

# **Localización de almacenes y distribución de ayuda humanitaria para atención de damnificados en caso de desastre natural**

**Christian Cornejo Sánchez**

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

**Jorge Vargas Florez**

Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, jorge.vargas@pucp.edu.pe

**Lucy Aragón Casas**

Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, laragonc@pucp.edu.pe

**Verónica Serpa Oshiro**

Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, veronica.serpa@pucp.edu.pe

## **ABSTRACT**

In humanitarian logistics, one of the critical aspects is the strategic location of warehouses. The effectiveness and speed of response of the supply chain have as determinants suitable quantity and location of such stores, as well as its capacity. This study aims to determine in which districts of Lima city must be localized stores to distribute humanitarian aid after a catastrophic magnitude 8 MM earthquake. It is considered that the stores must meet the victims in full, minimizing the flow of people to be served from another district. A numerical analysis is performed using a linear programming model, as a result the optimal number of warehouses as a function of their capacity is obtained.. Finally, we conduct an analysis on the trend of marginal benefit, which is defined as the number of people who receive the humanitarian aid as a function of the increase in storage capacity.

**Keywords:** humanitarian logistics, earthquakes, disaster, disaster victims, location.

## **RESUMEN**

En la logística humanitaria, uno de los aspectos críticos es la localización estratégica de los almacenes. La efectividad y la velocidad de respuesta de la cadena de suministro tienen como factores determinantes la cantidad y localización adecuada de dichos almacenes, así como su capacidad. El presente estudio tiene por objeto determinar en qué distritos de la ciudad de Lima deberían localizarse los almacenes para distribuir la ayuda humanitaria, luego de que haya ocurrido un terremoto de 8 MM de intensidad. Se considera que los almacenes deberán atender a los damnificados en su totalidad, minimizando el flujo de personas que serían atendidas desde otro distrito. Con un modelo de programación lineal entera mixta se realiza un análisis numérico para obtener el comportamiento de la cantidad óptima de almacenes conforme cambia su capacidad. Finalmente, se lleva a cabo un análisis de la tendencia del beneficio marginal, que se define como el número incremental de personas que recibirían la ayuda humanitaria cuando aumenta la capacidad de almacenamiento.

**Palabras claves:** logística humanitaria, terremotos, desastres, damnificados, localización.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La logística humanitaria se refiere a los procesos y sistemas involucrados en movilizar personas, recursos, habilidades y conocimiento para ayudar a las poblaciones damnificadas por causa de desastres naturales y emergencias complejas. Tanto la efectividad como la velocidad de respuesta de la ayuda humanitaria dependen fundamentalmente de la logística; para ello, se deben tomar decisiones y acciones administrativas antes, durante y

después del desastre. Una de estas decisiones críticas es la relacionada con el diseño de la cadena de suministro y consiste en la adecuada ubicación de los centros de almacenamiento donde se guardarán los materiales de ayuda, tales como, agua, medicinas, alimentos, sangre y materiales de abrigo, entre otros; así como la distribución de estos luego de que haya ocurrido un desastre natural.

El presente artículo trata sobre una de las decisiones necesarias en la etapa de previsión para hacer frente a un terremoto de magnitud superior a 8 MM, por ocurrir en la ciudad de Lima y Callao. Específicamente, se busca optimizar la ubicación de los centros de almacenamiento y distribución de los bienes de ayuda humanitaria, con el objetivo de atender de forma efectiva a las poblaciones afectadas. Se empleará un modelo matemático de programación lineal entera mixta para lograr este propósito.

La motivación del presente estudio surge de la revisión del desempeño de la ayuda humanitaria del terremoto más reciente en Perú; el cual ocurrió en la ciudad de Pisco en agosto del 2007 cuya magnitud fue 7.9 en la escala de Richter y dejó, 519 muertos, 1291 heridos, 219,826 afectados y gran cantidad de viviendas destruidas. La velocidad de respuesta y los indicadores de desempeños obtenidos en dicho desastre nos muestran que es necesario realizar esfuerzos considerables para mejorar la logística humanitaria en el Perú y, en particular en Lima y provincia aledaña del Callao, cuyas elevadas poblaciones, así como la vulnerabilidad en varias zonas de estas ciudades sugieren un alto potencial de personas damnificadas en caso ocurriese un terremoto de 8 MM

