



## SELECCIONES MATEMÁTICAS

Universidad Nacional de Trujillo

ISSN: 2411-1783 (Online)

2020; Vol. 7(2): 340-353.



REVIEW

### Estado del arte del ruteo de vehículos aplicado a desastres naturales en Sudamérica

#### Vehicle routing applied to natural disasters in South América: state of art

Flavio Gutiérrez-Guzman , Vladimir Navarro C. , Jose Rodriguez-Melquiades ,  
Edwar Lujan S.  and Flabio Gutiérrez S. 

Received, Jul. 30, 2020

Accepted, Nov. 30, 2020



#### How to cite this article:

Gutierrez-Guzman F., et al. *Estado del arte del ruteo de vehículos aplicado a desastres naturales en Sudamérica*. Seleccionces Matemáticas. 2020;7(2):340–353. <http://dx.doi.org/10.17268/sel.mat.2020.02.15>

#### Resumen

*En este artículo se presenta una revisión de la literatura del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) aplicado a desastres naturales en Sudamérica. La revisión se enfoca en los últimos diez años (2009 - 2019), en bases de datos de libre acceso y de pago. el 83 % están en idioma español y el 17 % en ingles. La mayoría de trabajos tratan el envío y entrega de productos, en menor proporción existen trabajos sobre el problema de programación y ruteo de personal, como por ejemplo, voluntarios, especialistas en logística humanitaria, personal medico, militares. En la revisión se han tomado en cuenta diversas características del problema, tales como, el tipo de desastre, el modelo VRP utilizado, el método de solución empleado, la utilización o no de parámetros con incertidumbre. El 65 % de investigaciones se encontró en bases de datos de acceso libre, el 83 % son modelos deterministas, el modelo mas utilizado es el VRP clásico, los métodos de solución exactos son los mas utilizados, le siguen las metaheurísticas (principalmente los algoritmos genéticos). Se espera que este trabajo sirva para dar una perspectiva general sobre la aplicación del VRP a problemas de desastres, así mismo de servir de antecedentes para trabajos en esta temática.*

**Palabras clave.** Problema de ruteo de vehículos, VRP, desastres naturales, logística humanitaria.

#### Abstract

*This paper presents a literature review of the Vehicle Routing Problem (VRP) applied to natural disasters in South America. The review focuses on the last ten years (2009 - 2019), in free access and paid databases. 83% are in Spanish and 17% in English. Most of the investigations deal with shipping and delivery of products, but there are also papers on programming and routing of personnel, such as volunteers, humanitarian logistics specialists, medical personnel, and military personnel. In the review, several characteristics of the problem have been taken into account, such as, the type of disaster, the VRP model used, the solution method employed, the use or not of parameters with uncertainty. The 65 % of investigations were found in databases of free access, 83 % are deterministic models, the most used model is the classic VRP, the exact solution methods are the most used, followed by the metaheuristics (mainly the genetic algorithms). It is hoped that this work will serve to give a general perspective on the application of VRP to disaster problems, as well as to serve as a background for work in this area.*

**Keywords .** Vehicle routing problem, VRP, natural disasters, humanitarian logistics.

\*Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Piura, Perú (flavio.j.g.g.p@gmail.com).

†Departamento de Matemática, Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú (gnavarrov@alumnos.unp.edu.pe).

‡Departamento de Informática, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú (jrodriguez@unitru.edu.pe).

§Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú (elujans@unitru.edu.pe).

¶Departamento de Matemática, Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú (flabio@unp.edu.pe).

**1. Introducción.** Los desastres naturales siempre han existido a lo largo de la historia de la humanidad algunas veces distanciados y otras en intervalos de tiempo relativamente cortos. Lamentablemente en la actualidad la posibilidad de ocurrencia de este tipo de desastres se ha incrementado debido a diversos factores que suceden tales como, calentamiento global, crecimiento demográfico, contaminación ambiental, concentración de la población en zonas de riesgo, etc.

Sudamérica, ha sufrido desastres naturales, entre estos, el fenómeno del niño costero en el norte del Perú (2017); la avalancha en Mocoa, ubicada al sur de Colombia (2017); el terremoto con tsunami en Chile (2010) y el terremoto en la ciudad de Pisco, en el sur del Perú (2007).

Cuando ocurren desastres naturales de gran magnitud, las zonas afectadas requieren ayuda de organizaciones públicas y privadas de los países afectados, además de países extranjeros y organismos internacionales quienes, por solidaridad humanitaria, se esfuerzan por remitir ayuda económica así como productos no perecibles, medicina, ropa, entre otros.

La logística humanitaria, es un tipo de logística que se encarga de planificar, ejecutar y controlar el almacenamiento y distribución de productos en la zona afectada. La rapidez y eficiencia del proceso de ayuda a través de la cadena de suministro involucrada, es importante para poder hacer llegar la ayuda a las zonas afectadas en el momento oportuno pues de este modo se evita o disminuye el incremento de muertes por hambruna o por enfermedades [1].

Propuestas de acciones a considerar en casos de emergencias lo encontramos en [2], quienes dividen el proceso en cuatro etapas (Ver Figura 1.1): En la etapa denominada **Mitigación** se aplican medidas que evitarán la aparición de un desastre o reducirán los impactos en caso de que ocurra; en la segunda etapa, **Preparación** se planifican las actividades a seguir en caso de un desastre; la siguiente etapa, **Respuesta** se da cuando ya ocurrió el desastre siendo necesario emplear recursos y planes de emergencia para preservar la vida, la propiedad, el medio ambiente y la estructura social, económica y política de la comunidad; por último, en la **Recuperación** se deben de tomar acciones para recuperar la estabilidad y normalidad en la zona del desastre.



Figura 1.1: Etapas en la gestión de desastres

Adaptado de [3]

Los trabajos de investigación publicados, se enfocan en la etapa de **Preparación** para luego ser aplicados en la etapa de **Respuesta** con el fin de distribuir eficientemente la ayuda hacia las zonas afectadas.

Si bien la mayoría de trabajos sobre la cadena de suministro en logística humanitaria se enfocan principalmente en el envío y entrega de bienes [4]; también existen trabajos sobre el problema de programación y ruteo de personal, como por ejemplo, voluntarios, especialistas en logística humanitaria, personal médico, militares [5, 6].

