un almacén fuera de Lima para satisfacer toda la demanda. Por ejemplo, se acudiría al almacén de Ancash y la distancia de un viaje ida partiendo de un almacén en Lima resulta mayor a los 350 kilómetros calculados como promedio por unidad móvil en el escenario propuesto. Es necesario resaltar que hay un precedente de despacho de bienes desde almacenes ubicados lejos de la zona afectada. Así por ejemplo, el terremoto de Pisco del 2007 fue tan severo que la elevada cantidad de damnificados obligó a que el INDECI tuviese que trasladar bienes de ayuda humanitaria almacenados en los depósitos, que gestiona dicha organización, ubicados en Arequipa, Huancavelica, Huancayo, Puno y Tacna, así como desde zonas más alejadas como Piura, Chiclayo y Trujillo por el norte [16].

B. Tiempo de recorrido

Uno de los factores más importantes en este tipo de problemas es el tiempo de respuesta, el cual tiene como límite 72 horas después de ocurrido el desastre, para la distribución de ayuda humanitaria. Este tiempo dependerá directamente del número de vehículos con los que se cuente por subestación. Por ejemplo, si una subestación demorara 20 horas con 10 vehículos, aún tendría holgura suficiente como para realizar la distribución con la mitad de la flota pues demoraría 40 horas aproximadamente.

El clúster de Ancón cuenta con cuatro subestaciones y la Tabla III muestra el tiempo que demora la distribución de la ayuda humanitaria no alimentaria, en horas, para cada escenario. Se puede observar que incluso con cuatro vehículos por subestación demorarían menos de 65 horas en abastecer a toda la población damnificada del clúster. Se debe considerar el tiempo de empadronamiento inicial que, en este caso, sería de a lo mucho 7 horas para poder cumplir la restricción de las 72 horas. Si hubiesen 10 vehículos disponibles, entonces toda la ayuda sería distribuida en aproximadamente un día después de finalizado el empadronamiento.

Tabla III
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE ANCÓN EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Ancón 1	24.19	27.55	30.97	34.51	40.32	48.36	60.98	80.51
Ancón 2	24.48	27.80	31.30	34.82	40.67	48.88	61.49	81.25
Ancón 3	25.44	28.96	32.64	36.24	42.32	50.83	64.03	84.55
Ancón 4	24.14	27.61	31.10	34.38	40.21	48.20	60.80	80.21

En la Tabla IV se muestran los resultados para el clúster de Ate, el cual tiene dos subestaciones. En este clúster se podría distribuir toda la ayuda dentro del plazo indicado con solo tres vehículos por subestación, incluso demorando hasta 15 horas en el empadronamiento. Con menor cantidad de vehículos ya resulta infactible cumplir con la exigencia de las 72 horas.

Tabla IV
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE ATE EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	9	8	7	6	5	4	3	2
Ate 1	18.54	19.97	23.39	26.18	31.76	39.27	52.36	78.54
Ate 2	20.16	21.48	25.41	28.58	35.01	42.87	57.16	85.74

Según esta lógica se analizará la sensibilidad que consistiría en variar el tamaño de la flota de vehículos en cada subestación y se mostrará en las tablas a continuación:

Tabla V
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE CARABAYLLO EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	10	9	8	7	6	5	4
Carabayllo 1	32.43	35.12	39.56	44.76	52.84	63.34	78.04
Carabayllo 2	31.08	34.64	38.94	44.20	52.30	61.67	77.23
Carabayllo 3	27.63	30.98	34.69	39.49	46.56	55.23	68.99
Carabayllo 4	28.84	32.50	36.29	41.17	48.47	57.58	72.22
Carabayllo 5	38.04	42.91	47.93	54.16	62.84	75.99	94.59

Tabla VI
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE CHACLACAYO EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	8	7	6	5	4	3	2
Chaclacayo 1	26.56	32.23	35.08	42.75	52.62	70.15	105.23