## **2. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

### **2.1 LA LOGÍSTICA DE AYUDA HUMANITARIA**

El problema de la localización de instalaciones para la ayuda humanitaria se ha venido estudiando y modelando desde hace muchos años. En 1963, Cooper presentó un método para decidir dónde localizar instalaciones para responder a emergencias, asignar óptimamente la demanda de ayuda desde dichas instalaciones y utilizar de manera efectiva los recursos. Recientemente se han planteado modelos de mayor complejidad como el propuesto por Balcik y Beamon (2008), el cual es una variación del modelo de máxima cobertura que integra las decisiones de dónde ubicar los almacenes y la cantidad de inventario a mantener en ellos. Así también, el modelo considera múltiples productos, restricciones de capacidad y presupuesto. Los autores plantean el modelo considerando que algunas organizaciones optan por una estrategia de ubicar sus almacenes en algunos países para atender las emergencias que se presentan en diversas partes del mundo. En otro estudio, el posicionamiento previo de suministros para desastres se modela como el problema de ubicación de instalaciones que considera la ruta de los vehículos y posibles interrupciones en la red de transporte. El método utiliza una combinación de la vía más confiable y un modelo de programación entera para encontrar la localización óptima de los suministros en centros de distribución (Ukkusuri y Yushimito, 2008). Por otro lado, de forma similar al desarrollo observado en los modelos discretos, se han venido proponiendo modelos probabilísticos. Un ejemplo de estos modelos es el desarrollado por Logendran y Terrell en 1998, quienes introdujeron un modelo estocástico sin capacidad para localizar instalaciones, en este modelo los autores consideran que la demanda es una variable aleatoria.

Así como los modelos mencionados previamente, existe una diversidad de modelos que tratan de resolver diversos aspectos de la logística humanitaria, más allá de la localización de la infraestructura. Revisarlos en detalle no es el propósito de este artículo; sin embargo, mencionaremos algunos ejemplos que dan luz para realizar nuevos estudios. Un primer ejemplo es el modelo para elegir la ubicación geográfica de centros de distribución y asignación en un sistema de multiproducto, el cual fue desarrollado por Nozick y Turnquist (2001). Este modelo puede decidir qué productos deben ser almacenados en el almacén central, qué productos en el centro de distribución regional y cuáles no deben ser almacenados. El estudio propone un enfoque iterativo que resuelve el problema de ubicación y almacenamiento para un número determinado de instalaciones. Un segundo ejemplo es la estrategia desarrollada por Beamon y Kotleba (2006a) la cual consiste en el diseño de políticas de administración de inventarios para almacenes que soporta una operación de ayuda para períodos largos; para tal fin, los autores desarrollaron un modelo que optimiza la cantidad de pedidos y el nivel de inventarios basado en los costos. Los mismos autores (2006b) continuaron este estudio y compararon tres estrategias de administración de inventarios para el mismo problema.

## **2.2 EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES**

La localización óptima de instalaciones es un problema que se presenta en diversas áreas y contextos. Para resolver el problema, los científicos han utilizado técnicas de investigación de operaciones (Owen y Daskin, 1998). Los primeros modelos fueron formulados en 1961 por Balinski y se han venido desarrollando hasta ahora. Los modelos de localización óptima básicos consideran un solo producto con instalaciones de capacidad limitada o ilimitada. (Klibi et al., 2010). Estos modelos básicos son de carácter discreto, los cuales pueden tipificarse en dos grandes grupos: los modelos de locación de la mediana y los modelos de centro y cobertura (Revelle et al., 2008). El otro grupo de modelos son los probabilísticos, estos modelos consideran que la incertidumbre y la información imperfecta afectan la respuesta esperada. Los modelos probabilísticos son clasificados en aleatorios, de peligro y de gran incertidumbre (Klibi et al., 2010).

En el sector privado, el objetivo de los modelos de localización son generalmente minimizar los costos y maximizar el beneficio. A diferencia de ello, en el caso de ayuda humanitaria se busca optimizar la accesibilidad y el tiempo de respuesta (Marianov y ReVelle, 1995). Entre ambos modelos matemáticos de localización, el modelo de cobertura se adecúa más a los problemas cuando el tiempo de respuesta es el criterio más importante (Schilling et al., 1993).

Los modelos de localización de cobertura, buscan elegir las instalaciones en los lugares disponibles, de modo que la demanda sea cubierta. El modelo de cobertura fue originalmente introducido por Toregas et al. (1971). El autor utiliza programación lineal entera para minimizar el número de ambulancias necesarias para cubrir todos los puntos de la demanda. Un modelo alternativo fue introducido por Church y ReVelle (1974), denominado Modelo de Localización de Máxima Cobertura. Este modelo maximiza la población cubierta sujeta a una limitada disponibilidad de ambulancias. En general, los modelos de máxima cobertura, maximizan el total de personas servidas dentro de una distancia máxima, dado el número fijo de instalaciones o limitaciones de presupuesto.

En los modelos de localización capacitados, la demanda puede ser abastecida por más de una fuente. Un ejemplo es el estudio de Haghani (1996), quien desarrolla un modelo de localización de máxima cobertura capacitado, permitiendo asignación múltiple. Según este modelo, la demanda de los clientes puede ser servida por varias instalaciones debido a que las variables de asignación son continuas. La importancia de la capacidad, como una variable de decisión en los problemas de localización, fue reconocida desde 1972 en el estudio de Elson. Un ejemplo de la evolución de este concepto es la consideración como variable continua a la expansión de la capacidad de las instalaciones (Verter y Dincer, 1995).