En los últimos años la literatura especializada reporta investigaciones con nuevas propuestas basadas en el diseño de modelos de optimización, en particular problemas de ruteo de vehículos (VRP), con el fin de obtener rutas que deben utilizar los vehículos de transporte para lograr la óptima distribución de personas, bienes y servicios, que puedan ayudar a los damnificados de los desastres naturales [7]. Revisiones sobre modelos de optimización aplicados a problemas de desastres, se pueden encontrar en [4, 8], en estas revisiones no se han encontrado aplicaciones del VRP a problemas de desastres naturales en Sudamérica.

En el artículo propuesto se revisa diversos modelos de VRP aplicados a desastres naturales en Sudamérica, siendo los criterios a tener en cuenta: el tipo de desastre, el modelo VRP utilizado, función

objetivo a optimizar, si los modelos investigados consideran o no parámetros con incertidumbre y los métodos de solución. La Sección 2, discute el alcance de la revisión; la Sección 3, presenta la terminología y notaciones usadas; la Sección 4, muestra los resultados que se obtienen en la investigación y comentarios de cada uno de los documentos encontrados; finalmente las conclusiones en la Sección 5.

**2. Alcance de la revisión.** En la revisión de las investigaciones se consideró aportes entre los años 2009 y 2019, en los idiomas inglés y español, restringiéndose a artículos publicados en revistas científicas, artículos de actas de congresos, capítulos de libros y tesis. La búsqueda se realizó en las bases de datos *EBSCO*, *Science Direct*, *IEEE* y *Scholar Google*, utilizándose como palabra clave *problema de ruteo de vehículos* combinado con las palabras: *desastres naturales*, *aluvión*, *terremoto*, *huracán*, *tornado*, *inundación*, *tsunami*, *sequía*, *incendio* y sus equivalentes en idioma inglés.

Los métodos para resolver los modelos de VRP y sus variantes, fueron clasificados en exactos, heurísticos y metaheurísticos.

Los métodos exactos obtienen una solución óptima, sin embargo son ineficientes en problemas para grandes escenarios, ya que el tiempo empleado para hallar las soluciones se incrementa considerablemente. Ejemplos de métodos utilizados son la programación lineal entera, programación dinámica, ramificación y acotamiento (Branch and Bound), etc.

Las heurísticas y metaheurísticas aunque no encuentran la solución óptima son ampliamente aceptados, ya que permiten encontrar buenas soluciones en tiempos razonables. Las heurísticas son métodos de búsqueda local, y entre las dificultades de estos métodos es que pueden quedar atrapados en óptimos locales en el espacio de búsqueda. Las heurísticas se clasifican en constructivos, de dos fases y métodos de mejora.

Finalmente las metaheurísticas son métodos generales que se adaptan para solucionar problemas particulares, incluyen mecanismos que evitan quedar atrapados en óptimos locales en el espacio de búsqueda. Las más populares son Algoritmos Genéticos (GA), Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), Algoritmo Colonia Artificial de Abejas (Artificial Bee Colony-ABC), Algoritmos Meméticos (MA), Recocido Simulado (SA), Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP) [9, 10].

### 3. Terminología y notaciones.

**3.1. Desastre.** La Organización Mundial de la Salud (OMS) define un “desastre” como cualquier evento que causa daño, destrucción, alteración ecológica, pérdida de vidas humanas, sufrimiento humano, deterioro de los servicios sanitarios y de salud en una escala suficiente para justificar una respuesta extraordinaria desde fuera de la comunidad o área afectada [11].

De acuerdo con el fenómeno que lo origina, los desastres se clasifican en aquellos que son provocados por fenómenos naturales (desastres naturales) y los que se derivan de actividades humanas. Los principales efectos primarios de los desastres son pérdida de vidas y lesiones en la población, la pérdida de bienes, el daño e interrupción de los servicios básicos, los daños en la infraestructura, la desorganización social y física de la comunidad, y las alteraciones orgánicas y conductuales de las personas [12].

Los desastres naturales son el resultado de variables meteorológicas, geológicas o biológicas que ocurren de forma independiente al accionar humano (aunque algunas condiciones pueden verse exacerbadas por el impacto de la civilización en el ecosistema). Algunos desastres naturales son cíclicos, siguiendo un patrón estacional o geológico que ha sido documentado a través de la historia. Otros eventos, aunque son el resultado de las fuerzas naturales, son tan infrecuentes que su ocurrencia es interpretada como “rareza” de la naturaleza [11].

Estos eventos destructores de la naturaleza crean una demanda masiva de ayuda de socorro que incluyen alimentos, medicinas, refugio, agua y otros recursos los cuales para llegar al lugar del desastre requieren uso de una logística eficiente.

Un desastre de gran magnitud genera dificultades para contribuir con la ayuda en las fases de planificación y mitigación. En la fase respuesta, los daños en las vías de comunicación tal como carreteras y las condiciones ambientales complican aún más las operaciones humanitarias. Los desastres ponen a prueba la capacidad de las diferentes operaciones de emergencia en trabajar juntos para ofrecer la mejor ayuda posible. El modelado, simulación y optimización son las principales herramientas para abordar y superar estos desafíos [11].

La reducción del riesgo de desastres no es una actividad única si no un proceso continuo, que requiere de una planificación previa, es decir, que mediante las instituciones del estado es necesario estar preparados para hacer frente a posibles embates de la naturaleza. Es necesario tener registros históricos de eventos pasados para estar preparados ante tipos de desastres comunes en Sudamérica como terremotos, inundaciones pluviales, tsunamis, sismos, etc.