Tabla VII
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE CIENEGUILLA EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Cieneguilla 1	25.15	28.68	32.32	35.80	41.85	50.29	63.47	83.54
Cieneguilla 2	30.05	32.61	37.59	40.99	48.53	58.67	72.29	95.64
Cieneguilla 3	24.56	27.87	31.38	34.95	40.80	49.09	61.82	81.55
Cieneguilla 4	26.18	29.72	33.52	37.22	43.49	52.33	65.89	86.86

Tabla VIII
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE COMAS EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Comas 1	22.74	24.91	27.13	31.52	36.96	43.70	54.26	72.97

Tabla IX
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LA MOLINA EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	9	8	7	6	5	4	3	2
La Molina 1	17.12	18.40	21.99	24.44	29.44	36.65	48.87	73.31
La Molina 2	23.37	25.07	29.33	32.80	39.80	49.20	65.60	98.40

Tabla X
DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LA VICTORIA EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
La Victoria 1	11.19	13.14	16.73	20.55	26.27	39.28	78.31

TABLA XI

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LIMA EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
Lima 1	19.30	21.78	25.94	32.65	43.77	64.86	129.72

TABLA XII

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LOS OLIVOS EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
Los Olivos 1	11.70	13.95	17.41	21.85	27.69	41.25	81.93

TABLA XIII

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LURIGANCHO EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Lurigancho 1	25.32	29.02	32.73	35.95	42.22	50.54	63.74	83.89
Lurigancho 2	26.79	30.58	34.45	38.02	44.52	53.49	67.42	88.72
Lurigancho 3	24.79	28.30	31.81	35.34	41.31	49.54	62.52	82.47
Lurigancho 4	27.59	31.85	35.90	39.01	46.04	55.07	69.26	91.02

TABLA XIV

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE PACHACAMAC EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	9	8	7	6	5	4	3
Pachacamac 1	25.28	27.65	32.21	36.82	43.75	56.42	73.56
Pachacamac 2	25.53	27.97	32.59	37.16	44.18	56.77	74.23
Pachacamac 3	26.55	29.10	33.81	38.72	46.00	59.23	77.28

TABLA XV

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE PUNTA HERMOSA EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	9	8	7	6	5	4	3
Punta Hermosa 1	32.21	36.24	40.96	47.54	56.72	70.66	94.90
Punta Hermosa 2	49.15	56.46	63.54	73.68	89.73	107.70	144.87

TABLA XVI

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE SAN BORJA EN HORAS

Subestación	Vehículos			
	4	3	2	1
San Borja 1	13.44	18.47	26.76	53.11

TABLA XVII

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE SAN ISIDRO EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
San Isidro 1	12.85	16.19	18.56	22.82	30.68	45.49	89.94

TABLA XVIII

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE SAN JUAN DE LURIGANCHO EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
SJL 1	30.12	33.78	37.97	42.75	50.24	60.11	75.74	99.74
SJL 2	24.69	28.06	31.54	35.17	41.12	49.30	62.09	82.06

TABLA XIX

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LIMA EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	9	8	7	6	5	4	3	2
SMP 1	21.26	23.89	28.53	31.21	37.96	46.81	62.42	93.63

TABLA XX

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LIMA EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
San Miguel 1	8.99	10.43	11.91	15.04	20.56	29.94	59.53

TABLA XXI

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LIMA EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
Santa Rosa 1	17.99	20.65	24.18	29.58	40.11	59.16	118.32

TABLA XXII

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LIMA EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	9	8	7	6	5	4	3	2
Surco 1	20.06	21.49	25.38	27.98	34.91	41.96	55.95	83.93

TABLA XXIII

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LIMA EN HORAS

Subestación	Vehículos						
	10	9	8	7	6	5	4
Ventanilla 1	32.70	36.87	41.42	46.50	54.78	65.35	81.93

TABLA XXIV

DURACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN PARA EL CLÚSTER DE LIMA EN HORAS

Subestación	Vehículos							
	9	8	7	6	5	4	3	2
VMT 1	16.80	18.20	21.70	24.13	29.11	36.20	48.27	72.40
VMT 2	16.21	17.64	21.11	23.38	28.17	35.07	46.76	70.14

Podemos observar que la disminución en horas no es lineal con respecto al incremento en el tamaño de la flota. Conforme se vaya incrementando el número de vehículos, el tiempo va a ser cada vez menor; sin embargo, el decremento marginal será poco considerable y tal vez no justifique la inversión de tener un vehículo adicional en la flota.