## **3. EL CASO DE LA CIUDAD DE LIMA METROPOLITANA Y EL CALLAO**

### **3.1 LA GESTIÓN PÚBLICA DEL RIESGO DE DESASTRES EN EL PERÚ**

El Perú está localizado en el Cinturón del Fuego del Pacífico, una zona propensa a sufrir terremotos. Con el propósito de reducir los riesgos inherentes provocados por desastres naturales, en el año 2011 se creó en el Perú el Sistema de Gestión del Riesgo de Desastres; un organismo integrante de este sistema es el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), entidad pública cuyas funciones, entre otras, son la supervisión y evaluación de los procesos de preparación de la población e instituciones, para incrementar la capacidad de respuesta efectiva en caso de desastres; coordinar la respuesta a través de la asistencia humanitaria y, la rehabilitación de las zonas afectadas.

Las actividades vinculadas a estas funciones están detalladas en el Plan Nacional de Atención y Prevención de Desastres, el cual contiene un Plan de Operaciones de Emergencia para Lima y Callao cuyo fin es guiar las acciones en la etapa del desastre para que la respuesta sea rápida y eficiente. Este plan define tareas logísticas de respuesta en caso se produzca un desastre y están agrupadas en áreas funcionales, una de ellas es el área de Asistencia Humanitaria la cual se encarga de la administración de los almacenes y la atención de los damnificados a través del reparto de los bienes de ayuda humanitaria. La propuesta de este estudio pretende contribuir en estas tareas de gestión, así por ejemplo en el nivel estratégico en la etapa pre-desastre, el estudio determinará la cantidad apropiada de almacenes así como su ubicación con el objetivo de mejorar la capacidad de respuesta y, en

el nivel operativo, en la etapa pos-desastre, el estudio indicará las cantidades de bienes de ayuda humanitaria que se despacharían desde los almacenes; ambas propuestas para Lima Metropolitana y el Callao.

### **3.2 VULNERABILIDAD DE LIMA METROPOLITANA Y EL CALLAO**

La provincia de Lima se ubica en la zona central de la costa peruana, su división política está conformada por 43 distritos en un área de 2,665 km<sup>2</sup> y según el INEI (2007) su población es 7,605,742 que representa el 28% de la población del Perú; mientras que el Callao, provincia limítrofe de Lima, en un área pequeña de 147 km<sup>2</sup> y con seis distritos tiene 876,877 habitantes y concentra el 3.2% de la población peruana.

En Lima y Callao, se distingue cinco zonas sísmicas, las cuales han sido clasificadas de acuerdo con las características mecánicas de los suelos; el CISMID (2005) calificó a la zona I como de bajo peligro sísmico; a la zona II como de relativamente bajo; a las zonas III y IV como de alto peligro y a la zona V como un área de alto peligro sísmico.

La Organización No Gubernamental PREDES que opera en el Perú, ha definido algunos parámetros que en conjunto permiten determinar el nivel de vulnerabilidad de las edificaciones (2009): la densidad poblacional, el material de construcción, la tipología constructiva, altura y el estado de conservación de las viviendas, así como la cantidad de médicos por habitantes. En el Perú, las construcciones en adobe y albañilería, reconocidas como muy vulnerables frente a los terremotos ascienden a 80,271 viviendas en Lima Metropolitana y 6,765 en el Callao, según el censo del INEI (2007). La densidad poblacional de Lima según INEI (2011) es 3,126.27 hab/km<sup>2</sup> bastante mayor al promedio nacional de 23.18 hab/km<sup>2</sup>. Por otro lado, según el MINSA (2010), la cantidad de médicos por habitantes es 17 por cada 10 000 personas.

Tanto el estudio del CISMID como las cifras para determinar el nivel de vulnerabilidad siguiendo los criterios de PREDES, además del incumplimiento de las normas legales para el adecuado uso de la tierra que aún se observa en Lima y Callao, configuran un escenario de elevada vulnerabilidad para esta metrópoli y su puerto.

## **4. METODOLOGÍA Y MODELOS**

### **4.1 METODOLOGÍA**

En este trabajo se diseñó un modelo de programación lineal entera mixta (PLEM); cuyo objetivo es la minimización de la distancia total recorrida por los móviles que trasladan los bienes de ayuda humanitaria, desde un almacén ubicado en un distrito hasta otro distrito que no tiene almacén; es así que a través de la minimización de la distancia, indirectamente se busca reducir el tiempo de respuesta, criterio que según Schilling, op.cit. es el más relevante en los casos de ayuda humanitaria.

Los bienes por despachar se envían en paquetes llamados *kits* los cuales están conformados por una serie de bienes que ayudarían en las necesidades primordiales del ser humano, entre otros, alimentos, agua y abrigo.

El modelo se resuelve para distintas capacidades de almacén, desde 350 000 *kits*; luego se resuelve para 325 000, también para 300 000 y así según una sucesión que disminuye cada vez en 25 000; sin embargo, para cada capacidad se agregó diversos escenarios dados por la cantidad máxima de almacenes por instalar, así se resolvió el modelo restringiendo el modelo a un máximo de 37 almacenes, y no 49 que es la cantidad de distritos de Lima y Callao porque con base en el estudio del CISMID se descartó a los municipios calificados como de alto y muy alto peligro, tales son: Callao, Chorrillos, La Perla, La Punta, Lurín, Pucusana, Puente Piedra, Punta Negra, San Bartolo, San Juan de Miraflores, Santa María y Villa El Salvador. En varios de estos distritos, este descarte se refuerza con el estudio de PREDES porque muestran cifras de densidad poblacional, médicos por habitante y tipología de vivienda inferiores al promedio de Lima.

