



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Localización de sitios  
temporales de separación y  
diseño de rutas de recolección  
de residuos por sismo en la  
Ciudad de México**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Industrial**

**P R E S E N T A**

Adriana Guadalupe Aguilar Montoya

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Ángel Leonardo Bañuelos Saucedo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

## *Agradecimientos*

A mis padres; Francisco y María Luisa, por todo su tiempo, amor, paciencia, apoyo y confianza.

Quienes sin escatimar esfuerzo alguno han dado gran parte de su vida para cuidarme, formarme y educarme. Nunca podré pagar todos sus desvelos ni aún con las riquezas más grandes del mundo. Gracias por creer en mí y hacer posible este sueño.

A David, mi compañero en los mejores y peores momentos. Gracias por tu amor, paciencia y por no dejarme olvidar quién soy y de lo que soy capaz.

A mis hermanos; Francisco, Luis, Gustavo y Jesús, por su ejemplo de nobleza y trabajo incansable.

A la Dra. Flor Hernández Padilla por sus valiosos consejos y enseñanzas que me ayudaron a crecer personal y profesionalmente.

A mi amada Universidad, por darme la oportunidad de aprender y crecer en el camino.

Este trabajo se desarrolló en las instalaciones del Centro de Ingeniería Avanzada de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Facultad de Ingeniería. Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, Proyecto “Propuesta de estrategia para la gestión integral de residuos sólidos en caso de desastre por sismo: Ciudad de México” TA101119. Agradezco a la DGAPA- UNAM por la beca recibida.

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 5  |
| 1. Introducción .....   | 6  |
| 2. Objetivos .....  | 6  |
| 2.1 Generales .....   | 6  |
| 2.2 Específicos .....   | 6  |
| 3. Antecedentes .....   | 7  |
| 3.1 Propuesta de gestión de residuos sólidos por sismo en la Ciudad de México ..... | 8  |
| 3.1.1 Estimación y clasificación de residuos sólidos por sismo.....                 | 9  |
| 3.1.2 Propuesta de diseño del sitio temporal .....                                  | 10 |
| 4. Marco teórico.....   | 15 |
| 4.1 Gestión de residuos por sismo .....   | 15 |
| 4.2 Localización de instalaciones .....   | 20 |
| 4.2.1 Problema de localización y asignación (LAP).....                              | 21 |
| 4.3 Programación lineal.....  | 21 |
| 4.3.1 Modelo de transporte .....  | 24 |
| 4.3.2 Programación lineal entera mixta .....  | 25 |
| 4.4 Sistemas de información geográfica (SIG).....                                   | 25 |
| 4.5 Diseño de rutas para los vehículos.....   | 26 |
| 4.5.1 Principios para una buena programación y diseño de rutas.....                 | 26 |
| 4.5.2 Problema del agente viajero (TSP) .....                                       | 30 |
| 4.5.3 Problema de ruteo de vehículos (VRP) .....                                    | 31 |
| 1.4.1 Problema de localización y ruteo (LRP).....                                   | 34 |
| 1.4.2 Técnicas de optimización .....  | 35 |
| 4.6 Transporte para la recolección de residuos en la Ciudad de México .....         | 37 |
| 5. Consideraciones para la planeación de la gestión de residuos por sismo .....     | 38 |
| 5.1 Planificación de la recolección de residuos.....                                | 40 |
| 6. Metodología .....  | 43 |
| 7. Caso de estudio de la Ciudad de México.....                                      | 43 |
| 7.1 Modelo de localización y asignación .....                                       | 43 |
| 7.1.1 Definición del problema .....   | 43 |

|   |    |
|---|----|
| 7.1.1 Variables de entrada .....  | 44 |
| 7.1.2 Variables de decisión.....  | 49 |
| 7.1.3 Variables de respuesta .....  | 49 |
| 7.1.4 Diagrama de influencia del modelo de localización y asignación .....                  | 51 |
| 7.1.5 Modelo matemático.....  | 51 |
| 7.1.6 Verificación y validación del modelo.....   | 53 |
| 7.2 Modelo de ruteo de vehículos VRP .....  | 55 |
| 7.2.1 Definición del problema .....   | 55 |
| 7.2.1 Variables de entrada .....  | 55 |
| 7.2.2 Variables de decisión.....  | 58 |
| 7.2.3 Variables de respuesta .....  | 58 |
| 7.2.4 Diagrama de influencia para el modelo VRP .....                                       | 58 |
| 7.2.5 Modelo matemático.....  | 59 |
| 7.2.6 Verificación y validación del modelo VRP .....  | 62 |
| 8. Resultados .....   | 70 |
| 8.1 Modelo de localización y asignación (LAP).....  | 71 |
| 8.2 Modelos VRP .....   | 73 |
| 9. Conclusiones.....  | 75 |
| 10. Anexos .....  | 76 |
| 10.1 Código de programación para el modelo de localización y asignación LAP con CPLEX ..... | 76 |
| 10.2 Código de programación para el modelo CVRP con CPLEX y Python.....                     | 78 |
| 10.3 Código de programación para el modelo SDVRP con CPLEX y Python .....                   | 80 |
| 10.4 Artículo publicado en memorias IEOM .....  | 83 |
| 11. Referencias.....  | 98 |

## Resumen

Posterior al sismo de 2017 en la Ciudad de México, se lanzó el proyecto para la Propuesta integral de gestión de residuos por sismo en la Ciudad de México la cual establece que una vez que los residuos han sido retirados del lugar del desastre, estos deben ser trasladados a un sitio temporal de separación, para ser almacenados, clasificados y posteriormente enviados hacia sus respectivas cadenas de reciclaje o para su adecuada disposición final. Esta estrategia permite la valorización de los residuos generados por el sismo y la reducción de las afectaciones ambientales que éstos implican.

La distancia entre los sitios de desastre y el sitio temporal determinará el tiempo que tome la remoción de los residuos generados por el sismo. Es por eso por lo que, la selección de ubicaciones para el o los sitios temporales, cuya distancia hacia los sitios de desastre sea la menor posible, tiene efectos importantes en las etapas de respuesta y recuperación de un sismo. En la etapa de respuesta contribuye a la pronta liberación de las vías primarias para la atención oportuna de las personas afectadas, la reducción de riesgos para la salud pública por la presencia de residuos orgánicos en las estructuras colapsadas y de forma indirecta en la gestión eficiente de la cadena de suministro y la logística humanitaria que es desplegada en caso de emergencia. En la etapa de reconstrucción, la remoción oportuna de los residuos facilita el restablecimiento de las actividades económicas y sociales, las redes de transporte y en general, de la recuperación de la normalidad.

Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo de localización y asignación para determinar las ubicaciones de  $n$  sitios temporales de separación de residuos cuya distancia hacia los puntos de desastre sea mínima y un modelo de ruteo de vehículos que minimice la distancia recorrida en el transporte para la recolección y traslado de los residuos hacia cada uno de los sitios temporales. Ambos modelos desarrollados con programación lineal mixta evalúan la distancia lineal entre los inmuebles colapsados (origen) inmediatamente después del sismo y los sitios disponibles para instalar el sitio temporal, con el objetivo de seleccionar los  $n$  sitios temporales (destinos), asignar los flujos de residuos entre cada punto de origen y destino y definir las rutas de recolección para cada uno de ellos.

La metodología del presente estudio incluye la verificación y validación del modelo de localización y asignación y del modelo de ruteo de vehículos para el caso de estudio del sismo del pasado 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, considerando: los 14 inmuebles colapsados inmediatamente después del sismo, 8 sitios potenciales que hasta el momento se encuentran disponibles y la ubicación de un solo sitio temporal. Los resultados muestran que la distancia total mínima entre todos los puntos de derrumbe y el sitio temporal seleccionado por el modelo es de 148 km. La distancia mínima recorrida entre los puntos de origen y destino es 79% menor que la del sitio más alejado, mientras que es 45% menor que la del siguiente sitio más próximo. Con el estudio se concluye que la ubicación de sitios temporales de separación de residuos y el diseño de sus respectivas rutas de recolección contribuye a la planeación en los niveles estratégico, táctico y operativo de las actividades previas al desastre, así como a la toma de decisiones en las etapas posteriores a este.

# 1. Introducción

México se encuentra en una zona con alta actividad sísmica, debido a la interacción entre cinco placas tectónicas, dentro del área conocida como el Cinturón Circumpacífico o Cinturón de Fuego, lugar que libera entre 80 y 90% de la energía sísmica anual de la Tierra (Sistema Geológico Mexicano, 2017). Ante la alta probabilidad de ocurrencia de desastres ambientales en México, es necesaria la existencia de planes de emergencia y respuesta que procuren atender las necesidades más urgentes de las víctimas, así como los procesos posteriores de recuperación y reconstrucción de las áreas afectadas. Una parte importante de estos planes se trata de la gestión de residuos generados por el desastre, motivada por el hecho de que el manejo eficiente de los escombros y residuos influye en el impacto ambiental provocado por estos eventos, la salud pública de la población involucrada y el proceso de recuperación de la normalidad (Brown et al., 2011) .

Posterior al sismo de 2017 en Ciudad de México, se lanzó el proyecto PAPIIT TA101119 llamado 'Propuesta de estrategia para la gestión integral de residuos sólidos en caso de desastres por sismos: Ciudad de México, la cual incluye la remoción de los residuos domésticos del lugar de desastre para que sean enviados hacia un sitio temporal de separación que es sitio de almacenamiento y de clasificación de residuos antes de que estos sean enviados hacia cadenas especializadas de reciclaje o bien para su adecuada disposición final. Este sitio temporal de separación necesita ser ubicado en un lugar factible, de entre un número de sitios disponibles para su instalación, que represente la distancia y el costo de transporte mínimos, con el objetivo de promover la gestión eficiente y limpieza oportuna de los residuos en las áreas afectadas. La ubicación del sitio temporal determina en gran medida la distancia, tiempo y costo que implica la gestión de los residuos, motivo por el cual la planeación y evaluación de alternativas, con ayuda de herramientas de localización de instalaciones y modelos matemáticos desarrollados por disciplinas como la Investigación de Operaciones, facilita la toma de decisiones y mejora el desempeño de los planes de gestión. La localización del sitio temporal, y el diseño de rutas de recolección son determinadas en este trabajo por modelos de programación lineal mixta.

## 2. Objetivos

### 2.1 Generales

Desarrollar un modelo de localización y asignación con programación lineal mixta que seleccione la localización de uno o varios sitios temporales de separación de residuos a partir de la ubicación de los inmuebles colapsados producto de un sismo y la de los sitios disponibles al momento del desastre, de tal forma que la distancia entre ellos sea mínima.

Desarrollar un modelo de ruteo de vehículos con programación lineal mixta que determine las rutas, a partir del número de vehículos necesarios y el tiempo para la recolección de los residuos por sismo, desde los puntos de derrumbe hacia los sitios temporales seleccionados por el modelo de localización y asignación, de tal forma que la distancia recorrida sea mínima.

### 2.2 Específicos

- Estimar la capacidad de almacenamiento del sitio temporal de separación de residuos por sismo con base en la propuesta de diseño existente.

- Verificar y validar el modelo de localización y asignación para el caso de estudio del sismo del pasado 19 de septiembre de 2017 a partir de los 14 inmuebles colapsados inmediatamente después del sismo y los 8 sitios disponibles de acuerdo con el gobierno de la Ciudad de México para determinar la localización óptima de un solo sitio temporal.
- Verificar y validar el modelo de ruteo de vehículos para el caso de estudio a partir del sitio temporal seleccionado por el modelo de localización y asignación.

### 3. Antecedentes

La República Mexicana se divide en cuatro zonas sísmicas tal como se muestra en la **Figura 1**. La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. Las zonas B y C son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad (Sistema Geológico Mexicano, 2017).



*Figura 1 Zonas sísmicas en México (Sistema Geológico Mexicano, 2017)*

A pesar de que las zonas epicentrales se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México se ha convertido en el receptor sísmico de todos ellos debido a que se encuentra lo suficientemente cercana para experimentar sus efectos y la naturaleza de su terreno, que en la antigüedad fue un lago, provoca que las ondas sísmicas sean más dañinas en esta zona que en otros lugares del país. La **Figura 2** muestra la zonificación del Valle de México cuyo riesgo sísmico dependerá del tipo de suelo en cuestión, tal como se describe a continuación.

- Zona I, firme o de lomas: localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles.
- Zona II o de transición: presenta características intermedias entre la Zonas I y III.
- Zona III o de Lago: localizada en las regiones donde antiguamente se encontraban lagos (lago de Texcoco, Lago de Xochimilco), este tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas.

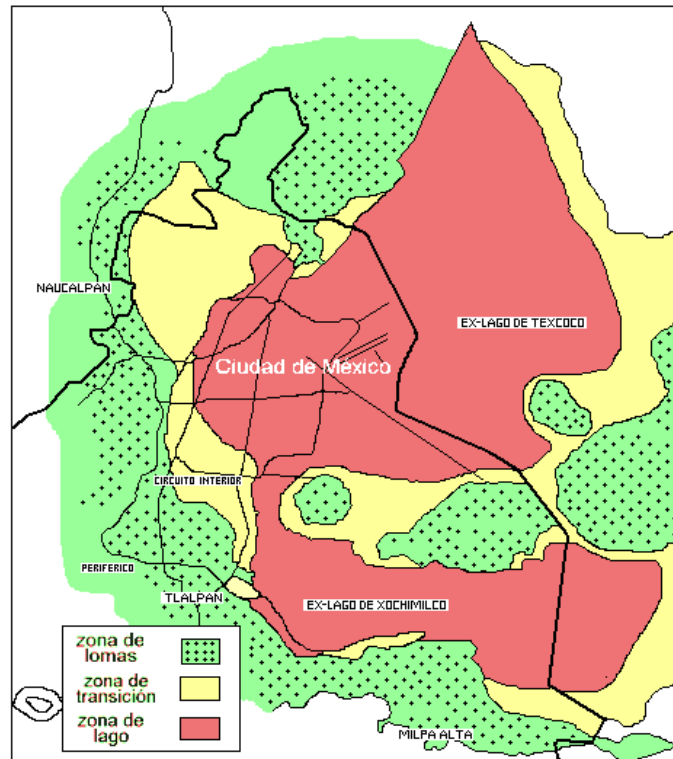


Figura 2 Zonificación del Valle de México (Sistema Geológico Mexicano, 2017)

El sismo del 19 de septiembre de 2017 tuvo un epicentro de 120 kilómetros respecto a la Ciudad de México y afectó mayormente a una franja ubicada al centro de la Metrópoli, donde se encontraba el extremo poniente del Lago de Texcoco. En esta área se localizan los daños más significativos, la cual abarca desde la alcaldía Gustavo A. Madero, pasando por las alcaldías Cuauhtémoc, Benito Juárez, Coyoacán, Iztapalapa y Xochimilco (Sistema Geológico Mexicano, 2017).

### 3.1 Propuesta de gestión de residuos sólidos por sismo en la Ciudad de México

Posterior al sismo de 2017 en Ciudad de México, se lanzó el proyecto PAPIIT TA101119 llamado “Propuesta de estrategia para la gestión integral de residuos sólidos en caso de desastres por sismos: Ciudad de México”, cuyos objetivos fundamentales son tres: 1) La liberación de las vías primarias para la pronta atención de las personas afectadas, 2) La reducción de riesgos para la salud pública por la presencia de residuos orgánicos en las estructuras colapsadas y 3) La valorización de



los residuos para su reciclaje o disposición final adecuada que conducen a la reducción de las afectaciones ambientales que éstos implican (Reyes Ramírez & Rojas Nava, 2020).

Una de las bases de esta propuesta es el hecho de que los residuos producto de un sismo tienen potencial de ser recuperados e integrados a cadenas de reciclaje especializadas dentro de la Ciudad de México. A veces, estos materiales pueden reciclarse en los mercados existentes o pueden usarse en aplicaciones posteriores a los desastres. Sin embargo, debido a la alta complejidad de la composición de los residuos, estos requieren criterios de clasificación, separación y manejo específicos para poder ser valorizados y enviados hacia los centros de reciclaje o rellenos sanitarios de la ciudad. El sitio temporal de separación toma importancia dentro de la gestión de residuos como un lugar de almacenamiento y ejecución de las operaciones mencionadas anteriormente. La separación, valorización y reciclaje de los residuos generados por un desastre reducen los impactos ambientales provocados por el final de la vida útil de los materiales de construcción y una variedad de artículos domésticos, así como por las malas prácticas de su disposición final. La propuesta de gestión clasifica los residuos por sismo principalmente en dos tipos; residuos de la construcción (R&D) y residuos domésticos. El plan de remoción de los residuos del lugar de desastre establece que los residuos de la construcción y otros de mayor volumen son clasificados *in situ* y enviados directamente para su reciclaje o disposición final. Por otro lado, el resto de los escombros, que mayormente contendrán residuos domésticos, serán enviados hacia un sitio temporal de separación que es sitio de almacenamiento y de clasificación de residuos antes de que estos sean enviados hacia cadenas especializadas de reciclaje o bien para su adecuada disposición final.

### 3.1.1 Estimación y clasificación de residuos sólidos por sismo

La estrategia de gestión establece que los residuos que son enviados al sitio temporal incluyen aquellos clasificados como domésticos y excluye a los residuos provenientes de la construcción y demolición (R&D), tales como el concreto armado, cascajo, mármol, loseta, etc. Los R&D no son considerados debido a que estos son mayormente clasificados *in situ* y enviados directamente para su reciclaje o disposición final. El sitio temporal está destinado para recibir solo los residuos domésticos provenientes de edificios habitacionales colapsados inmediatamente después del sismo, debido a que para aquellos edificios programados para su demolición existe la posibilidad de recuperar los bienes domésticos después del desastre. En el sismo del 19 de septiembre de 2017 se registraron 14 edificios habitacionales colapsados total y parcialmente al momento del sismo (Comisión para la reconstrucción, recuperación y transformación de la ciudad de México, 2018), para los cuales se realizó la caracterización, clasificación y estimación de la cantidad de residuos, de acuerdo con los estándares mexicanos. **La Tabla 1** muestra la estimación de residuos domésticos generados por cada edificio habitacional colapsado inmediatamente después del sismo de 2017.

Para los artículos domésticos, la caracterización se hizo con base en los datos relativos a los artículos domésticos en la Ciudad de México publicados en el estudio nacional de gastos e ingresos 2016 hecho por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los artículos domésticos fueron considerados y contabilizados para las 122 viviendas dentro de los 14 edificios habitacionales colapsados. Los pesos y volúmenes de los residuos domésticos fueron estimados utilizando el peso

y volumen promedio de cada artículo doméstico considerado que es comprado con mayor frecuencia y basados en 10 variaciones de cada uno de ellos. A partir de estos datos y de la sumatoria de los pesos y volúmenes promedio de cada artículo doméstico, se calculó un peso por vivienda de 0.8 toneladas y su equivalente a 15.40 metros cúbicos de residuos domésticos mezclados con otros escombros de bajo volumen como papel y cartón, vidrio, alimentos empacados, entre otros.

*Tabla 1 Estimación de residuos domésticos generados por edificio colapsado al momento del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Reyes Ramírez & Rojas Nava, 2020)*

| NO. | UBICACIÓN                         | NO. DE VIVIENDAS | PESO [TON] | VOLUMEN [M <sup>3</sup> ] |
|-----|-----------------------------------|------------------|------------|---------------------------|
| 1   | TEXCALTITLA                       | 1                | 0.80       | 15.40                     |
| 2   | AV. SANTA ANA                     | 2                | 1.60       | 30.80                     |
| 3   | AMSTERDAM                         | 16               | 12.83      | 246.38                    |
| 4   | PASEO DE LAS GALIAS               | 16               | 12.83      | 246.38                    |
| 5   | AVENIDA 323                       | 1                | 0.80       | 15.40                     |
| 6   | EDIMBURGO                         | 21               | 16.84      | 323.37                    |
| 7   | PROLONGACIÓN PETÉN                | 12               | 9.62       | 184.78                    |
| 8   | VIADUCTO PRESIDENTE MIGUEL ALEMÁN | 4                | 3.21       | 61.59                     |
| 9   | SALVADOR DÍAZ MIRÓN               | 1                | 0.80       | 15.40                     |
| 10  | BRETAÑA                           | 3                | 2.41       | 46.20                     |
| 11  | INSURGENTES                       | 1                | 0.80       | 15.40                     |
| 12  | GALICIA                           | 8                | 6.42       | 123.19                    |
| 13  | ESCOCIA                           | 12               | 9.62       | 184.78                    |
| 14  | RANCHO DE LOS ARCOS               | 24               | 19.25      | 369.57                    |

### 3.1.2 Propuesta de diseño del sitio temporal

Dentro de la propuesta de gestión de residuos se plantea que los residuos que llegan al sitio temporal no incluyan los residuos de mayor tamaño clasificados como residuos de la demolición, y otros como son cilindros que contienen tanques de gas comprimido, árboles, motocicletas, tanques de agua, etc. Los RD no pasan por el sitio temporal debido a que se recomienda que estos sean enviados directamente a recicladores con el fin de evitar manejos innecesarios.

La propuesta de diseño del sitio temporal elaborada por Reyes Ramírez & Rojas Nava (2020), fue elaborada a partir de la estimación y clasificación de los residuos del sismo del 19 de septiembre de 2017 y del uso de un diagrama de relación que permite visualizar la afinidad entre los materiales, dimensiones, características físicas y los procesos de manejo para la disposición final. El diseño se fundamenta en guías internacionales y su alcance se limita al *layout* del sitio temporal y sus consideraciones operativas. El diseño propone un sistema de clasificación de residuos por sismo que se organiza por celdas de almacenamiento basado en la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013 de la Ciudad de México, cuya clasificación se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2 Clasificación de celdas del almacenamiento del sitio temporal (Reyes Ramírez & Rojas Nava, 2020)




| Celdas de almacenamiento          | Ejemplo de artículos  |
|-----------------------------------|---|
| Artículos eléctricos              | Aspiradoras, licuadoras, planchas, tostadoras, cafeteras, secadores de cabello, relojes de pared, balanzas, computadoras de escritorio, teclados, ratones, cables, teléfonos, radios, televisores, DVD, impresoras, hornos microondas, pantallas de visualización   |
| Residuos orgánicos biodegradables | Contenido del refrigerador: vegetales, cáscaras de huevo, alimentos preparados, frutas, productos cárnicos, etc.; residuos orgánicos del hogar; residuos de jardín de casa.   |
| Alimento empacado                 | Alimentos empacados y sellados en buenas condiciones, libres de contaminantes y con fecha de vencimiento actual, tales como: botellas de agua, bolsas de cereales, botellas de aceite, alimentos enlatados, galletas, pan de caja, etc.   |
| Papel y cartón                    | Cajas, cartón y cartón corrugado, papel bond, cuadernos, periódicos, revistas   |
| Plásticos                         | El plástico tiene diferentes valores según sus características y propiedades, por lo que se deben utilizar las siguientes subclasificaciones:<br>PET: tereftalato de polietileno, PVC: cloruro de polivinilo, HDPE: polietileno de alta densidad, PP: polipropileno, PS: poliestireno, PC: policarbonato.   |
| Vidrio                            | Cristalería en general: vasos, platos, cristalería para alimentos, envases vacíos para alimentos y bebidas.   |
| Metales                           | Los metales tienen un valor diferente según sus características y propiedades, por lo que se deben utilizar las siguientes subclasificaciones:<br>Metal ferroso: incluye hierro, acero, hierro fundido, acero inoxidable.<br>Metal no ferroso: incluye cobre, aluminio, estaño, plomo, zinc, níquel, cromo, titanio, magnesio, latón, bronce, antimonio, plata, oro y platino.  |
| Textiles                          | Ropa, cortinas, toallas, sábanas, edredones, almohadas, mantas, alfombras, etc.   |
| Muebles                           | Incluye muebles compuestos o hechos de materiales simples (madera, plástico, vidrio, textil o metal), tales como: sillas, mesas, cabeceros, escritorios, cómodas, sofás, colchones, armarios, estanterías, etc.   |
| Línea blanca de gran volumen      | Refrigeradores, lavadoras, secadoras, lavavajillas, estufas, ventiladores eléctricos, aires acondicionados, etc.  |
| Artículos personales              | Se propone una celda de almacenamiento de artículos personales de valor, para permitir la recuperación por parte de los propietarios. La lista de estos objetos fue adaptada de la Sociedad Japonesa de Ciclos de Materiales y Gestión de Residuos (JSMCWM, 2012) e incluye álbumes de fotos, billeteras, joyas, teléfonos celulares, computadoras portátiles, identificaciones, documentos personales, pinturas, esculturas de metal y piedra, anteojos, libros. |
| Residuos sólidos no reciclables   | Artículos que son difíciles o no rentables de reciclar. Algunos ejemplos son: Artículos de cuero, calzado, polietileno de baja densidad, envoltura de plástico metalizado en general, maquillaje, etc.  |
| Restos de escombros               | Restos de residuos de la demolición, así como fragmentos de cristalería, vidrio plano, residuos de porcelana, inodoros y lavabos.   |

Los residuos peligrosos también serán recibidos en el sitio temporal, los cuales, debido a las características de almacenamiento requeridas, se clasificaron en tres tipos: residuos peligrosos, residuos biológico-infecciosos (RBI) y residuos contaminados. El diseño consideró las normas legales

requeridas y tiene un área de almacenamiento exclusiva para estos residuos. Otro aspecto importante es que las celdas de almacenamiento para residuos peligrosos, residuos contaminados y residuos biológicos infecciosos no tienen contacto con los materiales reciclables. La propuesta de diseño del sitio temporal se muestra en la **Figura 3**.

Las celdas de almacenamiento de muebles, electrodomésticos y línea blanca de gran volumen corresponden a los residuos voluminosos mientras que el resto de las celdas son consideradas residuos no voluminosos. Los residuos no voluminosos se almacenarán en contenedores de acuerdo con la **Tabla 3**.

*Tabla 3 Contenedores requeridos para celdas de almacenamiento (Reyes Ramírez & Rojas Nava, 2020)*

| <b>Tipo</b> | <b>Material</b> | <b>Función</b>  | <b>Ventajas</b>  | <b>Capacidad [m3]</b> | <b>Capacidad de carga [kg]</b> | <b>Ejemplo</b>   |
|-------------|-----------------|---|--|-----------------------|--------------------------------|--|
| A           | Plástico        | Albergar a los artículos de las celdas de metal, artículos personales, plástico, papel y cartón, textil, residuos no valorizables y vidrio. | Se pueden estibar, son resistentes y permiten el etiquetado. | -                     | -                              |  <p><i>Contenedor de plástico, (Uline, 2019).</i></p>                 |
| B           | Polietileno     | Almacenamiento de los residuos biodegradables y restos de escombros.  | Cuenta con ruedas  | 1.2                   | 130                            |  <p><i>Contenedor de polietileno, (Alproshop, 2019).</i></p>        |
| C           | Polietileno     | Almacenamiento de los residuos peligrosos, biológico-infeccioso y contaminados.   | Cuenta con ruedas  | 1                     | -                              |  <p><i>Contenedor polietileno para RP, (intecoAstur, 2019).</i></p> |

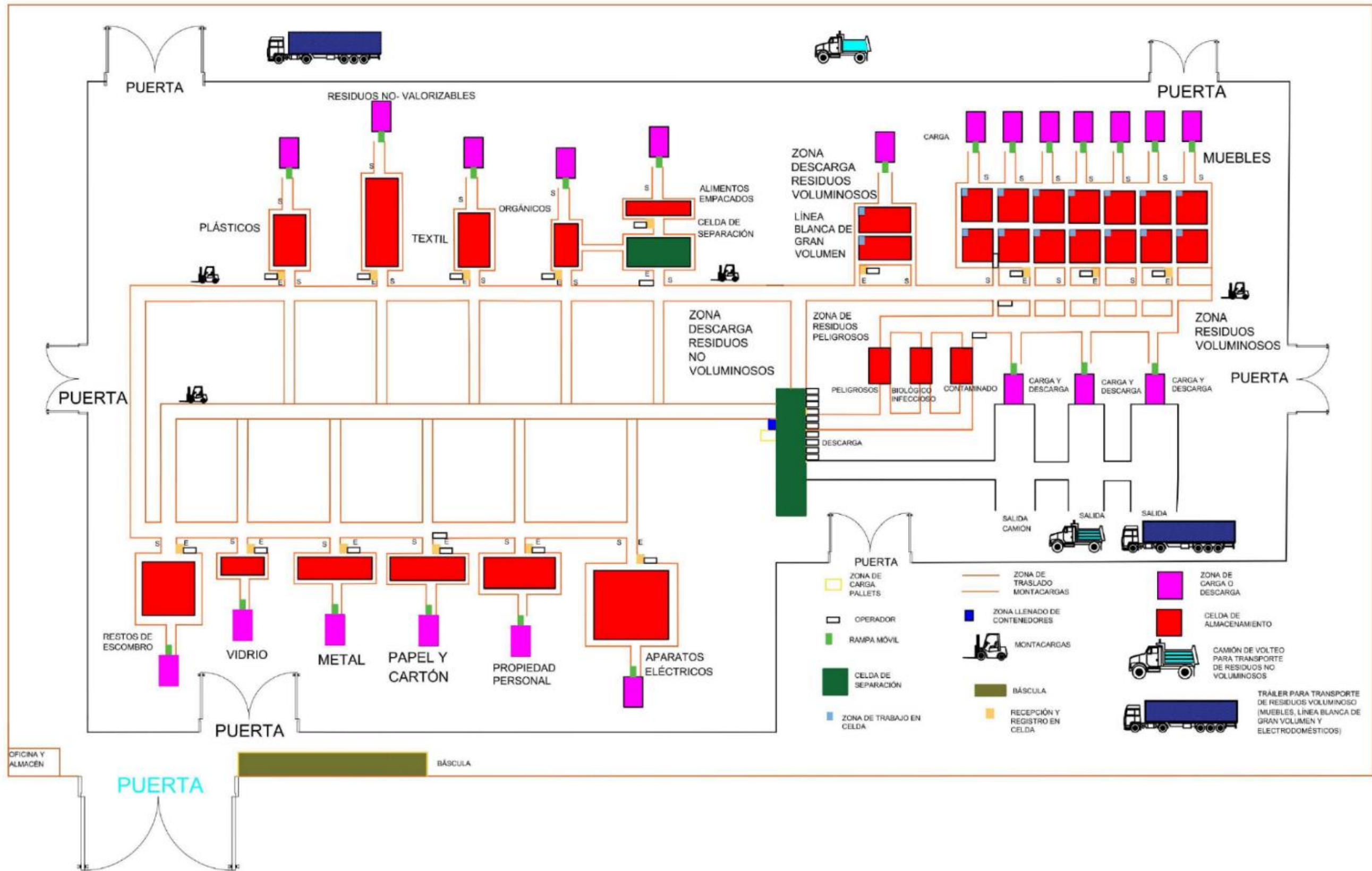


Figura 3 Diseño completo del sitio temporal (Reyes Ramírez & Rojas Nava, 2020)

Para las celdas de almacenamiento de los artículos personales, metales, plástico, papel y cartón, textil, residuos no valorizables y vidrio se utilizarán racks que almacenarán 6 pallets con dos contenedores cada uno. Esta información es la base para el cálculo de la capacidad del sitio temporal que se presenta en ese trabajo.

La **Figura 4** presenta un diagrama de flujo para el manejo de residuos por sismo de acuerdo con la propuesta de gestión citada. La primera columna indica la separación de residuos en el lugar del desastre que distingue entre los residuos mezclados no separables, que se envían al sitio temporal; y los residuos voluminosos que sí pueden ser separados. La segunda columna indica, dentro del cuadro punteado, el sitio temporal donde se realiza la separación de residuos y las clasificaciones de las celdas de almacenamiento. Fuera de la casilla discontinua están las categorías de residuos voluminosos, como vehículos, losas, tanques de agua, cilindros que contienen gas comprimido, árboles, etc. Que deberían ser enviados a las compañías de reciclaje directamente, debido a su difícil manejo. La última columna indica el destino de cada tipo de residuo ya sea reciclaje, incineración, almacenamiento, relleno sanitario, gestión externa autorizada por la SEMARNAT en el caso de los residuos peligrosos o la recuperación de objetos personales de valor.

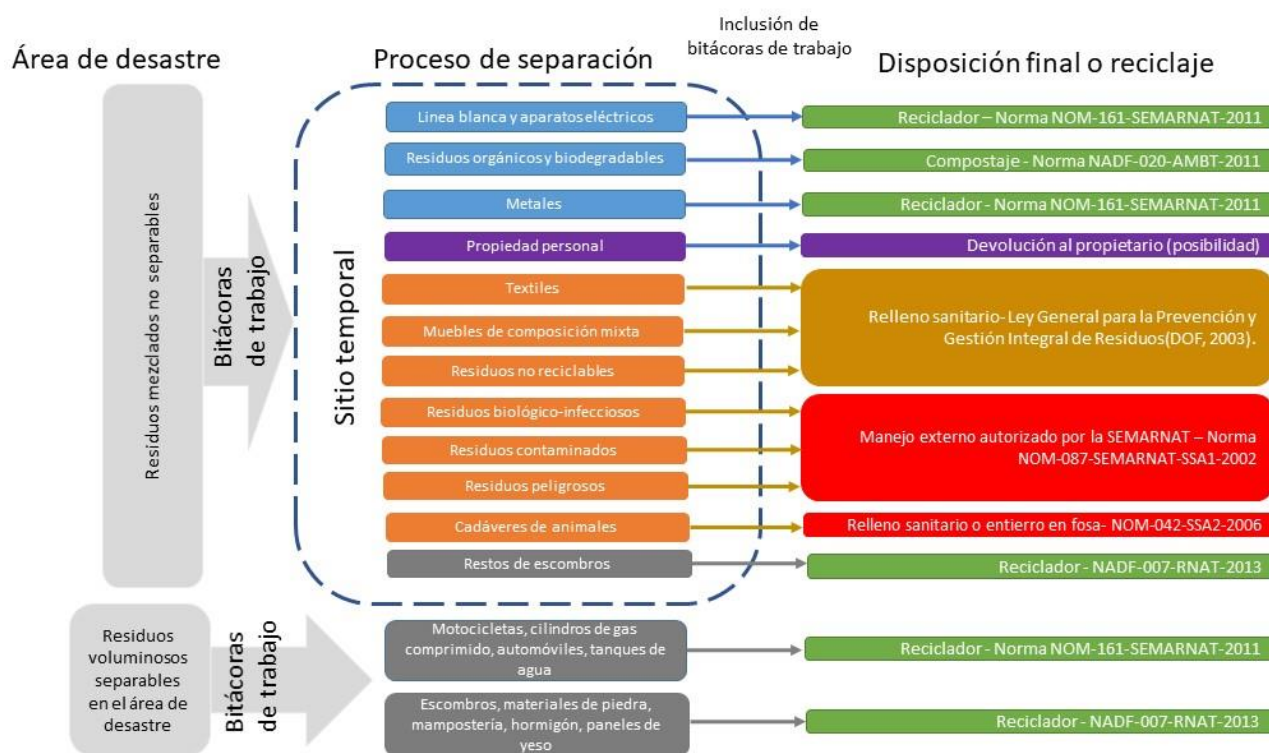


Figura 4 Diagrama de flujo propuesto para el manejo de los residuos en la Ciudad de México (Hernández-Padilla & Angles, 2021)

## 4. Marco teórico

### 4.1 Gestión de residuos por sismo

El marco de Sendai, establecido en 2015, tiene como objetivo lograr, para el año 2030, la reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas ocasionadas por los desastres, tanto en vidas, medios de subsistencia y salud como en bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países. Lo anterior a través de la prevención de la aparición de nuevos riesgos de desastres y la reducción de los existentes implementando medidas integradas e inclusivas de índole económica, estructural, jurídica, social, sanitaria, cultural, educativa, ambiental, tecnológica, política e institucional que prevengan y reduzcan el grado de exposición a las amenazas y la vulnerabilidad a los desastres, aumenten la preparación para la respuesta y la recuperación y refuercen de ese modo la resiliencia (UNISDR, 2015).

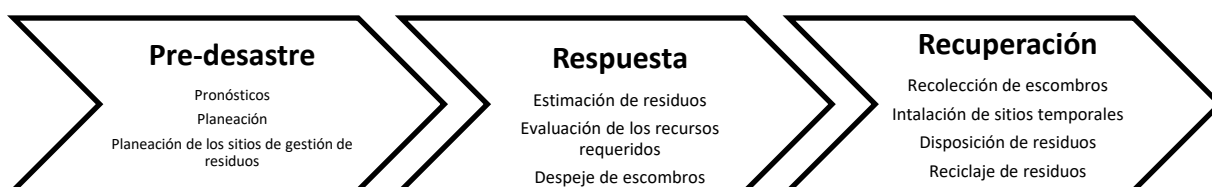
Los temas relacionados con la mitigación, la preparación, la respuesta y la recuperación relativas a desastres deben estar a la vanguardia para no solo generar conocimiento que sea de interés para los investigadores, sino también para proporcionar la base para la toma de decisiones por parte de los planificadores, *emergency managers* y otros profesionales involucrados. La recuperación comunitaria está asociada con la infraestructura y las líneas de vida que son fundamentales para las operaciones de otros sistemas como el transporte, la electricidad, el agua y la eliminación de residuos. Poner en marcha los negocios y la movilidad también es de vital importancia para reanimar las actividades económicas que proporcionan recursos económicos en forma de sueldos y salarios, así como bienes y servicios (Rodríguez et al., 2007). Por ejemplo, en el sismo de 1985, la capacidad de la red de transporte se redujo principalmente debido a bloqueos causados por estructuras que se derrumbaron en las calles y agravadas por los escombros de las estructuras colapsadas almacenadas en las calles a medida que avanzaban la búsqueda, rescate, demolición y limpieza (Hobeika et al., 1987).

La mayoría de los desastres rebasan la capacidad de las regiones afectadas para reaccionar a ellos apropiadamente, rescatar personas, proteger la propiedad y mantener la estabilidad social y económica de esas regiones. A pesar de que hay diferencias entre la naturaleza y severidad de los desastres, estos suelen generar una gran cantidad de escombros y residuos que no pueden evitarse. En algunos casos, el volumen de escombros de un solo evento de desastre es de 5 a 15 veces más grandes que los residuos normalmente generados en un año por las regiones afectadas (Reinhart & McCreanor, 1999).