**3.2. Problema de ruteo de vehículos (VRP).** Es un paradigma en la literatura especializada [13] que hace referencia a la asignación óptima de rutas de distribución o abastecimiento, a través de una flota de vehículos destinada a transportar la mercancía de un punto denominado depósito a otros puntos denominados clientes (Ver Figura 3.1). Es un problema de optimización combinatoria, donde el tiempo de solución del algoritmo no se encuentra ligado a un tiempo polinomial, por el contrario tiene un comportamiento de tipo exponencial haciéndolo desde el punto de vista computacional un problema que pertenece a la clase de problemas NP difíciles. El VRP ha tenido un desarrollo importante a partir de su formulación en la segunda

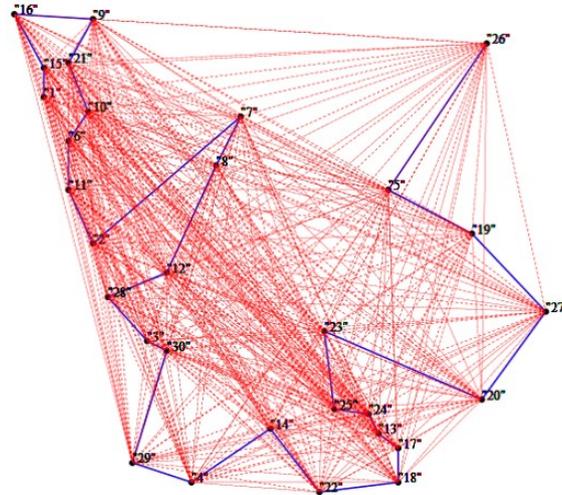


Figura 3.1: VRP con 30 clientes, la línea de color azul representa la solución

mitad de los años cincuenta; tanto, que hoy existe una gran variedad de clases del mismo, de acuerdo con las variaciones de un problema estándar (clientes, depósitos y flota de vehículos). Contextualizando las variantes a la logística humanitaria, los usuarios finales o clientes se definen como las poblaciones afectadas por el desastre natural [1].

Los objetivos que persigue el ruteo de vehículos son obtener el menor costo total asociado a transporte, menor distancia recorrida, menor tiempo de distribución, entre otras variables, sujetas a los requerimientos de las organizaciones o casos de estudio. La flota de vehículos puede ser de tipo homogénea o heterogénea, de acuerdo a la capacidad establecida en relación a las unidades que puede transportar, siendo estas iguales o diferentes respectivamente. Las diferentes variaciones y restricciones del problema generan una “familia” de VRP [14].

Un modelo general de este problema de ruteo es presentado en [15], donde se optimiza las distancias para atender a los clientes, según sea la aplicación, tal como lo muestra la ecuación (3.1). El objetivo se alcanza bajo las condiciones de ruteo (3.2) y (3.3); la ecuación (3.4) evita la formación de subrecorridos. Finalmente en (3.5) se muestra que la variable de recorrido es de tipo binario, es decir, si esta variable obtiene un valor 1 para cada arco en red, significará que se obtiene un recorrido; caso contrario obtendrá un valor 0 lo cual indica que aquellos arcos con este valor no serán parte de la solución.

$$(3.1) \quad \min Z = \sum_{(i,j) \in E, i \neq j}^n d_{ij} x_{ij}$$

s.a.

$$(3.2) \quad \sum_{j \in V}^n x_{ij} = 1, \forall i \in V$$

$$(3.3) \quad \sum_{i \in V}^n x_{ij} = 1, \forall j \in V$$

$$(3.4) \quad \sum_{i \in V}^n x_{ij} \geq |S| - V(S), S : S \subset N - \{1\}, |S| \geq 2$$

$$(3.5) \quad x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E, i \neq j$$

Una revisión reciente sobre el estado del arte del VRP, sus variantes, clasificación, métodos de solución y tendencias se puede hallar en [16]. De [13, 14, 17] se han tomado las definiciones de las variantes del VRP encontradas en la revisión.

**3.2.1. Problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP).** El VRP clásico, también conocido como VRP capacitado (CVRP), diseña rutas de entrega óptimas donde cada vehículo genera una ruta para atender a los clientes o usuarios, según sea la aplicación a determinar. Para este tipo de ruteo se considera que cada vehículo tiene las mismas características y hay solo un depósito central. El objetivo del CVRP es encontrar un conjunto de rutas de menor costo para que cada cliente sea visitado exactamente una vez por un vehículo. La condición para lograr con éxito el objetivo es que cada vehículo debe iniciar y terminar su recorrido en el depósito, y no exceder la capacidad de los vehículos.

**3.2.2. Problema de ruteo de vehículos con muchos depósitos (MDVRP).** En este tipo de ruteo de vehículos, existen varios depósitos (cada uno con una flota de vehículos independiente) los cuales deben servir a todos los clientes. Se establece la premisa de que los clientes y los depósitos se encuentran mezclados, de lo contrario podría ser solucionado como problemas VRP independientes.

**3.2.3. Problema de ruteo de vehículos de dos niveles (2E-VRP).** Trata del diseño de rutas en una cadena de suministro de dos niveles, el primero de ellos conecta la carga desde un depósito central hasta su consolidación en depósitos intermedios denominados satélites, y el segundo nivel enlaza la carga de los satélites con el cliente final.

**3.2.4. Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW).** Incluye la restricción que cada cliente debe ser visitado durante un intervalo de tiempo denominado ventana, es decir, cada cliente solo está dispuesto a recibir el bien o servicio durante un periodo de tiempo predeterminado. En este caso existen dos nuevas variantes, siendo el primero denominado ventana de tiempo duro, es decir, se cumple exactamente el intervalo de tiempo programado. Otro caso se le llama ventana de tiempo semisuave, es decir, que el cliente o usuario da una holgura al proveedor del servicio con el pago de alguna penalidad y otras veces sin pago de penalidad.

**4. Resultados.** En esta sección, se muestran los resultados de la revisión de 23 trabajos. Si bien la búsqueda se hizo desde el año 2009, solo se encontraron investigaciones desde el año 2014. El 83 % de los documentos están en idioma español y el 17 % en idioma inglés. En la Figura 4.1, muestra la cantidad de investigaciones realizadas por año, observándose una tendencia de crecimiento positivo, salvo el 2019, posiblemente por que las bases de datos demoran en actualizar las publicaciones. El 17 % de las investigaciones se encontraron en *EBSCO*, el 9 % en *Science Direct*, el 9 % en *IEEE* y el 65 % restante en *Google Scholar*. El 4 % son capítulos de libro, el 39 % artículos y el 43 % son tesis. Además el 83 % de las investigaciones encontradas utilizan modelos determinísticos y el 17 % modelos estocásticos.