El modelo nuevamente se resuelve para 32 almacenes y así en una sucesión que también decrece cada vez en cinco almacenes hasta 17 almacenes. Luego también se explora para cada escenario de capacidad, el rango de almacenes de seis hasta 15 almacenes.

**Tabla 1: Estimación de los damnificados en los distritos de Lima Metropolitana y Callao**

| Distrito          | Población damnificada | Distrito          | Población damnificada | Distrito     | Población damnificada | Distrito      | Población damnificada |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| SJL               | 314,549               | Santa Anita       | 15,339                | San Miguel   | 3,185                 | MM            | 1,204                 |
| Comas             | 242,235               | Pachacámac        | 15,260                | Breña        | 3,031                 | San Luis      | 1,102                 |
| Callao            | 195,954               | Ventanilla        | 14,435                | Bellavista   | 2,810                 | San Bartolo   | 1,049                 |
| Puente Piedra     | 144,323               | Santiago de Surco | 9,512                 | San Borja    | 2,729                 | Santa Rosa    | 850                   |
| VMT               | 133,171               | Los Olivos        | 9,316                 | Pucusana     | 2,686                 | Chaclacayo    | 815                   |
| SJM               | 128,435               | El Agustino       | 8,913                 | La Perla     | 2,348                 | Ancón         | 751                   |
| Carabayllo        | 127,612               | Barranco          | 7,969                 | Surquillo    | 2,240                 | CML           | 400                   |
| Villa el Salvador | 113,993               | La Molina         | 6,971                 | Miraflores   | 1,902                 | Cieneguilla   | 258                   |
| Lurigancho        | 74,186                | SMP               | 6,736                 | Pueblo Libre | 1,877                 | Punta Hermosa | 219                   |
| Ate               | 69,954                | La Victoria       | 6,537                 | Jesús María  | 1,672                 | Punta Negra   | 157                   |
| Chorrillos        | 51,918                | Independencia     | 4,865                 | San Isidro   | 1,374                 | La Punta      | 145                   |
| Lurín             | 36,312                | Rímac             | 4,416                 | Lince        | 1,272                 | Santa María   | 74                    |
| Lima              | 18,674                |                   |                       |              |                       |               |                       |

SJL:San Juan de Lurigancho; VMT:Villa María del Triunfo; SMP:San Martín de Porres; MM:Magdalena del Mar; CL:Carmen de La Legua

Se presume que la solución óptima tenderá a que cada distrito tenga un almacén, supuesto razonable porque en tal caso se lograría que la atención de los damnificados sea más rápida en vez de que sean atendidos desde otros distritos. Además de determinar la cantidad de almacenes y despachos de ayuda humanitaria que minimizan la distancia total recorrida, la finalidad de estas soluciones en cada escenario dado por los pares (capacidad, almacén) es determinar cuál es la tendencia de la cantidad de kilómetros ahorrados cada vez que se aumenta la capacidad del almacén y, sugerir en qué tramos dichos ahorros no son relevantes frente a la inversión incremental para instalar un almacén de mayor capacidad. Si bien, Marianov y ReVelle op.cit. refieren que con la minimización de los costos no necesariamente se logra optimizar la accesibilidad y tiempo de respuesta, esta no es la función objetivo de este modelo, sin embargo, sugerir una cantidad razonable de almacenes con el propósito de reducir los costos que se incurrirían por la construcción de estos sí es una propuesta que interesaría a las instituciones públicas encargadas de la gestión de desastres porque, como cualquier organismo público, tienen limitaciones presupuestales.

En resumen, la solución del modelo indicará en qué distritos se ubicarán los almacenes y cuántos *kits* serán distribuidos para atender a todos los damnificados de la ciudad, pero restringido a la capacidad de cada bodega y, la sensibilidad de la distancia frente a cambios de la capacidad del almacén.

#### 4.2 MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

Para formular el modelo de programación lineal entera mixta (PLEM), se define la siguiente notación. Sean  $I, J$  cada uno un conjunto con 49 elementos que representan los distritos de Lima y Callao, donde cada elemento del primer conjunto se representa con  $i$  y, cada elemento del segundo conjunto se representa con  $j$ . Asimismo, se define el conjunto  $K$  cuyos elementos  $k$  representan los distritos en donde no se instalarán almacenes. El vector  $D$  contiene el nivel estimado de personas damnificadas para cada distrito  $j$  y el vector  $d$ , cuyos elementos son  $d_{ij}$  es la distancia entre los distritos  $i$  y  $j$ . Finalmente,  $C$  es el parámetro para la capacidad del almacén en *kits* y  $A$  el parámetro que representa la cantidad total de almacenes en todo Lima. La variable de decisión  $X_{ij}$  es entera e indica la cantidad de personas damnificadas en el distrito  $j$  que serían abastecidas por el almacén ubicado en el distrito  $i$ , en otras palabras, la cantidad de *kits* requeridos; por otro lado,  $Y_i$  es la variable binaria 1-0 que indica si un almacén será ubicado o no en el distrito  $i$ .