De acuerdo con Lorca et al. (2015) un aspecto importante que suele ser ignorado dentro de las actividades logísticas posteriores al desastre es el manejo de los escombros, los cuales se definen como cualquier tipo de residuo generado por el desastre. Los residuos incluyen materiales de construcción, vegetación, residuos domésticos, residuos peligrosos, etc. El mismo autor establece que la remoción oportuna de estos residuos tiene consecuencias relevantes en el tiempo: en el corto plazo permite el mantenimiento de las actividades de respuesta al desastre tales como el transporte de ayuda, la búsqueda y rescate y la evacuación. En el largo plazo, ésta previene los efectos adversos en la salud pública y el ambiente debido a factores como la descomposición de productos químicos y la contaminación de fuentes de agua.

Anglica & Hernández (2015) coinciden en que la gestión eficiente de los residuos fuera de las áreas afectadas también contribuye al pronto restablecimiento de la normalidad, es por esto por lo que durante la fase de reconstrucción la calidad de las actividades logísticas puede impactar de sobremanera en el éxito del proceso completo de la recuperación, especialmente en términos de sustentabilidad y efectividad a largo plazo. Además, Brown & Milke (2016) mencionan que los beneficios de esta estrategia incluyen la reducción de espacio en rellenos sanitarios, reducción de la demanda de materia prima, la reducción de costos de gestión de residuos (esto depende de los costos relativos de gestión de residuos, incluido el transporte) y la creación de empleo.

La **Figura 5** muestra el tiempo en que las operaciones de gestión de residuos deberían llevarse a cabo durante las etapas de un desastre. En la etapa previa, es necesario que cada comunidad o región local determine una serie de posibles escenarios de desastre, lo que a su vez ayudará a determinar los pronósticos de posibles cantidades y composiciones de residuos generados en cada escenario. Según estos pronósticos, es posible planificar los requisitos de mano de obra, equipo y determinar las posibles instalaciones de gestión de residuos tales como sitios de procesamiento, plantas de reciclaje y sitios de disposición. Es así como inmediatamente después de un desastre, con base en la evaluación inicial del área del desastre, se estiman las cantidades y composiciones de los escombros y se evalúan las necesidades de mano de obra y equipo. La etapa posterior del desastre involucra la recolección de escombros para que estos sean transportados hasta los sitios de procesamiento temporal, donde pueden llevarse a cabo procesos como clasificación, separación, trituración, incineración, astillado de madera y trituración de concreto. Una vez que se completan estos procesos, la totalidad o parte de los residuos procesados se pueden eliminar en los rellenos sanitarios, mientras que otra parte se puede procesar en las plantas de reciclaje para ser reutilizados o vendidos. La gestión de residuos post desastre también implica la definición de responsabilidades y procedimientos administrativos (Lorca et al., 2015).



*Figura 5 Flujo de operaciones en la gestión de residuos a través de las etapas del desastre (Lorca et al., 2015)*

Domingo & Luo (2017) concluyen, después de hacer una revisión de la literatura, que muchas de las estrategias post desastre de gestión de residuos son diseñadas a partir de uno o más requerimientos clave como; la identificación de sitios de disposición y posibles materiales reciclables, la cantidad y composición de los residuos, la capacidad de las áreas de manejo de residuos, el alcance de los trabajos de reconstrucción y las oportunidades de reutilización de los residuos reciclados. Además, es esencial realizar la asignación de los roles y responsabilidades en el proceso de gestión de residuos de acuerdo con las estructuras gubernamentales y autoridades locales.

Uno de los aspectos más importantes de las operaciones de remoción de escombros es pronosticar el volumen de escombros generado por el desastre. Después de un desastre, los coordinadores de



desastres se enfrentan al desafío de tomar decisiones como la ubicación de los sitios de procesamiento de residuos para comenzar las operaciones de limpieza de escombros rápidamente, aunque el volumen y la ubicación de todos los escombros no se conocen con certeza (Fetter & Rakes, 2012). La gestión de residuos es un proceso largo, costoso y complicado; por lo tanto, las operaciones de manejo de escombros eficientes y efectivas podrían ser ayudadas significativamente por modelos cuantitativos y herramientas de apoyo a la toma de decisiones (Lorca et al., 2015).

De acuerdo con Cheng & Thompson (2016), uno de los objetivos principales de la gestión de residuos por desastre es la limpieza y remoción de residuos de los sitios afectados tan pronto como sea posible, por lo cual la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (*FEMA*, por sus siglas en inglés) recomienda el uso de sitios temporales de gestión de residuos por desastre. Para la selección y configuración de sitios de almacenamiento es preferible establecer sitios de almacenamiento utilizando áreas urbanas o tierras agrícolas que hayan sido inundadas, tierras de propiedad pública no utilizadas, tierras abandonadas, parques, estacionamientos o rellenos sanitarios (Tasaki et al., 2012). Los sitios temporales pueden tener diferentes papeles dentro del sistema de gestión ya sea como sitios de separación, tratamiento, incineración de residuos y/o de almacenamiento temporal antes de su disposición final.

Los beneficios de los sitios temporales incluyen la velocidad en las actividades de limpieza, la eficiencia en las actividades de la etapa de recuperación y un medio para una apropiada clasificación, incineración y reciclaje de residuos. Sin embargo, de acuerdo con el mismo autor, la selección de sitios temporales es un proceso difícil ya que se realiza durante las etapas posteriores al desastre y bajo una gran cantidad de restricciones, por lo cual desarrollar un método previo al desastre contribuye notoriamente a la planeación y toma de decisiones. Cheng & Thompson (2016) también mencionan que una de las acciones más importantes a considerar en la selección de sitios temporales es identificar los criterios que deben ser considerados, los cuales clasifican en tres categorías: tipo de propiedad, tamaño y ubicación. Para el criterio de propiedad sugieren que es mejor utilizar propiedades públicas cuyo costo asociado será menor, sin embargo, cuando estas no estén disponibles, la propiedad privada será una opción.

Por otro lado, es importante elegir sitios que sean lo suficientemente grandes para el tratamiento y almacenamiento de los residuos por lo cual es importante tomar en cuenta factores como la generación de residuos, operaciones del sitio y tiempo de almacenamiento. Por último, la ubicación de los sitios temporales no debe impedir el tránsito vial a lo largo de los corredores de transporte, interrumpir las operaciones de los negocios locales o causar condiciones peligrosas en zonas habitacionales, escolares, de hospitales, o alguna otra área vulnerable. Además, los sitios deben tener la infraestructura carretera necesaria para acceder a ellos.

A continuación, se citan algunas investigaciones relativas a estrategias de gestión de residuos en la etapa posterior al desastre, las cuales han sido diseñadas y adoptadas en países alrededor del mundo, que al igual que México, han experimentado desastres devastadores y siguen expuestos al riesgo en el futuro.

El trabajo realizado por Lorca et al. (2015) se enfoca en el desarrollo de un modelo matemático que funciona como una herramienta de toma de decisiones relativas a la recolección, transporte, reducción, reciclaje y disposición de residuos. Estas decisiones, tales como la ubicación de las instalaciones de procesamiento y el transporte de residuos, implican un número de *trade-offs* que el modelo resuelve balanceando múltiples objetivos como los costos financieros, efectos ambientales, tiempo operativo y la cantidad de residuos reciclados. Entre las asunciones del modelo está el hecho de que las potenciales ubicaciones para los sitios de procesamiento de residuos son determinadas previo al desastre y tienen que estar enlistadas en los planes locales de gestión de residuos. Otras entradas al modelo, como las mostradas en la **Figura 6**, incluyen las tasas de recolección en toneladas por hora, la capacidad de los rellenos sanitarios, los costos fijos de instalar las instalaciones de procesamiento y los costos unitarios de recolectar, procesar, disponer, reciclar y transportar los residuos.

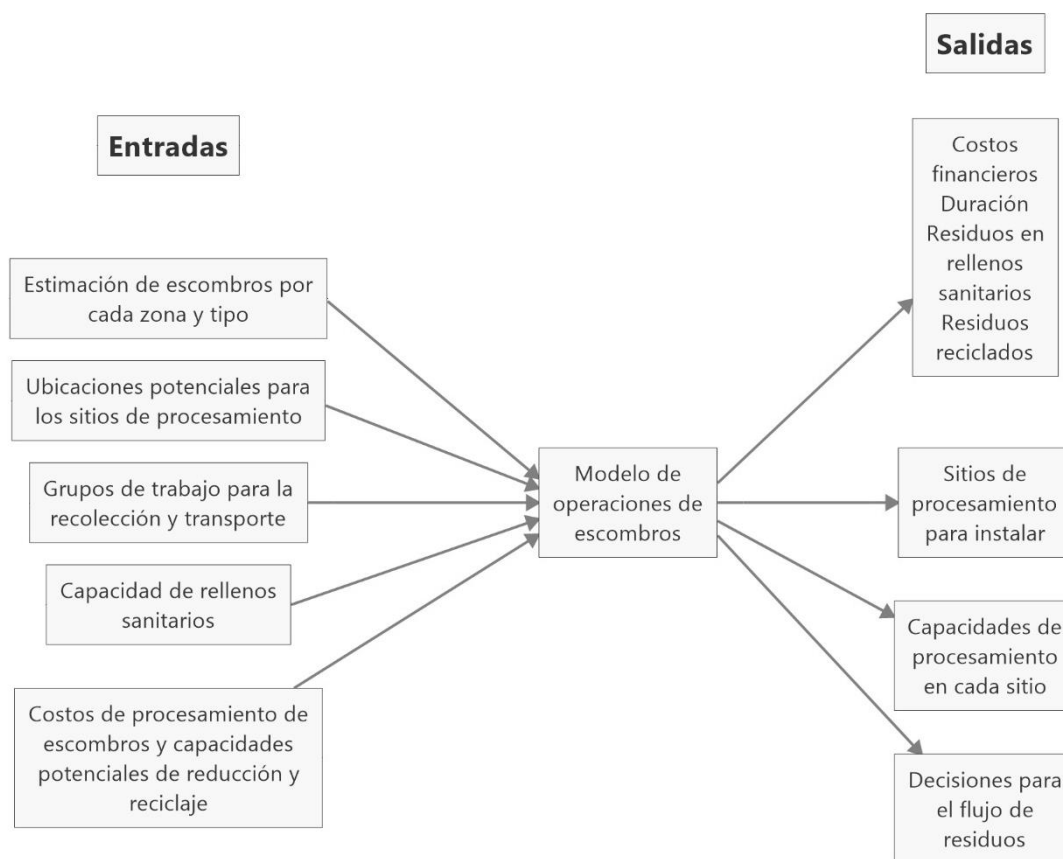


Figura 6 Principales entradas y salidas del modelo desarrollado por Lorca et al. (2015)

Onan et al. (2015) desarrolla un modelo de optimización multiobjetivo para determinar la ubicación de instalaciones de almacenamiento temporal y la asignación de residuos entre ellas y los puntos de origen, enfocado en la ciudad de Estambul (Turquía). El objetivo del modelo es minimizar el costo y el número de personas sujetas al riesgo de disposición, reciclaje y separación, así como la exposición a residuos peligrosos durante las operaciones de tratamiento de residuos. El modelo determina las locaciones de los sitios de almacenamiento temporal y la planeación para la recolección y transporte de los residuos a través de una ecuación que minimiza la distancia y selecciona los sitios más cercanos,

otra que minimiza la cantidad de población sujeta al riesgo y por último un modelo bi-objetivo de ubicación y asignación de flujos de residuos, que considera la cantidad de residuos en los puntos de origen, el costo esperado de instalación del sitio temporal y el costo de transporte hacia cada uno de ellos. El modelo se valida con datos provenientes de eventos previos en la ciudad de Estambul (Turquía).

Otro modelo de decisión definido por Fetter & Rakes(2012) se enfoca en la ubicación de sitios de almacenamiento temporal y disposición de residuos como apoyo a las operaciones de limpieza de los escombros por desastre. El modelo toma en cuenta los costos de recolectar y transportar los residuos, la estimación de residuos por región y la cantidad asignada a cada posible sitio de procesamiento, el número mínimo de sitios requeridos y el máximo de sitios posibles, la capacidad tecnológica de tratamiento de cada sitio (separación, incineración y trituración) y el costo de dicha tecnología, el costo de disposición para cada caso, los ingresos obtenidos por los materiales reciclados o recuperados y los costos fijos de instalar y dismantelar los sitios de procesamiento. El objetivo es minimizar los costos fijos y variables de la recolección de escombros, reciclaje y eliminación de los residuos, al mismo tiempo que se busca maximizar los ingresos por su reciclaje. El modelo se define a partir de un modelo programación lineal entera mixta que se validó usando datos registrados de las operaciones de limpieza de escombros que ocurrieron en Chesapeake, Virginia, después de la llegada del huracán Isabel en 2003.

De acuerdo con Domingo & Luo (2017), el gobierno de Nueva Zelanda estableció, posterior a los sismos de septiembre de 2010 y febrero de 2011 en la región de Canterbury, la Autoridad para la recuperación del sismo de Canterbury (CERA por sus siglas en inglés: *Canterbury Earthquake Recovery Authority*) con el objetivo de dirigir, coordinar y acelerar el proceso y los esfuerzos de recuperación posterior al desastre. CERA definió el proceso de remoción de los escombros a través de un método llamado “*quick pick and go*” que consiste en enviar los residuos, que pueden separarse en el sitio del desastre, directamente al mercado de uso final mientras que aquellos que están mayormente mezclados son transferidos a otras instalaciones de procesamiento o rellenos sanitario y de acuerdo con la investigación de este mismo autor, un método similar fue usado en el tsunami de Sri Lanka ocurrido en 2004. Algunos retos enfrentados en la etapa posterior a los sismos de Canterbury fueron la cantidad limitada de instalaciones de procesamiento de residuos, la carencia de legislación y planes de gestión de residuos, limitaciones organizacionales tales como la falta de interés en la protección ambiental y la naturaleza burocrática de la toma de decisiones, una mala comunicación y coordinación entre las partes interesadas (públicas y privadas) y, falta de habilidades y programas de entrenamiento y la falta de interés en la gestión de residuos post desastre.

La **Figura 7** presenta el marco de un sistema de logística inversa para escombros posterior al desastre (PDDRLS por sus siglas en inglés: *post-disaster debris reverse logistics system*), propuesto por Hu & Sheu (2013), que asume cuatro etapas de procesamiento de residuos: (1) procesamiento de escombros en el sitio de desastre; (2) procesamiento de residuos en un sitio temporal; (3) procesamiento masivo y avanzado de los residuos, y (4) reproducción de productos de construcción (etapa 4). Los autores establecen que estas cuatro etapas forman un circuito cerrado cuando los

materiales reciclados finalmente se incorporan como materiales de construcción a los sitios afectados por el desastre. Hu & Sheu (2013) proponen un modelo matemático de programación lineal multiobjetivo que incluye tres funciones objetivo; para la minimización de costo, la minimización del riesgo y la minimización del costo psicológico de la población a lo largo de las 4 etapas de la red de logística inversa. El modelo asume que las cantidades de escombros que serán recolectados en cada sitio de desastre se estima con base en la severidad del desastre, el número de víctimas y el de edificios colapsados. El modelo matemático es aplicado al caso de estudio del sismo de 2008 en Wenchuan, China.

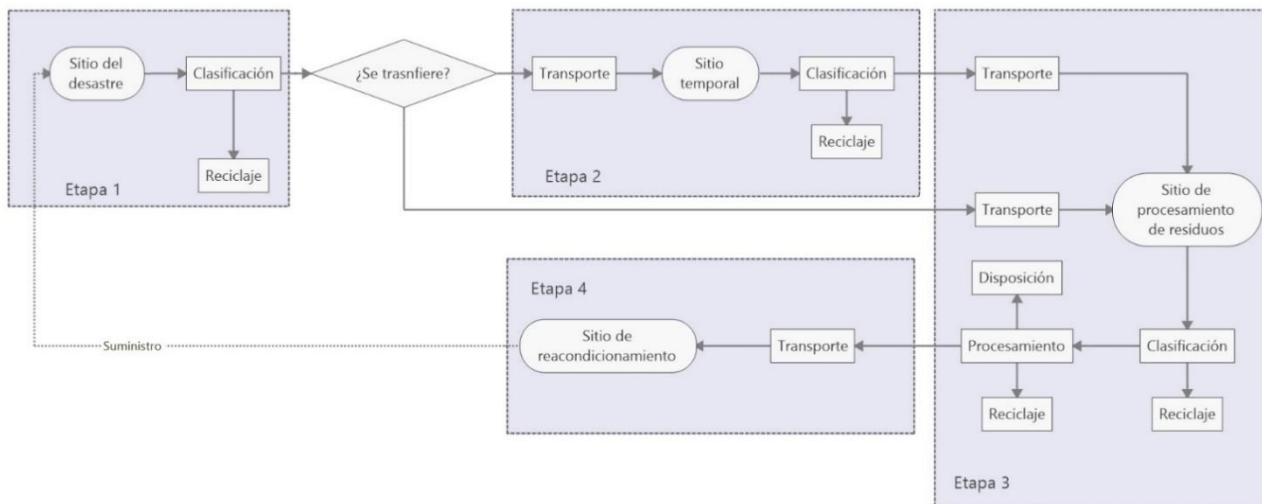


Figura 7 Marco de logística inversa para escombros post-desastre. Adaptada de Hu & Sheu (2013)

Los planificadores deben tener en cuenta que las soluciones de este tipo de modelos matemáticos se basan en parámetros de entrada que a menudo son inciertos o estimados, limitación que es inherente a todos los modelos de planificación de desastres. Es responsabilidad del planificador o el tomador de decisiones monitorear los cambios en los parámetros, tal como las estimaciones actualizadas del volumen de escombros, sin embargo, los modelos desarrollados por investigaciones en la materia ofrecen el beneficio a los tomadores de decisiones de permitirles generar rápidamente nuevas soluciones. Además, proporciona a los planificadores un mecanismo para evaluar las distintas alternativas según la naturaleza de un desastre (Fetter & Rakes, 2012).

## 4.2 Localización de instalaciones

La localización de instalaciones es ampliamente utilizada tanto en el sector privado, (plantas industriales, bancos, comercios, etc.), como el público (hospitales, estaciones postales, etc.) y tiene influencia en numerosas decisiones operacionales y logísticas (Tatjana, 2012). Los problemas de localización y asignación determinan la mejor configuración de una o más instalaciones y su interpretación práctica habitual es la de un sistema social o económico que se puede identificar como un conjunto de flujos entre una serie de instalaciones y algún conjunto de puntos de origen o destino geográficamente dispersos. El problema es, simultáneamente, ubicar las instalaciones y determinar

una asignación de flujos, de modo que los costos totales de operación del sistema sean los menores posibles. En su forma más general, el problema de asignación y ubicación se descompone en dos caminos básicos. Si las ubicaciones de todas las instalaciones se conocen de antemano, pero se desconoce la asignación de flujos entre el conjunto de instalaciones y algún otro conjunto de puntos, el problema se convierte en el problema de transporte ordinario de Programación Lineal (PL). Si se conoce la asignación de flujos, pero se desconoce la disposición geográfica de las instalaciones, entonces el problema es un problema de ubicación pura y generalmente se tratará como el problema clásico de Weber de la economía espacial (Scott, 1970).

#### 4.2.1 Problema de localización y asignación (LAP)

El problema de ubicación y asignación, conocido como LAP por sus siglas en inglés: *Location and allocation problem*, consiste en ubicar un conjunto de nuevas instalaciones de manera que se minimice el costo de transporte desde las instalaciones hasta los clientes, esto con un número óptimo de instalaciones en un área de interés y de modo que la demanda pueda ser satisfecha. Este problema envuelve una gran variedad de modelos que han sido desarrollados y resueltos por diversos autores desde mediados del siglo pasado. Los componentes básicos de los problemas de ubicación y asignación consisten en instalaciones, ubicaciones y clientes. Las definiciones y propiedades de estos componentes básicos de acuerdo con Azarmand & Neishabouri (2009) se muestran en la **Figura 8**.

Los componentes del problema de ubicación y asignación se representan en modelos matemáticos que se modelan a través de la Investigación de Operaciones. Los modelos de ubicación y asignación pueden dividirse, de acuerdo con Azarmand & Neishabouri (2009), en modelos generales y desarrollados que suelen tener variables tales como el número de instalaciones, su ubicación, cantidad de suministro de las instalaciones hacia los clientes y la capacidad de cada instalación. El modelo de Cooper (1963) fue uno de los primeros modelos generales para resolver el problema de ubicación y asignación de nuevas instalaciones.

### 4.3 Programación lineal

La Investigación de operaciones (IO) es el estudio cuantitativo de las operaciones de una organización compleja y la predicción de los efectos de los cambios en las condiciones para la orientación de los ejecutivos en la obtención de la máxima efectividad de los recursos disponibles (Goodell Brown & Easterfield, 2015). Los modelos desarrollados por la IO son representaciones exactas o aproximadas de situaciones reales cuyos grados de aproximación y niveles de abstracción de la realidad dependerán de cada aplicación. El modelo de investigación de operaciones busca definir y construir funciones matemáticas, a partir de las variables que controlan el sistema, que describan el comportamiento del fenómeno estudiado, con el objetivo de elaborar alternativas de solución y facilitar la toma de decisiones. La **Figura 9** muestra las fases principales para la implementación de modelos de Investigación de Operaciones en la práctica.

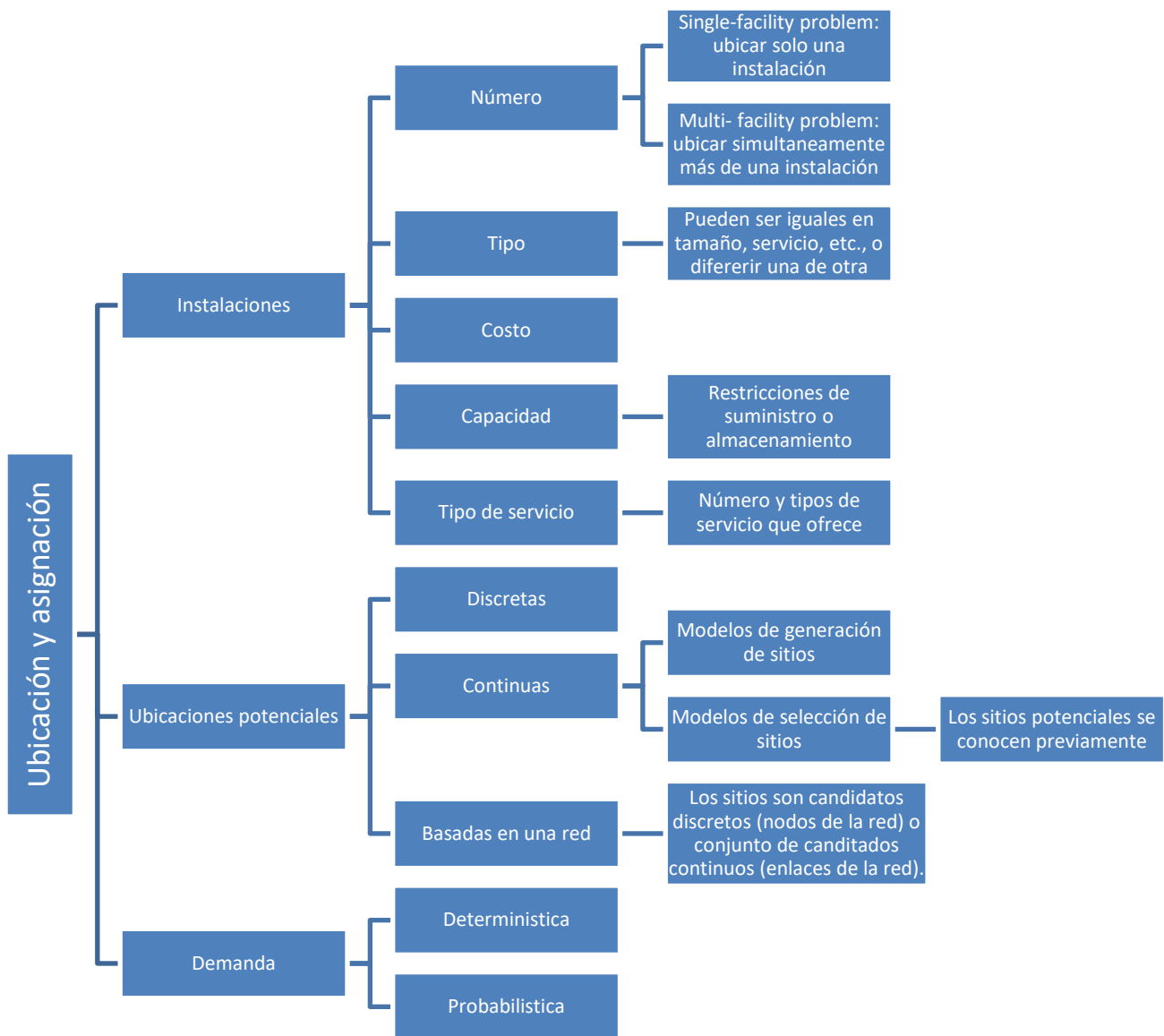


Figura 8 Componentes del problema de ubicación y asignación (Elaboración propia con información de Azarmand & Neishabouri (2009))

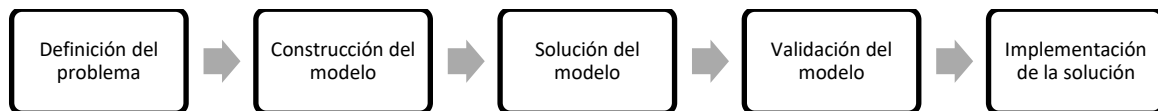


Figura 9 Fases de un estudio de IO (Taha, 2012)

El proceso de abstracción de la realidad inicia con la definición del problema que pretende ser modelado, la cual implica definir el alcance del problema, las variables de decisión, el objetivo de estudio y las limitaciones bajo las cuales funciona el sistema en cuestión. La definición del problema es transformada en relaciones matemáticas para construir modelos que pueden ajustarse a modelos estándar, como la Programación Lineal, que pueden ser resueltos con los algoritmos preexistentes. Si el modelo implica relaciones matemáticas más complejas, es común optar por simplificaciones, métodos heurísticos y/o el uso de simulación.

La solución del modelo implica el uso de algoritmos de optimización bien definidos, los cuales proporcionan reglas fijas de cálculo que se aplican en forma repetitiva al problema, y en cada repetición o iteración, la solución se acerca al valor óptimo. Actualmente, estos algoritmos suelen ejecutarse con ayuda de softwares computacionales debido a lo tedioso que pueden ser los cálculos para un número muy grande de iteraciones. Una parte importante de la fase de solución es el análisis de sensibilidad debido a que este proporciona información acerca del comportamiento de la solución óptima cuando el modelo experimenta cambios en alguno o algunos de sus parámetros o variables de entrada. Este análisis se hace necesario cuando dichos parámetros no pueden ser estimados con precisión y pueden estar sujetos a variabilidad dentro del sistema o fenómeno estudiado.

Para estar seguros de que el modelo cumple con los objetivos definidos en la primera fase es necesario darle validez a través del análisis de la solución óptima por medio de métodos como la comparación del resultado con resultados históricos o bien en el caso de que el modelo describiera un sistema nuevo, la simulación puede ser considerada como una herramienta de validación. Por último, la implementación de la solución consiste en traducir la solución del modelo en instrucciones operativas claras que se comunicarán a las personas encargadas de administrar el sistema en cuestión.

La investigación de operaciones no establece una técnica general única ya que el tipo y complejidad del modelo matemático determina la naturaleza del método de solución. La técnica de IO más importante es la programación lineal. Esta técnica está diseñada para modelos con funciones objetivo y restricciones lineales. Otras técnicas incluyen la programación entera (en la cual las variables asumen valores enteros), la programación dinámica (en la cual el modelo original puede descomponerse en subproblemas más pequeños y manejables), la programación de red, y la programación no lineal (Taha, 2012).

La Programación Lineal es un subconjunto de la programación matemática para la cual, a pesar de que los parámetros son números conocidos por el tomador de decisiones y son tomados como un dato fijo, las variables de decisión son números cuyos valores se determinarán en el proceso de solución. Uno de los supuestos básicos de la Programación Lineal es la propiedad determinista que significa que asumimos que la estructura del problema, así como todos los parámetros del problema, se conocen con certeza (Eiselt & Sandblom, 2007).

La palabra programación en esencia es sinónimo de planeación, por lo tanto, la Programación Lineal involucra la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo; esto es, el resultado que mejor alcance la meta especificada entre todas las alternativas factibles. Se dispone de un

procedimiento de solución muy eficiente llamado método simplex para resolver los problemas lineales, incluso los de gran tamaño, que es utilizado por la mayoría de los softwares de optimización para determinar el valor de las variables de interés bajo los supuestos de proporcionalidad, aditividad, divisibilidad y certidumbre de las variables y parámetros del modelo (Hillier & Lieberman, 2010).

### 4.3.1 Modelo de transporte

El modelo de transporte es un tipo de Programación Lineal que determina la cantidad de mercancías que deben ser enviadas desde  $i$  fuentes (fábricas) hacia  $j$  destinos (almacenes o centros de distribución) con el objetivo de minimizar los costos de transporte satisfaciendo los límites de suministro y demanda. La **Figura 10** representa gráficamente la forma general del modelo de transporte, en el cual hay  $i$  orígenes y  $j$  destinos, cada uno representado por un nodo. Los arcos representan las rutas que unen los orígenes con los destinos. El arco  $(i, j)$  que une el origen  $i$  con el destino  $j$  tiene asociadas dos variables:  $C_{ij}$  que representa el costo de transporte por unidad y  $X_{ij}$  cuyo valor es la cantidad transportada. La cantidad ofertada en el origen  $i$  es representada por la variable  $a_i$  y la cantidad demandada en el destino  $j$  es  $b_j$ . El objetivo del modelo es minimizar el costo de transporte total al mismo tiempo que se satisfacen las restricciones de la oferta y la demanda (Taha, 2012).

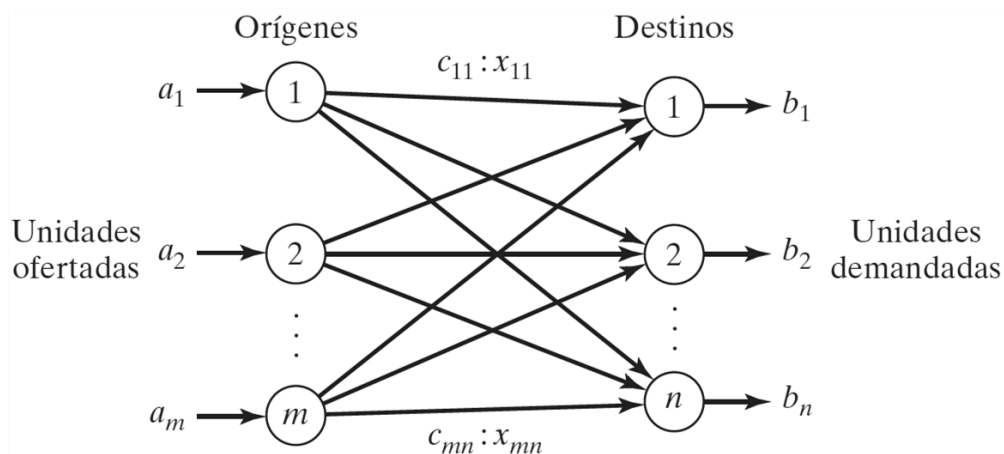


Figura 10 Representación general del modelo de transporte en una red bipartita (Taha, 2012)

El modelo se puede visualizar fácilmente a través de dos matrices, una de costos y otra de flujos. Las características del problema de transporte se resumen de la siguiente forma: 1) cada punto de destino tiene una demanda específica que se debe satisfacer, 2) cada punto origen solo puede proveer cierta cantidad de unidades que se desean transportar, es decir, tiene una oferta determinada, 3) el objetivo es minimizar el costo total de transporte, de acuerdo con los costos relacionados con el plan de rutas seleccionadas, 4) el costo de distribución es directamente proporcional a la cantidad de artículos que distribuye o transporta, 5) el problema tiene solución factible solo si la cantidad total disponible de todos los orígenes es mayor o igual a la demanda total de los destinos (Winston & Goldberg, 2004).



### 4.3.2 Programación lineal entera mixta

El modelo de transporte en su forma más básica puede asignar flujos de material a todos los destinos considerados, sin embargo, para este trabajo es necesario incluir un criterio de selección, con una variable binaria, que asigne los flujos únicamente a un número  $n$  de destinos de forma óptima. Cuando sólo es necesario que algunas de las variables sean enteras y el resto continuas, el modelo recibe el nombre de problema de Programación Lineal Entera Mixta (MILP por sus siglas en inglés: *Mixed Integer Linear Programming*). Dentro de esta clasificación, se incluyen aquellos modelos que, además de tener variables enteras no negativas y variables continuas, tienen también variables binarias (Cornejo Sánchez & Puente, 2005).

## 4.4 Sistemas de información geográfica (SIG)

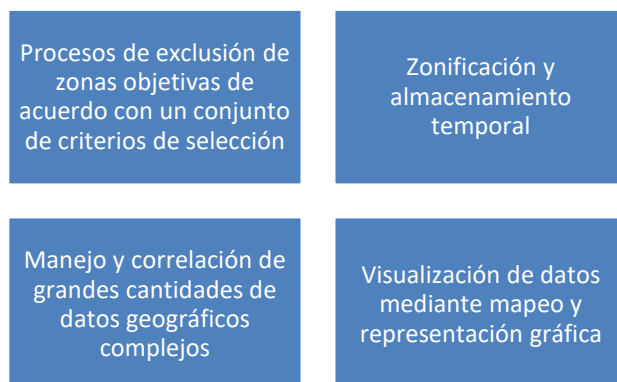
Las definiciones tradicionales describen los SIG como un conjunto de hardware, software, datos personas y procedimientos; organizados para capturar, almacenar, actualizar, manejar, analizar y desplegar eficientemente rasgos de información referenciados geográficamente. Estos sistemas nos permiten visualizar y comprender el mundo a través de lo que hay en él desde una perspectiva integral y con ayuda de sistemas computacionales y bases de datos. Al contrario de lo que sucede con mapas tradicionales, los mapas en un SIG cambian dinámicamente en la medida que los datos alfanuméricos son actualizados. A través de un SIG los mapas pueden ser integrados y correlacionados fácilmente con múltiples datos que son mapeados y cualquier problema representado en un mapa puede analizarse varias veces. Los SIG también son valiosos instrumentos de apoyo en situaciones de relevancia social, como un desastre; tal es el caso de la prevención de un sismo; cuando se requiere, por ejemplo, información geológica y sísmica para ser analizada y enlazarla con la distribución geográfica de la infraestructura y ocupación del suelo de la región afectable, así como distintos indicadores demográficos. Asimismo, con un SIG se facilita la obtención de mejores resultados en la atención de la emergencia (Ángel et al., 2002).

De acuerdo con Ángel et al. (2002), las aplicaciones de los sistemas de información geográfica, SIG (en inglés: GIS, *Geographic Information System*) en el transporte se resumen en:

- **Localizar** ¿Dónde se ubica algún elemento de infraestructura o equipo?
- **Navegar** ¿A dónde se dirige el vehículo?
- **Monitorear** ¿Dónde están las unidades móviles?
- **Mapear** ¿Dónde y cómo se distribuyen los componentes de un sistema de transporte?
- **Cronometrar** ¿Cuánto tiempo consumen las operaciones en un trayecto determinado?

Los SIG procesan una gran cantidad de información para facilitar la toma de decisiones y reducir los costos operativos en múltiples aplicaciones (Rodríguez Lloret & Olivella, 2010). Lo anterior es dado por el hecho de que los SIG tienen la funcionalidad de reconocer, correlacionar y analizar la relación espacial entre los fenómenos mapeados para permitir a los responsables de la formulación de políticas vincular fuentes dispares de información, realizar análisis complejos, visualizar tendencias, superponer diferentes criterios y elaborar estrategias de objetivos de planificación a largo plazo. La ventaja potencial de un enfoque basado en SIG para la selección de sitios surge del hecho de que puede reducir el tiempo y el costo, así como proporcionar un banco de datos digitales para el

monitoreo a largo plazo de los sitios (Cheng & Thompson, 2016). La **Figura 11** muestra otras ventajas de aplicar SIG en el proceso de ubicación de instalaciones.



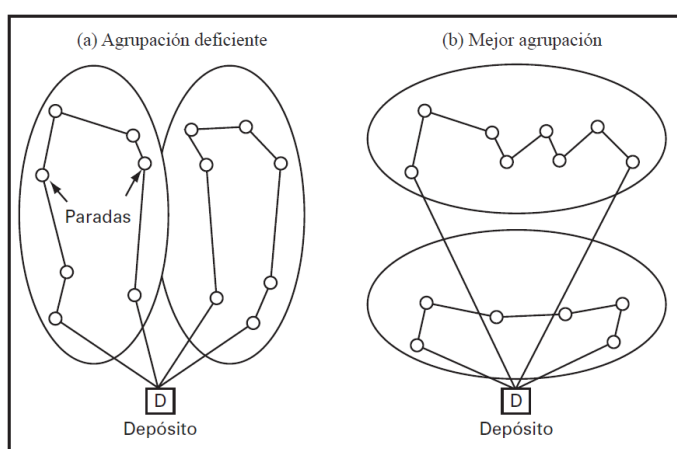
*Figura 11 Ventajas de aplicar SIG en la ubicación de instalaciones (Cheng & Thompson, 2016)*

## 4.5 Diseño de rutas para los vehículos

### 4.5.1 Principios para una buena programación y diseño de rutas

Un aspecto importante en la toma de decisiones es la definición de los caminos o rutas que debería seguir un vehículo en una red de transporte o distribución de tal forma que se minimicen el tiempo o la distancia recorrida con el objetivo de reducir los costos de transporte y mejorar el servicio al cliente. Ballou (2004) propone ocho principios guía para ser aplicados por los tomadores de decisiones para desarrollar buenas programaciones y diseños de rutas por carretera. Dichos principios son:

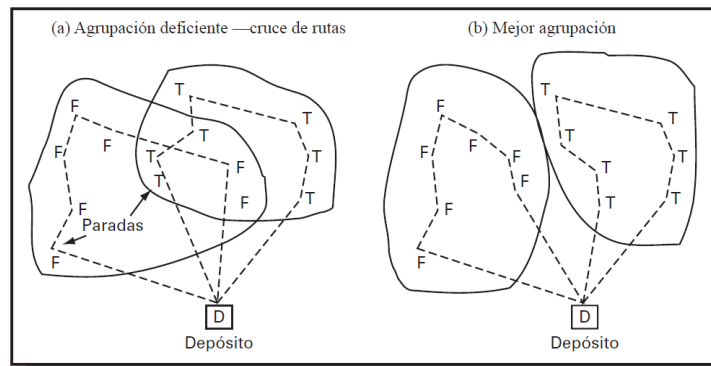
1. **Cargar los camiones con volúmenes de parada que estén lo más cercanos unos de otros.** Las rutas de los camiones deberían formarse alrededor de agrupaciones de paradas que estén cerca unas de otras para reducir al máximo el tiempo del viaje entre ellas. La **Figura 12** muestra ejemplos de agrupaciones de acuerdo con este criterio de programación.