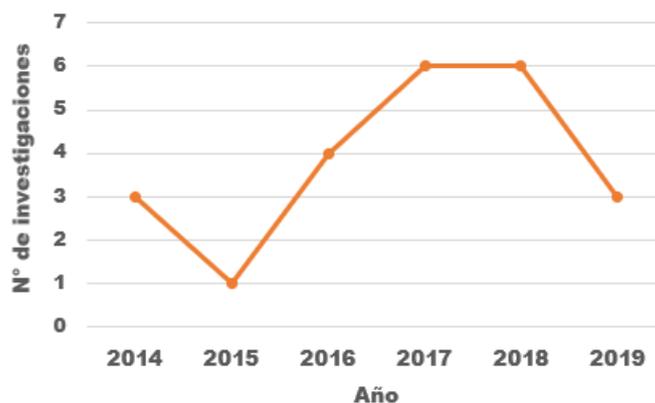


Figura 4.1: Investigaciones realizadas en los años 2009 - 2019

El VRP clásico se ha ampliado al introducir aspectos o características de cada desastre, en las Figuras 4.2 y 4.3 se pueden apreciar los porcentajes y la cantidad de investigaciones realizadas según el tipo de VRP a resolver.

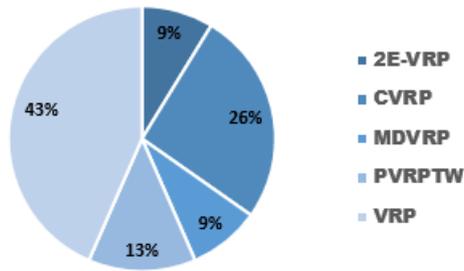


Figura 4.2: Porcentaje de investigaciones según el tipo de VRP

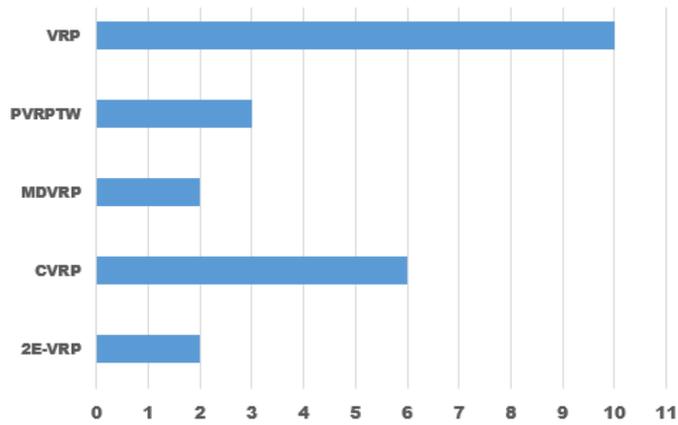


Figura 4.3: Número de investigaciones según el tipo de VRP

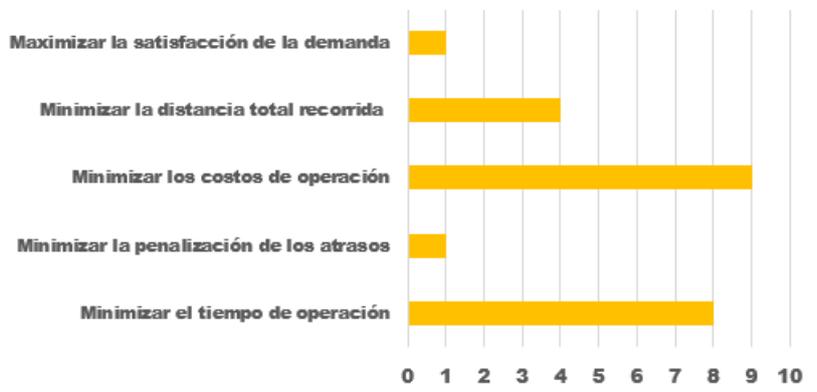


Figura 4.4: Número de investigaciones según la función objetivo.

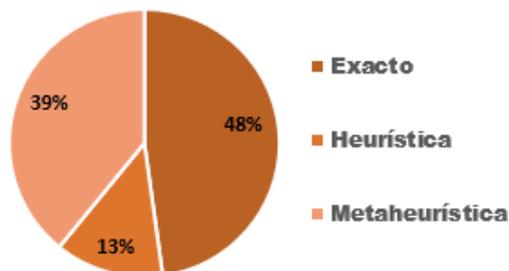


Figura 4.5: Porcentaje de investigaciones según el método de solución.

Por otro lado, en lo relacionado a la función objetivo de los modelos, el 39 % minimizan costos de operación y el 35 % buscan minimizar el tiempo de operación (Ver Figura 4.4). Respecto a los métodos de solución, según la Figura 4.5, el 48 % han optado por aplicar métodos exactos, el 39 % metaheurísticas y el 13 % las heurísticas.

La Tabla 4.1, resume el tipo de desastre, variante del VRP, tipo de modelo, el método de solución y los autores que desarrollaron cada investigación.

TABLA 4.1: Resumen de las investigaciones VRP en desastres naturales

DESASTRE	PROBLEMA	MODELO	MÉTODO DE SOLUCIÓN	AUTOR
Terremoto	VRP	Determinístico	Método exacto	Alva, R. A [18], (2014)
General	VRP	Determinístico	Método exacto	Reyes, L. S. et al. [5], (2014)
General	2E-VRP	Determinístico	Método exacto	González, E. L. [19], (2014)
Inundación	VRP	Determinístico	Método exacto	Reyes, L. S [20], (2015)
Terremoto	VRPTW	Determinístico	Metaheurística:MA	Melissa Barreto R., & Paula Niño N. [11], (2016)
General	CVRP	Estocástico	Método exacto	Toro, E. M. et al. [21], (2016)
Terremoto	VRPTW	Determinístico	Método exacto	Pareja, C. A., & Rodriguez, X. M. [22], (2016)
Terremoto	CVRP	Determinístico	Metaheurística: ABC	Barrera, A. R., & Hernandez, A. P. [23], (2016)
Terremoto/ Inundaciones	VRP	Estocástico	Metaheurística:SA	Cantera, I. E. et al. [24],(2017)
General	MDVRP	Determinístico	Heurística	Gatica, G. et al. [25], (2017)
Terremoto	VRPTW	Determinístico	Heurística	Benavente, R. A., & Cornejo, C. S. [26], (2017)
Terremoto	VRP	Determinístico	Metaheurística:MA	Aguilar, K. J. [27],(2017)
Terremoto	CVRP	Determinístico	Metaheurística: GA	Martinez, D. O. [28],(2017)
Incendio	VRP	Determinístico	Metaheurística:GRASP	Vitali, J. L. et. al. [29],(2017)
Terremoto	MDVRP	Determinístico	Método exacto	Benavente, R. A. [30], (2018)
Inundaciones	VRP	Estocástico	Metaheurística: GA	Constantino, D. C. et al. [31],(2018)