IV. CONCLUSIONES

La probabilidad que ocurra un terremoto en el Perú es significativa debido a su ubicación geográfica en el Cinturón de Fuego del Pacífico. En particular, en Lima Metropolitana y Callao, existe un silencio sísmico desde el terremoto de 1974 el cual ha ido almacenando energía la cual podría ser liberada con un gran sismo y posteriormente ocurriría un tsunami que afectaría principalmente el Callao.

Se logró cumplir con la meta de entregar la totalidad de kits de ayuda humanitaria no alimentaria dentro de las primeras 72 horas de ocurrido el terremoto recorriendo un total de 70 800 kilómetros. En total se evaluó 397 rutas distintas y muchas de ellas se realizan más de una vez obteniendo un total de 6 907

viajes. Esto da un promedio de 10.25 kilómetros por viaje. Es importante resaltar que actualmente se tiene una capacidad nacional de abastecer a no más de 150 000 según la referencia [13], lo que representa menos del 10% del total repartido en este modelo. Así mismo, el plan propuesto tiene capacidad extra como para atender a 186 284 damnificados adicionales.

Debido a que en algunos distritos se cumple con mucha holgura la meta de las 72 horas, es posible reducir el número de vehículos necesarios en cada subestación. Así, la cantidad inicial de 397 vehículos en total, puede reducirse a 156 unidades móviles distribuidas en Lima Metropolitana y Callao, asignando más viajes a los vehículos con holgura. Con esta cantidad también se garantiza cumplir con la distribución total en menos de 72 horas; sin embargo, con más vehículos disponibles se lograría una respuesta más rápida hacia los damnificados.

REFERENCIAS

- [1] United States Geological Survey, Archivo de sismos, 2017.
- [2] J. Kuroiwa, "Reducción de desastres: viviendo en armonía con la naturaleza", Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, 2002.
- [3] Instituto Nacional De Defensa Civil, "Compendio estadístico de prevención y atención de desastres", 2010.
- [4] P. Toth y D. Vigo, "The vehicle routing problem", SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, 2002.
- [5] G. Dantzig y J. Ramser, "The truck dispatching problem", Management science, 6(1), 80-91, 1959.
- [6] P. Toth y D. Vigo, "Vehicle routing: problems, methods and applications", SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, 2014.
- [7] G. Clarke y J. Wright, "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", Operations research, 12(4), 568-581, 1964.
- [8] B. Gillett y L. Miller, "A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem", Operations research, 22(2), 340-349, 1974.
- [9] C. Miller, A. Tucker y R. Zemlin, "Integer programming formulation of traveling salesman problems", Journal of the ACM (JACM), 7(4), 326-329, 1960.
- [10] N. Labadie, C. Prins y C. Prodhon, "Metaheuristics for Vehicle Routing Problems", John Wiley & Sons, 2016.
- [11] Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres y Asociación Peruana de Empresas de Seguros, "Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao", Lima, Perú, 2005.
- [12] PREDES, "Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao", Lima, Perú, 2009.
- [13] V. Serpa, "Optimización y localización de almacenes de abastecimiento para la atención de un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao", grado de ingeniero, tesis, PUCP, 2014.
- [14] V. Marianov y C. ReVelle, "Siting emergency services. Facility Location: a survey of applications and methods", 1, 199-223, 1995.
- [15] F. Wilcoxon, "Individual comparisons by ranking methods", Biometrics bulletin, 1(6), 80-83, 1945.
- [16] Instituto Nacional De Defensa Civil, "Lecciones aprendidas del sur - Sismo de Pisco, 15 agosto 2007", Lima, Perú, 2009.