*Figura 12 Agrupación para la asignación de volúmenes de parada a los vehículos (Ballou, 2004)*

2. **Las paradas en diferentes días se deberían ordenar de tal manera que formen agrupaciones más estrechas.** Cuando las paradas deben efectuarse durante diferentes días de la semana,

deberían segmentarse en problemas de programación y diseño de rutas separados para cada uno de los días de la semana. Los segmentos diarios, para los cuales hay que desarrollar programas y diseños de rutas, deberían evitar la superposición de las agrupaciones de paradas. Esto ayudará a minimizar el número de camiones necesarios para atender todas las paradas, así como a minimizar el tiempo de viaje del camión y la distancia recorrida durante la semana. La **Figura 13** muestra una agrupación deficiente y una mejorada con base en este criterio.



*Figura 13 Agrupación de paradas por día de la semana (Ballou, 2004)*

3. **Construir rutas comenzando con la parada más lejana del depósito.** Pueden desarrollarse rutas eficientes mediante la construcción de agrupaciones de paradas alrededor de la parada más lejana del depósito y luego trabajando de regreso hacia el depósito. Una vez que se identifica la parada más lejana, debería seleccionarse el volumen desde la agrupación más estrecha de paradas situada alrededor de esta parada clave, para completar la capacidad asignada del camión. Después de que se hayan asignado al vehículo los volúmenes de paradas, se selecciona otro vehículo y se identifica la parada más lejana al depósito entre las paradas restantes que aún no hayan sido asignadas a un vehículo. Este proceso se repite hasta que todas las paradas se hayan asignado a los vehículos.
4. **La secuencia de paradas en una ruta por carretera debería formar una figura de lágrima.** Las paradas deberían continuarse de tal manera que ningún camino de la ruta se cruce, y la ruta parezca tener la forma de una lágrima (**Figura 14**).

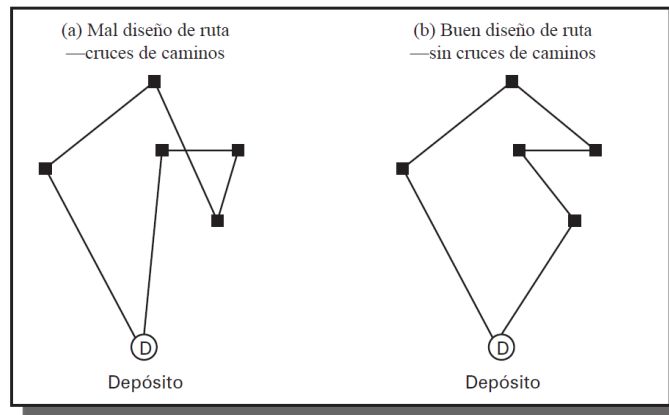


Figura 14 Ejemplos de mala y buena secuencia de paradas (Ballou, 2004)

Por otra parte, también se usan modelos por computadora para hallar la secuencia de las paradas de una ruta. En este punto es necesario decidir si serán tomadas las distancias lineales entre una ubicación y otra o bien las trayectorias carreteras dadas por un SIG. Esto puede ser una mejor opción que la percepción, cuando la relación de los espacios entre las paradas no representa su tiempo o distancia reales de viaje, por ejemplo, cuando hay barreras de viaje, calles de un solo sentido o congestión de tráfico, todo lo cual puede deformar la representación gráfica del problema. Es importante tener en cuenta que la consideración de trayectorias carreteras implica una buena integración entre el sistema de información geográfica y el modelo de programación matemática.

5. **Las rutas más eficientes se construyen usando los vehículos más grandes disponibles.** Idealmente, usar un vehículo lo suficientemente grande como para manejar todas las paradas en una ruta minimizará la distancia total, o el tiempo, utilizado para atender las paradas. Por lo tanto, se deberían asignar primero los vehículos más grandes, de entre los múltiples tamaños de una flota, a condición de que pudieran aprovecharse bien.
6. **Las recolecciones deberían mezclarse dentro de las rutas de reparto, en vez de ser asignadas al final de las rutas.** Las recolecciones deberían hacerse, dentro de lo posible, durante el curso de los repartos, para minimizar la cantidad de caminos que se cruzan, lo que puede ocurrir cuando se atienden dichas paradas después de hacer todos los repartos. El alcance al que puede hacerse esto dependerá de la configuración de los vehículos, del tamaño de los volúmenes de recolección y del grado de obstaculización que exista para no bloquear el acceso a la mercancía de reparto que haya dentro del vehículo.
7. **Una parada que se halla a gran distancia de una agrupación de ruta es buena candidata para un medio alternativo de reparto.** Las paradas que están aisladas de las agrupaciones de las paradas, especialmente aquellas con bajo volumen, son atendidas a costa de gran tiempo de conducción y gastos del vehículo. Usar pequeños camiones para manejar tales paradas puede ser más económico, dependiendo del aislamiento de cada parada en particular y de sus volúmenes. También sería buena alternativa usar un servicio de transporte de alquiler.
8. **Deberían limitarse las paradas restringidas por momentos oportunos (horarios).** Las restricciones de momentos oportunos en las paradas, cuando son limitadas, pueden forzar a

que la secuencia de las paradas se aleje de los patrones ideales. Dado que las restricciones por momentos oportunos a menudo no son absolutas, debería renegociarse cualquier parada que tenga que ser atendida en un patrón de diseño de ruta menos deseado, con la esperanza de ampliar sus límites de momento oportuno.

Estos principios son de utilidad para la programación y diseño de rutas óptimas o aproximadas al óptimo, sin embargo, estas siguen sujetas a las restricciones y características particulares de cada situación de reparto y/o recolección en particular. Algunas consideraciones prácticas que también suelen tomarse en cuenta para el diseño de rutas son el momento oportuno, la existencia de múltiples camiones con diferentes capacidades de peso y volumen, el tiempo máximo de conducción permitido en una ruta, diferentes velocidades dentro de distintas zonas, barreras para viajar (lagos, desviaciones, montañas) y tiempos de descanso para el conductor. Los problemas de diseño de rutas, según Ballou (2004), pueden reducirse a unos cuantos tipos básicos como se detalla a continuación.

#### ***Puntos de origen y destino separados y sencillos***

Para este problema el punto de origen es diferente del punto de destino. La técnica más sencilla y directa es el método de la *ruta más corta*. Para este método se tiene una red representada por vínculos y nodos, donde los nodos son los puntos de conexión entre los vínculos, y los vínculos son los costos (distancias, tiempos o una combinación de ambos, formados como un valor promedio de tiempo y distancia) para pasar entre los nodos y llegar al punto de destino. El conjunto de nodos seleccionados a través del algoritmo de este método conforma la ruta más corta o la ruta óptima.

#### ***Puntos múltiples de origen y destino***

Este enfoque se utiliza comúnmente cuando hay puntos múltiples de origen que puedan servir a múltiples puntos de destino, lo cual implica un problema de asignación de los destinos a esos orígenes, así como también para hallar las mejores rutas entre ellos. La incógnita en este tipo de problema es decidir qué puntos de origen servirán a cada punto de destino de forma óptima y bajo las restricciones de capacidad y demanda establecidas previamente. A este tipo de problema se aplica con frecuencia el *método o modelo de transporte*, el cual como se mencionó anteriormente es una clase especial de algoritmo de Programación Lineal.

#### ***Puntos coincidentes de origen y destino***

Este tipo de problema de diseño de rutas es una extensión del problema de puntos separados de origen y destino, pero el requisito de que la vuelta no está completa hasta que el vehículo regresa a su punto de partida, añade una dimensión que lo complica. Ejemplos comunes son el reparto de bebidas a bares y restaurantes y el reparto y programación de efectivo en cajeros automáticos. El objetivo es hallar la secuencia en la que los puntos deberían visitarse, de manera que se pueda reducir al máximo el tiempo o la distancia total del recorrido. El problema de diseño de ruta de origen y destino coincidentes por lo general se conoce como problema del *agente viajero TSP* (por sus siglas en inglés: *Traveling Salesman Problem*).

#### 4.5.2 Problema del agente viajero (TSP)

De acuerdo con Ramos (2007) se puede ver al problema del agente viajero como un grafo de  $n$  nodos (ciudades), en el cual cada arco (ruta que une cada par de ciudades) tiene asignado un peso o costo no negativo (distancia entre el par de ciudades que une o costo de viajar entre esas dos ciudades). Usualmente es un grafo completo, es decir, uno en el cual todo nodo está vinculado con cada uno de los demás por exactamente un eje, como puede observarse en la **Figura 15**.

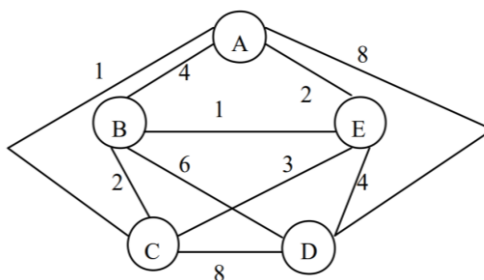


Figura 15 Problema del agente viajero (Ramos, 2007)

De acuerdo con Taha (2012) el modelo matemático básico del TSP, descrito en las **Ecuaciones (4.1) - (4.2)**, se define a partir de  $n$  ciudades y la distancia  $d_{ij}$  entre las ciudades  $i$  y  $j$ . Además, para un conjunto de  $n$  ciudades, existe un máximo de  $n - 1$  recorridos.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si se llega a la ciudad } j \text{ desde la ciudad } i \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij} \quad (4.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad \text{Para } i = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad \text{Para } j = 1, \dots, n \quad (4.3)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{Para } i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

La función objetivo **(4.1)** busca minimizar la suma de las distancias de los arcos  $X_{ij}$  activados en la ruta de solución. Las restricciones **(4.2)** y **(4.3)** significan que solo se puede llegar desde una ciudad y partir hacia otra sola ciudad. La restricción **(4.4)** define la variable binaria  $X_{ij}$  que activa el arco o

enlace entre dos ciudades como parte del recorrido. Si la solución del modelo TSP se agrupa en un recorrido único, significa que se tiene el valor óptimo o mínimo de distancia. Sin embargo, es común que el modelo de asignaciones se componga de sub recorridos, para los cuales diversos autores han propuesto diferentes tipos de restricciones para eliminarlos y obtener la solución de recorrido óptima (Taha, 2012).

La programación y el diseño de rutas para los vehículos es una extensión del *problema del agente viajero*. Para la cual, según Ballou (2004), se incluyen limitaciones reales, por ejemplo:

- 1) Cada parada puede tener un volumen que tiene que ser recogido y/o entregado
- 2) Pueden usarse múltiples vehículos con diferentes limitaciones de capacidad, tanto en peso como en volumen
- 3) Se permite un máximo de tiempo de conducción en ruta antes de tomar un periodo de descanso para viajes muy largos
- 4) Las paradas pueden permitir recolección y entregas sólo a ciertas horas del día (llamadas momentos oportunos)
- 5) Se puede permitir recolección en una ruta sólo después de haber efectuado las entregas
- 6) Se puede permitir a los conductores tomarse breves descansos, o pausas, para comer a ciertas horas del día.

Este tipo de limitaciones implican otro grado de complejidad y es por ello que a pesar de que el desarrollo tecnológico actual ofrece a los usuarios soluciones de hardware y software potentes, la práctica actual generalizada se basa en el diseño manual de rutas a cargo del personal de logística u operaciones, en forma complementaria a las soluciones automatizadas soportadas por modelos matemáticos o heurísticos (Machuca de Pina et al., 2018) .

#### 4.5.3 Problema de ruteo de vehículos (VRP)

La planificación del transporte a nivel operativo se conoce como problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés: *Vehicle Routing Problem*). El VRP, en su forma más básica, es un problema de optimización combinatoria que surge a partir del TPS, el cual que busca definir las rutas para dar servicio a un número de clientes con una flota de vehículos definida, satisfaciendo principalmente restricciones de demanda y capacidad. Fue propuesto por Dantzig y Ramser en 1959 y actualmente es un problema importante en los campos del transporte, la distribución y la logística (Networking and Emerging Optimization Research Group, 2013).

La diferencia entre el problema del agente viajero y el VRP radica en la cantidad de variables que incluyen. En el problema del agente viajero se dispone de un solo vehículo, donde en un solo viaje se debe visitar todas las poblaciones, además no existe demanda de cada población ni restricciones de capacidad del vehículo. Por otro lado, para los distintos tipos de VRP se dispone de varios vehículos que deben visitar varias poblaciones con una demanda conocida y cuyos recorridos finalizan en uno o varios depósitos distribuidos geográficamente en la red de transporte.

El término VRP también funciona como un nombre genérico que se le da a toda una familia de problemas en los que se deben determinar rutas óptimas de recolección o entrega para una flota de

vehículos bajo circunstancias particulares. El VRP tiene una diversidad de variantes de acuerdo con las restricciones que son tomadas en cuenta para modelar el fenómeno de distribución en cuestión, las cuales pueden ser la capacidad del vehículo, la longitud de la ruta, las ventanas de tiempo, el número de depósitos o almacenes, etc. Más recientemente, se ha prestado mayor atención a variantes más complejas del VRP que describen de mejor forma los problemas prácticos de distribución y se caracterizan por múltiples depósitos, múltiples viajes que deben realizar los vehículos, múltiples tipos de vehículos u otros problemas operativos como las limitaciones de carga (Golden et al., 2008).

El CVRP (por sus siglas en inglés: *Capacited Vehicle Routing Problem*) es una variante del VRP en la cual la capacidad de los vehículos es considerada como una restricción del modelo (Vázquez, 2012). El CVRP consiste en diseñar rutas de vehículos de tal manera que cada ruta comienza y termina en el depósito, cada cliente es visitado exactamente una vez por un vehículo y el total de mercancías transportadas en una ruta no excede la capacidad del vehículo. La **Figura 16** representa un ejemplo de CVRP.

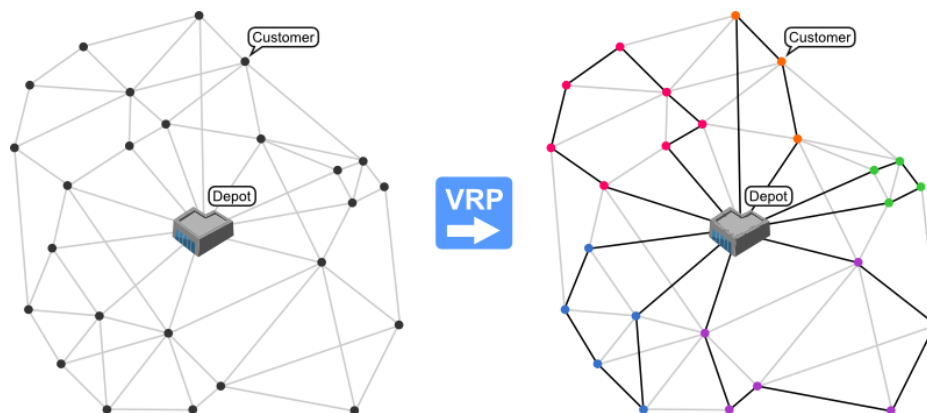


Figura 16 Ejemplo de VRP y su solución (Networking and Emerging Optimization Research Group, 2013)

Los objetivos del VPR pueden ser minimizar el tiempo requerido, la distancia total, el costo total del transporte, la flota de vehículos o bien una ponderación de todos ellos dependiendo del criterio de decisión característico de cada problema. La **Figura 17** muestra algunas de las variantes del VRP más comunes en la práctica.

El problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP) surge como una generalización del VRP, donde los vehículos parten y regresan a una de las ubicaciones de depósitos múltiples. Por tanto, además de la definición de las rutas de los vehículos, también es necesario decidir desde qué depósito se visitan los clientes. El MDVRP define simultáneamente las áreas de servicio de cada depósito y establece las rutas de vehículos asociadas (Ramos Rodrigues Pereira et al., 2020).



# Problema de ruteo de vehículos VRP

| VRP con restricción de capacidad del vehículo (CVRP)  | VRP con restricción de distancia (DVRP)      | VRP con backhauls (VRPB)   | VRP con recolección y entrega (VRPPD)   | VRP con ventanas de tiempo (VRPTW)  | VRP con entrega dividida (VRFS o SDVRP)   | VRP con múltiples depósitos (MDVRP)   | Problema de enrutamiento y ubicación (LRP)  |
|---|--|--|---|---|---|---|---|
| La flota fija de vehículos de reparto de capacidad uniforme debe atender las demandas conocidas de los clientes | Las rutas no pueden exceder un longitud dada | Rutas para clientes que requieren entrega y clientes que requieren recolección | Rutas para mover mercancías desde determinadas ubicaciones de recolección a determinadas ubicaciones de entrega | Cada cliente debe ser atendido dentro de intervalos de tiempo predeterminados | Un cliente está dispuesto a recibir un pedido en más de un vehículo y en más de una ocasión | Si los clientes y los depósitos se entremezclan se utiliza MDVRP<br>Si los clientes están agrupados en depósitos se utilizan VRP's independientes | Combina las decisiones de enrutamiento del VRP y las decisiones de ubicación.<br>Determina un conjunto de rutas de vehículos y los depósitos donde debe comenzar y terminar cada ruta |
|   |  |  |   |   |   | <b>VRP estocástico (SVRP)</b><br>Uno o más componentes del problema son aleatorios (Clientes, depósitos o tiempos)                                |   |
|   |  |  |   |   |   | <b>VRP periódico (PVRP)</b><br>Tiene un período de planificación a M días   |   |

Figura 17 Variantes comunes del VRP. Elaboración propia con información de Demir et al. (2019) y Networking and Emerging Optimization Research Group (2013)

El problema de ruteo de rutas para vehículos de entrega dividida (SDVRP por sus siglas en inglés: *Split Delivery Vehicle Routing Problem*) es una variante del VRP en la cual se eliminan las condiciones que establecen que cada cliente sea visitado por un solo vehículo cuya capacidad es mayor que la demanda de dicho cliente. En el SDVRP la demanda de los clientes se puede dividir entre varios vehículos, ya que sus demandas suelen ser mucho más grandes que la capacidad de cada vehículo en particular (Dror et al., 1994). En el SDVRP, se encuentra disponible una flota de vehículos homogéneos capacitados para atender a un conjunto de clientes. Cada cliente puede ser visitado más de una vez, y la demanda de cada cliente puede ser mayor que la capacidad del vehículo. Cada vehículo tiene que iniciar y finalizar su recorrido en el mismo depósito. El problema consiste en encontrar un conjunto de rutas vehiculares que atiendan a todos los clientes de manera que la suma de las cantidades entregadas en cada recorrido no supere la capacidad de un vehículo, se cumplan los requerimientos de demanda y se minimice la distancia total recorrida (Golden et al., 2008).

#### 1.4.1 Problema de localización y ruteo (LRP)

Como se describió en secciones anteriores, el problema de localización de instalaciones implica decisiones de instalación, ubicación y asignación de clientes a depósitos o almacenes, mientras que el ruteo de vehículos consiste en el diseño de un conjunto de rutas que minimicen el costo de la distancia recorrida entre clientes y depósitos, para satisfacer la demanda establecida. Es partir de esto que el problema de localización y ruteo (LRP por sus siglas en inglés: *Location-routing problem*) integra ambas problemáticas. El LRP, al igual que el VRP, normalmente puede modelarse como un problema de optimización combinatoria y para resolver este tipo de problemas, los algoritmos exactos han sido capaces de demostrar optimalidad para instancias pequeñas (menos de 100 clientes) y diversos algoritmos heurísticos y metaheurísticos han sido propuestos para resolver instancias de mayor tamaño (Linfati et al., 2014).

El modelo combinado de ubicación y programación de rutas resuelve el problema conjunto de determinar el número y la ubicación óptima de las instalaciones que atienden a más de un cliente o proveedor y definir el conjunto óptimo de rutas o de vehículos para las operaciones de distribución. La principal diferencia entre el problema LRP y el clásico problema de ubicación y asignación LAP es que, una vez que se ubica la instalación, el LRP establece los recorridos para las visitas a los clientes o proveedores, mientras que el segundo solo asume la distancia entre la instalación y el cliente o proveedor. La ventaja del LRP sobre el problema clásico es que considera los recorridos y busca la ubicación óptima de las instalaciones y el diseño de la ruta simultáneamente para poder interrelacionar esas dos decisiones (Min et al., 1998). La **Figura 18** muestra el proceso de decisión de un modelo LRP.

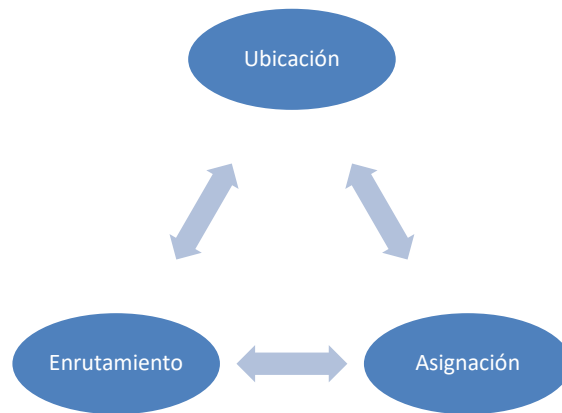


Figura 18 Interdependencia en el modelo LRP (Min et al., 1998).

### 1.4.2 Técnicas de optimización

El TSP, LAP, VRP y LRP son problemas de tipo *NP-hard* debido a que su naturaleza de solución es combinatoria y por lo tanto su dificultad incrementa de forma exponencial al crecer el número de ciudades en la red. Los algoritmos exactos para la solución del VRP y otros tipos de problemas combinatorios se basan generalmente en una formulación de programación matemática. Comúnmente estos algoritmos implican la relajación y la reintroducción de restricciones tales como; la eliminación de sub recorridos para asegurar que todos los recorridos de vehículos se asignen a un depósito, las rutas no pueden conectar un depósito con otro y la inclusión de variables enteras que normalmente son enteras binarias (Nagy & Salhi, 2007).

Los problemas que implican variables enteras son más difíciles de resolver dado el grado de complejidad que agregan sus criterios de decisión definidos en el modelo de programación lineal. Estos modelos pueden resolverse utilizando softwares comerciales de optimización como son MPSX-MIP®, OSL®, CPLEX® y LINDO®, los cuales tienen una extensa capacidad de programación entera. Por otro lado, paquetes de hoja de cálculo como Solver de Excel® también tienen la capacidad de resolver programas enteros de menor tamaño (Cogollo Flórez, 2017).

A pesar de que la solución óptima de los modelos de Programación Lineal puede ser encontrada con métodos exactos a través de la diversidad de softwares existentes en el mercado, el proceso para resolverlos implica largos tiempos de cómputo por lo que solo las instancias pequeñas pueden resolverse de manera óptima en tiempos relativamente cortos. Para resolver instancias de tamaño realista en una cantidad de tiempo factible, se han desarrollado con éxito una variedad de heurísticas durante las últimas décadas (Arnold & Sörensen, 2019).

Según la RAE (2020), la heurística es en algunas ciencias una manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc. En el campo de la programación matemática la heurística se puede definir como una técnica que aumenta la eficiencia del proceso de búsqueda para guiar la solución en la dirección óptima sin tener que resolver el problema en cada una de sus combinaciones lo que acorta considerablemente el tiempo de cómputo. Ya que por medio de la heurística se pretende resolver problemas complicados o muy grandes con eficiencia, es necesario comprometer algunos requisitos de optimalidad y construir una estructura de

control que no garantice encontrar la mejor respuesta pero que casi siempre encuentre una buena solución, aunque pueda no ser la óptima (Ramos, 2007).

De acuerdo con Vázquez (2012), los algoritmos utilizados para resolver problemas VRP y en general aquellos de tipo *NP-hard*, se clasifican en tres tipos:

- a) Métodos exactos. Estos métodos suelen ocuparse en problemas con pocos puntos y utilizar programación entera mixta como por ejemplo el método *Branch and Bound* o *Ramificación y Acotación* que consiste en una enumeración en árbol en el cual el espacio de las variables enteras se divide de forma sucesiva dando lugar a problemas lineales que se resuelven en cada nodo del árbol.
- b) Métodos heurísticos. Estos métodos se agrupan en; *algoritmos constructivos* como por ejemplo el algoritmo de los ahorros de Clarke y Wright; *algoritmos por fases*, tales como el heurístico de barrido o el algoritmo de Pétalo propuesto por Balinski y *algoritmos de inserción* como el de inserción secuencial de Mole y Jameson.
- c) Métodos metaheurísticos. Estos métodos pueden dividirse en: *búsqueda tabú*, algoritmos basados en poblaciones y *algoritmos basados en mecanismos de aprendizaje*.

La literatura nos dice que entre mayor sea el tamaño del problema y el número de puntos o nodos a considerar en la red, mayor será la necesidad de utilizar métodos heurísticos y metaheurísticos con el objetivo de reducir el tiempo de cómputo necesario para encontrar la solución más cercana al valor óptimo, de tal modo que los métodos exactos solo serán factibles para problemas de menor tamaño, los cuales tendrán tiempos de cómputo razonables.

La **Figura 19** muestra una clasificación de los métodos heurísticos propuesta por Nagy & Salhi (2007) para la solución de problemas combinatorios de tipo VRP y LRP de acuerdo con la forma que el algoritmo de solución modela la relación entre los subproblemas de ubicación y ruteo.

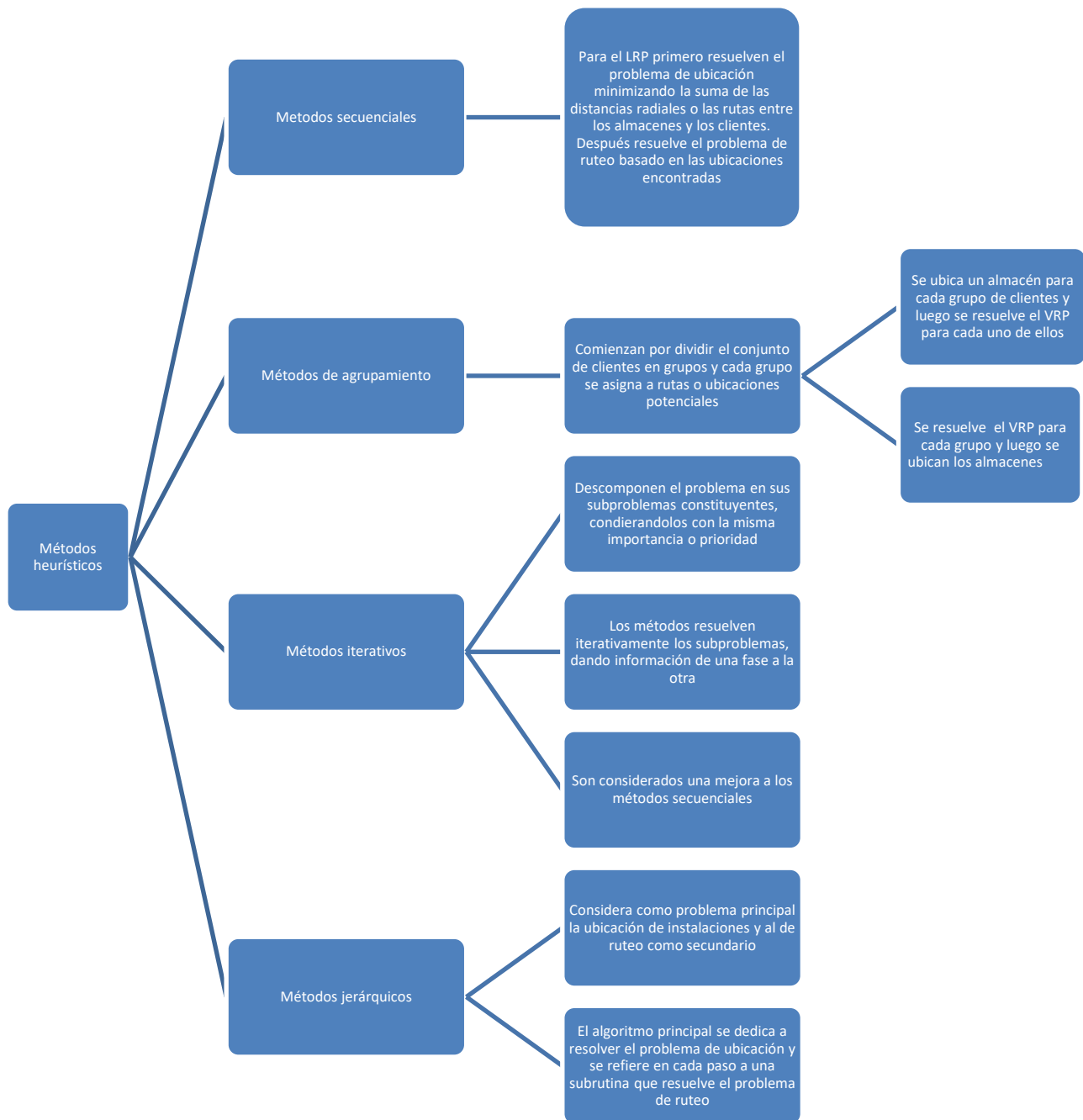


Figura 19 Métodos de solución heurística para problemas LRP determinísticos (Elaboración propia con informacion de Nagy & Salhi (2007))

#### 4.6 Transporte para la recolección de residuos en la Ciudad de México

De acuerdo con la Ley de Residuos Sólidos de la Ciudad de México, la recolección de residuos para su transferencia, tratamiento y/o disposición final se llevará a cabo por transportes autorizados, ya sea empresas o particulares, registrados ante la secretaría del medio ambiente (SEDEMA), tales transportes serán de carácter público o privado dependiendo de las características del servicio a

realizar. Por ejemplo, para el caso de los residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general, estos deben ser transportados por vehículos licenciados por el gobierno de la entidad a sitios autorizados tales como rellenos sanitarios o minas que ha terminado su vida útil. Sin embargo, una práctica común entre los transportistas es la disposición final de los residuos en sitios clandestinos, como son tiraderos a cielo abierto o barrancas o áreas naturales protegidas (García, 2017).

El listado de establecimientos mercantiles, de servicios y/o unidades de transporte de residuos sólidos de competencia local, con autorización y registro otorgado por la SEDEMA, o también conocido como RAMIR, está publicado en la página web de la dependencia. Tal listado especifica el servicio proporcionado por cada transportista de acuerdo con el tipo de residuo que manejan, ya sean residuos sólidos urbanos, de manejo especial o de la construcción y demolición (C&D). Dada la similitud entre los residuos por sismo y los residuos C&D, estos pueden ser manejados por los mismos transportes autorizados. Al año 2018 se encontraban registrados 18 proveedores de transporte para residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2018). La elección del prestador o prestadores del servicio para la recolección de residuos por sismo debería ser en función de la disponibilidad de vehículos requeridos para su manejo, ya que de acuerdo con Reyes Ramírez & Rojas Nava (2020), el tipo de vehículos recomendable para transportar los residuos por sismo no voluminosos son camiones de volteo de 16 m<sup>3</sup> y 20 toneladas mientras que para aquellos de tipo voluminosos son de 33 m<sup>3</sup> y 28 toneladas.

## 5. Consideraciones para la planeación de la gestión de residuos por sismo

Retomando la estrategia de planeación propuesta por Vázquez (2012), la planeación para el manejo de los residuos por sismo debe definirse desde el nivel estratégico hasta el operativo. La **Figura 20** muestra una propuesta de planeación para la recolección y transporte de residuos por sismo en la ciudad de México con algunos de los ejes importantes que se deben tomar en cuenta.

La planeación estratégica comienza con la definición de objetivos de priorización de las actividades de gestión de residuos respecto al tiempo o costo involucrados. Aunque no siempre es el caso, los costos podrían incrementar al buscar reducir el tiempo total o bien algunos tiempos en específico como los de limpieza, recolección o procesamiento de residuos, etc., esto debido a que pueden consumirse una mayor cantidad de recursos buscando alcanzar los objetivos planteados. Es por esto por lo que es esencial tener claro bajo qué criterio se establecerán los cursos de acción a seguir en cada una de las partes del plan a seguir.

La definición de sitios potenciales debería hacerse con base en criterios tales como el tamaño del espacio, las vías de acceso y comunicación, los servicios disponibles, la cercanía con poblaciones, el posible impacto social y ambiental que la instalación del sitio pudiera tener en tales ubicaciones etc., esto a través de estudios de factibilidad especializados.

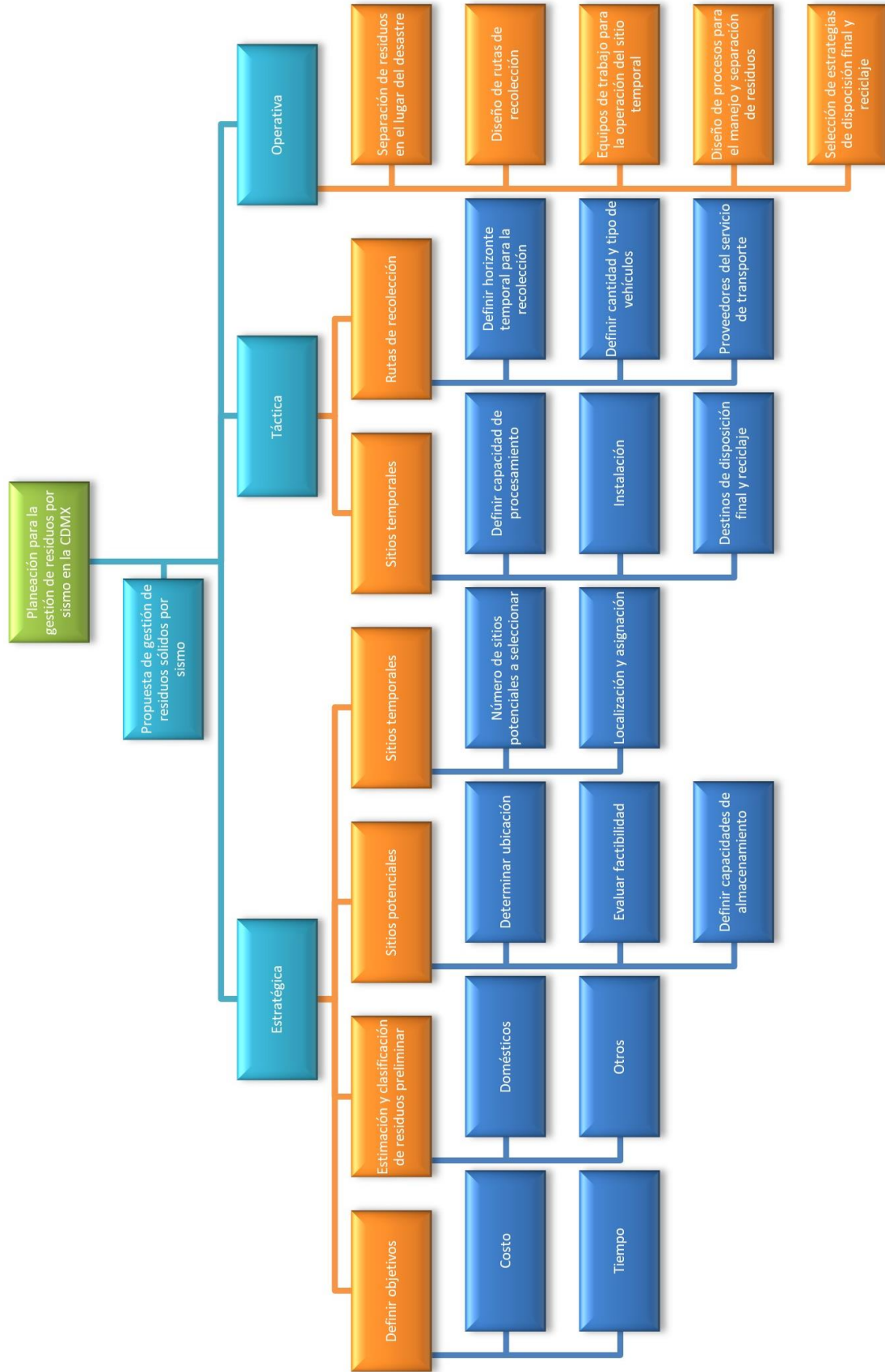


Figura 20 Planeación de residuos por sismo en la CDMX (Elaboración propia)

Aspectos como el tamaño determinarán la capacidad de cada sitio potencial, la cual es un factor importante que considerar pues influirá en el número y selección de los sitios potenciales para instalar los sitios temporales. El número de sitios temporales que se deseen instalar también puede estar en función de otros objetivos de tiempo y/o costos de instalación, operativos o totales.

La selección de los sitios temporales, de entre un conjunto de sitios potenciales, puede determinarse con ayuda de un modelo matemático de *localización y asignación* (LAP) que evalúe la distancia entre los puntos de origen y destino con el objetivo de minimizar y cumplir con las restricciones de capacidad y demanda existentes. Es objetivo de este trabajo desarrollar el modelo de localización que seleccione, con base en los datos de entrada previamente definidos, los sitios temporales y asigne los puntos a los que cada uno de ellos dará servicio.