Terremoto	CVRP	Estocástico	Metaheurística: PSO	Vesga, D. M., & Villar, S. A. [32],(2018)
Terremoto	2E-VRP	Determinístico	Metaheurística: GA	Angarita, A. G. [33],(2018)
Tsunami	VRP	Determinístico	Método exacto	Sepúlveda, J. M. et. al [34],(2018)
Terremoto	VRP	Determinístico	Método exacto	Benavente, R. et. al [35],(2018)
Sismos/ Terremotos	CVRP	Determinístico	Método exacto	Barragán-Acevedo, E. et al. [36], (2019)
Tsunami	VRP	Estocástico	Método exacto	García, A. J. [37], (2019)
Sequía	CVRP	Determinístico	Heurística	Vieira, Y. E. et al. [38], (2019)

La Tabla 4.2, presenta una breve descripción del contenido de cada documento .

TABLA 4.2: Comentarios de los documentos incluidos en la revisión

TÍTULO	COMENTARIO	AUTOR
Plan de despacho para la distribución de ayuda humanitaria en caso de un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao.	Presenta un trabajo sobre VRP relacionado a la problemática surgida en la logística humanitaria, supone un terremoto que afecta a las ciudades de Lima y Callao. Para la solución del modelo aplica diversos métodos heurísticos y luego Programación Lineal	Alva, R. A [18], (2014)
Modelo matemático para la programación de personal especializado en logística humanitaria post-desastre.	Se enfoca en la caracterización y formulación de un modelo matemático para el problema de programación y ruteo de personal, relacionado con las operaciones de atención médica y psicológica, prestación de primeros auxilios y la construcción de albergues en situación post-desastre. El modelo se formuló empleando programación lineal entera mixta; dicho modelo considera la dinámica de la situación, es decir, se considera que la demanda cambia en el tiempo.	Reyes, L. S. et al. [5], (2014)
Un modelo de optimización bi-nivel para enviar, recibir y distribuir ayuda en especie después de haber ocurrido un desastre natural	Busca la configuración óptima y la forma de distribución de los productos que son enviados hacia las zonas afectadas por algún medio de transporte. Además de mostrar la importancia de utilizar un modelo Bi-nivel en lugar de un modelo de un solo nivel.	González, E. L. [19], (2014)

<p>Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre-caso inundaciones.</p>	<p>Se enfoca en determinar soluciones para el problema de localización de un punto de distribución y múltiples albergues considerando el riesgo de inundación, además del problema de ruteo del personal especializado que permita aliviar las calamidades médicas y psicológicas entre otras, presentes en la población afectada en una situación post-desastre. Toma como caso de estudio la inundación que sufrió el municipio de Santa Lucía en el departamento del Atlántico, Colombia en 2010.</p>	<p>Reyes, L. S [20],(2015)</p>
<p>Un Algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga.</p>	<p>Aborda un problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW) para llevar a cabo la evacuación de afectados en caso de un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. Diseñó un algoritmo memético (MA) que hace uso de operadores de búsqueda local, con el objetivo de minimizar el tiempo total de respuesta.</p>	<p>Melissa Barreto R., &amp; Paula Niño N. [11],(2016)</p>
<p>Modelo matemático para resolver el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad considerando flota propia y subcontratada.</p>	<p>Presenta un nuevo modelo matemático para el problema de localización y ruteo con flota propia y subcontratada, en el que las restricciones clásicas para evitar los sub-tours se reemplazan por un conjunto de restricciones que establecen conexiones radiales entre los clientes y los depósitos, permitiendo resolver de forma exacta instancias de la literatura especializada usando solvers comerciales; validan los modelos con instancias de la literatura.</p>	<p>Toro, E. M. et al. [21], (2016)</p>
<p>Determinantes del número de damnificados por causa de un terremoto en Lima Metropolitana y Callao y contraste de medidas de respuestas a través de modelos de programación lineal entera para la distribución de bienes para ayuda humanitaria.</p>	<p>Diseña un modelo multivariado para identificar los factores determinantes que explican el número de damnificados por causa de un terremoto en la región de Lima y Callao; asimismo, formula y resuelve un modelo de programación lineal entera para la distribución de bienes de ayuda humanitaria.</p>	<p>Pareja, C. A., &amp; Rodriguez, X. M. [22], (2016)</p>
<p>Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos postdesastres sísmicos en la ciudad De Bucaramanga.</p>	<p>Aborda el problema de ruteo de vehículos capacitados(CVRP) para llevar acabo la distribución de recursos en caso de un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. Propone un algoritmo de colonia de abejas para minimizar la distancia recorrida.</p>	<p>Barrera, A. R., &amp; Hernandez, A. P. [23], (2016)</p>
<p>Diseño de planes de contingencia ante desastres naturales: El caso de la distribución de ayuda humanitaria balanceada y su solución con técnicas de vanguardia.</p>	<p>Presenta un modelo de ruteo para la gestión del abastecimiento y la distribución de la ayuda humanitaria. El modelo es resuelto mediante un algoritmo híbrido entre un algoritmo metaheurístico y un método exacto. Su trabajo está orientado hacia el diseño de planes de contingencia ante desastres naturales.</p>	<p>Cantera, I. E. et al. [24], (2017)</p>