A continuación se presenta la formulación del PLEM:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} w_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} \geq D_j \quad \forall j \in J, i \neq k \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq CY_i \quad \forall i \in I, i \neq k \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \geq Y_i \quad \forall i \in I, i \neq k \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} Y_i \leq A \quad (5)$$

$$X_{ij} \leq M(1 - v_{ij}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J, i \neq k \quad (6)$$

$$-w_{ij} + 1 \leq Mv_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, i \neq k \quad (7)$$

$$X_{ij} \geq w_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, i \neq k \quad (8)$$

$$X_{ij} \text{ entero} \quad Y_i \in \{0,1\} \quad v_{ij} \in \{0,1\} \quad w_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J \quad (9)$$

La función objetivo (1) minimiza la distancia total recorrida dada por la expresión  $d_{ij}w_{ij}$ , en donde la variable binaria  $w_{ij}$  agrega a la sumatoria la distancia entre  $i$  y  $j$  en caso  $w_{ij}$  tome el valor uno, en caso contrario, será igual a cero.

Las restricciones enumeradas con (2) indican que la cantidad de personas que podrían atenderse en el distrito  $j$  por despachos enviados desde otros almacenes ubicados en los distritos  $i$  debe ser por lo menos superior a la cantidad de personas damnificadas en el distrito  $j$ . Las restricciones identificadas con (3) refieren que si un almacén se ha ubicado en el distrito  $i$  y si además dicha bodega despacha a otros distritos, entonces, necesariamente la cantidad total de *kits* despachados no deberá exceder la capacidad  $C$  del almacén.

El grupo de restricciones (5) acota la cantidad de almacenes a un nivel no mayor que  $A$ . Las restricciones (6) y (7) aseguran que si la variable  $X_{ij}$  es positiva, lo cual significa que se despachan *kits* desde el distrito  $i$  hacia el distrito  $j$ , entonces se debe instalar un almacén en el distrito  $i$ , lo que matemáticamente opera así: en (6) si  $X_{ij} > 0$  y como se cumple que el parámetro  $M \gg 0$ , entonces necesariamente  $v_{ij} = 0$ ; luego en (7) para el caso descrito, necesariamente,  $w_{ij} = 1$ ; luego en la función objetivo el producto  $d_{ij}w_{ij}$  será igual a  $d_{ij}$ . Las restricciones (8) aseguran que si  $X_{ij} = 0$ , entonces  $w_{ij} = 0$ , lo que significa que si no se despacha nada de  $i$  a  $j$ , entonces no se recorre la distancia entre estos distritos y en la función objetivo el producto  $d_{ij}w_{ij}$  será igual a cero.

## 5. RESULTADOS

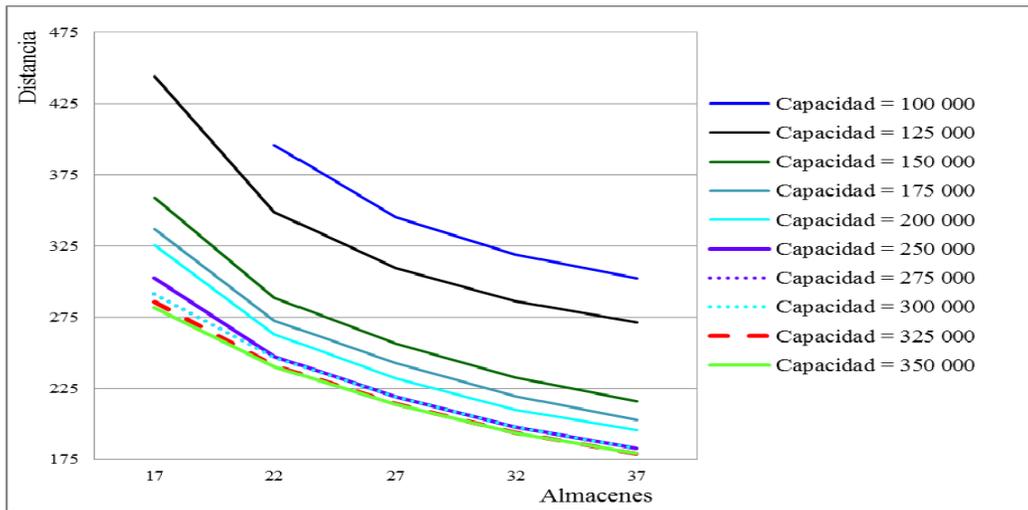
El modelo se formuló con el lenguaje de modelado del LINGO versión 13 y fue resuelto para 143 escenarios de combinaciones de capacidad y almacenes los cuales se muestran en la tabla 1, en donde los espacios en blanco indican que para tales pares de capacidad y almacén no hay solución factible.

Los resultados de la tabla 1 también se presentan de manera gráfica en las figuras 1 y 2, tales datos muestran una presunción evidente: si para cada capacidad se instalasen menos almacenes, entonces aumentaría la distancia recorrida para despachar la ayuda humanitaria.