Además de la ubicación de los sitios temporales para su instalación, es importante definir sus capacidades de procesamiento, o tasas de separación de residuos, por medio de estudios de tiempos o análisis especializados con simulación que proporcionen información valiosa para la coordinación de las actividades y la logística de la gestión de residuos desde su recolección en los sitios de desastre hasta su disposición final o integración en cadenas de reciclaje.

El diseño de rutas para la recolección implica tomar en cuenta todos los factores definidos en la planeación estratégica y táctica, tales como los mencionados anteriormente y otros que permiten contar con la información necesaria que proporcione un marco de referencia para la toma de decisiones relativas a la cantidad de recursos que pueden emplearse, las restricciones o especificaciones que deben cubrirse y sobre todo los objetivos que se desean alcanzar. En este punto es necesario tener en cuenta que en el sitio de desastre se separarán aquellos residuos destinados al sitio temporal de aquellos que son enviados directamente a otros lugares para su disposición final o reciclaje, tal como se describió en la **Sección 3.1**. Las rutas de recolección para los residuos destinados a los sitios temporales también pueden diseñarse con el uso de un modelo de ruteo de vehículos (VRP) con programación matemática, como herramienta complementaria para la toma de decisiones.

### 5.1 Planificación de la recolección de residuos

Es necesario determinar los recursos disponibles o bien los recursos necesarios para alcanzar objetivos específicos de la recolección de los residuos domésticos en términos del tiempo o el costo involucrado.

El tiempo y el costo son dos criterios básicos para determinar los objetivos de la planeación operativa de la recolección y manejo de los residuos por sismo. La planeación de la recolección puede partir desde dos enfoques; el primero con base en la cantidad y capacidad de los vehículos disponibles para la recolección que determinaría el tiempo en que dichos vehículos recolectarían el volumen total generado por todos los inmuebles colapsados; y el segundo con base en el tiempo en el que se espera completar el proceso de recolección que determinaría la cantidad de vehículos necesarios para cumplir con ese tiempo previamente definido. Es lógico pensar que este último enfoque es el más adecuado para una situación de desastre ya que el tiempo que toma completar el proceso de recolección de los escombros impacta en el tiempo que tomará la etapa de recuperación del desastre



y en consecuencia la etapa de reconstrucción de las áreas afectadas. Para ambos enfoques el tiempo proyectado debe cubrir restricciones operativas tales como el número de sitios temporales y sus respectivas capacidades de almacenamiento y tasas de recepción de residuos.

### 5.1.1 Tiempo para completar el proceso de recolección con base en los vehículos disponibles

Si el enfoque de planeación se hace con base en la disponibilidad de vehículos, donde  $K = \{1, 2, \dots, n\}$  es el conjunto de  $n$  vehículos disponibles, cada uno con capacidad  $Q_k$  y un número de viajes o vueltas  $NV_k$  que puede hacer durante un día para transportar los residuos a los sitios temporales, entonces el tiempo  $t_r$  para recolectar el volumen total  $V_t$  de residuos con dicha flota de vehículos se calcula:

$$t_r(d) = \frac{V_t (m^3)}{\sum_{k \in K} Q_k * NV_k \left( \frac{m^3}{d} \right)} \quad (5.1)$$

La **Ecuación (5.1)** se adapta al caso de que los vehículos tengan diferente capacidad  $Q_k$  y pueden dar diferente número de viajes  $NV_k$  por día. El número de viajes que pueden hacerse por día dependerá de la capacidad, el tiempo de carga y el tiempo de transporte desde y hacia el sitio temporal.

Dado el alto volumen que los residuos por sismo tienen, es más eficiente utilizar los vehículos con la mayor capacidad disponible ya que esto minimiza los costos fijos de transporte. Bajo el supuesto de obtener menores costos por operar vehículos más grandes, se propone calcular el tiempo de recolección en función de flotas homogéneas de vehículos con la mayor capacidad posible. Para este caso, en el cual el total de  $K$  vehículos tienen la misma capacidad  $Q_k = Q$  y dan el mismo número de viajes por día  $NV_k = NV$  entonces el cálculo del tiempo de recolección  $t_r$  se simplifica de modo que:

$$t_r(d) = \frac{V_t (m^3)}{K * Q * NV \left( \frac{m^3}{d} \right)} \quad (5.2)$$

Las **Ecuaciones (5.1)** y **(5.2)** determinan el tiempo necesario para que los vehículos disponibles recolecten el volumen total de residuos domésticos, bajo el supuesto de días seguidos de recolección. Sin embargo, no hay que perder de vista el hecho de que también se retiran otros tipos de residuos que no se envían al sitio temporal, como es el caso de los residuos C&D. Dado lo anterior, para calcular el tiempo que toma el proceso completo de remoción de residuos domésticos puede ser necesario considerar otros factores como puede ser la programación de recolecciones cada tercer día, por poner un ejemplo. Bajo estas condiciones es recomendable integrar la planeación de las actividades de recolección y limpieza de todos los tipos de residuos presentes en las áreas de desastre.

### 5.1.1 Vehículos necesarios para un tiempo dado de recolección

El tiempo total de recolección puede definirse previamente con el objetivo de cubrir necesidades como, por ejemplo: la pronta liberación de las vías primarias, el restablecimiento de la normalidad, la disminución de las afectaciones sociales y económicas, el inicio de la etapa de reconstrucción, la coordinación con la recolección de los residuos que no se envían al sitio temporal, entre muchas otras variables particulares de cada escenario de desastre, las cuales deben ser analizadas a profundidad por el tomador de decisiones.

El tiempo proyectado también debe cubrir restricciones operativas tales como el número de sitios temporales y sus respectivas capacidades de almacenamiento y tasas de recepción de residuos. Al establecer un tiempo factible para el proceso de recolección, se calcula la cantidad de vehículos necesarios para cumplir con ese objetivo. El número de vehículos necesarios  $K$  dentro de una flota homogénea, se calcula a partir de la **Ecuación (5.2)** como se muestra en la **Ecuación (5.3)**.

$$K = \frac{V_t (m^3)}{t_r(d) * Q * NV \left( \frac{m^3}{d} \right)} \quad (5.3)$$

La **Ecuación (5.3)** nos permite calcular el número de vehículos necesarios para recolectar los residuos, en un tiempo previamente definido, bajo las condiciones de igualdad en capacidad y el número de viajes posibles por día. Para determinar el número de vehículos necesarios en una flota heterogénea con distintas capacidades y viajes por día, será necesario realizar un análisis detallado de los costos fijos para las distintas capacidades, considerando las restricciones de tiempo y volumen de recolección, para evaluar la factibilidad de la utilización de flotas de este tipo. Sin embargo, dicho análisis no se encuentra dentro de los alcances de este trabajo.

Una vez que se hayan determinado, a partir de cualquiera de los dos enfoques mencionados anteriormente, el horizonte de planeación de la recolección, la cantidad y el tipo de vehículos serán datos de entrada para el modelo de ruteo de vehículos, el cual funcionará como herramienta para la toma de decisiones en la planeación a nivel operativo de las actividades de recolección. Es así como se establece que el objetivo del modelo VRP será minimizar la distancia recorrida por las rutas de recolección, bajo el tiempo y los recursos previamente definidos.

Ambos modelos matemáticos, de localización y asignación y de ruteo de vehículos, pueden ser resueltos con métodos exactos de programación lineal entera mixta, lo cual es justificado por el hecho de que estos métodos son eficientes para fenómenos cuya red de transporte es relativamente pequeña, como es el caso de los residuos por sismo. Si estuviésemos tratando con el caso de los residuos sólidos urbanos, cuya red dentro de la Ciudad de México rebasa los 100 nodos o puntos de recolección, el uso de técnicas heurísticas sería una mejor alternativa.

## 6. Metodología

La metodología seguida incluye para cada modelo en particular; el planteamiento o definición del problema de acuerdo con las características del fenómeno de gestión de residuos a modelar, en el cual se delimitará el alcance del estudio de IO, su justificación y objetivo principal; la identificación de las variables de entrada, decisión y respuesta que influyen en el problema que se desea resolver con la intención de tener claro cuáles son los parámetros conocidos y cuáles serán determinados durante el proceso de solución, de acuerdo con el objetivo del estudio; la cuantificación de las variables de entrada definidas en la etapa anterior a partir de datos previos dentro del mismo proyecto de gestión de residuos y otras fuentes de información; el análisis de las interacciones entre las variables del modelo con el objetivo de definir de la relación matemática que mejor lo describa y por último la verificación y validación del modelo para el caso de estudio del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, a través del software de optimización CPLEX®, para estar seguros de que el modelo cumple con los objetivos definidos y describe el comportamiento del fenómeno en la forma esperada. La **Figura 21** resume la metodología seguida.

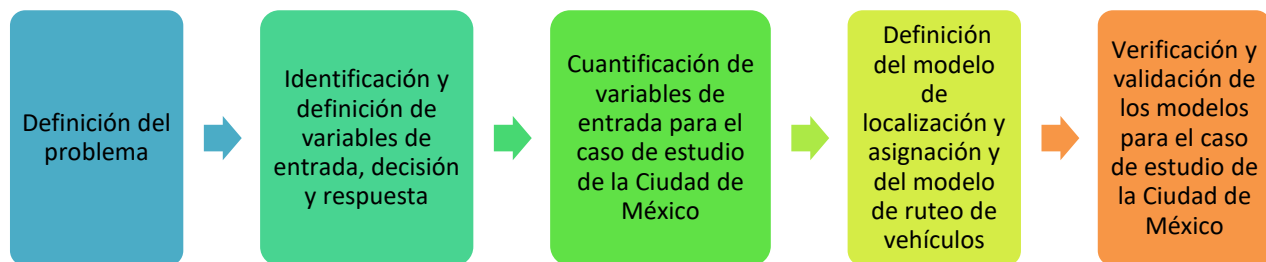


Figura 21 Metodología empleada para el desarrollo de los modelos LAP Y VRP (Elaboración propia)

## 7. Caso de estudio de la Ciudad de México

### 7.1 Modelo de localización y asignación

#### 7.1.1 Definición del problema

Para el caso de estudio abordado, se conocen los puntos de origen a partir de los inmuebles colapsados inmediatamente después del sismo y los puntos de destino como los sitios disponibles de acuerdo con el Gobierno de la Ciudad de México. Dado lo anterior, la decisión es desarrollar un modelo de localización y asignación con programación lineal entera mixta.

Los escombros producto del sismo serán transportados en camiones de carga, al finalizar las actividades de búsqueda y rescate, hacia sitios temporales de almacenamiento y separación de residuos. El objetivo del modelo es seleccionar, de entre un número de sitios disponibles,  $n$  sitios temporales que puedan contener la cantidad total de residuos domésticos generados en un escenario producto de un sismo en la Ciudad de México. Además, debe asignar cada derrumbe con el o los sitios temporales seleccionados que recibirán sus residuos, de tal forma que el costo total y la distancia hacia los puntos de desastre sea la mínima. La decisión de uno o más o sitios temporales se encuentra

abierta a la evaluación de las necesidades que una determinada circunstancia de desastre requiera, es decir, el modelo debe dar la libertad de elegir tantos sitios temporales se deseen instalar al menor costo que esta decisión implique.

### 7.1.1 Variables de entrada

#### *Cantidad de residuos por sismo*

La estrategia de gestión establece que los residuos que son enviados al sitio temporal incluyen aquellos clasificados como domésticos y excluye a los residuos provenientes de la construcción y demolición (R&D), tales como el concreto armado, cascajo, mármol, loseta, etc. Los R&D no son considerados debido a que estos son mayormente clasificados *in situ* y enviados directamente para su reciclaje o disposición final. De forma similar, el sitio temporal está destinado para recibir solo los residuos domésticos provenientes de edificios habitacionales colapsados inmediatamente después del sismo, debido a que para aquellos edificios programados para su demolición existe la posibilidad de recuperar los bienes domésticos después del desastre. De este modo, deberá realizarse una estimación inicial de la cantidad de residuos domésticos que deben ser enviados al sitio temporal, la cual es una variable de entrada que determinará las restricciones de “oferta” para el modelo de localización y asignación.

Para el caso de estudio del sismo del 19 de septiembre de 2017, los parámetros o variables de entrada al modelo, respecto a la cantidad de residuos domésticos que deben ser transportados es tomada de una investigación previa dentro del mismo proyecto en la cual se realizó la caracterización, clasificación y estimación de la cantidad de residuos por sismo, de acuerdo con los estándares mexicanos, tomando como base los datos provenientes de ese evento. En el sismo de 2017 se registraron 14 edificios habitacionales que colapsaron total o parcialmente al momento del sismo (Comisión para la reconstrucción, recuperación y transformación de la ciudad de México, 2018) para los cuales la estimación de residuos generados se muestra en la **Tabla 1** de la **Sección 3.1.1**.

#### *Sitios potenciales para ubicar los sitios temporales*

Para fines de este trabajo se consideran un sitio autorizado para la transferencia y almacenamiento temporal de residuos de la construcción y siete sitios autorizados para la disposición de materiales de excavación y de construcción de acuerdo con información de la SEDEMA, tal como se muestra en la **Tabla 4**.

#### *Inmuebles colapsados por el sismo del 19 de septiembre de 2017*

Al momento del sismo del 19 de septiembre de 2017 se registraron 15 inmuebles o edificios colapsados total o parcialmente, de los cuales 14 corresponden a los tipos habitacional y habitacional mixto. Como se mencionó anteriormente los residuos provenientes de este tipo de inmuebles son los que llegarán al sitio temporal. La **Tabla 5** muestra las ubicaciones de los inmuebles colapsados de acuerdo con información del gobierno de la Ciudad de México obtenida por Reyes Ramírez & Rojas Nava (2020).

Tabla 4 Sitios potenciales para la instalación del sitio temporal (Secretaría del medio ambiente, 2015)

| No. | Municipio    | Proyecto  | Ubicación  | Resolución                 |
|-----|--------------|---|--|----------------------------|
| 1   | XOCHIMILCO   | CENTRO DE TRANSFERENCIA Y ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN CUEMANCO         | ANILLO PERIFÉRICO SUR NÚMERO 7555, COLONIA RINCONADA COAPA,  | MA/DGRA/DEIA/00536 6/201   |
| 2   | HUIXQUILUCAN | CENTRO DE DISPOSICIÓN FINAL DE MATERIALES "EL ESCOBAL"  | PARAJE DENOMINADO EL ESCOBAL, EN EL EJIDO DE LA MAGDALENA CHICHICASPA  | RESOL/114/06 5/ABRIL/06    |
| 3   | ZUMPANGO     | DEPOSITO DE MATERIAL PROCEDENTE DE EXCAVACIONES Y OBRAS DE CONSTRUCCION                           | LOTE 25, FRACC. No.5 DE LA EX HACIENDA DE SAN JUAN   | RESOL/091/09 30/MAR/09     |
| 4   |              | SITIO DE TIRO EJIDO DE SAN JUAN ZITLALTEPEC   | PARCELAS 1527,1579, 364195, 1370/163/48, 15441526 DEL EJIDO DE SAN JUAN ZITLATEPEC EN CIRCUITO EXTERIOR MEXIQUENSE SENTIDO MEXICO QUERETARO KM 7+900 | RESOL/407/09 1/12/09       |
| 5   | IXTAPALUCA   | RECEPCION DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCION Y MATERIAL DE EXCAVACION, PROVENIENTE DE OBRAS           | FRACCION UNO, RESULTANTE DE LA FRACCION DEL PREDIO RUSTICO LOMA ANCHA, EX HACIENDA DE ZOQUIAPAN  | DGOIA/1800/09 8/SEPT/09    |
| 6   | CALIMAYA     | SITIO DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL LA MAGDALENA                            | CAMINO ANTIGUO A TOLUCA SIN NUMERO   | RESOL/051/10 1/03/10       |
| 7   | COACALCO     | REHABILITACION DE LA MINA LA BEZANA CONSISTENTE EN EL RELLENO DE DICHA MINA DE MATERIALES PETREOS | CALLE CERRADA DE LA 16 DE SEPTIEMBRE No. 82, COL. HACIENDA LAS GARZAS  | RESOL/002/07 10/01/07      |
| 8   | XONACATLÁN   | SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y DE MANEJO ESPECIAL                       | CAMINO A LOS MESONES No. 5, SAN MIGUEL MIMIAPAN, XONACATLÁN, ESTADO DE MÉXICO, C.P. 52070  | RESOL/217/07 06/JULIO/2007 |

Tabla 5 Edificios colapsados al momento del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Reyes Ramírez & Rojas Nava, 2020)

| No. | CALLE                             | NUMERO                       | COLONIA                            | ALCALDÍA          | USO INMUEBLE              |
|-----|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| 1   | TEMASCALTITLA                     | 4                            | SANTA ROSA XOCHIAAC                | ÁLVARO OBREGÓN    | HABITACIONAL              |
| 2   | AV. SANTA ANA                     | ESQ. EJIDO SANTA CRUZ ATOYAC | EXEJIDO DE SAN FRANCISCO CULHUACÁN | COYOACÁN          | HABITACIONAL MIXTO        |
| 3   | AMSTERDAM                         | 107, ESQ. LAREDO             | HIPÓDROMO                          | CUAUHTÉMOC        | HABITACIONAL MIXTO        |
| 4   | PASEO DE LAS GALIAS               | 47                           | LOMAS ESTELLA 2DA. SECCIÓN         | IZTAPALAPA        | HABITACIONAL              |
| 5   | AVENIDA 323                       | 655, ESQ. AVENIDA 314        | NUEVA ATZACOALCO                   | GUSTAVO A. MADERO | HABITACIONAL              |
| 6   | EDIMBURGO                         | 4 ESQ. ESCOCIA               | DEL VALLE                          | BENITO JUÁREZ     | HABITACIONAL              |
| 7   | PROLONGACIÓN PETÉN                | 915                          | EMPERADORES                        | BENITO JUÁREZ     | HABITACIONAL MIXTO        |
| 8   | VIADUCTO PRESIDENTE MIGUEL ALEMÁN | 106, ESQ. CALLE TORREÓN      | PIEDAD NARVARTE                    | BENITO JUÁREZ     | HABITACIONAL MIXTO        |
| 9   | SALVADOR DÍAZ MIRÓN               | 151                          | SANTA MARÍA LA RIVERA              | CUAUHTÉMOC        | HABITACIONAL (ABANDONADA) |
| 10  | BRETAÑA                           | 90, CASI ESQ. IROLO          | ZACAHUITZCO                        | BENITO JUÁREZ     | HABITACIONAL              |
| 11  | INSURGENTES                       | ESQ. VICENTE GUERRERO        | SAN GREGORIO ATLAPULCO             | XOCHIMILCO        | HABITACIONAL              |
| 12  | NIÑOS HÉROES                      | 173, ESQ. GALICIA            | NIÑOS HÉROES                       | BENITO JUÁREZ     | HABITACIONAL              |
| 13  | ESCOCIA                           | 4, ESQ. GABRIEL MANCERA      | DEL VALLE CENTRO                   | BENITO JUÁREZ     | HABITACIONAL              |
| 14  | RANCHO DE LOS ARCOS               | 32                           | LOS GIRASOLES                      | COYOACÁN          | HABITACIONAL              |

### Distancia entre los edificios colapsados y los sitios potenciales

Para los 14 inmuebles colapsados, las distancias entre cada uno de ellos y los sitios candidatos para ubicar el sitio temporal fueron calculadas a partir de las coordenadas geográficas de cada ubicación obtenidas con ayuda de la herramienta Google Maps (**Figura 22**).

|                      |    | X        | Y       |
|----------------------|----|----------|---------|
|                      |    |          |         |
| INMUEBLES COLAPSADOS | 1  | -99.2964 | 19.3191 |
|                      | 2  | -99.1249 | 19.3294 |
|                      | 3  | -99.1710 | 19.4128 |
|                      | 4  | -99.0974 | 19.3201 |
|                      | 5  | -99.0831 | 19.4998 |
|                      | 6  | -99.1634 | 19.3874 |
|                      | 7  | -99.1570 | 19.3668 |
|                      | 8  | -99.1614 | 19.4023 |
|                      | 9  | -99.1601 | 19.4494 |
|                      | 10 | -99.1373 | 19.3732 |
|                      | 11 | -99.0584 | 19.2541 |
|                      | 12 | -99.1461 | 19.3886 |
|                      | 13 | -99.1637 | 19.3877 |
|                      | 14 | -99.1231 | 19.3045 |

|        |  | X        | Y       |
|--------|--|----------|---------|
| SITIOS |  |          |         |
| 1      |  | -99.1069 | 19.2924 |
| 2      |  | -99.3222 | 19.4157 |
| 3      |  | -99.1055 | 19.7989 |
| 4      |  | -99.1401 | 19.8083 |
| 5      |  | -98.8097 | 19.3207 |
| 6      |  | -99.6178 | 19.1618 |
| 7      |  | -99.1176 | 19.6315 |
| 8      |  | -99.5229 | 19.4135 |

Figura 22 Coordenadas geográficas de los inmuebles colapsados y los sitios potenciales (Elaboración propia)

La **Tabla 6** muestra la matriz de distancias lineales entre la ubicación de cada sitio potencial y cada inmueble colapsado, calculadas a través de la **Ecuación (7.0)** para la distancia entre dos puntos. La **Figura 23** muestra gráficamente la ubicación de los potenciales sitios temporales (en color naranja) y los inmuebles colapsados (en color azul).

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7.0)$$

Tabla 6 Distancias entre el inmueble colapsado *i* y el sitio disponible *j* en km (Elaboración propia)

| I.C./sitio potencial | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1                    | 19.13 | 10.00 | 51.63 | 51.35 | 48.67 | 35.79 | 35.99 | 24.55 |
| 2                    | 4.12  | 21.53 | 46.98 | 47.91 | 31.54 | 52.06 | 30.21 | 73.33 |
| 3                    | 13.64 | 15.12 | 39.16 | 39.67 | 37.29 | 51.25 | 22.51 | 69.47 |
| 4                    | 2.92  | 24.43 | 47.89 | 49.01 | 28.78 | 54.39 | 31.21 | 81.00 |
| 5                    | 20.87 | 25.35 | 29.99 | 31.37 | 32.69 | 63.26 | 13.61 | 81.23 |
| 6                    | 11.05 | 16.13 | 41.55 | 42.16 | 36.00 | 50.73 | 24.84 | 73.80 |
| 7                    | 8.97  | 17.23 | 43.51 | 44.18 | 35.03 | 50.44 | 26.76 | 78.37 |
| 8                    | 12.27 | 16.14 | 40.04 | 40.65 | 36.10 | 51.60 | 23.33 | 74.15 |
| 9                    | 16.57 | 16.56 | 35.38 | 35.95 | 37.33 | 54.06 | 18.70 | 68.47 |
| 10                   | 8.63  | 18.97 | 42.69 | 43.52 | 33.18 | 52.50 | 25.91 | 80.87 |
| 11                   | 6.18  | 30.94 | 54.68 | 56.02 | 25.75 | 56.70 | 38.20 | 84.70 |
| 12                   | 10.38 | 17.82 | 41.23 | 41.98 | 34.32 | 52.35 | 24.46 | 71.93 |
| 13                   | 11.09 | 16.09 | 41.53 | 42.13 | 36.04 | 50.72 | 24.81 | 65.10 |
| 14                   | 2.02  | 22.81 | 49.47 | 50.41 | 31.38 | 51.49 | 32.71 | 77.20 |

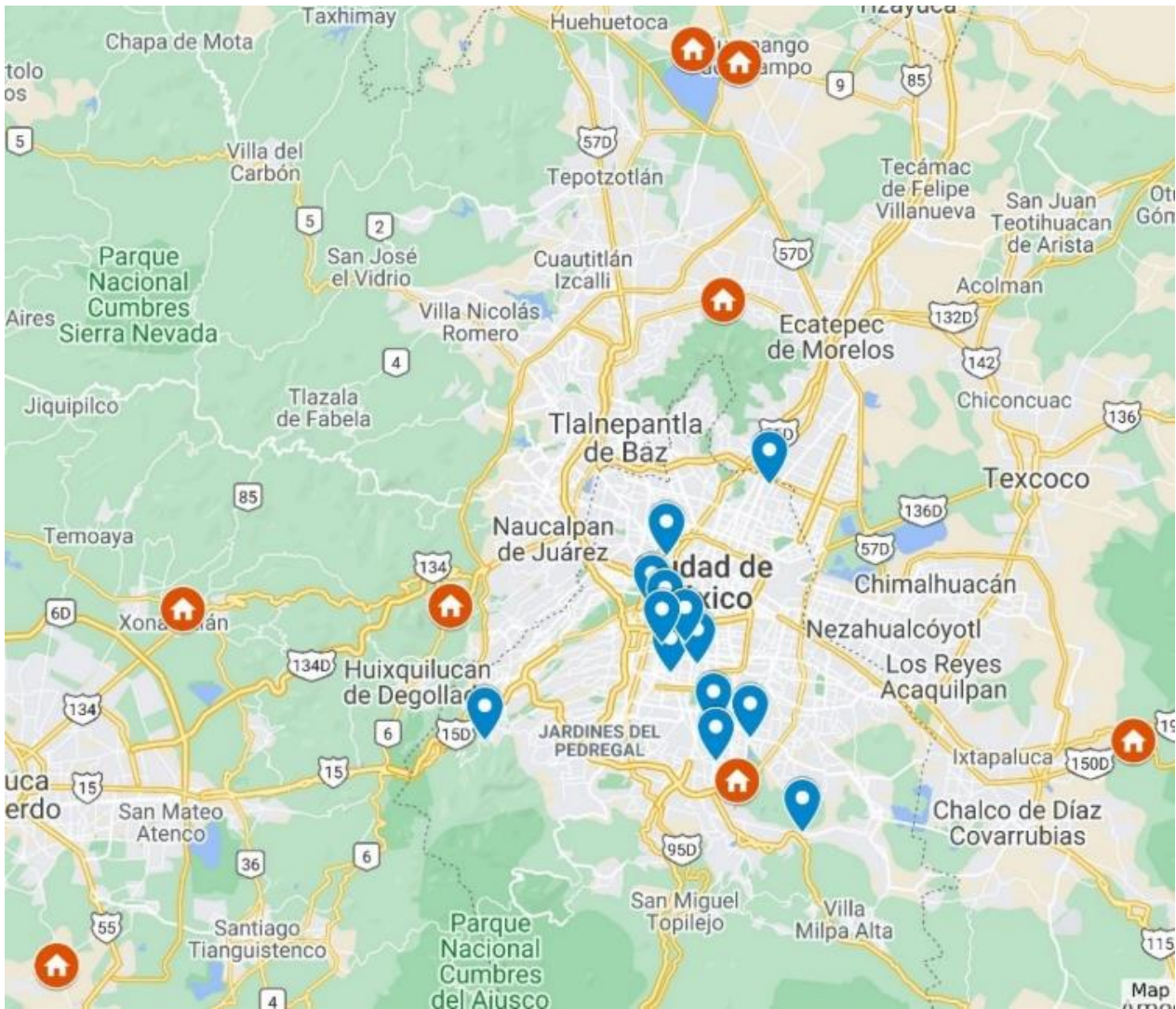


Figura 23 Ubicación de los inmuebles colapsados y sitios potenciales de separación de residuos (Elaboración propia con Google Maps)

#### *Capacidad de almacenamiento del sitio temporal*

La propuesta de diseño del sitio temporal mencionada en la **Sección 3.1.2** incluye el *layout* del sitio, las dimensiones por cada celda de almacenamiento para cada tipo de residuo y sus características operacionales, por lo cual para fines de este trabajo se asume que todos los sitios temporales son exactamente iguales en cuanto a diseño, dimensiones y operación. Las dimensiones totales del sitio temporal son de 7,519 m x 13,318 m. Cada sitio temporal tiene asociado un costo de instalación y capacidad de almacenamiento que deberán ser considerados como variables de entrada para el modelo de transporte.

De acuerdo con las características operacionales de sitio propuesto y la caracterización y estimación de residuos hecha por Reyes & Rojas (2020) se calculó la capacidad total en volumen del sitio temporal. La capacidad del sitio temporal fue calculada a partir del espacio disponible por celda de

almacenamiento, las dimensiones y el número de racks y contenedores que cada celda puede alojar, así como los pesos y volúmenes característicos del tipo de residuo a almacenar. A partir de la capacidad volumétrica del sitio temporal se calculó la capacidad en peso a través de un factor de conversión de volumen a peso por cada tipo de residuo. Tal factor se calculó de acuerdo con la relación peso/volumen proveniente de los datos de caracterización de residuos hecha previamente dentro del proyecto. La **Tabla 7** muestra la capacidad por celda de almacenamiento del sitio temporal para residuos voluminosos y no voluminosos. Para los residuos voluminosos no se utilizan contenedores motivo por el cual se utilizó el área de suelo destinada para almacenar estos residuos multiplicada por una altura de 2 metros.

*Tabla 7 Capacidad del sitio temporal por celda de almacenamiento (Elaboración propia)*

| Clasificación           | Célula de almacenamiento          | Volumen del contenedor (m <sup>3</sup> ) | Número de contenedores disponibles | Volumen disponible (m <sup>3</sup> ) | Factor de conversión | Peso (ton) |
|-------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------|
| Residuos no voluminosos | Artículos eléctricos              | 0.057                                    | 960                                | 55.450                               | 0.128                | 7.13054043 |
|                         | Residuos orgánicos biodegradables | 1.2                                      | 204                                | 244.8                                | 1                    | 244.8      |
|                         | Alimento empacado                 | 1.2                                      | 204                                | 244.8                                | 0.496                | 121.487    |
|                         | Papel y cartón                    | 0.057                                    | 360                                | 20.793                               | 0.553                | 11.512     |
|                         | Plásticos                         | 0.057                                    | 492                                | 28.418                               | 0.058                | 1.664      |
|                         | Vidrio                            | 0.057                                    | 240                                | 13.862                               | 0.321                | 4.456      |
|                         | Metales                           | 0.057                                    | 360                                | 20.793                               | 0.224                | 4.664      |
|                         | Textiles                          | 0.057                                    | 480                                | 27.725                               | 0.035                | 0.986      |
|                         | Residuos biológico infecciosos    | 1.1                                      | 450                                | 495                                  | 0.008                | 4.362      |
|                         | Artículos personales              | 0.057                                    | 240                                | 13.862                               | 0.046                | 0.641      |
|                         | Residuos sólidos no reciclables   | 0.057                                    | 60                                 | 3.465                                | 0.034                | 0.120      |
|                         | Restos de escombros               | 1.2                                      | 80                                 | 96                                   | 0.115                | 11.071     |
|                         | Residuos contaminados             | 1.1                                      | 450                                | 495                                  | 0.059                | 29.583     |
|                         | Residuos peligrosos               | 1.1                                      | 450                                | 495                                  | 0.293                | 145.465    |
| Residuos voluminosos    | Muebles                           | -  | -                                  | 31650.273                            | 0.040                | 1273.997   |
|                         | Línea blanca de gran volumen      | -  | -                                  | 4621.72                              | 0.054                | 250.855    |

La capacidad del sitio temporal por celda de almacenamiento no puede ser tomada en cuenta como una restricción para el modelo de transporte debido a que los residuos dentro de los escombros se encuentran mezclados al momento de ser retirados del sitio de desastre y no se conocerá con certeza la cantidad de cada tipo de residuo hasta que estos sean separados dentro del sitio temporal. Sin embargo, la sumatoria de los volúmenes disponibles de almacenamiento por celda nos proporciona una referencia de la capacidad total del sitio temporal, partiendo del supuesto de que el diseño del sitio temporal se basa en la composición de residuos observada en el sismo de 2017 y su proporción con relación al total estimado. La **Tabla 8** muestra la capacidad en volumen y peso estimado del sitio temporal de separación.



Tabla 8 Capacidad del sitio temporal por celda de almacenamiento (Elaboración propia)

| Tipo de residuo        | Área (m <sup>2</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Peso (ton)      |
|------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------|
| No voluminosos         | -                      | 2,254.97                  | 587.95          |
| Voluminosos            | 18135.9966             | 36,271.99                 | 1,524.85        |
| <b>Capacidad total</b> |                        | <b>38,526.97</b>          | <b>2,112.80</b> |

La unidad de capacidad del sitio temporal debe ser definida a partir de las unidades de carga de los escombros y del costo unitario de transporte con el objetivo de mantener una coherencia dimensional en el modelo de transporte. El costo unitario de transporte estará definido, como es común, en unidades de pesos mexicanos por metro cúbico por kilómetro recorrido. De este modo, la cantidad de residuos y la capacidad del sitio serán manejados en metros cúbicos para fines del modelo. La capacidad calculada corresponde al diseño de sitio temporal propuesto por Reyes Ramírez & Rojas Nava (2020).

#### *Costo unitario de transporte*

El costo de instalación del sitio temporal y el costo unitario de transporte son parámetros cuya variabilidad es alta a lo largo del tiempo, por ello es recomendable realizar una estimación inicial al momento del desastre de acuerdo con las características operacionales del sitio descritas en trabajos previos y el costo de transporte unitario cotizado por los proveedores del servicio.

Recapitulando, el modelo de localización y asignación debe tomar como datos de entrada; la ubicación y el número de derrumbes registrados inmediatamente después del sismo, la cantidad inicial estimada de residuos generada en cada punto de derrumbe, el número y ubicación de sitios disponibles para la instalación del sitio temporal, la capacidad de almacenamiento del sitio temporal, el costo de instalación del sitio temporal y el costo unitario de transporte.

#### 7.1.2 Variables de decisión

Las variables de decisión del modelo consisten en; los sitios disponibles que serán seleccionados para la instalación de los sitios temporales y la cantidad de residuos que será transportada desde cada edificio colapsado a cada sitio seleccionado.

#### 7.1.3 Variables de respuesta

Las variables de respuesta del modelo consisten en; la distancia total entre los puntos de derrumbe y los sitios seleccionados, la cual será proporcional al costo de transporte, y el costo total de instalación de cada alternativa de solución dada por el número de sitios que se desean localizar. En otras palabras, si condicionamos al modelo para que ubique 1,2,3 hasta  $n$  sitios temporales los costos asociados a cada una de estas decisiones son tomados como variables de respuesta para su análisis y la toma de decisiones en una situación real.

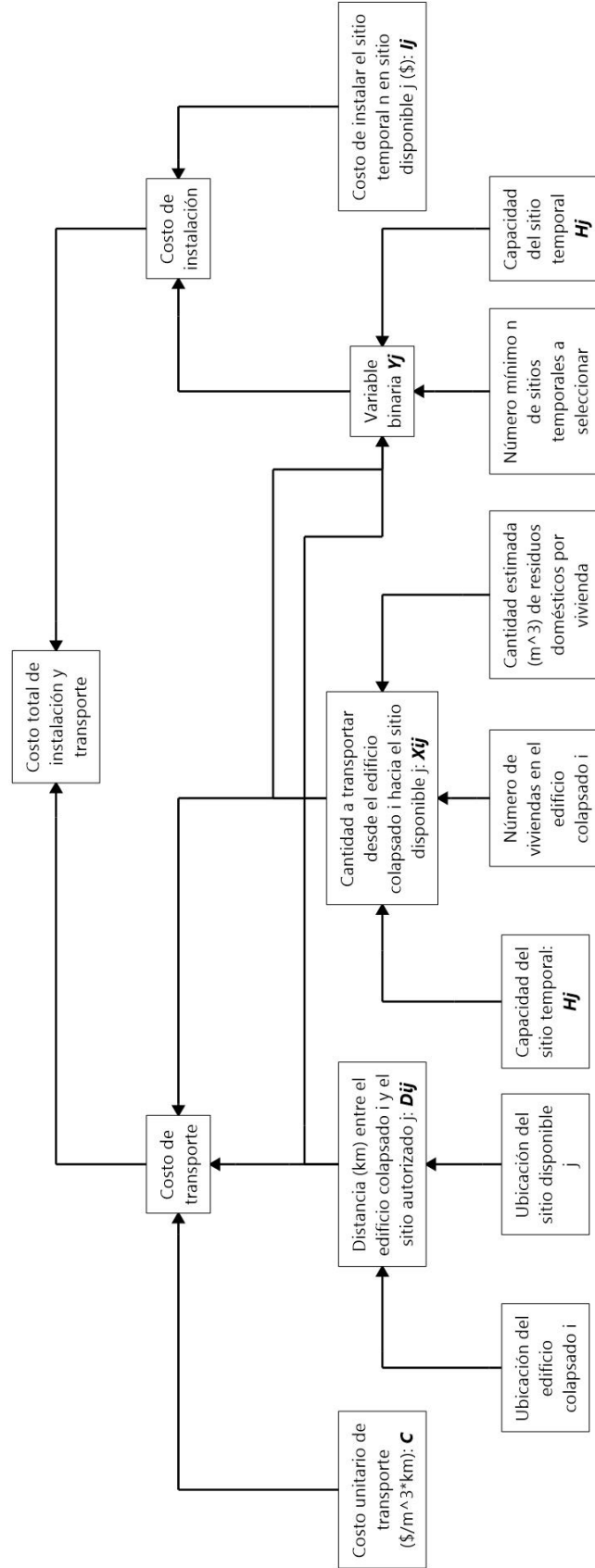


Figura 24 Diagrama de influencia del modelo de localización y asignación (Elaboración propia)

#### 7.1.4 Diagrama de influencia del modelo de localización y asignación

El diagrama de influencia mostrado en la **Figura 24** muestra la relación entre las variables involucradas en el modelo con el objetivo de definir una relación matemática y sus restricciones. Las variables se leen en forma ascendente de acuerdo con la información que van generando en el fenómeno. Los dos niveles más altos del diagrama representan tanto el costo total como la sumatoria del costo de transporte hacia los  $n$  sitios temporales seleccionados y la del costo de instalación de cada uno de ellos. Estas son definidas como las variables de respuesta del modelo, las cuales buscan ser minimizadas. El resto de las variables se tratan de variables de entrada y decisión que intervienen en el modelado y la resolución del problema. Las relaciones entre variables quedan definidas partir de operaciones matemáticas que deben ser representadas en la función objetivo y las restricciones del programa lineal.