Una aplicación web, para asignación y ruteo de vehículos en caso de desastres.	Presenta una aplicación web que asigna los superdepósitos, y luego establece el ruteo que han de seguir los vehículos para cubrir los centros de distribución. Además, cumple con un conjunto de buenas prácticas de calidad de software.	Gatica, G. et al. [25], (2017)
Plan de ruteo para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria ante un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao.	Presenta un escenario crítico frente a un terremoto de magnitud 8,0 Mw con epicentro frente a Lima, ante el cual busca realizar la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria a 1 795 735 damnificados en Lima Metropolitana y Callao. Evalúa tres heurísticas clásicas: el algoritmo de ahorros, el método en dos fases y el algoritmo del vecino más cercano.	Benavente, R. A., & Cornejo, C. S. [26],(2017)
Un modelo multiobjetivo De localización-ruteo para La planeación logística en la fase de preparación a sismos en Bucaramanga.	Se enfoca en un problema de Localización-ruteo multiobjetivo capacitado y desarrolla un algoritmo memético para encontrar soluciones al problema, este modelo es evaluado con datos de un supuesto sismo en la ciudad de Bucaramanga.	Aguilar, K. J. [27],(2017)
Diseño de un sistema De apoyo a la toma de decisiones-Dss para la gestion de las etapas pre-desastre de sismos en Bucaramanga, basado en técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning).	Presenta el diseño y la implantación del SPT (Sistema de Producción y Transporte), un sistema de apoyo a las decisiones (DSS) basado en el modelo de transporte. El SPT se implementa con un software para modelos generales de red.	Martinez, D. O. [28], (2017)
Bus Routing for Emergency Evacuations: The Case of the Great Fire of Valparaiso	Desarrollaron un modelo VRP para el problema de evacuación de personas en autobuses hacia lugares seguros, en caso de incendio en la ciudad de Valparaíso, Chile	Vitali, J. L. et. al. [29], (2017)
Minimización del impacto social en la ayuda humanitaria ante un sismo en lima metropolitana y callao, optimizando la velocidad de respuesta ante los sectores damnificados, mediante el uso de modelos matemáticos en la redistribución de almacenes y un plan de ruteo eficiente.	Presenta una propuesta de la cantidad y ubicación de almacenes de ayuda humanitaria en Lima Metropolitana y Callao, así como un plan de distribución de estos bienes a la población damnificada ante un terremoto con epicentro frente a Lima. Simuló un escenario para ejecutar la metodología propuesta y se calcularon 9 clústeres en Lima Metropolitana y Callao con un almacén fijo en cada uno de ellos, y un total de 161 almacenes temporales dispersos por el territorio mencionado.	Benavente, R. A. [30], (2018)

<p>Diseño de una técnica de solución para el problema de localización-inventario-ruteo en logística humanitaria.</p>	<p>Proponen una solución preventiva al problema de Ubicación-Inventario-Enrutamiento en caso de inundación en Colombia, con incertidumbre de tipo estocástica en la demanda y el estado de las vías de comunicación. Diseñaron y ejecutaron un modelo simheurístico (extensión de una metaheurística para resolver problemas bajo incertidumbre) basado en Algoritmos Genéticos. Presentan como caso de estudio una inundación en el municipio de Mocoa.</p>	<p>Constantino, D. C. et al. [31],(2018)</p>
<p>Un modelo de programación estocástico multi-objetivo para la entrega de recursos a los albergues ante un sismo en la ciudad de Bucaramanga.</p>	<p>Presenta un problema de optimización multi-objetivo resuelto por algoritmo de enjambre de partículas con componente evolutivo para el problema de asignación de recursos a los albergues temporales en la fase post-desastre por sismo en la ciudad de Bucaramanga.</p>	<p>Vesga, D. M., &amp; Villar, S. A. [32], (2018)</p>
<p>Un modelo para la localización de depósitos centrales y ruteo de vehículos de dos escalones aplicado a la distribución de recursos humanitarios durante las fases de pre y post-desastre (2e-Lrp).</p>	<p>Aborda el problema de localización y ruteo de dos escalones (2E-VRP) en la gestión de la cadena de suministro humanitaria, formula su problema como un modelo de programación lineal entera mixta con el objetivo de minimizar el costo total, aplica algoritmos genéticos para obtener la solución en un tiempo razonable.</p>	<p>Angarita, A. G. [33],(2018)</p>
<p>A decision support system for distribution of supplies in natural disaster situations.</p>	<p>Lo autores presentan un sistema de apoyo a las decisiones para desastres naturales, uno de los componentes del sistema es un modelo VRP para el suministro de ayuda en el transporte de alimentos y/o medicina. El sistema se aplica al caso de estudio hipotético de un Tsunami en la costa de la región del BIO-BIO en Chile.</p>	<p>Sepúlveda, J. M. et. al. [34], (2018)</p>
<p>Temporary warehouses for an earthquake in San Borja and San Luis, Lima, Peru</p>	<p>Se muestra una propuesta para distribuir ayuda en un escenario crítico de un terremoto de magnitud 8.0 Mw con epicentro en Lima. Se supone que la población afectada deberá acercarse al parque seleccionado para recibir los bienes de ayuda. Primero, se hace una localización de los almacenes temporales luego se aplica un modelo VRP para determinar la ruta óptima de distribución</p>	<p>Benavente, R., &amp; Rojas, J. [35],(2018)</p>
<p>Desarrollo de un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia para la gestión del riesgo en sismos y terremotos en Cádiz, Cundinamarca.</p>	<p>Desarrolla un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia para la gestión del riesgo en sismos y terremotos en Cádiz, Cundinamarca; para esto emplea herramientas informáticas para validar el modelo como Open Solver Promodel.</p>	<p>Barragán-Acevedo, E. et al. [36], (2019)</p>