La relevancia de estos resultados, presumidos anteriormente como evidentes, es que revelan la sensibilidad de la distancia frente a variaciones de la capacidad. Así por ejemplo, según la figura 1, el incremento de la distancia total recorrida para despachar la ayuda se incrementa en promedio 100 km si la capacidad disminuye de 150 000 a 125 000 para cualquier cantidad de almacenes en el rango entre 17 a 37 almacenes. Estas cifras sugieren que una reducción de la capacidad de esa magnitud, motivada quizá por limitaciones de presupuesto, genera un incremento relevante de la distancia total recorrida con perjuicio de la capacidad de respuesta.

**Tabla 2: Distancia recorrida en kilómetros para los pares (capacidad, almacén)**

| Capacidad<br>(en kits ) | Cantidad de almacenes |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                         | 5                     | 6   | 7   | 8   | 9   | 11  | 12  | 15  | 17  | 22  | 27  | 32  | 37  |
| 100 000                 | -                     | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 346 | 319 | 303 |
| 125 000                 | -                     | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 528 | 445 | 349 | 309 | 286 | 272 |
| 150 000                 | -                     | -   | -   | -   | -   | -   | 589 | 399 | 359 | 289 | 256 | 233 | 216 |
| 175 000                 | -                     | -   | -   | -   | -   | 496 | 457 | 377 | 337 | 273 | 243 | 219 | 203 |
| 200 000                 | -                     | -   | -   | -   | 630 | 480 | 445 | 366 | 326 | 263 | 232 | 210 | 195 |
| 225 000                 | -                     | -   | -   | 644 | 536 | 455 | 422 | 352 | 315 | 260 | 232 | 210 | 195 |
| 250 000                 | -                     | -   | -   | 586 | 528 | 441 | 404 | 337 | 303 | 247 | 219 | 198 | 183 |
| 275 000                 | -                     | -   | 620 | 551 | 506 | 419 | 387 | 325 | 291 | 246 | 219 | 198 | 183 |
| 300 000                 | -                     | 688 | 568 | 515 | 476 | 412 | 383 | 325 | 291 | 246 | 219 | 198 | 183 |
| 325 000                 | -                     | 621 | 553 | 508 | 469 | 407 | 377 | 316 | 286 | 241 | 214 | 194 | 179 |
| 350 000                 | -                     | 612 | 543 | 496 | 459 | 398 | 369 | 311 | 282 | 240 | 214 | 194 | 179 |

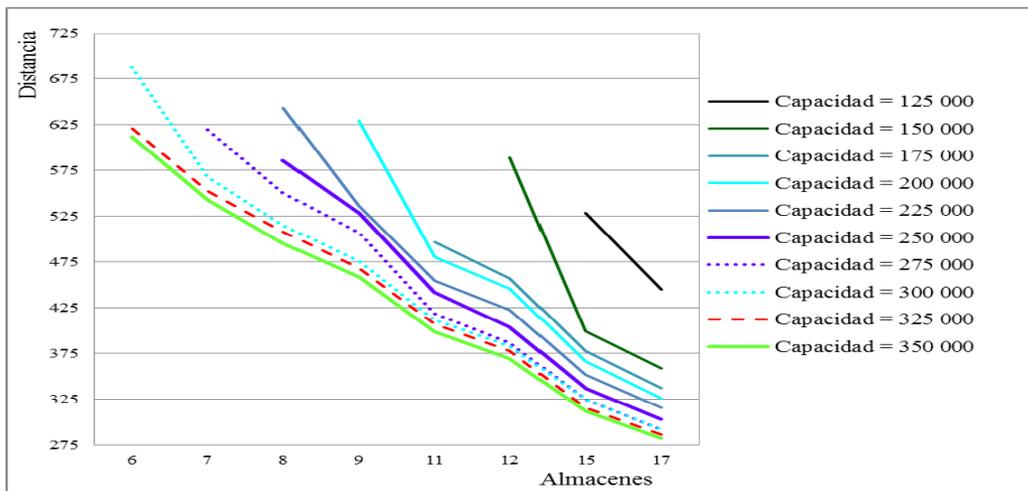


**Figura 1: Curvas de isocapacidad en el rango de 17 a 37 almacenes**

Según la figura 1, en el rango de disminuciones de 350 000 hasta 250 000 de la capacidad, los incrementos de las distancias son menos de 100 km; visto de otra manera, frente a posibles incrementos presupuestales, el beneficio marginal de la capacidad de respuesta medido en kilómetros recorridos es decreciente conforme aumenta la capacidad. Se observa también, en la figura 1 y la tabla 1, que para las capacidades de 325 000 a 350 000 la distancia total recorrida es casi la misma, en el rango de 17 a 37 almacenes, lo cual indica que un aumento del presupuesto para incrementar la capacidad en dicho rango no mejora sustancialmente la capacidad de respuesta. Similar comportamiento se observa para capacidades que aumentan de 275 000 a 300 000.