#### 7.1.5 Modelo matemático

El modelo de localización y asignación se define por los conjuntos;  $IC = \{1, 2, \dots, l\}$  compuesto por los  $l$  inmuebles colapsados y  $SP = \{1, 2, \dots, m\}$  compuesto por los  $m$  sitios potenciales con capacidad de almacenamiento  $H$  y costo de instalación  $I$ . Para los cuales se deben seleccionar  $n$  sitios temporales cuya distancia a los inmuebles colapsados sea mínima. Los inmuebles colapsados por el sismo son considerados como los puntos de origen  $i$  y los sitios potenciales  $j$  como los puntos de destino. Para cada derrumbe hay una cantidad de residuos  $R_i$  que debe ser transportada hacia el o los sitios temporales de separación. De acuerdo con los términos convencionales del modelo de transporte, la *demanda* corresponderá con la cantidad de residuos generada en cada derrumbe mientras que la *capacidad de producción* estará representada por la capacidad de almacenamiento de residuos de los sitios temporales que sean seleccionados. El modelo para la localización de sitios temporales debe seleccionar las  $n$  ubicaciones y asignar los derrumbes con cada sitio temporal minimizando el costo total de transporte e instalación. A continuación se detalla la relación matemática, basada en los aportes de Cooper (1963), y el diagrama de influencia construido en la **Sección 7.1.4**.

##### *Variables de decisión*

$X_{ij}$ : Cantidad de residuos a transportar desde el derrumbe  $i$  hacia el sitio disponible  $j$  ( $m^3$ )

$C$ : Costo unitario de transporte  $\left( \frac{\$}{km * m^3} \right)$

$I_j$ : Costo por instalar el sitio temporal  $j$  (\$)

$D_{ij}$ : distancia entre el derrumbe  $i$  y el sitio disponible  $j$  (km)

$R_i$ : Residuos generados en el derrumbe  $i$  ( $m^3$ )

$H_j$ : Capacidad del sitio disponible  $j$  ( $m^3$ )

$X_{ij}, C_{ij}, R_i, H_j \in \mathbb{R}^+$

$Y_j: \begin{cases} 1 & \text{Si se elige el sitio } j \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$

### Función Objetivo

La función objetivo **(7.1)** busca minimizar el costo total de transporte, proporcional a la distancia, de los residuos generados en cada inmueble colapsado, hacia el o los sitios temporales de separación que sean seleccionados. El costo de instalación acompaña a la variable binaria como criterio de selección de los sitios temporales. La solución óptima tiende a minimizar el costo de instalación de los sitios, en adición al costo de transportar los residuos hacia cada uno de ellos.

$$\min Z = \sum_{i \in IC} \sum_{j \in SP} CD_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in SP} I_j Y_j \quad (7.1)$$

### Restricciones

El número de sitios temporales que el modelo seleccionará es una decisión que deberá tomarse en función de cada situación de desastre. Se pueden abordar criterios de minimización del costo total, que se refiere al costo conjunto de instalación y transporte, o bien de únicamente la minimización del costo de transporte (posiblemente asociado a una menor distancia, pero a un mayor número de sitios instalados) debido a la priorización del tiempo de recuperación sobre el costo total o viceversa. También influirán el grado de afectación del sismo, la cantidad de residuos estimada inicialmente, la disponibilidad de recursos humanos, técnicos y financieros, las ubicaciones y el número de sitios disponibles, entre otros aspectos particulares dados al momento del sismo. De este modo, será necesario ingresar al modelo el número de sitios temporales que desean instalarse a través de la **restricción (7.2)** para seleccionar al menos  $n$  ubicaciones:

$$\sum_{j \in SP} Y_j \geq n \quad \forall n \geq 1 \quad (7.2)$$

La **restricción (7.3)** establece que la cantidad de residuos generados en un punto de derrumbe debe ser retirada en su totalidad independientemente de si ésta se destina a más de un sitio temporal de separación.

$$\sum_{j \in SP} X_{ij} = R_i \quad \forall i \in IC \quad (7.3)$$

La **restricción (7.4)** asegura que la capacidad de un sitio temporal solamente será considerada si éste es seleccionado por el modelo. La restricción de capacidad del sitio incluye la variable binaria **(7.5)** para asegurar que se enviarán residuos al sitio solo si este ha sido seleccionado.

$$\sum_{i \in IC} X_{ij} = H_j Y_j \quad \forall j \in SP \quad (7.4)$$

$$Y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in SP \quad (7.5)$$

### 7.1.6 Verificación y validación del modelo

La verificación y validación del modelo se realizó utilizando las observaciones y datos obtenidos para el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México tal como fueron descritos en la **Sección 3.2**. Se tomaron como base los supuestos de elegir un solo sitio temporal de separación de residuos, un costo de instalación de 200,000 pesos mexicanos, capacidad de almacenamiento de 2500 m<sup>3</sup> y un costo unitario de transporte promedio de 25 pesos sobre metro cúbico por kilómetro recorrido. El problema de optimización fue resuelto utilizando la hoja de cálculo Excel® y el software de optimización CPLEX®. Los resultados en ambos softwares fueron congruentes, sin embargo, Excel permite una mejor visualización y manipulación de los datos. La **Figura 25** muestra la solución en CPLEX® y el código del programa se muestra en la **Sección 10.1** de este trabajo. La **Figura 26** muestra una sección de la hoja de cálculo utilizada para la solución y verificación del modelo de transporte en la cual se muestra la matriz de distancias, costos y flujos o cantidades de residuos que son asignadas al sitio temporal. La solución del modelo determina al sitio disponible no. 1 como la localización óptima. El sitio no. 1, ubicado en Av. Periférico Sur No. 7555, Col. San Lorenzo la Cebada, Alcaldía Xochimilco, dentro de la Ciudad de México, representa una distancia mínima entre los inmuebles colapsados y el sitio de 148 kilómetros, la cual es proporcional a un costo de 590,766 pesos mexicanos para el caso de estudio desarrollado.

| derrumbes (tamaño 14) | sitios (tamaño 8) |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                       | "Sitio 1"         | "Sitio 2" | "Sitio 3" | "Sitio 4" | "Sitio 5" | "Sitio 6" | "Sitio 7" | "Sitio 8" |
| "Derrumbe 1"          | 15.3986...140658  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 2"          | 30.7972...281317  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 3"          | 246.377...425053  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 4"          | 246.377...425053  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 5"          | 15.3986...140658  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 6"          | 323.370...995382  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 7"          | 184.78337656879   | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 8"          | 61.5944...562633  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 9"          | 15.3986...140658  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 10"         | 46.1958...421975  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 11"         | 15.3986...140658  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 12"         | 123.188...712527  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 13"         | 184.78337656879   | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| "Derrumbe 14"         | 369.56675313758   | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

| sitios (tamaño 8) | Valor |
|-------------------|-------|
| Sitio 1           | 1     |
| Sitio 2           | 0     |
| Sitio 3           | 0     |
| Sitio 4           | 0     |
| Sitio 5           | 0     |
| Sitio 6           | 0     |
| Sitio 7           | 0     |
| Sitio 8           | 0     |

| Estadística   | Valor  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li> <ul style="list-style-type: none"> <li> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cplex</li> </ul> </li> <li> <ul style="list-style-type: none"> <li>Constraints</li> </ul> </li> <li> <ul style="list-style-type: none"> <li>Variables                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Binary</li> <li>Other</li> </ul> </li> <li>Non-zero coefficients</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> | solution (optimal) with objective 590765.709943053<br>23<br>120<br>8<br>112<br>240 |

Figura 25 Solución en CPLEX® del modelo de localización y asignación para el caso de estudio desarrollado (Elaboración propia)

Matriz de distancias  $D_{ij}$  (km)

|                           | Sitio temporal $j$ |        |        |        |        |        |        |        |       |
|---------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                           | 1                  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |       |
| Edificio colapsado $i$    | 1                  | 19.13  | 10.00  | 51.63  | 51.35  | 48.67  | 35.79  | 35.99  | 24.55 |
|                           | 2                  | 4.12   | 21.53  | 46.98  | 47.91  | 31.54  | 52.06  | 30.21  | 40.68 |
|                           | 3                  | 13.64  | 15.12  | 39.16  | 39.67  | 37.29  | 51.25  | 22.51  | 35.19 |
|                           | 4                  | 2.92   | 24.43  | 47.89  | 49.01  | 28.78  | 54.39  | 31.21  | 43.57 |
|                           | 5                  | 20.87  | 25.35  | 29.99  | 31.37  | 32.69  | 63.26  | 13.61  | 44.82 |
|                           | 6                  | 11.05  | 16.13  | 41.55  | 42.16  | 36.00  | 50.73  | 24.84  | 36.05 |
|                           | 7                  | 8.97   | 17.23  | 43.51  | 44.18  | 35.03  | 50.44  | 26.76  | 36.89 |
|                           | 8                  | 12.27  | 16.14  | 40.04  | 40.65  | 36.10  | 51.60  | 23.33  | 36.18 |
|                           | 9                  | 16.57  | 16.56  | 35.38  | 35.95  | 37.33  | 54.06  | 18.70  | 36.46 |
|                           | 10                 | 8.63   | 18.97  | 42.69  | 43.52  | 33.18  | 52.50  | 25.91  | 38.77 |
|                           | 11                 | 6.18   | 30.94  | 54.68  | 56.02  | 25.75  | 56.70  | 38.20  | 49.11 |
|                           | 12                 | 10.38  | 17.82  | 41.23  | 41.98  | 34.32  | 52.35  | 24.46  | 37.77 |
|                           | 13                 | 11.09  | 16.09  | 41.53  | 42.13  | 36.04  | 50.72  | 24.81  | 36.01 |
|                           | 14                 | 2.02   | 22.81  | 49.47  | 50.41  | 31.38  | 51.49  | 32.71  | 41.45 |
| Distancia total recorrida | 147.83             | 269.11 | 605.73 | 616.30 | 484.10 | 727.35 | 373.26 | 537.51 |       |

|  |
|--|
| Costo unitario (\$/m <sup>3</sup> *km) |
| 25.00                                  |

Matriz de costos  $C_{ij}$  (\$/m<sup>3</sup>)

|                        | Sitio temporal $j$ |        |        |          |          |          |          |        |          |
|------------------------|--------------------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|
|                        | 1                  | 2      | 3      | 4        | 5        | 6        | 7        | 8      |          |
| Edificio colapsado $i$ | 1.00               | 478.34 | 249.97 | 1,290.86 | 1,283.85 | 1,216.76 | 894.76   | 899.82 | 613.66   |
|                        | 2.00               | 102.91 | 538.25 | 1,174.58 | 1,197.75 | 788.48   | 1,301.59 | 755.37 | 1,016.98 |
|                        | 3.00               | 340.93 | 378.02 | 979.00   | 991.78   | 932.27   | 1,281.24 | 562.85 | 879.80   |
|                        | 4.00               | 73.02  | 610.68 | 1,197.17 | 1,225.24 | 719.40   | 1,359.87 | 780.21 | 1,089.15 |
|                        | 5.00               | 521.83 | 633.71 | 749.75   | 784.31   | 817.16   | 1,581.60 | 340.35 | 1,120.62 |
|                        | 6.00               | 276.25 | 403.23 | 1,038.84 | 1,053.88 | 899.95   | 1,268.37 | 620.93 | 901.19   |
|                        | 7.00               | 224.16 | 430.79 | 1,087.76 | 1,104.50 | 875.87   | 1,261.07 | 668.98 | 922.37   |
|                        | 8.00               | 306.63 | 403.51 | 1,001.11 | 1,016.28 | 902.60   | 1,289.98 | 583.25 | 904.41   |
|                        | 9.00               | 414.22 | 413.89 | 884.40   | 898.76   | 933.27   | 1,351.44 | 467.61 | 911.51   |
|                        | 10.00              | 215.63 | 474.30 | 1,067.27 | 1,087.90 | 829.55   | 1,312.39 | 647.75 | 969.34   |
|                        | 11.00              | 154.56 | 773.42 | 1,366.98 | 1,400.47 | 643.70   | 1,417.53 | 955.02 | 1,227.86 |
|                        | 12.00              | 259.57 | 445.51 | 1,030.70 | 1,049.38 | 857.98   | 1,308.64 | 611.43 | 944.23   |
|                        | 13.00              | 277.36 | 402.28 | 1,038.16 | 1,053.13 | 900.91   | 1,267.99 | 620.29 | 900.31   |
|                        | 14.00              | 50.40  | 570.23 | 1,236.73 | 1,260.25 | 784.52   | 1,287.37 | 817.64 | 1,036.21 |

Matriz de flujos  $X_{ij}$  (m<sup>3</sup>)

|   | Sitio temporal $j$ |        |      |      |      |           |           |       | Restricciones de residuos generados en m <sup>3</sup> (W) |        |            |        |
|---|--------------------|--------|------|------|------|-----------|-----------|-------|---|--------|------------|--------|
|   | 1                  | 2      | 3    | 4    | 5    | 6         | 7         | 8     |   |        |            |        |
| Edificio colapsado $i$  | 1                  | 15.40  | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 15.40  | =          | 15.40  |
|   | 2                  | 30.80  | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 30.80  | =          | 30.80  |
|   | 3                  | 246.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 246.38 | =          | 246.38 |
|   | 4                  | 246.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 246.38 | =          | 246.38 |
|   | 5                  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 15.40 | 0.00  | 15.40  | =          | 15.40  |
|   | 6                  | 323.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 323.37 | =          | 323.37 |
|   | 7                  | 184.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 184.78 | =          | 184.78 |
|   | 8                  | 61.59  | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 61.59  | =          | 61.59  |
|   | 9                  | 15.40  | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 15.40  | =          | 15.40  |
|   | 10                 | 46.20  | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 46.20  | =          | 46.20  |
|   | 11                 | 15.40  | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 15.40  | =          | 15.40  |
|   | 12                 | 123.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 123.19 | =          | 123.19 |
|   | 13                 | 184.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 184.78 | =          | 184.78 |
|   | 14                 | 369.57 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00      | 0.00  | 0.00  | 369.57 | =          | 369.57 |
| Restricciones de capacidad de almacenamiento en m <sup>3</sup> (\$) | 1,863.23           | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 15.40     | 0.00  |   |        |            |        |
|   | ≤                  | ≤      | ≤    | ≤    | ≤    | ≤         | ≤         | ≤     |   |        |            |        |
|   | 38,526.00          | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 38,526.00 | 38,526.00 | 0.00  |   |        |            |        |
|   |                    |        |      |      |      |           |           |       | Función objetivo  | \$     | 987,971.12 |        |

|                      |            |
|----------------------|------------|
| Costo de transporte  | 387,971.12 |
| Costo de instalación | 600,000.00 |

| Sitio | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             | 8             | Número de sitios seleccionados |   |   |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|---|---|
| Sj    | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     |                                |   |   |
| ij    | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | n                              |   |   |
| Vj    | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 1             | 1             | 0             | 3                              | ≥ | 3 |

Figura 26 Solución del modelo de localización y asignación a través del complemento Solver de Excel® para el caso de estudio desarrollado (Elaboración propia)

## 7.2 Modelo de ruteo de vehículos VRP

### 7.2.1 Definición del problema

Una vez que los sitios temporales fueron seleccionados por el modelo de localización y asignación, surge la necesidad de diseñar y programar rutas de recolección entre dichos sitios y el grupo de inmuebles colapsados a los cuales se encuentran asignados, esto debido a la importancia de contar con información como: el número de vehículos necesarios, el número de rutas a programar y la secuencia de paradas en cada una de estas rutas, el tiempo estimado que llevará todo el proceso de recolección y la distancia total recorrida que será proporcional al costo de transporte involucrado. El número  $n$  de sitios temporales a instalar implicará el mismo número  $n$  de problemas VRP independientes para la planeación operativa de cada uno de los sitios temporales. Lo anterior está justificado por el hecho de que el problema de localización y asignación determina la agrupación entre puntos de derrumbe y el sitio que dará servicio a cada grupo en particular por lo cual un problema de tipo MDVRP no sería necesario.

El modelo puede definirse por un grafo dirigido  $G = (V, A)$  donde;  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  es el conjunto de  $n + 1$  nodos o vértices y  $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$  es el conjunto de arcos o enlaces entre cada uno de los nodos del grafo. El nodo 0 representa el sitio temporal, mientras que los nodos restantes  $N = V \setminus \{0\}$  corresponden a los  $n$  inmuebles colapsados. Cada inmueble colapsado  $i \in N$  requiere la recolección de  $q_i$  unidades de residuos que serán destinados al sitio temporal. Se asume una flota homogénea de  $K$  vehículos con capacidad  $Q > 0$ . Un vehículo que da servicio a un conjunto de inmuebles colapsados  $S \subseteq N$  comienza en el sitio temporal, se desplaza a cada uno de los inmuebles colapsados en  $S$  para recolectar los residuos, y finalmente regresa al sitio temporal para el manejo y separación de dichos residuos. El desplazamiento de un vehículo desde un nodo  $i$  a un nodo  $j$  dentro del grafo  $G$  implica un costo de transporte  $c_{ij}$  que está dado por el costo de transporte unitario  $C$  y la distancia  $d_{ij}$  del arco o enlace  $\{i, j\} \in A$ . La **Figura 27** muestra el grafo dirigido  $G = (V, A)$  para los 14 inmuebles colapsados del sismo del 19 de septiembre de 2017 y el sitio temporal seleccionado por el modelo de localización y asignación desarrollado en la **Sección 7.1**.

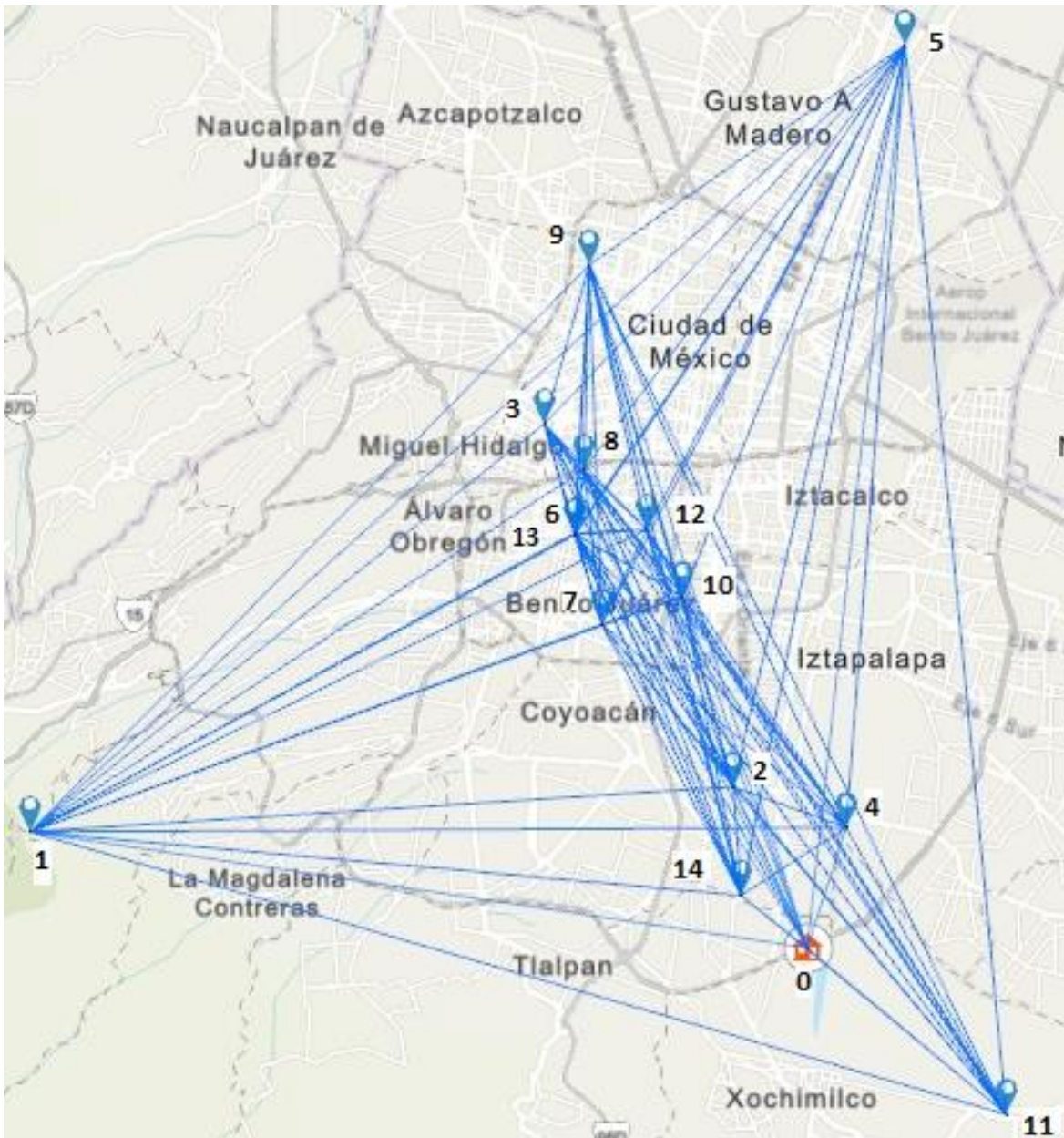
### 7.2.1 Variables de entrada

#### *Sitios temporales*

El modelo de localización y asignación descrito en la **Sección 7.1** tiene como salida la selección de  $n$  sitios temporales que serán instalados para recibir los residuos provenientes de los inmuebles colapsados, así como la asignación de inmuebles colapsados a cada sitio temporal y el flujo de residuos entre ellos. Cada uno de los sitios temporales seleccionados por el modelo de transporte, corresponderá en términos del problema VRP, al depósito o almacén del cual las unidades de transporte parten para recolectar los residuos y regresan para que dichos residuos sean almacenados y clasificados. Como se mencionó anteriormente, para cada sitio temporal se utilizarán modelos VRP independientes de acuerdo con las características particulares de cada uno de ellos. Las variables de entrada, en términos de los sitios temporales, son la ubicación del sitio en cuestión y su grupo de puntos de derrumbe asignado. Para el caso de estudio desarrollado se tomará en cuenta el sitio temporal seleccionado por el modelo de localización y asignación tal como se describió en la **Sección 7.1.6**.

### *Distancias entre edificios colapsados y sitios temporales*

La distancia entre cada uno de los nodos (sitio temporal e inmuebles colapsados) está dada por el enlace o arco  $\{i, j\} \in A$  que une a cada uno de los nodos  $i \in V$ . Los arcos y nodos mencionados constituyen el grafo dirigido  $G = (V, A)$  tal como puede observarse en la **Figura 27**. Las ubicaciones en color azul representan cada uno de los nodos relativos a los inmuebles colapsados, los cuales están enumerados del 1 al 14 y la ubicación en color naranja representa el sitio temporal definido como el nodo 0.



*Figura 27 Grafo dirigido  $G(V,A)$  del problema VRP para el caso de estudio del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Elaboración propia con ArcGISPro®)*



La distancia  $d_{ij}$  fue calculada a partir de las coordenadas geográficas de los inmuebles colapsados y el sitio temporal, obtenidas por medio de Google Maps. La **Tabla 9** muestra la matriz de distancias euclidianas para cada arco  $i, j$  donde el nodo 0 representa el sitio temporal y los nodos restantes los inmuebles colapsados.

*Tabla 9. Distancia entre los arcos (i,j) del grafo completo G(V,A) en km (Elaboración propia)*

| <i>i/j</i> | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0          | 0  | 19 | 4  | 14 | 3  | 21 | 11 | 9  | 12 | 17 | 9  | 6  | 10 | 11 | 2  |
| 1          | 19 | 0  | 17 | 16 | 20 | 28 | 15 | 15 | 16 | 19 | 17 | 25 | 17 | 15 | 17 |
| 2          | 4  | 17 | 0  | 10 | 3  | 18 | 7  | 5  | 8  | 12 | 5  | 10 | 6  | 7  | 3  |
| 3          | 14 | 16 | 10 | 0  | 12 | 12 | 3  | 5  | 1  | 4  | 5  | 19 | 3  | 3  | 12 |
| 4          | 3  | 20 | 3  | 12 | 0  | 18 | 9  | 8  | 10 | 14 | 7  | 8  | 8  | 9  | 3  |
| 5          | 21 | 28 | 18 | 12 | 18 | 0  | 14 | 15 | 13 | 9  | 14 | 25 | 13 | 14 | 20 |
| 6          | 11 | 15 | 7  | 3  | 9  | 14 | 0  | 2  | 2  | 6  | 3  | 17 | 2  | 0  | 9  |
| 7          | 9  | 15 | 5  | 5  | 8  | 15 | 2  | 0  | 4  | 8  | 2  | 15 | 2  | 2  | 7  |
| 8          | 12 | 16 | 8  | 1  | 10 | 13 | 2  | 4  | 0  | 5  | 4  | 18 | 2  | 1  | 11 |
| 9          | 17 | 19 | 12 | 4  | 14 | 9  | 6  | 8  | 5  | 0  | 8  | 22 | 6  | 6  | 15 |
| 10         | 9  | 17 | 5  | 5  | 7  | 14 | 3  | 2  | 4  | 8  | 0  | 14 | 2  | 3  | 7  |
| 11         | 6  | 25 | 10 | 19 | 8  | 25 | 17 | 15 | 18 | 22 | 14 | 0  | 16 | 17 | 8  |
| 12         | 10 | 17 | 6  | 3  | 8  | 13 | 2  | 2  | 2  | 6  | 2  | 16 | 0  | 2  | 9  |
| 13         | 11 | 15 | 7  | 3  | 9  | 14 | 0  | 2  | 1  | 6  | 3  | 17 | 2  | 0  | 9  |
| 14         | 2  | 17 | 3  | 12 | 3  | 20 | 9  | 7  | 11 | 15 | 7  | 8  | 9  | 9  | 0  |

#### *Cantidad de vehículos disponibles y capacidad de carga*

Como se mencionó en la **Sección 4.6**, los vehículos utilizados para la recolección y transporte de los residuos por sismo son camiones de volteo cuya capacidad varía entre 3 y  $33 m^3$ , sin embargo, se recomienda utilizar la mayor capacidad disponible de  $33 m^3$  con el objetivo de minimizar el costo de transporte y hacer más eficiente el proceso completo de recolección. El número de vehículos disponibles es un dato que se definirá por el planeador o tomador de decisiones de acuerdo con diferentes criterios y objetivos de planeación. El volumen estimado de residuos para el caso de estudio desarrollado es de aproximadamente  $1,886 m^3$  por lo cual para cubrir este volumen de recolección por completo se necesitarían 58 cargas con vehículos de  $33 m^3$ . Los camiones de volteo de  $33 m^3$ , son un tipo de vehículo personalizado cuya disponibilidad está sujeta a los proveedores de servicio de transporte autorizados por la Ciudad de México y enlistados en el documento RAMIR (véase la **Sección 4.6**).

#### *Cantidad de residuos generada por inmuebles colapsados*

La cantidad de residuos en un determinado punto de derrumbe corresponde en términos del problema VRP a la demanda que necesita ser recolectada por la flota de vehículos y transportada hacia el sitio temporal. Los datos para esta variable corresponden a la estimación de residuos generados por cada inmueble colapsado, la cual se muestra en la **Tabla 1** de la **Sección 3.1.1**.

### 7.2.2 Variables de decisión

La variable de decisión corresponde con la elección de rutas cuya distancia total sea mínima, cumpliendo con la capacidad del vehículo y la demanda de recolección.

### 7.2.3 Variables de respuesta

Las variables de respuesta del modelo VRP son; cada una de las rutas definidas por la variable  $X_{ij}$  de tal forma que se cumpla con las restricciones de capacidad y demanda de recolección; y la distancia total recorrida por todas ellas. De esta manera, la distancia se podrá expresar en costo al multiplicarse por el costo unitario por kilómetro recorrido. La relación entre variables puede observarse en la **Figura 28**.

### 7.2.4 Diagrama de influencia para el modelo VRP

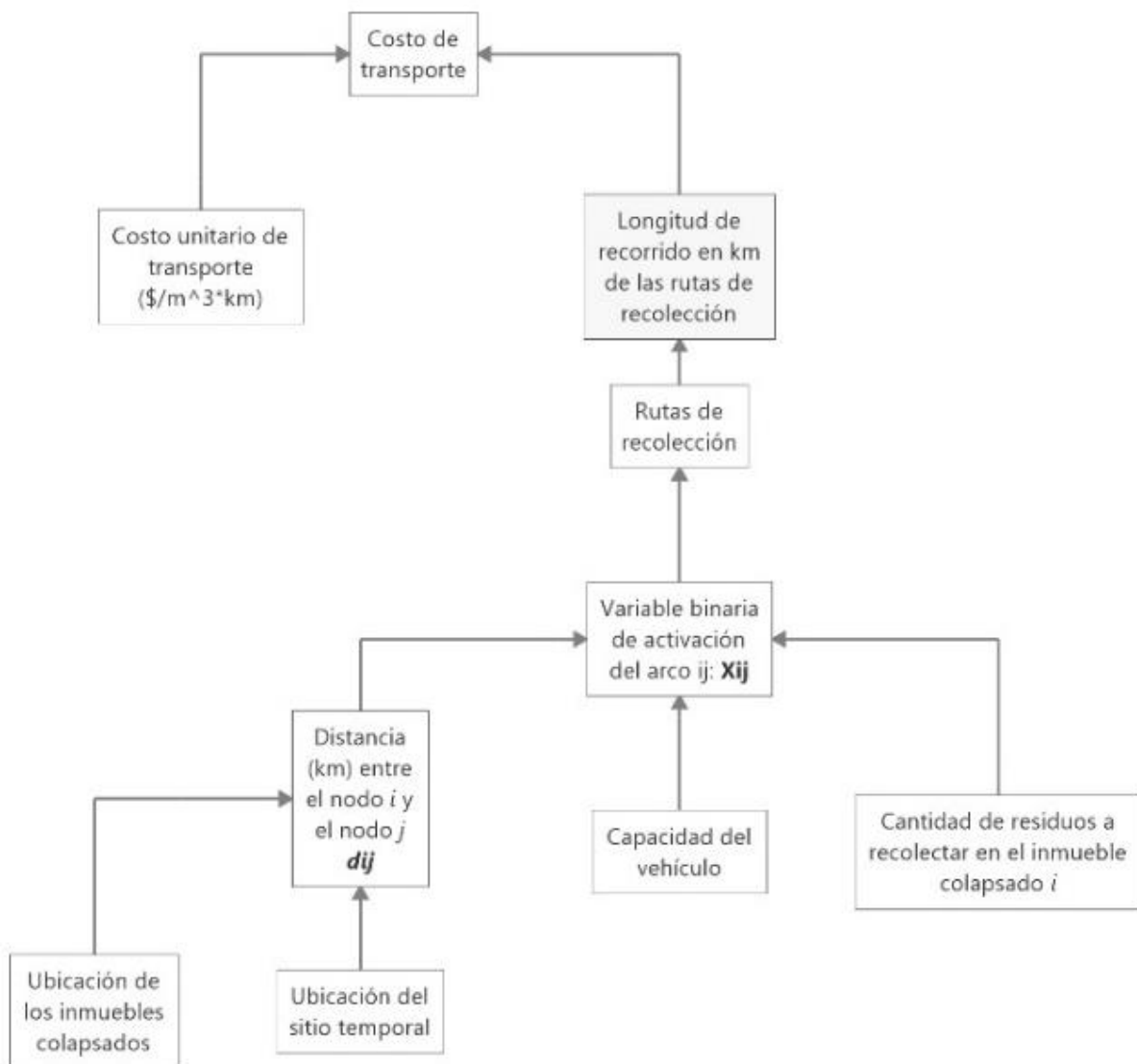


Figura 28 Diagrama de influencia para el modelo VRP (Fuente: Elaboración propia)

## 7.2.5 Modelo matemático

### *Modelo de ruteo de vehículos capacitado (CVRP)*

De acuerdo con la definición del problema de la **Sección 7.2.1**, y las características del modelo CVRP (descritas en la **Sección 4.5.3**), este puede aplicarse al caso de estudio desarrollado considerando cantidades de residuos menores o iguales a la capacidad de recolección del vehículo. Lo anterior se debe a que los puntos de demanda o inmuebles colapsados son atendidos por un solo vehículo y para que este se asigne a cada uno de ellos dentro de una ruta, la capacidad debe ser suficiente para recolectar el volumen planeado. Ya que los volúmenes de residuos en inmuebles colapsados pueden ser muy grandes, para poder utilizar un modelo de tipo CVRP, estos deberían dividirse en cantidades pequeñas para cada periodo de recolección, ya sea en días o semanas. Esto implica resolver el modelo de ruteo para cada periodo en particular.

El modelo no considera una cantidad de vehículos específica porque define las rutas necesarias dado el volumen de demanda y la capacidad de recolección establecida. Por lo tanto, este modelo ayuda a definir la cantidad de vehículos necesarios a partir del número de rutas establecidas y los criterios de planeación previamente definidos. Por ejemplo, para un periodo de tiempo dado (día, semana, etc.) si el modelo define 12 rutas entonces podrían necesitarse 12 vehículos asignados a cada una de ellas, o bien, 6 vehículos asignados a dos rutas durante ese periodo. Este tipo de decisiones dependen de varios factores de planeación en particular, para las cuales el modelo CVRP funciona como una herramienta de soporte. Al ser un problema de tipo *NP-Hard* la solución del modelo VRP mediante métodos exactos solo es eficiente para las instancias pequeñas, el cual suele ser el caso de la red de inmuebles colapsados por sismo. A continuación se describe el modelo matemático, retomando los aportes de (Irnich et al., 2014) y (Cáceres, 2018), para el modelo de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad.

### Variables de decisión

$$X_{ij}: \begin{cases} 1 & \text{Si el arco } i, j \text{ pertenece a la ruta} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

$d_{ij}$ : distancia entre los nodos o inmuebles colapsados incluyendo el sitio temporal  $i, j \in A$

$q_i$ : cantidad de demanda o residuos en el inmueble colapsado  $i \in N$

$u_i$ : acumulado de recolección en el nodo  $i \in N$

### Función objetivo

La función objetivo (7.6) busca minimizar la distancia recorrida a través del grafo al multiplicar la distancia entre cada arco o enlace  $i, j$ , que forma parte una ruta en particular, por la variable binaria que activa dicho arco  $i, j$ .

$$\min Z = \sum_{i,j \in A} d_{ij} X_{ij} \quad (7.6)$$

## Restricciones

La **Ecuación (7.7)** establece que desde un nodo  $i \in N$  solo se puede ir hacia un nodo  $j \in V$ , de manera similar, la **Ecuación (7.8)** establece que solo se puede llegar a un nodo  $j \in N$  desde un nodo  $i \in V$ .

$$\sum_{j \in V, j \neq i} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (7.7)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (7.8)$$

Las **Ecuaciones (7.9)** y **(7.10)** definen las restricciones de conectividad y eliminación de sub recorridos en las rutas a través de la variable de acumulación  $u$  que define el acumulado de recolección en cada nodo relativo a los inmuebles colapsados  $i \in N$ . La variable de acumulación en el nodo  $j$  es igual al acumulado en el nodo anterior  $i$  más la cantidad de demanda o residuos del nodo actual  $j$ , **restricción (7.9)** siempre y cuando el acumulado sea menor que la capacidad del vehículo, **restricción (7.10)**. Por medio de estas restricciones se evalúa la capacidad del vehículo y su asignación con los nodos cuya demanda pueden satisfacer. La condición de que  $X_{ij}$  es una variable binaria cuyo valor puede ser uno o cero se define en la **restricción (7.11)**.

$$\text{si } X_{ij} = 1 \Rightarrow u_i + q_j = u_j \quad \forall i, j \in A: j \neq 0, i \neq 0 \quad (7.9)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (7.10)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in A \quad (7.11)$$

## Modelo de ruteo de vehículos con entregas divididas (SDVRP)

Tal como se describió en la **Sección 4.5.3**, el SDVRP parte de la definición del modelo VRP clásico, con la diferencia de que este permite que el volumen de residuos en un inmueble colapsado pueda dividirse entre varios vehículos, lo cual podría generar ahorros en la distancia total recorrida. Se asume una flota homogénea de  $K$  vehículos con capacidad  $Q_k > 0$ . Para vehículos con la misma capacidad, el SDVRP considera a  $K$  como la cantidad mínima necesaria de vehículos para recolectar el volumen total de la demanda, la cual se calcula a partir de la **Ecuación (7.12)** que divide el volumen total entre la capacidad de carga de un vehículo. Para vehículos de distintas capacidades dentro de un modelo VRP o SDVRP es necesario realizar un análisis previo distinto que esta fuera del alcance de este trabajo.

$$K = \frac{\sum_{i \in N} q_i}{Q_k} \quad (7.12)$$

Este tipo de modelo es útil para los casos en que la demanda de los clientes suele ser mucho mayor que la capacidad de un solo vehículo. Sin embargo, este tipo de modelo implica un mayor grado de complejidad para ser resuelto con métodos exactos debido a su naturaleza *NP-Hard* y el tiempo de cómputo necesario para su resolución. En este trabajo se desarrolla un SDRVP para el caso de estudio

abordado, resuelto por un método exacto, para comparar los resultados con los del VRP tradicional descrito en la sección anterior.

El modelo puede definirse por un grafo dirigido  $G = (V, A)$  donde;  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  es el conjunto de  $n + 1$  nodos o vértices y  $A = \{(i, j, k): i, j \in V, i \neq j, k \in K\}$  es el conjunto de arcos o enlaces entre cada uno de los nodos del grafo recorridos por el vehículo  $k$ . El nodo 0 representa el sitio temporal, mientras que los nodos restantes  $N = V \setminus \{0\}$  corresponden a los  $n$  inmuebles colapsados. El modelo matemático, retomando los aportes de (Dror et al., 1994) se define a continuación.