Diseño de un plan de evacuación en caso de emergencia por tsunami en el distrito La Punta usando métodos de optimización.	Desarrolla el diseño y la simulación de un modelo de un plan de evacuación en caso de emergencia por tsunami en el distrito La Punta. Trabaja bajo el supuesto de un terremoto de magnitud 8.5 Mw con epicentro en el mar, frente al Callao. Busca una mejor preparación ante un desastre por tsunami para reducir el número de pérdidas a través de optimizar las rutas de escape a utilizar por los vehículos de la zona.	García, A. J. [37], (2019)
A procedure to support the distribution of drinking water for victims of drought: the case of the Brazilian semi-arid region	Pocos estudios se ocupan de los desastres lentos, como la sequía. En este trabajo, se muestra un modelo CVRP para la distribución de agua a los afectados por la sequía, el modelo se aplicó como caso de estudio a una región semi árida de Brasil.	Vieira, Y. E et al. [38],(2019)

## 5. Conclusiones.

- En Sudamérica, el interés de la aplicación del ruteo de vehículos aplicado a desastres naturales, ha ocurrido en los últimos seis años (2014 en adelante) y esta incrementándose cada año.
- La mayor parte de artículos se han encontrado en bases de datos públicas como *Google Scholar*, y en menor porcentaje en bases de datos de pago como *EBSCO*, *Science Direct* y *IEEE*.
- Si bien la mayoría de trabajos se enfocan en el envío y entrega de productos, también existen trabajos sobre el problema de programación y ruteo de personal, como por ejemplo, voluntarios, especialistas en logística humanitaria, personal medico, militares.
- La mayor de parte de los modelos son determinísticos, son pocos los trabajos que consideran parámetros con incertidumbre, posiblemente por ser más complejos para resolverlos.
- El VRP clásico es el más utilizado, ya que la mayoría de los escenarios post desastre se pueden adaptar con mas facilidad a este modelo.
- En la mayoría de los modelos se busca minimizar el tiempo de operación así como los costos de operación, en los desastres naturales, el factor dinero y el tiempo son factores determinantes en la distribución de productos en las zonas afectadas post desastres.
- Los métodos de solución mas aplicados son los métodos exactos, para escenarios pequeños y medianos; para escenarios que contempla grandes escenarios, se utilizan las metaheurísticas, de estas, los Algoritmos Genéticos son los mas utilizados.

**6. Agradecimientos.** Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica del Perú (FONDECYT), Proyecto 125-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV.

## ORCID and License

Flavio Gutiérrez-Guzman <https://orcid.org/0000-0002-1032-9892>

Vladimir Navarro C. <https://orcid.org/0000-0002-9602-1679>

Jose Rodriguez-Melquiades <https://orcid.org/0000-0002-4763-4663>

Edwar Lujan S. <https://orcid.org/0000-0003-0663-4189>

Flabio Gutiérrez S. <https://orcid.org/0000-0003-0372-3864>

This work is licensed under the [Creative Commons Attribution-NoComercial-ShareAlike 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## Referencias

- [1] Camacho JF, González EL. Un modelo para enviar, recibir y distribuir ayuda en especie, después de haber ocurrido un desastre natural. *Celerinet*, 2013;1:27-59. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/3279/>.
- [2] Altay N, Green WG. OR/MS research in disaster operations management. *Eur. j. of operational research*. 2006; 175(1):475-493. doi:10.1016/j.ejor.2005.05.016.
- [3] Viera O, Moscatelli S, Mercader LT. Logística humanitaria y su aplicación en Uruguay. *Gerencia Tec. Informática*. 2012; 11(30):47-56. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/hevila/Gerenciatecnologicainformatica/2012/vol11/no30/4.pdf>.
- [4] Caunhye AM, Nie X, Pokharel S. Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Ec. Plan. Sciences*. 2012; 46(1):4-13. doi:10.1016/j.seps.2011.04.004.