Es importante aclarar que el modelo fue resuelto para cada capacidad indicada, sin embargo, la capacidad real por instalarse en cada almacén está dada por el total del despacho de kits de cada almacén, cantidad que se lee del grupo de restricciones (2) del modelo formulado. Así por ejemplo, cuando se resuelve el modelo para una capacidad de 300 000, la solución indica que algunos almacenes tendrán dicha capacidad pero otros tendrán una menor.

A continuación se muestra en la figura 2, el rango de 6 a 17 bodegas. Los resultados sugieren que en la mayoría de casos las distancias recorridas con estas combinaciones de capacidad y almacenes son superiores a las obtenidas en el rango de 17 a 37 almacenes mostrados en la figura 1. Estas son las soluciones de peor capacidad de respuesta pero de menor costo porque en promedio la cantidad de almacenes a instalar es inferior.



**Figura 2: Curvas de Isocapacidad en el rango de 6 a 17 almacenes**

Nuevamente en la figura 2 se observa que hay una brecha de distancia importante entre las capacidades de 125 000 y 150 000

El modelo formulado no incorpora el costo como parámetro para evaluar la solución óptima que busque un equilibrio adecuado entre la capacidad de respuesta y el costo por instalación de los almacenes, sin embargo, se analizará un intervalo intermedio el cual es 15 y 17 almacenes con capacidades de 250 000 y 270 000 para cada caso. Estos rangos fueron elegidos porque las diferencias entre estas generan un ahorro de 12 km en total. Para un incremento de la capacidad desde 275 000 hasta 300 000 no genera disminución de la distancia total recorrida. Finalmente, si la capacidad se incrementa de 300 000 a 350 000 la reducción es de tan solo 4 km. Según estas reducciones de distancias, se analizará las soluciones óptimas de los pares (capacidad, almacenes) = (250 000, 15); (275 000, 15); (250 000, 17); (275 000, 17) cuyas capacidades instaladas óptimas según los resultados del modelo se muestran en la tabla 3.

Las soluciones de la tabla 3 son similares entre sí, sin embargo, para elegir la mejor propuesta usaremos algunos factores cualitativos para justificar que la mejor solución sería la que recorre una distancia total de 291 km. Dicha propuesta además de tener la menor distancia, sugiere instalar un almacén con una capacidad de 275 000 en el distrito de San Juan de Lurigancho, el cual no solo es el más populoso de Lima, sino también, como indica la tabla 1, es el que mayor cantidad de damnificados tendría en caso ocurra el desastre descrito en este trabajo. Por otro lado, esta solución también sugiere instalar almacenes en San Luis y Santiago de Surco, ambos distritos cercanos a San Juan de Miraflores, el cual también tiene una estimación elevada de damnificados según la tabla 1, pero que por las características inapropiadas de sus suelos, se asumió como premisa que no se debe ubicar almacén en dicho municipio. Finalmente, la solución no contempla ubicar un almacén en Comas, distrito con la segunda mayor cantidad de damnificados según la tabla 1, sin embargo, la solución indica instalar el almacén en Los Olivos que contrastado con Comas, es un distrito limítrofe; en promedio tiene mejor infraestructura y se le estima un nivel de 9,316 damnificados, cifra apreciablemente inferior que los 242,235 damnificados estimados para Comas. Con estas evidencias se esperaría que la respuesta a dicho municipio sea oportuna.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados del modelo sugieren que la distancia decremental para aumentos de la capacidad del almacén de 250 000 a 300 000 es menor en contraste al resto de incrementos; pero aumentos de la capacidad de 125 000 a 150 000 generan en promedio un ahorro de 100 km menos que se recorrerían. Esta información puede orientar a las entidades estatales responsables de la instalación de los almacenes, las cuales con frecuencia tienen

limitaciones de presupuesto, para definir el beneficio marginal en kilómetros recorridos por cada sol marginal invertido con el fin de aumentar la capacidad.

El criterio de aumentar la capacidad del almacén con el propósito de reducir los kilómetros recorridos no conduce a una decisión necesariamente apropiada en un escenario de restricción de presupuesto porque se observa de los resultados que el beneficio marginal del aumento de la capacidad es decreciente.

No necesariamente las soluciones con mayor capacidad y cantidad de almacenes generan menor distancia recorrida, hay algunas soluciones más eficientes con menor capacidad y menos almacenes, una de ellas al parecer es la solución de 17 almacenes, algunas con capacidad igual o menor a 275 000 con una distancia total de 291 km y con aspectos cualitativos que apoyan la elección como una buena solución.