### Variables de decisión

$$X_{ijk} : \begin{cases} 1 & \text{Si el vehículo } k \text{ viaja del nodo } i \text{ al nodo } j \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad \forall i, j, k \in A$$

$$Y_{ik} : \text{fracción de residuos recolectados en } i \text{ por el vehículo } k \quad \forall i \in N, k \in K$$

$$q_i : \text{cantidad de demanda o residuos en el inmueble colapsado } i \in N$$

$$Q_k : \text{capacidad del vehículo } k \in K$$

$$u_{ik} : \text{acumulado de residuos recolectados en } i \text{ por el vehículo } k \quad \forall i \in N, k \in K$$

$$w_{ik} : \text{cantidad de residuos recolectados en } i \text{ por el vehículo } k \quad \forall i \in N, k \in K$$

$$w_{ik} = Y_{ik}q_{ik} \quad \forall i \in N, \quad k \in K$$

### Función objetivo

Tal como en el modelo VRP clásico, la función objetivo **(7.13)** busca minimizar la distancia recorrida a través del grafo al multiplicar la distancia entre cada arco o enlace recorrido por el vehículo  $k$ , que forma parte una ruta en particular, por la variable binaria que activa dicho arco  $i, j, k$ .

$$\min Z = \sum_{i, j, k \in A} d_{ijk} X_{ijk} \quad (7.13)$$

### Restricciones

La **Ecuación (7.14)** define la continuidad de una ruta para la conservación de los flujos de entrada y salida de vehículos en cada nodo.

$$\sum_{i \in V} X_{ihk} - \sum_{j \in V} X_{hjk} = 0 \quad \forall h \in V; k \in K \quad (7.14)$$

La suma de las fracciones de residuos recolectada en cada inmueble colapsado por cada vehículo debe completar el total del volumen de demanda para cada uno de ellos. Es decir, el volumen de residuos en cada inmueble colapsado debe ser completamente recolectado. Esta condición se cumple a través de la **restricción (7.15)**.

$$\sum_{k \in K} Y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (7.15)$$

La **restricción (7.16)** establece que, para cada ruta o vehículo, la suma de las cantidades de residuos recolectadas en cada inmueble colapsado no debe exceder la capacidad del vehículo.

$$\sum_{i \in N} q_i Y_{ik} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (7.16)$$

La **Ecuación (7.17)** establece que si un inmueble colapsado o nodo  $i$  es visitado por un vehículo  $k$  entonces ese vehículo debe abandonar a dicho nodo.

$$\sum_{j \in V} X_{ijk} \geq Y_{ik} \quad \forall i \in N; k \in K \quad (7.17)$$

Las **Ecuaciones (7.18)** y **(7.19)** definen las restricciones de conectividad y eliminación de sub recorridos en las rutas a través de la variable de acumulación  $u$  que define el acumulado de recolección en cada nodo relativo a los inmuebles colapsados  $i \in N$  por cada vehículo  $k \in K$ . La variable de acumulación para el vehículo  $k$  en el nodo  $j$  es igual al acumulado en el nodo anterior  $i$  más la cantidad de residuos recolectados en el nodo actual  $j$ , **Ecuación (7.18)** siempre y cuando el acumulado sea menor que la capacidad del vehículo, **Ecuación (7.19)**. Por medio de estas restricciones se evalúa la capacidad del vehículo y su asignación con los nodos cuya demanda pueden satisfacer. La condición de que  $X_{ijk}$  es una variable binaria cuyo valor puede ser uno o cero se define en la **restricción (7.20)**.

$$si X_{ijk} = 1 \implies u_{ik} + y_{ik}q_j = u_{jk} \quad \forall i, j, k \in A: j \neq 0, i \neq 0 \quad (7.18)$$

$$y_{ik}q_i \leq u_{ik} \leq Q_k \quad \forall i \in N \quad (7.19)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in A \quad (7.20)$$

La fracción de residuos recolectada en un nodo  $i$  por un vehículo  $k$  es una variable que solo puede estar entre cero y uno, tal como se establece en la **restricción (7.21)**.

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \quad \forall i, k \in B \quad (7.21)$$

## 7.2.6 Verificación y validación del modelo VRP

### *Modelo de ruteo de vehículos capacitado (CVRP)*

Para el caso de estudio desarrollado se consideran los 14 inmuebles colapsados, el sitio temporal seleccionado por el modelo de transporte y una flota homogénea de vehículos con 33 m<sup>3</sup> de capacidad, de acuerdo con las variables definidas en las **Secciones 7.2.1-7.2.3**. Asumiendo que las rutas se programan para todos los inmuebles colapsados dentro de un periodo dado, la **Tabla 10** muestra la distribución de las recolecciones para los volúmenes totales respectivos a cada punto de derrumbe. Las recolecciones sombreadas en color verde representan aquellas que son menores a la capacidad del vehículo y deberían programarse en rutas conjuntas con el objetivo de que la utilización de los vehículos sea eficiente.

Tabla 10 Distribución de las recolecciones de acuerdo con la capacidad del vehículo y el volumen de cada inmueble colapsado (Elaboración propia)

| Inmueble colapsado | Volumen de residuos m <sup>3</sup> | Periodo de planeación |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------|------------------------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                    |                                    | 1                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 1                  | 16                                 | 16                    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2                  | 31                                 | 31                    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3                  | 247                                | 33                    | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4                  | 247                                | 33                    | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 5                  | 16                                 | 16                    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 6                  | 324                                | 33                    | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 27 | 0  | 0  |
| 7                  | 185                                | 33                    | 33 | 33 | 33 | 33 | 20 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 8                  | 62                                 | 33                    | 29 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9                  | 16                                 | 16                    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 10                 | 47                                 | 33                    | 14 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11                 | 16                                 | 16                    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12                 | 124                                | 33                    | 33 | 33 | 25 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 13                 | 185                                | 33                    | 33 | 33 | 33 | 33 | 20 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 14                 | 370                                | 33                    | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 7  |

La solución del modelo CVRP, definido en la **Sección 7.2.5**, se obtuvo con ayuda del lenguaje de programación Python y el software de optimización CPLEX<sup>®</sup>. Para el periodo de periodo de planeación número uno, los resultados muestran la definición de 12 rutas de recolección, como puede observarse en la **Figura 29**, con un recorrido de 267 kilómetros en total. A este recorrido es necesario sumar la consideración del número de veces que las rutas se programan hasta terminar de recolectar el volumen de residuos completo, de acuerdo con los criterios de planeación de las recolecciones dados.

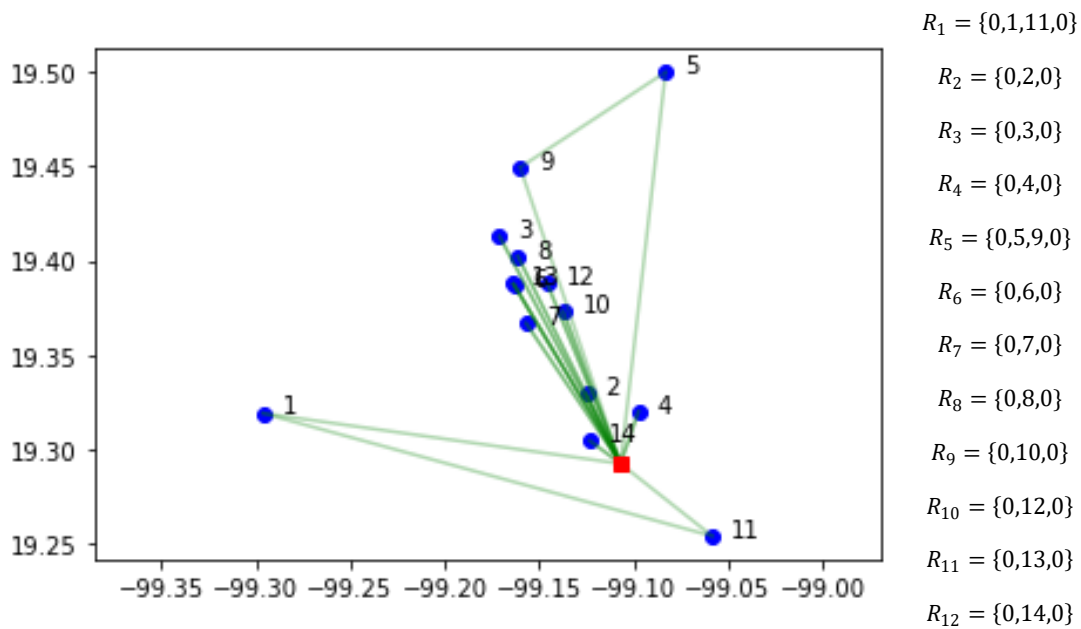


Figura 29 Solución del CVRP para el primer periodo con Python y CPLEX (Fuente: Elaboración propia)

Siguiendo el patrón de planeación mostrado en la **Tabla 10**, tiende a haber ineficiencia en la utilización de la capacidad de los vehículos ya que existen recolecciones menores a la capacidad que podrían incluirse dentro de una misma ruta si se incluyeran dentro de un mismo periodo de recolección. A continuación, se propone una metodología para el diseño de rutas con el modelo CVRP como herramienta para la toma de decisiones.

#### Metodología para el diseño de rutas

1. **Definir la cantidad de vehículos a operar durante un periodo de tiempo y el número de viajes o vueltas que pueden dar en ese periodo** (de acuerdo con las consideraciones descritas en la **Sección 5.1**). Para este caso de estudio se consideran 5 vehículos disponibles por día con una capacidad de 33 m<sup>3</sup>, los cuales pueden realizar dos viajes durante ese periodo de tiempo.
2. **Identificar, agrupar y contabilizar las recolecciones con carga completa para los vehículos y calcular la distancia recorrida.** Cada viaje o recolección corresponderá con una ruta que sale del sitio temporal y regresa para descargar el volumen recolectado. Las distancias entre los inmuebles colapsados y el sitio temporal pueden ser tomadas de los datos para el CVRP. Para el caso de estudio desarrollado, los datos se encuentran en la primera fila de la **Tabla 9**. A partir de la **Tabla 10**, la **Tabla 11** muestra las recolecciones con capacidad máxima del vehículo de acuerdo con el volumen de residuos en cada inmueble colapsado, así como la suma de las distancias recorridas para cada una de ellas.



Tabla 11 Volumen de residuos para recolecciones al máximo de la capacidad del vehículo (m<sup>3</sup>) (Elaboración propia)

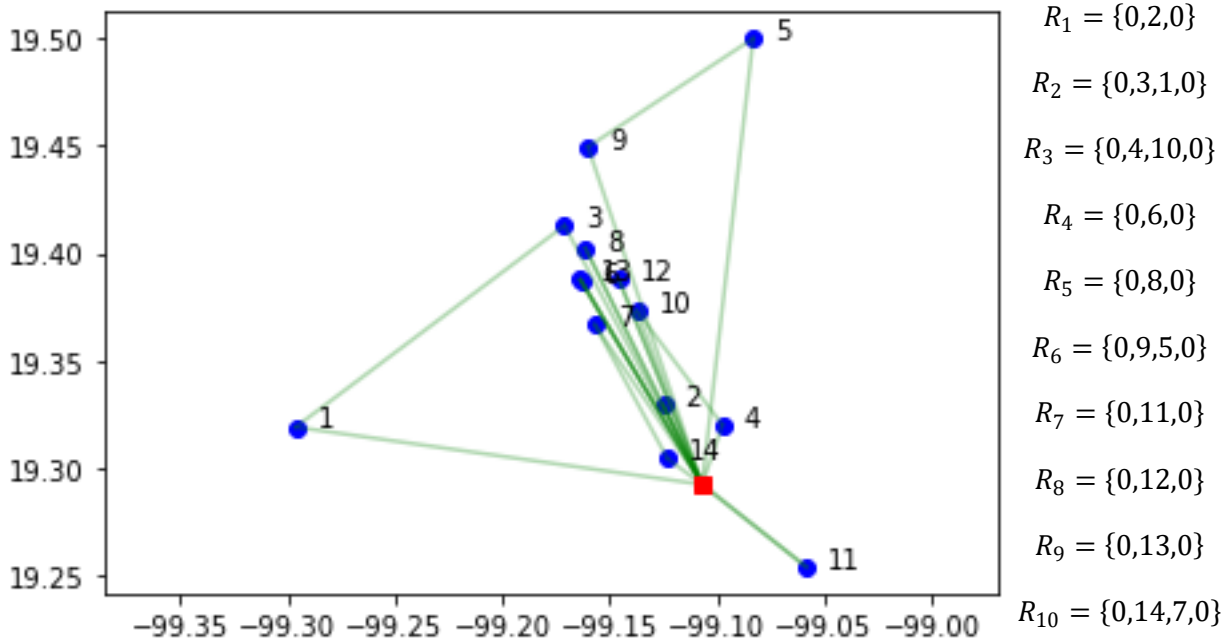
| Inmueble colapsado | Distancia hacia el sitio temporal | Periodo de planeación |        |        |       |       |       |       |       |       |      |      |               |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|---------------|
|                    |                                   | 1                     | 2      | 3      | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10   | 11   |               |
| 1                  | 19.13                             | 0                     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 2                  | 4.12                              | 0                     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 3                  | 13.64                             | 33                    | 33     | 33     | 33    | 33    | 33    | 33    | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 4                  | 2.92                              | 33                    | 33     | 33     | 33    | 33    | 33    | 33    | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 5                  | 20.87                             | 0                     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 6                  | 11.05                             | 33                    | 33     | 33     | 33    | 33    | 33    | 33    | 33    | 33    | 0    | 0    | 0             |
| 7                  | 8.97                              | 33                    | 33     | 33     | 33    | 33    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 8                  | 12.27                             | 33                    | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 9                  | 16.57                             | 0                     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 10                 | 8.63                              | 33                    | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 11                 | 6.18                              | 0                     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 12                 | 10.38                             | 33                    | 33     | 33     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 13                 | 11.09                             | 33                    | 33     | 33     | 33    | 33    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0             |
| 14                 | 20.02                             | 33                    | 33     | 33     | 33    | 33    | 33    | 33    | 33    | 33    | 33   | 33   | 33            |
|                    | Distancia recorrida por las rutas | 161.91                | 120.13 | 120.13 | 99.37 | 99.37 | 59.25 | 59.25 | 26.13 | 26.13 | 4.03 | 4.03 | <b>779.74</b> |

3. **Identificar, y agrupar recolecciones menores a la capacidad del vehículo y resolver el CVRP para este grupo.** A partir de la **Tabla 10**, la **Tabla 12** muestra la agrupación de recolecciones menores que la capacidad de los vehículos, de acuerdo con el volumen de residuos en cada inmueble colapsado.

Tabla 12 Volumen de residuos para recolecciones menores a la capacidad del vehículo (Elaboración propia)

| Inmueble colapsado/periodo | 1     |
|----------------------------|-------|
| 1                          | 16.00 |
| 2                          | 31.00 |
| 3                          | 16.00 |
| 4                          | 16.00 |
| 5                          | 16.00 |
| 6                          | 27.00 |
| 7                          | 20.00 |
| 8                          | 29.00 |
| 9                          | 16.00 |
| 10                         | 14.00 |
| 11                         | 16.00 |
| 12                         | 25.00 |
| 13                         | 20.00 |
| 14                         | 7.00  |

La solución para el modelo CVRP, con base en los datos mostrados en la **Tabla 12** y una capacidad de recolección de 33 m<sup>3</sup>, se muestra en la **Figura 30**.



*Figura 30 Solución del CVRP para el paso 3 con Python y CPLEX (Elaboración propia)*

La solución óptima del modelo CVRP define 10 rutas de recolección con una distancia recorrida de 242 km. Al sumar esta distancia con la distancia calculada en el punto 3 se obtiene una distancia total recorrida de 1022 km para la recolección del volumen total de residuos generados en el escenario de sismo del 19 de septiembre de 2017.

**4. Programar las rutas de recolección definidas en los pasos 2 y 3 de acuerdo con el periodo, el número de vehículos disponibles definidos en el paso 1 y los criterios de planeación particulares de cada contexto.** La **Tabla 13** muestra la programación de recolecciones y rutas para 5 vehículos que pueden realizar dos viajes con recolecciones a su máxima capacidad por día, además se asume que las recolecciones podrían realizarse en días consecutivos. Las casillas en color blanco significan los inmuebles colapsados que visita cada vehículo durante el primer y segundo viaje del día para recolectar los 33 m<sup>3</sup> de su capacidad y volver al sitio temporal (paso 2). Para la programación de rutas definidas por el modelo VRP en el paso 3 (**Figura 29**) es importante tomar en cuenta el número de nodos visitados en cada ruta y los tiempos de viaje, debido a que, en el caso de visitar más de dos nodos, la ruta puede tomar más tiempo y solo se podría realizar una por día por cada vehículo. En este caso de estudio se asume que las rutas asignadas a un solo inmueble colapsado pueden ser programadas dos el mismo día, mientras que las rutas de tres nodos se programan para un día completo cada una. Bajo estas circunstancias, la recolección del volumen total de residuos tomaría 7 días.

Tabla 13 Programación de recolecciones para el caso de estudio desarrollado (Elaboración propia)

| Vehículo                     |   | 1    |      | 2    |      | 3     |       | 4     |       | 5     |       |
|------------------------------|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Viaje                        |   | 1    | 2    | 1    | 2    | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     |
| Periodo de planeación (días) | 1 | 3.00 | 4.00 | 6.00 | 6.00 | 7.00  | 6.00  | 13.00 | 14.00 | 13.00 | 14.00 |
|                              | 2 | 3.00 | 4.00 | 6.00 | 6.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 14.00 | 8.00  | 10.00 |
|                              | 3 | 3.00 | 4.00 | 6.00 | 7.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 14.00 | 3.00  | 4.00  |
|                              | 4 | 3.00 | 4.00 | 6.00 | 7.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 14.00 | 3.00  | 4.00  |
|                              | 5 | 3.00 | 4.00 | 6.00 | 7.00 | R8    | R9    | R10   |       | 14.00 | 14.00 |
|                              | 6 | R1   | R4   | 6.00 | 7.00 | R6    |       | R7    |       | R5    | 14.00 |
|                              | 7 | R3   |      |      | R2   |       |       |       |       |       |       |
|                              | 8 |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |

**Modelo de ruteo de vehículos con entregas divididas (SDVRP)**

Retomando la solución del CVRP desarrollado anteriormente (Figura 29) puede observarse que, para algunas rutas definidas por el modelo, la capacidad del vehículo (33 m<sup>3</sup>) no es aprovechada en su totalidad, Ejemplos de estos casos son las rutas 6, 8, 11,12,13, las cuales tienen entre 4 y 13 m<sup>3</sup> de espacio vacío en el vehículo. Esto puede solucionarse asignado vehículos con menores capacidades o aplicando un modelo de ruteo con recolecciones divididas (SDVRP) que divida las demandas entre un menor número de vehículos y aproveche la capacidad del vehículo lo mayor posible. Ambas alternativas deberían evaluarse en términos de costos y factibilidad. En esta sección se desarrollará un modelo SDVRP con el objetivo de comparar el resultado obtenido frente al del modelo CVRP, en términos de la distancia recorrida por los vehículos y el número de rutas definidas.

**Alternativa de solución no. 1**

Al igual que para el modelo CVRP, la solución del modelo SDVRP se obtuvo con ayuda del lenguaje de programación Python y el software de optimización CPLEX ®. Al sumar el volumen que necesita ser recolectado y dividirlo entre la capacidad obtenemos el mínimo de vehículos necesarios para la recolección (7.22).

$$K = \frac{269 \text{ m}^3}{33 \text{ m}^3} = 8.15 \Rightarrow K = 9 \text{ (7.22)}$$

Considerando el número K de vehículos igual a 9 los datos descritos en las secciones 7.2.1-7.2.3 y el modelo SDVRP definido en la Sección 7.2.5, la primera solución para el SDVRP a partir de los volúmenes de recolección de la Tabla 12 se muestra en la Figura 31.

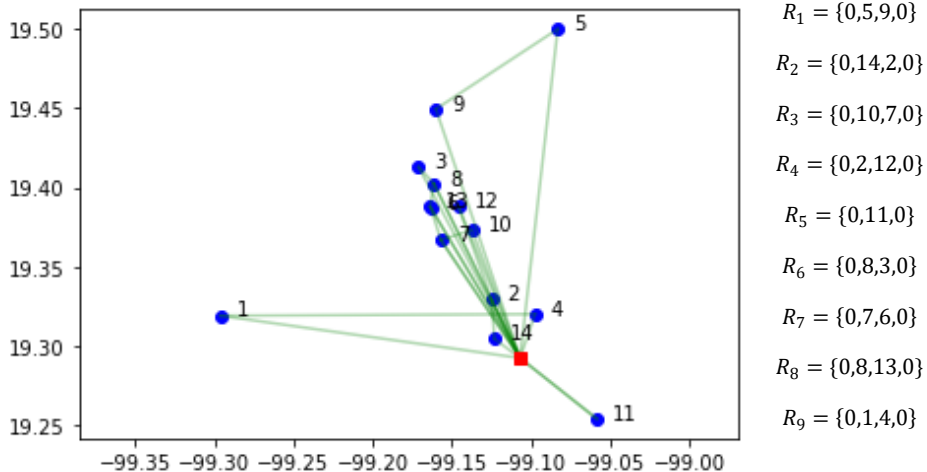


Figura 31 Solución no. 1 del SDVRP para el caso de estudio desarrollado (Elaboración propia)

La alternativa de solución número uno representa una distancia de recorrida de 225 kilómetros y la definición de 9 rutas (una menos que el CVRP). La **Figura 32** muestra el valor de las variables  $Y_{ik}$  para esta alternativa.

| Residuos en i          | i/Ruta k | 1  | 2          | 3   | 4          | 5  | 6         | 7   | 8         | 9  | $\sum Y_{ik}$ |
|------------------------|----------|----|------------|-----|------------|----|-----------|-----|-----------|----|---------------|
| 16.00                  | 1        | 0  | 0          | 0   | 0          | 0  | 0         | 0   | 0         | 1  | 1             |
| 31.00                  | 2        | 0  | 0.74193548 | 0   | 0.25806452 | 0  | 0         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| 16.00                  | 3        | 0  | 0          | 0   | 0          | 0  | 1         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| 16.00                  | 4        | 0  | 0          | 0   | 0          | 0  | 0         | 0   | 0         | 1  | 1             |
| 16.00                  | 5        | 1  | 0          | 0   | 0          | 0  | 0         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| 27.00                  | 6        | 0  | 0          | 0   | 0          | 0  | 0         | 1   | 0         | 0  | 1             |
| 20.00                  | 7        | 0  | 0          | 0.7 | 0          | 0  | 0         | 0.3 | 0         | 0  | 1             |
| 29.00                  | 8        | 0  | 0          | 0   | 0          | 0  | 0.5862069 | 0   | 0.4137931 | 0  | 1             |
| 16.00                  | 9        | 1  | 0          | 0   | 0          | 0  | 0         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| 14.00                  | 10       | 0  | 0          | 1   | 0          | 0  | 0         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| 16.00                  | 11       | 0  | 0          | 0   | 0          | 1  | 0         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| 25.00                  | 12       | 0  | 0          | 0   | 1          | 0  | 0         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| 20.00                  | 13       | 0  | 0          | 0   | 0          | 0  | 0         | 0   | 1         | 0  | 1             |
| 7.00                   | 14       | 0  | 1          | 0   | 0          | 0  | 0         | 0   | 0         | 0  | 1             |
| <b>Espacio ocupado</b> |          | 32 | 30         | 28  | 33         | 16 | 33        | 33  | 32        | 32 | 269           |

Figura 32 Fracciones de la demanda recolectadas en cada inmueble colapsado por cada vehículo o ruta ( $Y_{ik}$ ) para la solución no. 1 (Elaboración propia)

A partir de las fracciones recolectadas en cada inmueble colapsado ( $Y_{ik}$ ) por cada vehículo, las cantidades de residuos recolectadas por cada vehículo en cada inmueble colapsado se muestran en la **Figura 33**. Como se mencionó anteriormente, la capacidad de 33m<sup>3</sup> es la misma para todos los vehículos, para los cuales en algunos se observa que su capacidad no se utiliza adecuadamente (3 y 16). Esto se debe a que para el volumen total dado se necesitarían 8.15 vehículos de 33 m<sup>3</sup>, lo que significa que, al utilizar 9 vehículos de esa capacidad, el 85% de la capacidad de un vehículo es innecesaria.

| Residuos en i          | i/Ruta k | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | $\sum W_{ik}$ |
|------------------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------------|
| 16.00                  | 1        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 16 | 16            |
| 31.00                  | 2        | 0  | 23 | 0  | 8  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 31            |
| 16.00                  | 3        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 16 | 0  | 0  | 0  | 16            |
| 16.00                  | 4        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 16 | 16            |
| 16.00                  | 5        | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 16            |
| 27.00                  | 6        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 27 | 0  | 0  | 27            |
| 20.00                  | 7        | 0  | 0  | 14 | 0  | 0  | 0  | 6  | 0  | 0  | 20            |
| 29.00                  | 8        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 17 | 0  | 12 | 0  | 29            |
| 16.00                  | 9        | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 16            |
| 14.00                  | 10       | 0  | 0  | 14 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 14            |
| 16.00                  | 11       | 0  | 0  | 0  | 0  | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 16            |
| 25.00                  | 12       | 0  | 0  | 0  | 25 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 25            |
| 20.00                  | 13       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 20 | 0  | 20            |
| 7.00                   | 14       | 0  | 7  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 7             |
| <b>Espacio ocupado</b> |          | 32 | 30 | 28 | 33 | 16 | 33 | 33 | 32 | 32 | 269           |

Figura 33 Cantidad de residuos recolectada en cada inmueble colapsado por cada vehículo o ruta ( $W_{ik}$ ) para la solución no. 1 del SDVRP (Elaboración propia)

### Alternativa de solución no. 2

Para maximizar el aprovechamiento del espacio en los vehículos, se puede agregar un vehículo de menor capacidad para recolectar el remanente de residuos necesario. Si calculamos la diferencia entre el volumen total de 269 m<sup>3</sup> y el volumen que pueden recolectar 8 vehículos de 33 m<sup>3</sup> obtenemos un remanente de 5 m<sup>3</sup>. Dadas las capacidades disponibles para el tipo de vehículos de recolección de residuos, se agregará un vehículo con capacidad de 7 m<sup>3</sup> al modelo SDVRP. La solución número dos para el SDVRP bajo estas condiciones se muestra en la **Figura 34**.

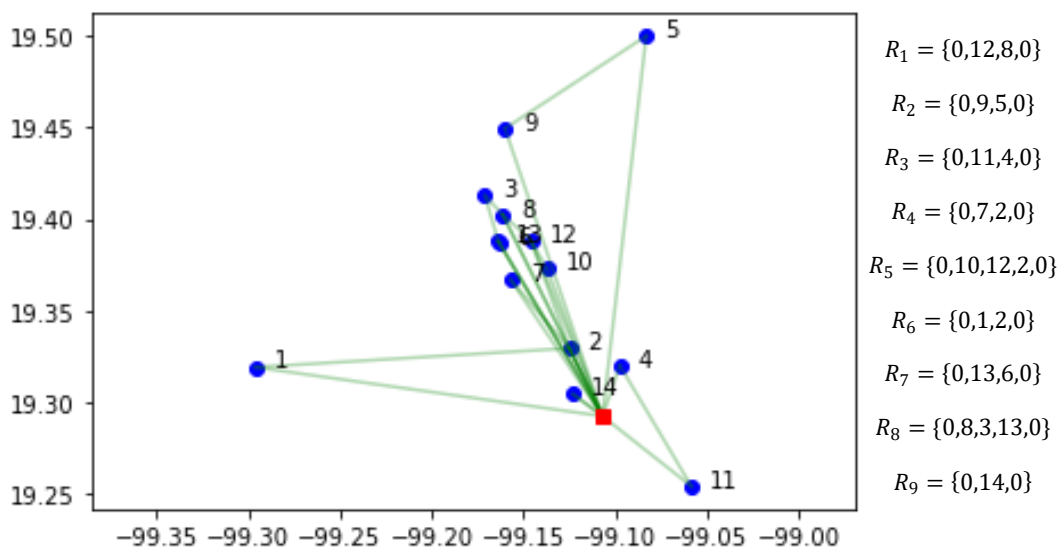


Figura 34 Solución no.2 del SDVRP para el caso de estudio desarrollado (Elaboración propia)

La solución número dos representa una distancia de recorrida de 220 kilómetros. La **Figura 35** muestra el valor de las variables  $Y_{ik}$  para esta alternativa.

| Residuos en i   | i/Ruta k | 1          | 2  | 3  | 4          | 5          | 6         | 7   | 8          | 9 | $\sum Y_{ik}$ |
|-----------------|----------|------------|----|----|------------|------------|-----------|-----|------------|---|---------------|
| 16.00           | 1        | 0          | 0  | 0  | 0          | 0          | 1         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 31.00           | 2        | 0          | 0  | 0  | 0.41935484 | 0.03225806 | 0.5483871 | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 16.00           | 3        | 0          | 0  | 0  | 0          | 0          | 0         | 0   | 1          | 0 | 1             |
| 16.00           | 4        | 0          | 0  | 1  | 0          | 0          | 0         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 16.00           | 5        | 0          | 1  | 0  | 0          | 0          | 0         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 27.00           | 6        | 0          | 0  | 0  | 0          | 0          | 0         | 1   | 0          | 0 | 1             |
| 20.00           | 7        | 0          | 0  | 0  | 1          | 0          | 0         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 29.00           | 8        | 0.89655172 | 0  | 0  | 0          | 0          | 0         | 0   | 0.10344828 | 0 | 1             |
| 16.00           | 9        | 0          | 1  | 0  | 0          | 0          | 0         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 14.00           | 10       | 0          | 0  | 0  | 0          | 1          | 0         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 16.00           | 11       | 0          | 0  | 1  | 0          | 0          | 0         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 25.00           | 12       | 0.28       | 0  | 0  | 0          | 0.72       | 0         | 0   | 0          | 0 | 1             |
| 20.00           | 13       | 0          | 0  | 0  | 0          | 0          | 0         | 0.3 | 0.7        | 0 | 1             |
| 7.00            | 14       | 0          | 0  | 0  | 0          | 0          | 0         | 0   | 0          | 1 | 1             |
| Espacio ocupado |          | 33         | 32 | 32 | 33         | 33         | 33        | 33  | 33         | 7 | 269           |

Figura 35 Fracciones de la demanda recolectadas en cada inmueble colapsado por cada vehículo o ruta ( $Y_{ik}$ ) para la solución no. 2 (Elaboración propia)

A partir de las fracciones recolectadas en cada inmueble colapsado por cada vehículo, las cantidades de residuos recolectadas por cada vehículo en cada inmueble colapsado se muestran en la **Figura 36**. Como puede observarse, los 8 vehículos de 33 m<sup>3</sup> y el vehículo de 7 m<sup>3</sup> tienen una utilización de su

capacidad mayor, además de que la distancia recorrida bajó 11% en comparación con la alternativa número 1.

| Residuos en i   | i/Ruta k | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9 | $\Sigma Wik$ |
|-----------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|---|--------------|
| 16.00           | 1        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 16 | 0  | 0  | 0 | 16           |
| 31.00           | 2        | 0  | 0  | 0  | 13 | 1  | 17 | 0  | 0  | 0 | 31           |
| 16.00           | 3        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 16 | 0 | 16           |
| 16.00           | 4        | 0  | 0  | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 16           |
| 16.00           | 5        | 0  | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 16           |
| 27.00           | 6        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 27 | 0  | 0 | 27           |
| 20.00           | 7        | 0  | 0  | 0  | 20 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 20           |
| 29.00           | 8        | 26 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 3  | 0 | 29           |
| 16.00           | 9        | 0  | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 16           |
| 14.00           | 10       | 0  | 0  | 0  | 0  | 14 | 0  | 0  | 0  | 0 | 14           |
| 16.00           | 11       | 0  | 0  | 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 16           |
| 25.00           | 12       | 7  | 0  | 0  | 0  | 18 | 0  | 0  | 0  | 0 | 25           |
| 20.00           | 13       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6  | 14 | 0 | 20           |
| 7.00            | 14       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 7 | 7            |
| Espacio ocupado |          | 33 | 32 | 32 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 7 | 269          |

Figura 36 Cantidad de residuos recolectada en cada inmueble colapsado por cada vehículo o ruta (Wik) para la solución no. 2 del SDVRP (Fuente: Elaboración propia)

El tipo de modelo VRP a elegir y las variables de entrada, tales como las capacidades de los vehículos y los periodos de planeación de las rutas, son decisiones que dependen completamente de los *emergency managers* y de muchos factores particulares de cada situación de desastre. Sin embargo, estos modelos dan soporte para mejorar la toma de decisiones y la eficiencia de los planes de gestión.

## 8. Resultados

Se definieron tres modelos con programación lineal mixta. El primer modelo de localización y asignación selecciona un número de sitios temporales dado de entre un conjunto de sitios disponibles para instalarlo y les asigna el grupo de inmuebles colapsados a los cuales darán servicio. Este modelo busca minimizar la distancia entre el sitio temporal y los inmuebles colapsados asignados tomando en cuenta el volumen de residuos generado en los inmuebles colapsados y la capacidad de almacenamiento de cada sitio temporal. El segundo modelo CVRP define rutas de recolección de los residuos para los inmuebles colapsados y el sitio temporal al que se encuentran asignados. Eso implica que el modelo CVRP se resuelve para cada sitio temporal seleccionado por el modelo de localización y asignación. De forma análoga al CRVP, el tercer modelo de tipo SDVRP define rutas de recolección con la diferencia de que este permite recolecciones en los inmuebles colapsados divididas entre varios vehículos, lo cual puede generar una disminución en la distancia recorrida e incrementar la utilización de la capacidad de los vehículos. Ambos modelos VRP buscan minimizar la distancia recorrida en la recolección de los residuos por sismo. Los tres modelos reducen la distancia como un parámetro proporcional al costo de transporte.

Los tres modelos desarrollados fueron validados a partir del caso de estudio del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, para el cual se hizo una recopilación de la información necesaria y las variables de entrada necesarias para la solución de los modelos.

### 8.1 Modelo de localización y asignación (LAP)

Para el caso de estudio, el modelo de localización y asignación determina la localización óptima de un solo sitio temporal en un lugar ubicado dentro de la ciudad de México conocido como “Centro de acopio y transferencia Cuemanco” perteneciente a la alcaldía Xochimilco (**Figura 37**). La localización de ese sitio temporal representa un costo total mínimo de \$590,766 pesos mexicanos. La sumatoria de las distancias entre cada uno de los 14 inmuebles colapsados del sismo de 2017 y el sitio temporal seleccionado es de 148 kilómetros, la cual es 79% menor que la del sitio más alejado y 45% menor que la del siguiente sitio más próximo. El sitio seleccionado pertenece a la lista de sitios autorizados por la Ciudad de México para el manejo y disposición de residuos de la construcción como se describió en la **Sección 4.6**.

Al solucionar el modelo con la selección de dos, como puede observarse en la **Tabla 14**, el costo de transporte se reduce un 0.72% mientras que el costo total aumentó en 33%. Para esta solución, el modelo envía al segundo sitio más cercano únicamente el 0.9% (16 m<sup>3</sup>) del total de residuos. Lo anterior es debido a que, aun restringiendo al modelo a seleccionar dos sitios, el primero de ellos continúa siendo el más cercano a la mayoría de los puntos de desastre y la decisión de ubicar dos sitios temporales no representa, para este caso de estudio, una alternativa viable.

Al condicionar la selección de tres sitios temporales, el costo de transporte se mantiene igual al que se tiene con dos sitios, debido a que el modelo no asigna ningún inmueble colapsado al tercer sitio, sin embargo, al seleccionarlo, el costo de instalación aumenta. En otras palabras, dada la condición inicial  $n \geq 3$ , se decide instalar el tercer sitio temporal pero no se utiliza para almacenar los residuos. El modelo no asigna inmuebles colapsados al tercer sitio temporal porque la capacidad de almacenamiento de los primeros dos sitios es suficientemente grande para todo el volumen generado y el costo de transporte es mínimo.