- [5] Reyes LS, Quintero-Araújo CL, Torres-Ramos AF. Modelo matemático para la programación de personal especializado en logística humanitaria post-desastre. LACCEI. 2014; 1-7. Recuperado de <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP108.pdf>.
- [6] Dessouky M, Ordonez F, Jia H, Shen Z. Rapid distribution of medical supplies. In *Patient Flow: Reducing Delay in Healthcare Delivery*. Springer. 2006. p.309-338. doi:10.1007/978-0-387-33636-7.
- [7] La Rotta ECG, Yazo OG, Fernández MB. Estado del arte del problema de ruteo de vehículos con componentes estocásticos. *Rev. Inventum*. 2018; 13(24):2. doi:10.26620/uniminuto.inventum.13.24.2018.2-14.
- [8] Hu H, He J, He X, Yang W, Nie J, Ran B. Emergency material scheduling optimization model and algorithms: A review. *J. of traffic and transp. eng.* 2019; 6(5):441-454. doi:10.1016/j.jtte.2019.07.001.
- [9] Laporte G. Fifty years of vehicle routing. *Transportation science*. 2009; 43(4):408-416. doi:10.1287/trsc.1090.0301.
- [10] Medina LBR, La Rotta ECG, Castro JAO. Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*. 2011; 16(2):35-55. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/4988/498850173004.pdf>
- [11] Barreto MA, Niño PN. Un Algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga [Tesis Doctoral en internet]: Universidad Industrial de Santander, Escuela de estudios industriales y empresariales; 2016). Disponible en <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/165444.pdf>
- [12] Meli R, Bitrán D, Santa Cruz S. El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso: Comisión económica para América Latina y Caribe; 2005. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/25766-impacto-desastres-naturales-desarrollo-documento-metodologico-basico-estudios>.
- [13] Vagas GG, Aristizábal FG. Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 1: formulación del problema. *Ing. e Investigación*. 2006; 26(3):149-156. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64326319.pdf>.
- [14] Velásquez YL. Análisis de las características y aplicaciones de los sistemas de ruteo de vehículos [Internet]. 2015; Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13308/>.
- [15] Liong Y, Wan I, Khairuddin, Zirour M. Vehicle routing problem: Models and solutions. *J. of quality measurement and analysis*. 2008; 4(1):205-218. Recuperado de <http://www.ukm.edu.my/jqma/v4.1/jqma-4-1-paper19.pdf>.
- [16] Braekers K, Ramaekers K, Van Nieuwenhuysse I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Comp. and Indust. Engineering*. 2016; 99:300-313. doi:10.1016/j.cie.2015.12.007.
- [17] Eitzen H, López-Pires F, Barán B, Sandoya F, Chicaiza JL, Núñez CS. Ruteo de vehículos multi-objetivo en dos niveles para logística urbana inteligente. *Rev. de la Soc. Científica del Paraguay*. 2018; 23(1):123-138. doi:10.32480/rscp.2018-23-1.123-138.
- [18] Alva RA. Plan de despacho para la distribución de ayuda humanitaria en caso de un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao [Tesis de Grado]: Pontificia Universidad Católica del Perú; 2014. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6186>
- [19] González EL. Un modelo de optimización bi-nivel para enviar, recibir y distribuir ayuda en especie después de haber ocurrido un desastre natural [Tesis Doctoral]: Universidad Autónoma de Nuevo León; 2014. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/4842/1/1080230785.pdf>
- [20] Reyes LS. Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre-caso inundaciones [Tesis de master]: Universidad de La Sabana; 2015. Recuperado de <https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/15448>
- [21] Toro EM, Franco JF, Gallego RA. Modelo matemático para resolver el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad considerando flota propia y subcontratada. *Ing. invest. y tecnología*. 2016; 17(3):357-369. doi:10.1016/j.riit.2016.07.006.
- [22] Pareja CA, Rodríguez XM. Determinantes del número de damnificados por causa de un terremoto en Lima Metropolitana y Callao y contraste de medidas de respuestas a través de modelos de programación lineal entera para la distribución de bienes para ayuda humanitaria [Tesis de grado]: Pontificia Universidad Católica del Perú; 2016. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7099>.
- [23] Barrera AR, Hernandez AP. Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos postdesastres sísmicos en la ciudad De Bucaramanga [Tesis Doctoral]: Universidad Industrial de Santander, Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales; 2016. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/160917.pdf>.
- [24] Cantera IE, Bartolomé AR, Vargas JM. Diseño de planes de contingencia ante desastres naturales: El caso de la distribución de ayuda humanitaria balanceada y su solución con técnicas de vanguardia [Internet]. Mexico: Logística y cadena de suministros: Tendencia y desafíos en México; 2017. Recuperado de [http://editorial.upgto.edu.mx/index.php/20\\_logistica.16/article/view/99](http://editorial.upgto.edu.mx/index.php/20_logistica.16/article/view/99).
- [25] Gatica G, Bolton CC, Venegas N, Opazo O, Linfati R, Escobar J. Una aplicación web, para asignación y ruteo de vehículos en caso de desastres. *ITECKNE: Innov. e Invest. en Ingeniería*. 2017; 14(1):62-69. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5894770>
- [26] Benavente RA, Cornejo CS. Plan de ruteo para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria ante un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao. *LACCEI*. 2017; 446. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7352913>.
- [27] Aguilar KJ. Un modelo multiobjetivo De localización-ruteo para La planeación logística en la fase de preparación a sismos en Bucaramanga [Tesis Doctoral]: Universidad Industrial de Santander, Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales; 2017. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2017/165948.pdf>
- [28] Martínez DO. Diseño de un sistema De apoyo a la toma de decisiones-Dss para la gestión de las etapas pre-desastre de sismos en Bucaramanga, basado en técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) [Tesis Doctoral]: Universidad Industrial de Santander, Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales; 2017.
- [29] Vitali JL, Riff MC, Montero E. Bus Routing for emergency evacuations: The case of the Great Fire of Valparaiso. In *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. 2017. p 2346-2353. doi:10.1109/CEC.2017.7969589.
- [30] Benavente RA. Minimización del impacto social en la ayuda humanitaria ante un sismo en lima metropolitana y callao, optimizando la velocidad de respuesta ante los sectores damnificados, mediante el uso de modelos matemáticos en la redistribución de almacenes y un plan de ruteo eficiente [Tesis de Master]: Pontificia Universidad Católica del Perú; 2018. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12427>.
- [31] Constantino DC, Coronado DA, Herrera Ortíz DC, Wilches AY. Diseño de una técnica de solución para el problema de localización-inventario-ruteo en logística humanitaria [Tesis de grado]. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana; 2018. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/44721/ConstantinoDeLaEsprie>

- lla2019.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- [32] Vesga DM, Villar SA. Un modelo de programación estocástico - objetivo para la entrega de recursos a los albergues ante un sismo en la ciudad de Bucaramanga[Tesis Doctoral]: Universidad Industrial de Santander, Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales; 2018. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/172917.pdf>
  - [33] Angarita AG. Un modelo para la localización de depósitos centrales y ruteo de vehículos de dos escalones aplicado a la distribución de recursos humanitarios durante las fases de pre y pos-desastre (2e-Lrp) [Tesis Doctoral]: Universidad Industrial de Santander, Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales; 2018. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173637.pdf>
  - [34] Sepúlveda JM, Arriagada IA, Derpich I. A decision support system for distribution of supplies in natural disaster situations. In 2018 7th International Conference on Computers Communications and Control (ICCC); 2018. p 295-30. doi:10.1109/ICCC.2018.8390474.
  - [35] Benavente R, Rojas J. Temporary warehouses for an earthquake in San Borja and San Luis, Lima[Internet]. LACCEI. 2018. Recuperado de [http://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/full\\_papers/FP172.pdf](http://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/full_papers/FP172.pdf)
  - [36] Barragán-Acevedo E, Castañeda LB, Fuentes EA. Desarrollo de un modelo matemático de logística humanitaria con resiliencia para la gestión del riesgo en sismos y terremotos en Cúcuta, Cundinamarca. Ing. Solidaria. 2019; 15(27):1–33. doi: 10.16925/2357-6014.2019.01.02.
  - [37] García AJ. Diseño de un plan de evacuación en caso de emergencia por tsunami en el distrito La Punta usando métodos de optimización [Tesis de grado]: Pontificia Universidad Católica del Perú; 2019. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14019>
  - [38] Vieira YE, Bandeira RA, Lopes LA, Júnior OSS, Júnior MMB. A procedure to support the distribution of drinking water for victims of drought: the case of the Brazilian semi-arid region. Transp. Research Procedia. 2019; 47:331-339. doi:10.1016/j.trpro.2020.03.106