**Tabla 3 Capacidad instalada óptima**

| Distancia óptima | Capacidad | Almacenes | Distritos |        |            |            |            |             |         |             |             |           |        |
|------------------|-----------|-----------|-----------|--------|------------|------------|------------|-------------|---------|-------------|-------------|-----------|--------|
|                  |           |           | Ancón     | Ate    | Bellavista | Carabayllo | Chaclacayo | Cieneguilla | Comas   | El Agustino | Jesús María | La Molina | Lince  |
| 337              | 250,000   | 15        | 0         | 69,954 | 223,516    | 127,612    | 75,001     | 258         | 242,235 | 250,000     | 115,781     | 0         | 0      |
| 303              | 250,000   | 17        | 1,601     | 69,954 | 223,516    | 127,612    | 0          | 258         | 242,235 | 250,000     | 0           | 6,971     | 18,069 |
| 325              | 275,000   | 15        | 0         | 69,954 | 223,516    | 127,612    | 0          | 258         | 0       | 83,810      | 275,000     | 6,971     | 0      |
| 291              | 275,000   | 17        | 1,601     | 69,954 | 223,516    | 127,612    | 0          | 258         | 0       | 68,217      | 10,430      | 6,971     | 0      |

| Distancia óptima | Capacidad | Almacenes | Distritos  |            |            |               |         |          |        |            |                   |           |            |         |
|------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|---------------|---------|----------|--------|------------|-------------------|-----------|------------|---------|
|                  |           |           | Los Olivos | Lurigancho | Pachacámac | Punta Hermosa | SJL     | San Luis | SMP    | Santa Rosa | Santiago de Surco | Surquillo | Ventanilla | VMT     |
| 337              | 250,000   | 15        | 0          | 0          | 51,729     | 4,028         | 0       | 0        | 20,917 | 1,601      | 0                 | 207,181   | 158,758    | 247,164 |
| 303              | 250,000   | 17        | 20,917     | 75,001     | 51,729     | 4,028         | 93,217  | 0        | 0      | 0          | 0                 | 204,705   | 158,758    | 247,164 |
| 325              | 275,000   | 15        | 263,152    | 75,001     | 51,729     | 4,028         | 0       | 0        | 0      | 1,601      | 0                 | 207,181   | 158,758    | 247,164 |
| 291              | 275,000   | 17        | 263,152    | 75,001     | 51,729     | 4,028         | 275,000 | 138,803  | 0      | 0          | 73,541            | 0         | 158,758    | 247,164 |

## REFERENCIAS

- Balcik B. y Beamon, B.M. (2008), Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistic: Research and Applications*, Vol. 11, No 2, pp 101-121.
- Beamon B.M. y Kotleba, S.A. (2006a), Inventory modeling for complex emergencies in humanitarian relief operations. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, Vol. 9, No 1, pp 1-18.
- Beamon B.M. y Kotleba, S.A. (2006b), Inventory management support systems for emergency humanitarian relief operations in South Sudan. *Journal of Logistics Management*, Vol. 17, No 2, pp 187-212.
- Church, R.L. y ReVelle, C. (1974), The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, Vol. 32, pp 101-118.
- CISMID, Centro Peruano de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (2005), Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en 42 distritos de Lima y Callao, Lima.

- Cooper, L. (1963), Location-allocation problems. *Operational Research*, Vol. 11, pp 331-344.
- Haghani, A. (1996), Capacitated maximum covering location models: Formulations and solution procedures. *Journal of advanced transportation*, Vol. 30, No 3, pp 101-136.
- INDECI (2011), Plan Logístico Indeci AF-2011, para ayuda humanitaria ante emergencias o desastres, pp 4
- INEI (2007), XI Censo de Población y VI de Vivienda 2007.
- Knott, R. (1987), The Logistics of bulk relief supplies. *Disasters*, Vol. 11, pp 113-115.
- Klibi, W., Martel, A. y Guitouni, A. (2010), The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operations Research*, Vol. 203, pp 283-293.
- Logendran, R. y Terrell, M.P. (1998), Uncapacitated plant location-allocation problems with Price sensitive stochastic demands. *Computers and Operations Research*, 15: 189-198.
- Marianov, V. y Re Velle, C. (1995), Siting emergency services. In *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*, edited by Z. Drezner, 199-223. (Springer-Verlag Inc.:New York).
- MINSA, Ministerio de Salud (2010), Censo de Infraestructura Sanitaria y Recursos Humanos I y II, 1992 y 1996.
- Nozick, L.K. y Turnquist, M.A. (2001), Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. *European Journal of Operational Research*, Vol. 129, No 2, pp 362-371.
- Owen, S.H. y Daskin, M.S. (1998), Strategic facility location: A review. *European Journal of Operation Research*, Vol. 111, No 3, pp 423-447.
- PREDES, Centro de Estudios y Prevención de Desastres (2009), Diseño de escenarios sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao, Perú.
- Revelle, C., Eiselt, H. y Daskin, M., (2008), A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*. Vol. 184, pp 817-848.
- Ukkusuri, S. y Yushimito, W., (2008), Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2089, pp 18-25.
- Schilling, D., Vaidyanathan, D.A., y Barkhi L.R., (1993), A review of covering problems in facility location. *Location Science*, Vol. 1, No 1, pp 25-55.
- Toregas C., Swain, R., ReVelle, C. y Bergman L., (1971), The location of emergency service facilities. *Operations Research*, Vol. 19, No 6, pp 1363-1373.
- Verter, V. y Dincer, C., (1995), Facility location and capacity acquisition: An integrated approach. *Naval Research Logistics*, Vol. 42, pp 1141-1160.

### ***Authorization and Disclaimer***

*Authors, Christian Cornejo, Jorge Vargas, Lucy Aragón y Verónica Serpa authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.*