*Tabla 14 Costo para la selección de más de un sitio temporal para el caso de estudio desarrollado*

| n    | Costo de transporte | Costo de instalación | Costo total |
|------|---------------------|----------------------|-------------|
| 1.00 | 390,765.71          | 200,000.00           | 590,765.71  |
| 2.00 | 387,971.12          | 400,000.00           | 787,971.12  |
| 3.00 | 387,971.12          | 600,000.00           | 987,971.12  |

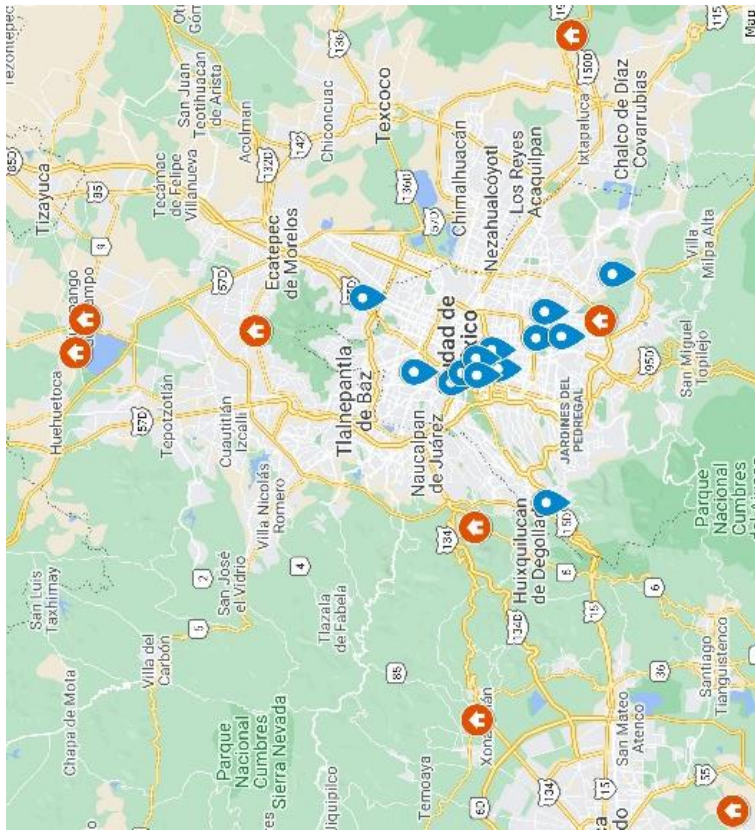
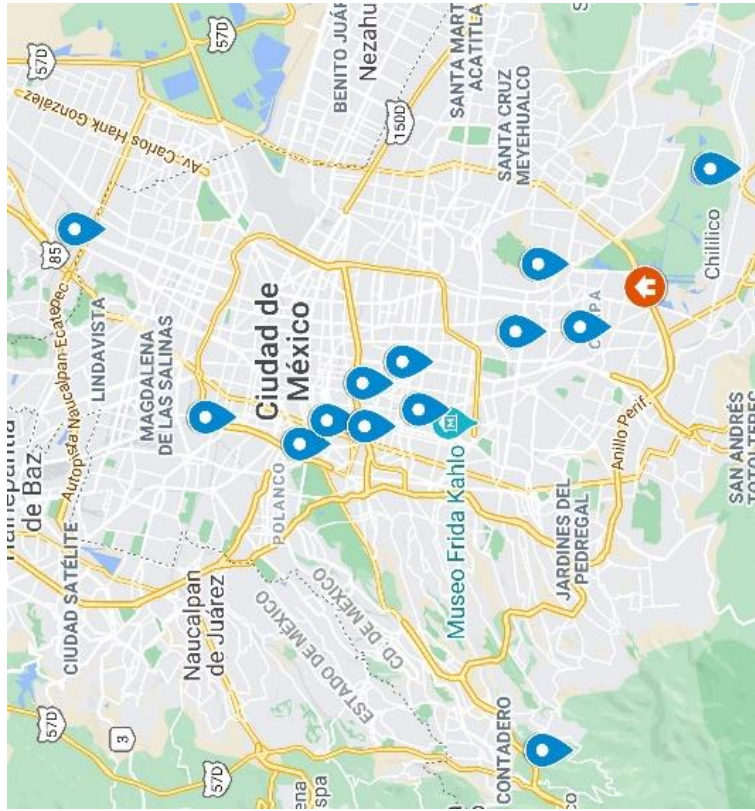


Figura 37 Sitios disponibles vs sitio seleccionado por el modelo de localización y asignación

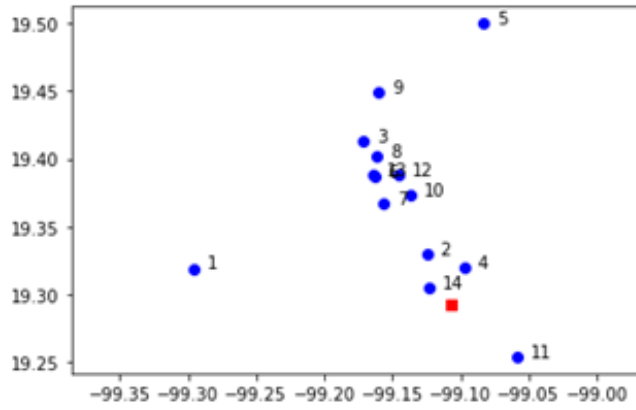


## 8.2 Modelos VRP

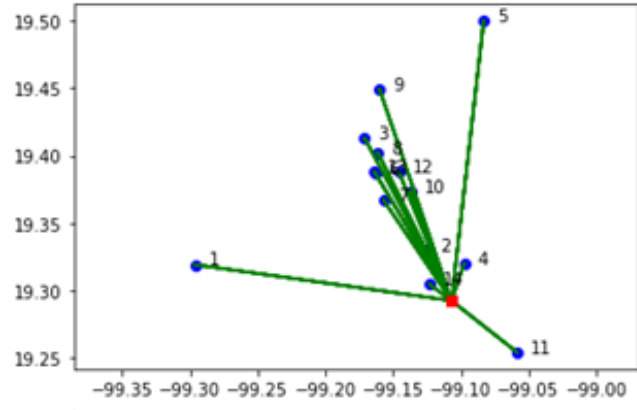
Para el sitio temporal seleccionado, la programación de rutas se hizo a partir de una metodología propuesta con el modelo VRP como herramienta de apoyo a la toma de decisiones. A partir de esta metodología las recolecciones se dividieron en aquellas que son iguales y son menores a la capacidad del vehículo. Las recolecciones iguales a la capacidad del vehículo implican ir a un solo inmueble colapsado para cargar todos los residuos que caben en el vehículo y llevarlos al sitio temporal. Esto dado los grandes volúmenes de residuos generados en algunos inmuebles colapsados. Las recolecciones menores a la capacidad son aquellas relativas a inmuebles colapsados con volúmenes de residuos pequeños y aquellos volúmenes remanentes de los inmuebles con grandes volúmenes de residuos después de una serie de recolecciones con capacidad completa. La definición de rutas para estas últimas se hizo a partir de los modelos VRP definidos. La **Figura 38** muestra las distancias para cada modelo VRP desarrollado en la **Sección 7.2.6**. A partir de estos resultados, la mejor programación y diseño de rutas se obtiene con la alternativa número 2 del modelo SDVRP con 9 rutas definidas una distancia recorrida de 1000 kilómetros para todo el proceso de recolección del caso de estudio abordado (**Figura 39**).

|         | Distancia recorrida (km)             |                                      | Total (km) |
|---------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------|
|         | Recolecciones iguales a la capacidad | Recolecciones menores a la capacidad |            |
| CVRP    | 780                                  | 242                                  | 1022       |
| SDVRP-1 | 780                                  | 225                                  | 1005       |
| SDVRP-2 | 780                                  | 220                                  | 1000       |

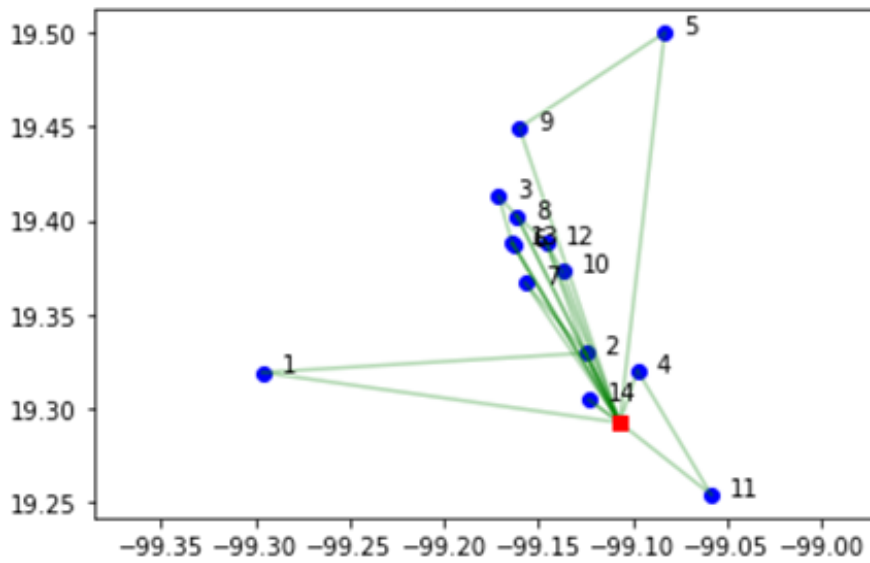
*Figura 38 Distancias para la recolección de residuos de acuerdo con los tipos de VRP desarrollados (Elaboración propia)*



39 (a)-Distribución geográfica de los inmuebles colapsados y el sitio temporal



39 (b)-Recolecciones iguales a la capacidad del vehículo



39 (c)-Recolecciones menores a la capacidad del vehículo

Figura 39 Solución gráfica del diseño de rutas para el caso de estudio de la Ciudad de México

## 9. Conclusiones

La gestión de residuos por un sismo tiene un papel importante en la respuesta a este tipo de eventos debido a que contribuye a la pronta liberación de las vías primarias, el restablecimiento de la normalidad y el desarrollo de las etapas de recuperación y reconstrucción de las áreas afectadas. Además, reduce los impactos ambientales que los residuos generan, pues estos tienen la oportunidad de ser valorizados e integrados en cadenas especializadas de reciclaje o bien ser tratados con estrategias de disposición final adecuadas. La logística involucrada en este proceso de gestión es primordial para alcanzar los objetivos temporales con el menor costo posible. La planeación de acciones previas al desastre, así como de aquellas de respuesta y toma de decisiones en la etapa posterior a este, también es un aspecto fundamental para contar con un marco de referencia que permita definir características operacionales y alcanzar los objetivos establecidos en la atención de emergencias. Sin embargo, debido a que el nivel de incertidumbre de este tipo de eventos es alto, un gran número de decisiones quedan abiertas a la evaluación del contexto en un escenario de desastre dado. La utilización de los modelos desarrollados en este trabajo son una herramienta útil para la evaluación de alternativas por medio del análisis de las variables de entrada, decisión y respuesta involucradas en los modelos, para cada situación en particular.

Los modelos aquí presentados pretenden ser una representación lo más cercana a la realidad, sin embargo, no lo son en su totalidad, por lo cual están sujetos a mejoras tales como; análisis más detallados de costos fijos y variables de transporte; la inclusión de otras variables relevantes; la coordinación con otros procesos de la gestión de residuos y en general de la etapa de respuesta al desastre; la operación del sitio temporal y las estrategias de reciclaje y disposición final, etc. También existe la posibilidad de desarrollar un modelo de localización de sitios y ruteo de vehículos en conjunto (LRP) para trabajos futuros.

Tal como el caso de gestión de residuos que son producto de un sismo, la localización de instalaciones y/o ubicaciones estratégicas de almacenes, centros de acopio, de atención médica, brigadas de apoyo, entre otros, es esencial para el manejo eficiente de las cadenas de suministro humanitarias y la logística en casos de una contingencia. Las acciones oportunas en estos casos procuran salvar vidas humanas y disminuyen las afectaciones e impactos en la sociedad y en el medio ambiente involucrados. Es necesario seguir trabajando sobre este eje de desarrollo para incrementar la resiliencia de la Ciudad de México ante este tipo de eventos y en un largo plazo de otras entidades políticas vulnerables del país.

## 10. Anexos

### 10.1 Código de programación para el modelo de localización y asignación LAP con CPLEX

```
1 /*****
2 * OPL 20.1.0.0 Model
3 * Author: adriana
4 * Creation Date: 8 feb. 2021 at 14:46:03
5 *****/
6 //Data
7 int n = ...;
8 float costo_unitario=...;
9 {string} derrumbes = ...;
10 {string} sitios = ...;
11 float costo_de_instalacion [sitios]=...;
12 float capacidad_de_almacenamiento [sitios]=...;
13 float residuos_generados[derrumbes] = ...;
14 float distancia [derrumbes][sitios] = ...;
15
16 //Variables
17 dvar boolean Instalar_sitio [sitios];
18 dvar float+ flujo_de_residuos [derrumbes][sitios];
19
20 //Objective
21 minimize
22     sum(i in derrumbes , j in sitios )
23     flujo_de_residuos[i][j]*costo_unitario*distancia[i][j]
24     + sum (j in sitios)
25     Instalar_sitio[j]*costo_de_instalacion [j];
26
27 //Constraints
28 subject to {
29     forall(i in derrumbes )
30         ctresiduos:
31             sum(j in sitios )
32             flujo_de_residuos [i][j] == residuos_generados[i];
33
34     forall( j in sitios )
35         ctalmacenamiento:
36             sum(i in derrumbes )
37             flujo_de_residuos [i][j]
38             <=capacidad_de_almacenamiento[j]*Instalar_sitio[j];
39         ctseleccion_de_sitios:
40             sum(j in sitios )
41             Instalar_sitio[j] >= n;
42 }
43
44 tuple flujo_de_residuosSolutionT{
45     string derrumbes;
46     string sitios;
47     int value;
48
49 };
```

```

1 /*****
2 * OPL 20.1.0.0 Data
3 * Author: adria
4 * Creation Date: 8 feb. 2021 at 14:46:03
5 *****/
6 n=1;
7 costo_unitario=25;
8 derrumbes={"Derrumbe 1","Derrumbe 2","Derrumbe 3","Derrumbe 4","Derrumbe 5",
"Derrumbe
6","Derrumbe 7","Derrumbe 8","Derrumbe 9","Derrumbe 10","Derrumbe 11","Derrumbe
12","Derrumbe
13","Derrumbe 14"};
9 sitios={"Sitio 1","Sitio 2","Sitio 3","Sitio 4","Sitio 5","Sitio 6","Sitio
7","Sitio 8"};
10
11 costo_de_instalacion = [200000, 200000, 200000, 200000,200000, 200000,200000,
200000];
12 capacidad_de_almacenamiento = [2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500,2500];
13
14 SheetConnection my_sheet("HOJADEDATOS_COORDENADAS_LAP.xlsx");
15 distancia from SheetRead(my_sheet,"distancias_lap");
16 residuos_generados from SheetRead(my_sheet,"residuos");
17 flujo_de_residuos to SheetWrite (my_sheet,"resultados_lap");
18 Instalar_sitio to SheetWrite (my_sheet,"resultados_sitios");

```

## 10.2 Código de programación para el modelo CVRP con CPLEX y Python

```
In [1]: import numpy as np
```

```
In [2]: import pandas as pd
```

```
In [3]: n = 14
Q = 33
N = [i for i in range(1, n+1)]
V = [0] + N
q = {1:16,2: 31, 3:16, 4:16,5: 16, 6:27,7: 20, 8:29, 9:16, 10:14,11:16,12: 25,13: 20, 14:7}
```

```
In [4]: N
```

```
Out[4]: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]
```

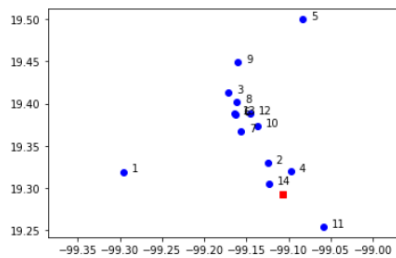
```
In [5]: data_locations=pd.read_csv("data_coordenadas.csv")
```

```
In [6]: loc_x = {i: data_locations.iloc[i][0] for i in V}
loc_y = {i: data_locations.iloc[i][1] for i in V}
```

```
In [7]: import matplotlib.pyplot as plt
```

```
In [8]: for i in N:
plt.scatter(loc_x[i], loc_y[i], c='b')
for i in N:
plt.annotate('%d' % (i), (loc_x[i]+0.01, loc_y[i]))
plt.plot(loc_x[0], loc_y[0], c='r', marker='s')
plt.axis('equal')
```

```
Out[8]: (-99.30825899999999, -99.046481, 19.241825000000002, 19.512095)
```



```
In [9]: A = [(i, j) for i in V for j in V if i != j]
c = {(i, j): 100*np.hypot(loc_x[i]-loc_x[j], loc_y[i]-loc_y[j]) for i, j in A}
```

```
In [10]: from docplex.mp.model import Model
```

```
In [11]: mdl = Model('CVRP')
```

```
In [12]: x = mdl.binary_var_dict(A, name='x')
u = mdl.continuous_var_dict(N, ub=Q, name='u')
```

```
In [13]: mdl.minimize(mdl.sum(c[i, j]*x[i, j] for i, j in A))
mdl.add_constraints(mdl.sum(x[i, j] for j in V if j != i) == 1 for i in N)
mdl.add_constraints(mdl.sum(x[i, j] for i in V if i != j) == 1 for j in N)
mdl.add_indicator_constraints(mdl.indicator_constraint(x[i, j], u[i]+q[j] == u[j]) for i, j in A if i != 0 and j != 0)
mdl.add_constraints(u[i] >= q[i] for i in N)
mdl.parameters.timelimit = 15
solution = mdl.solve(log_output=True)
```

```
In [14]: print(solution)
```

```
solution for: CVRP
objective: 241.515
x_0_2=1
x_0_3=1
x_0_4=1
x_0_6=1
x_0_8=1
x_0_9=1
x_0_11=1
x_0_12=1
x_0_13=1
x_0_14=1
x_1_0=1
x_2_0=1
x_3_1=1
x_4_10=1
x_5_0=1
x_6_0=1
x_7_0=1
x_8_0=1
x_9_5=1
x_10_0=1
x_11_0=1
x_12_0=1
x_13_0=1
x_14_7=1
u_1=32.000
u_2=31.000
u_3=16.000
u_4=16.000
u_5=32.000
u_6=27.000
u_7=27.000
u_8=29.000
u_9=16.000
u_10=30.000
u_11=16.000
u_12=33.000
u_13=20.000
u_14=7.000
```

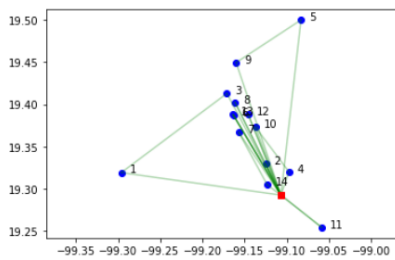
```
In [15]: solution.solve_status
```

```
Out[15]: <JobSolveStatus.OPTIMAL_SOLUTION: 2>
```

```
In [16]: active_arcs = [a for a in A if x[a].solution_value > 0.9]
```

```
In [18]: for i in N:
plt.scatter(loc_x[i], loc_y[i], c='b')
for i in N:
plt.annotate('%d' % (i), (loc_x[i]+0.01, loc_y[i]))
for i, j in active_arcs:
plt.plot([loc_x[i], loc_x[j]], [loc_y[i], loc_y[j]], c='g', alpha=0.3)
plt.plot(loc_x[0], loc_y[0], c='r', marker='s')
plt.axis('equal')
```

```
Out[18]: (-99.30825899999999, -99.046481, 19.241825000000002, 19.512095)
```



```
In [ ]:
```

## 10.3 Código de programación para el modelo SDVRP con CPLEX y Python

```
In [1]: import numpy as np
```

```
In [2]: import pandas as pd
```

```
In [3]: import math
```

```
In [4]: n = 14
N = [i for i in range(1, n+1)]
V = [0] + N
q = {1:16,2: 31, 3:16, 4:16,5: 16, 6:27,7: 20, 8:29, 9:16, 10:14,11:16,12: 25,13: 20, 14:7}
k = 9
K = [i for i in range(1, k+1)]
Q = {1:33, 2:33,3:33,4:33, 5:33, 6:33, 7:33,8:33,9:7}
```

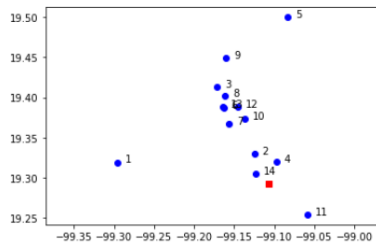
```
In [5]: data_locations=pd.read_csv("data_coordenadas.csv")
```

```
In [6]: loc_x = {i: data_locations.iloc[i][0] for i in V}
loc_y = {i: data_locations.iloc[i][1] for i in V}
```

```
In [7]: import matplotlib.pyplot as plt
```

```
In [8]: for i in N:
plt.scatter(loc_x[i], loc_y[i], c='b')
for i in N:
plt.annotate('%d' % (i), (loc_x[i]+0.01, loc_y[i]))
plt.plot(loc_x[0], loc_y[0], c='r', marker='s')
plt.axis('equal')
```

```
Out[8]: (-99.30825899999999, -99.046481, 19.241825000000002, 19.512095)
```



```
In [9]: A = [(i, j, k) for i in V for j in V if i != j for k in K]
B = [(i,k) for i in N for k in K]
c = {(i, j,k): 100*np.hypot(loc_x[i]-loc_x[j], loc_y[i]-loc_y[j]) for i, j, k in A}
```

```
In [10]: from docplex.mp.model import Model
```

```
In [11]: mdl = Model('CVRP')
```

```
In [12]: x = mdl.binary_var_dict(A, name='x')
y = mdl.continuous_var_dict(B, lb=0, ub=1, name='y')
d = mdl.continuous_var_dict(V, name='d')
w = mdl.continuous_var_dict(B, name='w')
u = mdl.continuous_var_dict(B, ub=33, name='u')
```

```
In [9]: A = [(i, j, k) for i in V for j in V if i != j for k in K]
B = [(i,k) for i in N for k in K]
c = {(i, j,k): 100*np.hypot(loc_x[i]-loc_x[j], loc_y[i]-loc_y[j]) for i, j, k in A}
```

```
In [10]: from docplex.mp.model import Model
```

```
In [11]: mdl = Model('SDVRP')
```

```
In [12]: x = mdl.binary_var_dict(A, name='x')
y = mdl.continuous_var_dict(B, lb=0, ub=1, name='y')
d = mdl.continuous_var_dict(V, name='d')
w = mdl.continuous_var_dict(B, name='w')
u = mdl.continuous_var_dict(B, ub=33, name='u')
```



```
In [13]: mdl.minimize(mdl.sum(c[i, j, k]*x[i, j, k] for i, j, k in A))

#continuidad de la ruta
mdl.add_constraints(mdl.sum(x[i, h, k] for i in V if i!=h) - mdl.sum(x[h, j, k] for j in V if j!=h) == 0 for h in V for k in K)
# La suma de las fracciones recolectadas en un nodo debe cumplir la demanda total de ese nodo
mdl.add_constraints(mdl.sum(y[i,k] for k in K) == 1 for i in N)
mdl.add_constraints(mdl.sum(w[i,k] for k in K) == q[i] for i in N)

#definir residuos recolectados en cada punto
mdl.add_constraints(w[i,k]== q[i]*y[i,k] for i,k in B)

#La cantidad recolectada en cada nodo no debe exceder la capacidad del vehículo
mdl.add_constraints(mdl.sum(q[i]*y[i,k] for i in N) <= Q[k] for k in K)

mdl.add_constraints(y[i,k] <= mdl.sum(x[i,j,k] for j in V if j!=i) for i,k in B)

#Restricciones del CVRP para eliminar sub recorridos
mdl.add_indicator_constraints(mdl.indicator_constraint(x[i, j, k], u[i,k]+y[j,k]*q[j] == u[j,k]) for i, j, k in A if i != 0 and j)
mdl.add_indicator_constraints(mdl.indicator_constraint(x[i,j,k], w[j,k] >= 0.000001) for i, j, k in A if i != j and j != 0)
mdl.add_constraints(u[i,k]>y[i,k]*q[i] for i in N)

mdl.parameters.timelimit = 1400

solution = mdl.solve(log_output=True)
```

```
In [15]: print(solution)
```

```
solution for: SDVRP
objective: 220.966
x_0_1_6=1
x_0_7_4=1
x_0_8_8=1
x_0_9_2=1
x_0_10_5=1
x_0_11_3=1
x_0_12_1=1
x_0_13_7=1
x_0_14_9=1
x_1_2_6=1
x_2_0_4=1
x_2_0_5=1
x_2_0_6=1
x_3_13_8=1
x_4_0_3=1
x_5_0_2=1
x_6_0_7=1
x_7_2_4=1
```

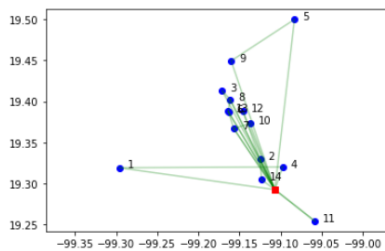
```
In [15]: solution.solve_status
```

```
Out[15]: <JobSolveStatus.FEASIBLE_SOLUTION: 1>
```

```
In [16]: active_arcs = [a for a in A if x[a].solution_value > 0.9]
```

```
In [17]: for i in N:
plt.scatter(loc_x[i], loc_y[i], c='b')
for i in N:
plt.annotate('%d' % (i), (loc_x[i]+0.01, loc_y[i]))
for i, j, k in active_arcs:
plt.plot([loc_x[i], loc_x[j]], [loc_y[i], loc_y[j]], c='g', alpha=0.3)
plt.plot(loc_x[0], loc_y[0], c='r', marker='s')
plt.axis('equal')
```

```
Out[17]: (-99.30825899999999, -99.046481, 19.241825000000002, 19.512095)
```



```
In [18]: fractions={y[i,k]:y[i,k].solution_value for i,k in B if y[i,k].solution_value > 0 }
```

```
In [19]: datos_y = {k : [y[i,k].solution_value for i in N] for k in K}
indices_y = [i for i in N]
```

```
In [20]: results_y = pd.DataFrame(data=datos_y, index=indices_y)
```

```
In [21]: print(results_y)
```

|    | 1   | 2        | 3   | 4        | 5   | 6        | 7   | 8        | 9   |
|----|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|
| 1  | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 1.0 |
| 2  | 0.0 | 0.741935 | 0.0 | 0.258065 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 3  | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 1.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 4  | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 1.0 |
| 5  | 1.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 6  | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 1.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 7  | 0.0 | 0.000000 | 0.7 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.3 | 0.000000 | 0.0 |
| 8  | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.586207 | 0.0 | 0.413793 | 0.0 |
| 9  | 1.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 0.000000 | 1.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 1.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 12 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 1.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |
| 13 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 1.000000 | 0.0 |
| 14 | 0.0 | 1.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 |

```
In [22]: results_y.to_csv("resultados_y.csv")
```

```
In [25]: R1={x[i,j,1]:x[i,j,1].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,1].solution_value > 0.9}
R2={x[i,j,2]:x[i,j,2].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,2].solution_value > 0.9}
R3={x[i,j,3]:x[i,j,3].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,3].solution_value > 0.9}
R4={x[i,j,4]:x[i,j,4].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,4].solution_value > 0.9}
R5={x[i,j,5]:x[i,j,5].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,5].solution_value > 0.9}
R6={x[i,j,6]:x[i,j,6].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,6].solution_value > 0.9}
R7={x[i,j,7]:x[i,j,7].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,7].solution_value > 0.9}
R8={x[i,j,8]:x[i,j,8].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,8].solution_value > 0.9}
R9={x[i,j,9]:x[i,j,9].solution_value for i in V for j in V if i!=j if x[i,j,9].solution_value > 0.9}
```

```
In [28]: datos_w = {k : [w[i,k].solution_value for i in N] for k in K}
indices_w = [i for i in N]
```

```
In [29]: results_w = pd.DataFrame(data=datos_w, index=indices_w)
```

```
In [30]: print(results_w)
```

|    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 16.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 2  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 13.0 | 1.0  | 17.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 3  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 16.0 | 0.0 |
| 4  | 0.0  | 0.0  | 16.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 5  | 0.0  | 16.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 6  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 27.0 | 0.0  | 0.0 |
| 7  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 20.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 8  | 26.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 3.0  | 0.0 |
| 9  | 0.0  | 16.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 10 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 14.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 11 | 0.0  | 0.0  | 16.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 12 | 7.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 18.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 |
| 13 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 6.0  | 14.0 | 0.0 |
| 14 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 7.0 |

```
In [ ]:
```

## 10.4 Artículo publicado en memorias IEOM

Como parte de la investigación desarrollada en esta tesis, se redactó el artículo científico “Location of a temporary site to earthquake waste separation. Case study: Mexico city”, el cual se encuentra publicado en las memorias del “5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IOEM 2020; United States” y fue presentado y expuesto en el congreso de forma virtual.

Las memorias se pueden consultar en la página oficial de la IEOM Society, <http://ieomsociety.org/detroit2020/proceedings/>

Además, el comité científico del congreso es reconocido por la base de datos SCOPUS por lo cual el artículo también se encuentra en el repositorio de dicha plataforma científica,

<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096561695&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=d32e3f79b2d5228d619c344d990be149&sot=b&sdt=b&sl=74&s=TITLE-ABS-KEY%28Location+of+a+temporary+site+to+earthquake+waste+separation%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm=>

## Documents

Montoya, A.G.A., Saucedo, Á.L.B., Padilla, F.H.

### **Location of a temporary site to earthquake waste separation. Case study: Mexico city**

(2020) *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, (August), .

Mechanical and Industrial Engineering Division, School of Engineering, National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico

#### **Abstract**

After the 2017 earthquake in Mexico City, the project "Earthquake Waste Management Proposal in Mexico City" was launched, which includes the removal of waste from the disaster site to a temporary site separation, the last is a temporary storage and waste classification site, that is used before waste being sent to their respective recycling chains or for their proper final disposal. This work presents the optimal location of the temporary site based on the transportation model of Mixed Integer Linear Programming, which evaluates the average distance between the collapsed buildings caused by the earthquake and the sites authorized by the Government of the Mexico City, to select n temporary sites whose distance is minimal. The methodology of the present study includes the application of the transportation model, to case study earthquake of September 19th, 2017 in Mexico City, considering next constraints: 14 collapse buildings, 8 possible sites according to official data provided, 1878.63 m<sup>3</sup> (97.83 ton) earthquake waste generation according with previous estimations by the same Project and the location of a single temporary site. The results show that the minimum distance traveled between the points of origin and destination is 51% less than that of the farthest site. © IEOM Society International.

#### **Author Keywords**

Earthquake Solid Waste; Earthquake Waste Management; Installation Location; Mixed Integer Linear Programming; Temporary Solid Waste Separation Site

#### **Funding details**

Universidad Nacional Autónoma de MéxicoUNAMTA101119

This research was financed with resources from the Program of Support for Research Projects and Technological Innovation (PAPIIT, by its name in Spanish: Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica) of National Autonomous University of Mexico. Project number TA101119.

#### **References**

- Anglica, Luz, Hernández, Gradilla  
**Consideraciones Para La Gestión de La Logística Humanitaria Postdesastre**  
(2015) *Instituto Mexicano Del Transporte*, (433), p. 46.
- Brown, Charlotte  
**Disaster Waste Management: A Review Article**  
(2011) *Waste Management*, 31 (6), pp. 1085-1098.  
Elsevier Ltd
- Brown, Charlotte, Milke, Mark  
**Recycling Disaster Waste: Feasibility, Method and Effectiveness**  
(2016) *Resources, Conservation and Recycling*, 106, pp. 21-32.  
Elsevier B.V
- **Comisión para la reconstrucción, recuperación y transformación de la ciudad de México, en una C. cada vez más resiliente**  
(2018) *Sexto Informe de Gobierno, CDMX*,
- Cornejo Sánchez, Christian, Puente, Miguel Mejía

**The Mixed Integer Linear Programming Model for the Import Planning in Definitive Customs Regime PART I**

(2005) *Industrial Data*,

- Eiselt, H. A., Sandblom, C. L.  
(2007) *Linear Programming and Its Applications*,  
Springer
- Goodell Brown, Robert, Easterfield, T. E.  
**A Proposed Definition of Operations Research**  
(2015) *Operational Research Society and Palgrave Macmillan Journals on Behalf of the Operational Research Society*, 2 (2), pp. 21-24.
- Hobeika, Antoine G.  
**Transportation Problems and Needs in the Aftermath of the 1985 Mexico City Earthquake**  
(1987) *FMHI Publications, Institute of Behavioral Science*, 6.
- Ramírez, Reyes, Gerardo, Alan, Rojas Nava, Marco Antonio  
*Propuesta de Gestión de Residuos Sólidos Por Sismo Caso de Estudio: Ciudad de México, 2017*,  
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2020
- Rodríguez, Havidán  
(2007) *Handbook of Disaster Research*,  
Springer
- Scott, Allen J.  
**Location-Allocation Systems: A Review**  
(1970) *Geographical Analysis*, 2 (2), pp. 95-119.
- (2017) *Sismología de México*,  
Sistema Geológico Mexicano. Taha, Hamdy A. Investigación de Operaciones. 9th ed.,  
PEARSON EDUCACIÓN, 2012
- Tatjana, Samsonowa  
**Contributions to Management Science**  
(2012) *lcclab.NI*,
- Winston, Wayne L., Goldberg, Jeffrey B.  
(2004) *Operations Research: Applications and Algorithms*,  
4th ed., CENGAGE Learning

**Sponsors:** CINTAS; EATON Powering Business worldwide; EFR Certification; SIEMENS; ToolingTechGroup

**Publisher:** IEOM Society

**Conference name:** Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IOEM 2020

**Conference date:** 10 August 2020 through 14 August 2020

**Conference code:** 144118

**ISSN:** 21698767

**Language of Original Document:** English

**Abbreviated Source Title:** Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manage.  
2-s2.0-85096561695

**Document Type:** Conference Paper

**Publication Stage:** Final

**Source:** Scopus



# **Location of a Temporary Site to Earthquake Waste Separation. Case Study: Mexico City**

**Adriana Guadalupe Aguilar Montoya**

**Ángel Leonardo Bañuelos Saucedo**

**Flor Hernández Padilla**

Mechanical and Industrial Engineering Division

School of Engineering

National Autonomous University of Mexico, Mexico City.

[adriana.agmt@gmail.com](mailto:adriana.agmt@gmail.com), [anleba17@hotmail.com](mailto:anleba17@hotmail.com), [florhp@comunidad.unam.mx](mailto:florhp@comunidad.unam.mx)

## **Abstract**

After the 2017 earthquake in Mexico City, the project “Earthquake Waste Management Proposal in Mexico City” was launched, which includes the removal of waste from the disaster site to a temporary site separation, the last is a temporary storage and waste classification site, that is used before waste being sent to their respective recycling chains or for their proper final disposal. This work presents the optimal location of the temporary site based on the transportation model of Mixed Integer Linear Programming, which evaluates the average distance between the collapsed buildings caused by the earthquake and the sites authorized by the Government of the Mexico City, to select  $n$  temporary sites whose distance is minimal. The methodology of the present study includes the application of the transportation model, to case study earthquake of September 19<sup>th</sup>, 2017 in Mexico City, considering next constraints: 14 collapsed buildings, 8 possible sites according to official data provided, 1878.63 m<sup>3</sup> (97.83 ton) earthquake waste generation according with previous estimations by the same Project and the location of a single temporary site. The results show that the minimum distance traveled between the points of origin and destination is 51% less than that of the farthest site.

## **Keywords**

Earthquake Solid Waste, Earthquake Waste Management, Temporary Solid Waste Separation Site, Installation Location, Mixed Integer Linear Programming

## **1. Introduction**

Mexico is in an area with high seismic activity because it is located within the area known as the Circumpacific Belt or Ring of Fire, a place that releases between 80 and 90% of the Earth's annual seismic energy, and on the interaction of five tectonic plates (Sistema Geológico Mexicano, 2017). Given the high probability of occurrence of environmental disasters in Mexico, it is necessary to have emergency and response plans that attend the most urgent needs of victims, as well as the subsequent recovery and reconstruction processes in the affected areas. An important part in the elaboration of these plans involves the definition of strategies related to the management of waste generated by the disaster. This was motivated by the fact that efficient waste management influences the environmental impact caused by these events, the public health of the population involved and the process of recovering normality (Brown et al.).

After the 2017 earthquake in Mexico City, the project “Earthquake Waste Management Proposal in Mexico City” was launched, which includes the removal of waste from the disaster site to a temporary site separation, which is a temporary storage and waste classification site before being sent to their respective recycling chains or for their proper final disposal. This strategy allows the recovery of the waste generated by the earthquake and reduction of the environmental damages.

In this type of chaotic and complex circumstances the time is a key factor in safeguarding human lives that are in danger therefore the location of temporary sites with a minimum distance to disaster sites contributes to the prompt release of primary routes, the timely care of affected people and the reduction of risks to public health due to the

presence of organic waste in collapsed buildings. This work presents the formulation of an Operations Research model to determine the optimal locations of  $n$  temporary sites with a minimum distance to the disaster points.

## **2. Literature review**

Disaster mitigation, preparedness, response and recovery issues must be at the forefront not only to generate knowledge that is of interest to researchers, but also to provide the basis for decision-making by the planners, emergency managers and other professionals involved. Community recovery is associated with infrastructure and lifelines that are critical to the operations of other systems such as transportation, electricity, water, and waste disposal. Launching business and mobility is also vital to revive economic activities that provide economic resources in the form of salaries, as well as goods and services (Rodríguez et al.). For example, in the 1985 earthquake in Mexico City, the street and highway network faced problems such as the reduction in the capacity of the transportation network mainly due to blockages caused by structures that collapsed on the streets and aggravated by the debris of collapsed buildings stored on the streets while search, rescue, demolition and cleaning-up activities progressed (Hobeika et al.). Efficient waste management, outside affected areas, contributes to the prompt restoration of normality. The quality of logistics activities during the reconstruction phase can greatly impact the success of the entire disaster recovery process, especially in terms of long-term sustainability and effectiveness (Anglica and Hernández).

The waste generated by earthquake has the potential to be recovered and integrated into specialized recycling chains within Mexico City. These materials can be recycled in existing markets or can be used in post-disaster applications. However, due to the high complexity of the composition of the waste, these require specific classification, separation and handling criteria in order to be valued and sent to the city's recycling centers or sanitary landfills (Reyes Ramírez and Rojas Nava). The benefits of recovering materials from earthquake waste include reducing space in landfills, reducing demand for raw materials, reducing waste management costs (this depends on the relative costs of waste management, including transportation) and job creation (Brown and Milke). The temporary separation site takes on importance within waste management as a place of storage and execution of the necessary operations. The location of the temporary site largely determines the distance, time and cost involved in the management of waste by earthquake. The planning and evaluation of alternatives, with the help of facility location tools and mathematical models developed by disciplines like Operations Research, facilitate decision making and improve the performance of management plans.

The location of facilities is widely used both in the private (industrial plants, banks, shops, etc.), and the public sector (hospitals, postal stations, etc.) and influences numerous operational and logistical decisions (Tatjana). Location and allocation problems determine the best configuration of one or more facilities. The usual practical interpretation of this type of problems is the existence of a social or economic system that need to assign a set of flows between a series of facilities or points of origin and a series of geographically dispersed destinations. The problem is, simultaneously, locating the facilities and determining an allocation of flows, so that the total operating costs of the system are as low as possible. In its most general form, the allocation and location problem is divided into two basic paths as explained below. If the locations of all the facilities are known in advance, but the allocation of flows between the set of facilities and some other set of points is unknown, the problem becomes the ordinary linear programming transport problem. If flow allocation is known, but the geographic arrangement of facilities is unknown, then the problem is a pure location problem and will generally be treated as the classic Weber problem of space economics (Scott).

Operations Research is the quantitative study of the operations of a complex organization and the prediction of the effects of changes in conditions for the guidance of executives in obtaining the maximum effectiveness with the available resources (Goodell Brown and Easterfield). Linear programming is a subset of mathematical programming that is part of Operations Research. Mathematical programming problems are models that try to describe a real-life situation. It does this by using variables and parameters represented by numbers. Although the parameters are numbers known to the decision maker and are taken as a fixed data, the variables are numbers whose values will be determined in the decision process. One of the basic assumptions of linear programming is the deterministic property, which means that we assume that the structure of the problem, as well as all the parameters of the problem, are known with certainty (Eiselt and Sandblom).

The transportation model is a type of linear programming that determines the quantity of goods that must be sent from  $i$  sources (facilities) to  $j$  destinations (warehouses or distribution centers) with the objective of minimizing transport costs by satisfying supply and demand limits (Taha). The model can be easily visualized through two matrices, one of



costs and the other of flows. The characteristics of the transportation problem are summarized as follows: 1) each destination point has a specific demand that must be met, 2) each origin point can only provide a certain number of units that are to be transported, that is, it has a determined offer, 3) the objective is to minimize the total cost of transportation, according to the costs related to the selected route plan, 4) the cost of distribution is directly proportional to the quantity of items that it distributes or transports, 5) the problem has feasible solution only if the total quantity available from all sources is greater than or equal to the total demand of the destinations (Winston and Goldberg).

The transportation model in its most basic form can assign material flows to all destinations considered; however, for this work it is necessary to include a selection criterion that assigns the flows only to a number  $n$  of destinations. It is possible with the inclusion of a binary variable whose value determinate the selection of the temporary sites that imply the optimal cost. When only some of the variables need to be integers and the rest are continuous, the model is called a Mixed Integer Linear Programming problem. Within this classification, those models include non-negative integer variables, continuous variables and binary variables (Cornejo Sánchez and Puente).

### **3. Methodology**

The methodology followed includes the problem definition, the identification of the input, decision and response variables involved in the phenomenon to be modeled, obtaining information from previous data within the same project, the construction of an influence diagram to relate all the variables of the model, the formulation of the mathematical relationship of the transportation model and finally the verification and validation of the model for the case study of the earthquake of September 19, 2017 in Mexico City, through a resolution optimization problems software.

#### **3.1 Problem Definition**

For the Mexico City case study, the points of origin are known from the collapsed buildings that occurred in the 2017 earthquake and the destination points as the available sites according to the Government of Mexico City. Given the above, the development of a Mixed Integer Linear Programming transport model is necessary. The debris resulting from the earthquake will be transported in trucks, at the end of search and rescue activities, to be sent to temporary storage and separation sites. The objective of the model is to select, from several available sites,  $n$  temporary sites that can receive the total amount of household waste by earthquake scenario in Mexico City. In addition, it must allocate the waste flow between each collapsed building and the selected temporary sites with the minimum total cost and distance. The decision of a single or more than one temporary sites is open to the evaluation of the needs that a certain disaster circumstance requires, in other words, the model should give the liberty to choose as many temporary sites as the decision maker needs to install, at the least cost that this decision implies.

#### **3.2 Variables**

The management strategy establishes that the waste that is sent to the temporary site includes that classified as household and excludes the waste from construction and demolition (C&D), such as masonry, concrete, drywall, ceramic, etc. C&D are not considered because they are mostly classified *in situ* and sent directly for recycling or final disposal. Similarly, the temporary site is designed to receive only household waste from residential buildings that had collapsed immediately after the earthquake. The waste from buildings scheduled for demolition, after the earthquake, are excluded because there is the possibility of recovering household goods. In the 2017 earthquake, 14 residential buildings were totally and partially collapsed at the time of the earthquake (Comisión para la reconstrucción, recuperación y transformación de la ciudad de México). The parameters or input variables to the model, regarding the amount of household waste that must be transported, are taken from a previous research within the same project, in which the characterization, classification and estimation of the amount of waste by earthquake was carried out. This research was developed according with Mexican standards and based on data from the earthquake of September 19, 2017. Table 1: Estimate of waste generated by collapsed building, shows the estimate of waste generated by each residential building collapsed at the time of the 2017 earthquake.

Table 1. Estimate of waste generated by collapsed building (Reyes Ramírez and Rojas Nava).

| No. | Address  | Number of individual household | Weight [ton] | Volume [m <sup>3</sup> ] |
|-----|--|--------------------------------|--------------|--------------------------|
| 1   | Temascaltitla No. 4, Col. Santa Rosa Xochiac. Alc. Álvaro Obregón.                                   | 1                              | 0.80         | 15.40                    |
| 2   | Av. Santa Ana esq. Ejido Santa Cruz Atoyac, Col. Ex Ejido de San Francisco Culhuacán. Alc. Coyoacán. | 2                              | 1.60         | 30.80                    |
| 3   | Amsterdam No. 107 esq. Laredo, Col. Hipódromo. Alc. Cuauhtémoc.                                      | 16                             | 12.83        | 246.38                   |
| 4   | Paseo de las galias No. 47, Col. Lomas Estrella 2da sección. Alc. Iztapalapa.                        | 16                             | 12.83        | 246.38                   |
| 5   | Avenida 323 No. 655 esq. Avenida 314, Col. Nueva Atzacualco. Alc. Gustavo A. Madero.                 | 1                              | 0.80         | 15.40                    |
| 6   | Edimburgo No. 4 esq. Escocia, Col. Del Valle. Alc. Benito Juárez.                                    | 21                             | 16.84        | 323.37                   |
| 7   | Prolongación Petén No. 915, Col. Emperadores. Alc. Benito Juárez.                                    | 12                             | 9.62         | 184.78                   |
| 8   | Viaducto Presidente Miguel Alemán No. 106 esq. Torreón, Col. Piedad Narvarte. Alc. Benito Juárez.    | 4                              | 3.21         | 61.59                    |
| 9   | Salvador Díaz Mirón No. 151, Col. Santa María la Rivera. Alc. Cuauhtémoc.                            | 1                              | 0.80         | 15.40                    |
| 10  | Bretaña No. 90, Col. Zacahuitzco. Alc. Benito Juárez.  | 3                              | 2.41         | 46.20                    |
| 11  | Insurgentes esq. Vicente Guerrero, Col. San Gregorio Atlapulco. Alc. Xochimilco.                     | 1                              | 0.80         | 15.40                    |
| 12  | Niños Héroes No. 173 esq. Galicia, Col. Niños Héroes. Alc. Benito Juárez.                            | 8                              | 6.42         | 123.19                   |
| 13  | Escocia No. 4 esq. Gabriel Mancera, Col. Del Valle Centro. Alc. Benito Juárez.                       | 12                             | 9.62         | 184.78                   |
| 14  | Rancho de los Arcos No. 32, Col. Los Girasoles. Alc. Coyoacán.                                       | 24                             | 19.25        | 369.57                   |

For these collapsed buildings, the distances between each of them and the available sites within Mexico City were determined with the help of the Google Maps tool. The distances were calculated from an average of up to three existing routes provided by the tool. Table 2: Distances in km between collapsed building  $i$  and available site  $j$ , shows the associated distance matrix.

Table 2. Distances in km between collapsed building  $i$  and available site  $j$

| $i/j$ | 1.00  | 2.00  | 3.00  | 4.00  | 5.00  | 6.00  | 7.00  | 8.00  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 36.15 | 29.75 | 55.95 | 58.50 | 65.70 | 57.63 | 63.07 | 57.03 |
| 2     | 47.57 | 45.47 | 79.70 | 38.25 | 41.85 | 81.60 | 48.10 | 73.33 |
| 3     | 31.50 | 32.97 | 73.10 | 38.20 | 56.05 | 74.95 | 42.10 | 69.47 |
| 4     | 54.40 | 55.90 | 75.70 | 39.40 | 34.80 | 77.60 | 47.70 | 81.00 |
| 5     | 42.87 | 44.37 | 85.55 | 19.70 | 47.25 | 93.30 | 27.57 | 81.23 |
| 6     | 37.17 | 36.90 | 73.17 | 35.45 | 41.60 | 75.07 | 43.97 | 73.80 |
| 7     | 41.40 | 41.10 | 77.67 | 40.05 | 44.40 | 79.57 | 46.07 | 78.37 |
| 8     | 35.53 | 35.27 | 73.45 | 34.93 | 39.70 | 75.35 | 41.93 | 74.15 |
| 9     | 31.37 | 34.20 | 73.10 | 32.60 | 58.43 | 75.00 | 38.63 | 68.47 |
| 10    | 38.53 | 38.27 | 81.15 | 36.20 | 40.80 | 83.05 | 42.83 | 80.87 |

|    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11 | 58.10 | 59.60 | 79.40 | 51.00 | 30.87 | 81.30 | 69.70 | 84.70 |
| 12 | 37.97 | 37.63 | 75.75 | 32.00 | 40.30 | 77.60 | 40.60 | 71.93 |
| 13 | 37.23 | 36.93 | 73.20 | 35.25 | 41.40 | 75.10 | 42.53 | 65.10 |
| 14 | 50.60 | 52.10 | 71.90 | 42.70 | 45.05 | 73.80 | 55.40 | 77.20 |

This research also includes a design proposal for the temporary site that is limited to the layout, organized by storage cells for each type of waste, and the operational characteristics for its proper management. For purposes of this paper, it is assumed that all temporary sites are the same in design, dimensions, and operation. Each temporary site has an associated installation cost and storage capacity that should be considered as input variables for the transportation model.

Based on the operational characteristics of the proposed site and the characterization and estimation of waste made by Reyes and Rojas, the total capacity of the temporary site was calculated. The volumetric capacity of the temporary site was calculated from the available space per storage cell, the dimensions and the number of racks and containers that each cell can accommodate, as well as the characteristic weights and volumes of the type of waste to be stored. For bulky waste, no containers are used therefore to calculate the volumetric capacity, the area of land destined to store this waste was multiplied by an average height of two meters. The storage weight capacity was calculated through a conversion factor for each type of residue. This factor was calculated according to the weight / volume relationship from the previous waste characterization data. Table 3: Temporary site capacity per storage cell, shows the capacity per storage cell of the temporary site for bulky and non-bulky waste.

Table 3. Temporary site capacity per storage cell

| Classification  | Storage cell                    | Container volume (m <sup>3</sup> ) | Number of containers available | Available volume (m <sup>3</sup> ) | Conversion factor | Weight (ton) |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------|
| Non-bulky waste | Electrical items                | 0.057                              | 960                            | 55.450                             | 0.128             | 7.13054043   |
|                 | Organic and biodegradable waste | 1.2                                | 204                            | 244.8                              | 1                 | 244.8        |
|                 | Packaged food                   | 1.2                                | 204                            | 244.8                              | 0.496             | 121.487      |
|                 | Paper and cardboard             | 0.057                              | 360                            | 20.793                             | 0.553             | 11.512       |
|                 | Plastics                        | 0.057                              | 492                            | 28.418                             | 0.058             | 1.664        |
|                 | Glass                           | 0.057                              | 240                            | 13.862                             | 0.321             | 4.456        |
|                 | Metals                          | 0.057                              | 360                            | 20.793                             | 0.224             | 4.664        |
|                 | Textiles                        | 0.057                              | 480                            | 27.725                             | 0.035             | 0.986        |
|                 | Infectious biological waste     | 1.1                                | 450                            | 495                                | 0.008             | 4.362        |
|                 | Personal property               | 0.057                              | 240                            | 13.862                             | 0.046             | 0.641        |
|                 | Non- recyclable solid waste     | 0.057                              | 60                             | 3.465                              | 0.034             | 0.120        |
|                 | Leftover rubble                 | 1.2                                | 80                             | 96                                 | 0.115             | 11.071       |
|                 | Contaminated waste              | 1.1                                | 450                            | 495                                | 0.059             | 29.583       |
| Bulky waste     | Hazardous waste                 | 1.1                                | 450                            | 495                                | 0.293             | 145.465      |
|                 | Furniture                       | -                                  | -                              | 31650.273                          | 0.040             | 1273.997     |
|                 | White goods (large volumen)     | -                                  | -                              | 4621.72                            | 0.054             | 250.855      |

The storage capacity of the temporary site per storage cell cannot be taken individually as a constraint for the transportation model because the wastes within the debris are mixed at the time of removal from the disaster site and the amount of each type of waste will not be known with certainty until they are separated into the temporary site. However, assuming that the design of the temporary site is based on the composition of waste observed in the 2017 earthquake and its proportion in relation to the estimated total, the sum of the available storage volumes per each storage cell provides us a reference of the total storage capacity of the temporary site. Table 4: Temporary site storage capacity, shows the capacity in volume and estimated weight of the temporary separation site.

Table 4. Temporary site storage capacity

| Waste type     | Area (m <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> ) | Weight (ton) |
|----------------|------------------------|--------------------------|--------------|
| Non-bulky      | -                      | 2,254.97                 | 587.95       |
| Bulky          | 18135.9966             | 36,271.99                | 1,524.85     |
| Total capacity |                        | 38,526.97                | 2,112.80     |

The dimensional unit of the storage capacity of the temporary site must be defined based on the units of load of the debris and the unit cost of transport in order to maintain dimensional coherence in the transportation model. The unit cost of transportation will be defined, as is common, in units of Mexican pesos per cubic meter per kilometer traveled. In this way, the amount of waste and the capacity of the site will be managed in cubic meters for the purposes of the model.

The installation cost of the temporary site and the unit cost of transportation are parameters whose variability is high over time, therefore it is recommended to make an initial estimate at the time of the disaster of the installation cost, according to the operational characteristics of the site described in previous works, and an estimate of the unit cost of transportation given by service providers.

Retaking, the transportation model must take as input data; the location and number of collapsed buildings at the time of the earthquake, the estimated initial amount of household waste by each collapsed building, the number and location of sites available for the installation of the temporary site, the storage capacity and the cost installation of the temporary site and the unit cost of transportation.

### 3.3 Influence diagram

The influence diagram shows the relationships between the variables involved in the model in order to define a mathematical relationship of the transportation model and its restrictions. The highest level of the diagram represents the decision variable which is the total cost. The following levels represent each of the input and decision variables that intervene in the calculation of the response variable and are involved in modeling and solving the problem. The relationships between variables are defined from mathematical operations that must be represented in the objective function and the restrictions of the linear program. For example, the sum of transportation cost and the installation cost is the mathematical operation to calculate the total cost, while these variables depending of others to also be calculated. The influence diagram that shows the relationships between the variables described in section 3.2 is represented in figure 1: Model influence diagram.

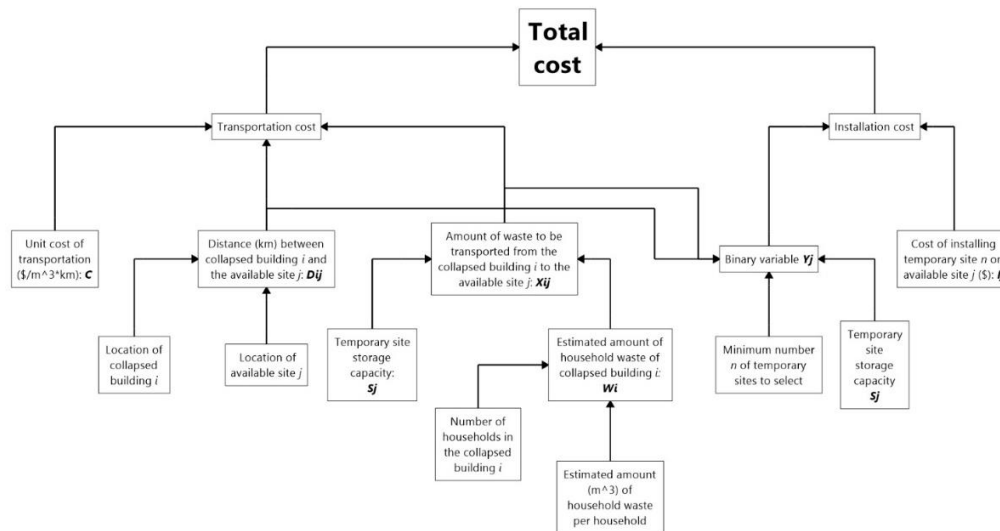


Figure 1. Model influence diagram

### 3.4 Mathematical relationship

For the application of the transportation model, the collapsed buildings by the earthquake are considered as the points of origin  $i$  and the available sites  $j$  as the points of destination. For each collapsed building there is a quantity of household waste that needs to be transported to the temporary separation sites, this quantity will take the value of  $X_{ij}$ . According with the conventional terms of the transportation model, the production capacity will be the amount of household waste generated in each collapsed building, while the demand will be represented by the waste storage capacity of the selected temporary sites. The model must select  $n$  temporary sites and determine the allocation of the quantities to be transported to each of them, minimizing the total cost of transportation and installation. The development of the general transport model is detailed below, according to the influence diagram shown in figure 1.

#### 1.1.1 Model notations

The transportation model formulation is based on the following notations:

- $i$ : collapsed building
- $j$ : available site
- $l$ : total collapsed buildings
- $m$ : total available sites
- $n$ : number of selected temporary sites

#### 1.1.2 Decision variables

$X_{ij}$ : Amount of waste to be transported from the  $i$  collapsed building to the  $j$  available site [ $m^3$ ]

$C$ : Unit cost of transportation  $\left[ \frac{\$}{km * m^3} \right]$

$I_j$ : Cost to install the  $j$  temporary site

$D_{ij}$ : Distance between collapsed building  $i$  and available site  $j$

$W_i$ : Waste generated in the collapsed building  $i$

$S_j$ : Storage capacity of the  $j$  available site

$$X_{ij}, C_{ij}, W_i, S_j \in \mathbb{R}^+$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, l$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$Y_j: \begin{cases} 1 & \text{If site } j \text{ is chosen} \\ 0 & \text{another case} \end{cases}$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, j = 1, 2, \dots, n$$

#### 1.1.3 Objective Function

The function aims to minimize the total cost of transportation, associated with a shorter distance, of the amounts of household waste by earthquake at each collapsed building to the temporary separation sites. The installation cost accompanies the binary variable as a selection criterion for the temporary sites. The optimal solution tends to minimize the cost of installing the sites, in addition to the cost of transporting the waste to each of them.

$$\min Z = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m C D_{ij} X_{ij} + \sum_{j=1}^m I_j Y_j$$

#### 1.1.4 Constraints

The number of temporary sites that the model selects is a decision to be made based on each disaster situation. The criteria of minimization of the total cost, which refers to the joint cost of installation and transportation, or solely the minimization of the cost of transportation (possibly associated with a smaller distance, but with a greater number of connected sites) can be used due to prioritization of recovery time over total cost or vice versa. Other influencing factors are the degree of affectation of the earthquake, the total estimated amount of waste, the availability of human, technical and financial resources, the locations and the number of available sites, among other particular aspects given at the time of the earthquake. Thus, it will be necessary to enter the model the number of temporary sites that are required to install through the restriction to select at least  $n$  temporary sites:

$$\sum_{j=1}^n Y_j \geq n$$

For  $n \geq 1$

The amount of waste generated at a collapsed building must be removed completely, regardless of whether it is destined for more than one temporary site or not. This restriction is met through:

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = W_i$$

For  $i = 1, \dots, l$

The storage capacity of a temporary site will only be considered if it is selected by the model. The storage capacity constraint includes the binary variable to ensure that waste will be sent to the site only if it has been selected, such as:

$$\sum_{i=1}^l X_{ij} = S_j Y_j$$

For  $j = 1, \dots, m$

### **3.5 Verification and validation of the model**

The verification and validation of the model was performed using the observations and data obtained for the earthquake of September 19, 2017 in Mexico City as is described in section 3.2. The assumptions are the following: the selection of a single temporary waste separation site, an installation cost of the temporary site of 200,000 Mexican pesos, and an average unit cost of transportation (to date) of 24.20 Mexican pesos per cubic meter per kilometer traveled. The optimization problem was solved using the Excel spreadsheet and the specialized software LINGO. The results in both software's were consistent, however, Excel allows a better visualization and manipulation of the data, as well as the input and solution of the model through the Solver complement. Figure 2: Solution of the transportation model through the solver plugin of the Excel software, shows a section of the spreadsheet used to verify the transportation model, it includes the matrix of flows or amounts of waste that are assigned to the selected temporary site. The model solution determines the available site number 4 as the optimal location. The site number 4 is located in Zumpango in the State of Mexico and represents a minimum total cost of 1,735,445.69 Mexican pesos.

Distance Matrix  $D_{ij}$  (km)

|                         |    | Temporary site $j$ |        |          |        |        |          |        |          |
|-------------------------|----|--------------------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|----------|
|                         |    | 1                  | 2      | 3        | 4      | 5      | 6        | 7      | 8        |
| Collapsed buildings $i$ | 1  | 36.15              | 29.75  | 55.95    | 58.50  | 65.70  | 57.63    | 63.07  | 57.03    |
|                         | 2  | 47.57              | 45.47  | 79.70    | 38.25  | 41.85  | 81.60    | 48.10  | 73.33    |
|                         | 3  | 31.50              | 32.97  | 73.10    | 38.20  | 56.05  | 74.95    | 42.10  | 69.47    |
|                         | 4  | 54.40              | 55.90  | 75.70    | 39.40  | 34.80  | 77.60    | 47.70  | 81.00    |
|                         | 5  | 42.87              | 44.37  | 85.55    | 19.70  | 47.25  | 93.30    | 27.57  | 81.23    |
|                         | 6  | 37.17              | 36.90  | 73.17    | 35.45  | 41.60  | 75.07    | 43.97  | 73.80    |
|                         | 7  | 41.40              | 41.10  | 77.67    | 40.05  | 44.40  | 79.57    | 46.07  | 78.37    |
|                         | 8  | 35.53              | 35.27  | 73.45    | 34.93  | 39.70  | 75.35    | 41.93  | 74.15    |
|                         | 9  | 31.37              | 34.20  | 73.10    | 32.60  | 58.43  | 75.00    | 38.63  | 68.47    |
|                         | 10 | 38.53              | 38.27  | 81.15    | 36.20  | 40.80  | 83.05    | 42.83  | 80.87    |
|                         | 11 | 58.10              | 59.60  | 79.40    | 51.00  | 30.87  | 81.30    | 69.70  | 84.70    |
|                         | 12 | 37.97              | 37.63  | 75.75    | 32.00  | 40.30  | 77.60    | 40.60  | 71.93    |
|                         | 13 | 37.23              | 36.93  | 73.20    | 35.25  | 41.40  | 75.10    | 42.53  | 65.10    |
|                         | 14 | 50.60              | 52.10  | 71.90    | 42.70  | 45.05  | 73.80    | 55.40  | 77.20    |
| Total distance traveled |    | 580.38             | 580.45 | 1,048.78 | 534.23 | 628.20 | 1,080.92 | 650.20 | 1,036.65 |

| Unit cost (\$/m <sup>3</sup> *km) |
|-----------------------------------|
| 24.20                             |

Cost Matrix  $C_{ij}$  (\$/m<sup>3</sup>)

|                         |       | Temporary site $j$ |          |          |          |          |          |          |          |
|-------------------------|-------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                         |       | 1                  | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
| Collapsed buildings $i$ | 1.00  | 874.83             | 719.95   | 1,353.99 | 1,415.70 | 1,589.94 | 1,394.73 | 1,526.21 | 1,380.21 |
|                         | 2.00  | 1,151.11           | 1,100.29 | 1,928.74 | 925.65   | 1,012.77 | 1,974.72 | 1,164.02 | 1,774.67 |
|                         | 3.00  | 762.30             | 797.79   | 1,769.02 | 924.44   | 1,356.41 | 1,813.79 | 1,018.82 | 1,681.09 |
|                         | 4.00  | 1,316.48           | 1,352.78 | 1,831.94 | 953.48   | 842.16   | 1,877.92 | 1,154.34 | 1,960.20 |
|                         | 5.00  | 1,037.37           | 1,073.67 | 2,070.31 | 476.74   | 1,143.45 | 2,257.86 | 667.11   | 1,965.85 |
|                         | 6.00  | 899.43             | 892.98   | 1,770.63 | 857.89   | 1,006.72 | 1,816.61 | 1,063.99 | 1,785.96 |
|                         | 7.00  | 1,001.88           | 994.62   | 1,879.53 | 969.21   | 1,074.48 | 1,925.51 | 1,114.81 | 1,896.47 |
|                         | 8.00  | 859.91             | 853.45   | 1,777.49 | 845.39   | 960.74   | 1,823.47 | 1,014.79 | 1,794.43 |
|                         | 9.00  | 759.07             | 827.64   | 1,769.02 | 788.92   | 1,414.09 | 1,815.00 | 934.93   | 1,656.89 |
|                         | 10.00 | 932.51             | 926.05   | 1,963.83 | 876.04   | 987.36   | 2,009.81 | 1,036.57 | 1,956.97 |
|                         | 11.00 | 1,406.02           | 1,442.32 | 1,921.48 | 1,234.20 | 746.97   | 1,967.46 | 1,686.74 | 2,049.74 |
|                         | 12.00 | 918.79             | 910.73   | 1,833.15 | 774.40   | 975.26   | 1,877.92 | 982.52   | 1,740.79 |
|                         | 13.00 | 901.05             | 893.79   | 1,771.44 | 853.05   | 1,001.88 | 1,817.42 | 1,029.31 | 1,575.42 |
|                         | 14.00 | 1,224.52           | 1,260.82 | 1,739.98 | 1,033.34 | 1,090.21 | 1,785.96 | 1,340.68 | 1,868.24 |

Flow Matrix  $X_{ij}$  (m<sup>3</sup>)

|   |               | Temporary site $j$ |               |               |               |               |               |               |                              | Constraints of generated waste in m <sup>3</sup> (W <sub>i</sub> ) |   |                     |                 |
|---|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------|--|---|---------------------|-----------------|
|   |               | 1                  | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             | 8                            |  | = |                     |                 |
| Collapsed buildings $i$   | 1             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 15.40         | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 15.40  | = | 15.40               |                 |
|   | 2             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 30.80         | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 30.80  | = | 30.80               |                 |
|   | 3             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 246.38        | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 246.38   | = | 246.38              |                 |
|   | 4             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 246.38        | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 246.38   | = | 246.38              |                 |
|   | 5             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 15.40         | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 15.40  | = | 15.40               |                 |
|   | 6             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 323.37        | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 323.37   | = | 323.37              |                 |
|   | 7             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 184.78        | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 184.78   | = | 184.78              |                 |
|   | 8             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 61.59         | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 61.59  | = | 61.59               |                 |
|   | 9             | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 15.40         | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 15.40  | = | 15.40               |                 |
|   | 10            | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 46.20         | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 46.20  | = | 46.20               |                 |
|   | 11            | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 15.40         | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 15.40  | = | 15.40               |                 |
|   | 12            | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 123.19        | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 123.19   | = | 123.19              |                 |
|   | 13            | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 184.78        | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 184.78   | = | 184.78              |                 |
|   | 14            | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 369.57        | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         | 369.57   | = | 369.57              |                 |
| Constraints of storage capacity in m <sup>3</sup> (S <sub>j</sub> ) |               | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 1,878.63      | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         |  |   |                     |                 |
|   |               | ≤                  | ≤             | ≤             | ≤             | ≤             | ≤             | ≤             | ≤                            |  |   |                     |                 |
|   |               | 0.00               | 0.00          | 0.00          | 38,526.00     | 0.00          | 0.00          | 0.00          | 0.00                         |  |   |                     |                 |
|   |               |                    |               |               |               |               |               |               |                              |  |   | Objective Function  | \$ 1,935,445.69 |
|   |               |                    |               |               |               |               |               |               |                              |  |   | Transportation cost | 1,735,445.69    |
|   |               |                    |               |               |               |               |               |               |                              |  |   | Installation cost   | 200,000.00      |
| Site  | 1             | 2                  | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             | 8             | Number of locations selected |  |   |                     |                 |
| S <sub>j</sub>  | 38,526.00     | 38,526.00          | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | 38,526.00     | n                            |  |   |                     |                 |
| I <sub>j</sub>  | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00      | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | \$ 200,000.00 | n                            |  |   |                     |                 |
| Y <sub>j</sub>  | 0             | 0                  | 0             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 1                            | ≥  | 1 |                     |                 |

Figure 2: Solution of the transportation model through the solver plugin of the excel software

4. Results and conclusions

The linear program of the proposed transportation model determines the optimal location of a single temporary site in a place known as Ejido de San Juan Zitlatepec belonging to the municipality of Zumpango in the State of Mexico. The location of this temporary site represents a minimum total cost of 1,735,445.69 Mexican pesos. The amount of household waste sent to the temporary site is equivalent to 71.02% of the non-bulky waste storage capacity while it is only 4.16% of the total capacity. The sum of the distances between each of the 14 collapsed buildings by the 2017

earthquake and the selected temporary site is 534.23 km, which is 51% less than that of the farthest site and 7.95% less than that of the next nearest site.

By running the model with the selection of two temporary sites, the cost of transportation decreased by 2.81% while the total cost increased by 7.82%. For this solution, the model sends only 13.93% of the total waste to the nearest second site. This is due to the fact that, although forcing the model to select two sites, the first one continues to be the closest to most of the disaster points and the decision to locate two temporary sites does not represent, for this case study, a viable alternative. In addition, the design capacity of a single temporary site is expected to be sufficient to meet the requirements for receiving waste in the event of an earthquake. However, due to the level of uncertainty of this type of event, it is a decision that will continue to open the evaluation of alternatives in a given scenario. The use of the model developed here is a useful tool for the evaluation of alternatives mentioned above through the analysis of the response variables provided. The study concludes that the location of temporary waste separation sites through the proposed model contributes to the planning of pre-disaster actions, as well as those of response and decision-making in the post-disaster stage.

Such as the case of earthquake waste management, the location of facilities and / or strategic locations of warehouses, collection centers, medical care, support brigades, among others, is essential for the efficient management of humanitarian supply chains and logistics in emergencies. The opportune actions in these cases procure and save human lives and decrease the affectations and impacts on the society and the environment involved. It is necessary to continue working on this axis of development to increase the resilience of Mexico City to these types of events and in the long term of other vulnerable areas of the country.

## Acknowledgements

This research was financed with resources from the Program of Support for Research Projects and Technological Innovation (PAPIIT, by its name in Spanish: Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica) of National Autonomous University of Mexico. Project number TA101119.

## References

- Anglica, Luz, and Gradilla Hernández. "Consideraciones Para La Gestión de La Logística Humanitaria Postdesastre." *Instituto Mexicano Del Transporte*, no. 433, 2015, p. 46, <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt433.pdf>.
- Brown, Charlotte, et al. "Disaster Waste Management: A Review Article." *Waste Management*, vol. 31, no. 6, Elsevier Ltd, 2011, pp. 1085–98, doi:10.1016/j.wasman.2011.01.027.
- Brown, Charlotte, and Mark Milke. "Recycling Disaster Waste: Feasibility, Method and Effectiveness." *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 106, Elsevier B.V., 2016, pp. 21–32, doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.021.
- Comisión para la reconstrucción, recuperación y transformación de la ciudad de México, en una C. cada vez más resiliente. *Sexto Informe de Gobierno, CDMX*. 2018, <http://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/64/2018/nov/CDMX-20181122.pdf>.
- Cornejo Sánchez, Christian, and Miguel Mejía Puente. "The Mixed Integer Linear Programming Model for the Import Planning in Definitive Customs Regime PART I." *Industrial Data*, 2005.
- Eiselt, H. A., and C. L. Sandblom. *Linear Programming and Its Applications*. Springer, 2007.
- Goodell Brown, Robert, and T. E. Easterfield. "A Proposed Definition of Operations Research." *Operational Research Society and Palgrave Macmillan Journals on Behalf of the Operational Research Society*, vol. 2, no. 2, 2015, pp. 21–24, <http://www.jstor.org/stable/3006472>.
- Hobeika, Antoine G., et al. "Transportation Problems and Needs in the Aftermath of the 1985 Mexico City Earthquake." *FMHI Publications, Institute of Behavioral Science*, vol. 6, 1987, [http://scholarcommons.usf.edu/fmhi\\_pub/29](http://scholarcommons.usf.edu/fmhi_pub/29).
- Reyes Ramírez, Alan Gerardo, and Marco Antonio Rojas Nava. *Propuesta de Gestión de Residuos Sólidos Por Sismo Caso de Estudio: Ciudad de México, 2017*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2020, <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/17221/Tesis.pdf?sequence=3>.
- Rodríguez, Havidán, et al. *Handbook of Disaster Research*. Springer, 2007.



- Scott, Allen J. "Location-Allocation Systems: A Review." *Geographical Analysis*, vol. 2, no. 2, 1970, pp. 95–119, doi:10.1111/j.1538-4632.1970.tb00149.x.
- Sistema Geológico Mexicano. *Sismología de México*. 2017, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html#>.
- Taha, Hamdy A. *Investigación de Operaciones*. 9th ed., PEARSON EDUCACIÓN, 2012.
- Tatjana, Samsonowa. "Contributions to Management Science." *Icclab.Nl*, 2012, doi:10.1007/978-3-7908-2151-2.
- Winston, Wayne L., and Jeffrey B. Goldberg. *Operations Research: Applications and Algorithms*. 4th ed., CENGAGE Learning, 2004.

## **Biography / Biographies**

**Adriana Guadalupe Aguilar Montoya** is an industrial engineering student who is specializing in environmental issues and Operations Research.

**Ángel Leonardo Bañuelos Saucedo** is a full-time professor at the School of Engineering, Operations Management Area in National Autonomous University of Mexico (UNAM). He completed a master's degree in Operations Research specializing in Markov Chains. His main practice areas are: probability, stochastic processes, waiting lines and quality management systems.

**Flor Hernández Padilla** is a full-time professor at the School of Engineering, National Autonomous University of Mexico (UNAM). She holds a PhD in Environmental Engineering from the Institute of Engineering UNAM. She completed a master's degree in Environmental Engineering specializing in solid waste management in Mexico, her publications have focused on the integrality of environmental management in her Country based on Life Cycle Analysis. She is member of the working table for the elaboration of the National Law of Disaster Risk Management in Mexico. Her main practice areas are: solid waste management, waste water treatment and application of engineering in sustainability issues.

## 11. Referencias

- Aguilar-Montoya, A. G., Bañuelos-Saucedo, Á. L., & Hernández-Padilla, F. (2020). Location of a Temporary Site to Earthquake Waste Separation. Case Study: Mexico City. *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Detroit, Michigan, USA, August 10 - 14, 2020*, 2677–2687, Conference Code:144118. ISSN: 21698767 ISBN: 9780985549787.  
<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096561695&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=d32e3f79b2d5228d619c344d990be149&sot=b&sdt=b&sl=74&s=TITLE-ABS-KEY%28Location+of+a+temporary+site+to+earthquake+waste+separation%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm=>
- Ángel, M., Pohls, B., Carlos, J., & Paulino, V. (2002). El Sistema De Información Geoestadística Para El Transporte Métodos, Organización Y Descripción Operativa. *SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, Publicació.*  
<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt207.pdf>
- Anglica, L., & Hernández, G. (2015). Consideraciones para la gestión de la logística humanitaria postdesastre. *Instituto Mexicano Del Transporte*, 433, 46.  
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt433.pdf>
- Arnold, F., & Sörensen, K. (2019). What makes a VRP solution good? The generation of problem-specific knowledge for heuristics. *Computers and Operations Research*, 106, 280–288.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.007>
- Azarmand, Z., & Neishabouri, E. (2009). Location Allocation Problem. In *Facility Location. Contributions to Management Science*. (pp. 93–109). Physica, Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2>
- Ballou, R. (2004). *Logística Administración De La Cadena De Suministro* (5th ed.). PEARSON EDUCACIÓN. [www.pearsoneducacion.net](http://www.pearsoneducacion.net)
- Brown, C., & Milke, M. (2016). Recycling disaster waste: Feasibility, method and effectiveness. *Resources, Conservation and Recycling*, 106, 21–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.021>
- Brown, C., Milke, M., & Seville, E. (2011). Disaster waste management: A review article. *Waste Management*, 31(6), 1085–1098. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.027>
- Cáceres, H. (2018). *Jupyter exaples- Optimization-CVRP*. Departamento de Ingeniería Industrial En Universidad Católica Del Norte. <https://github.com/industrial-ucn/jupyter-examples/blob/master/optimization/cvrp-cplex.ipynb>
- Cheng, C., & Thompson, R. G. (2016). Application of boolean logic and GIS for determining suitable locations for Temporary Disaster Waste Management Sites. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20(October), 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.10.011>
- Cogollo Flórez, J. M. (2017). Métodos exactos y heurísticos en la solución de problemas de redes de transporte en las cadenas de suministros. *Lupa Empresarial*, N° 18(August 2017), 44–63.

- Comisión para la reconstrucción, recuperación y transformación de la ciudad de México, en una C. cada vez más resiliente. (2018). *Sexto Informe de Gobierno, CDMX*.  
<http://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/64/2018/nov/CDMX-20181122.pdf>
- Cooper, L. (1963). Location-Allocation Problems. *Operations Research*, 11(3), 331–343.  
<https://doi.org/10.1287/opre.11.3.331>
- Demir, E., Huckle, K., Syntetos, A., Lahy, A., & Wilson, M. (2019). Vehicle Routing Problem: Past and Future. In *Contemporary Operations and Logistics: Achieving Excellence in Turbulent Times* (pp. 1–389). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-14493-7>
- Domingo, N., & Luo, H. (2017). Canterbury earthquake construction and demolition waste management: issues and improvement suggestions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.03.003>
- Dror, M., Laporte, G., & Trudeau, P. (1994). Vehicle routing with split deliveries. *Discrete Applied Mathematics*, 50(3), 239–254. [https://doi.org/10.1016/0166-218X\(92\)00172-1](https://doi.org/10.1016/0166-218X(92)00172-1)
- Eiselt, H. A., & Sandblom, C.-L. (2007). *Linear Programming and its Applications*. Springer.
- Fetter, G., & Rakes, T. (2012). Incorporating recycling into post-disaster debris disposal. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.10.001>
- García, J. G. S. (2017). ANÁLISIS DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN PRODUCTO DE LA EXCAVACIÓN PARA EL SUBSECTOR DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA EN LA CIUDAD DE MÉXICO [Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México].  
 ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12694/Tesina\_Análisis de residuos de la construcción producto de la excavación para el subsector de construcción de vivienda en~1.pdf?sequence=1
- Golden, B., Maryland, U. of, RAGHAVAN, S., Maryland, U. of, WASIL, E., & University, A. (2008). THE VEHICLE ROUTING PROBLEM: LATEST ADVANCES AND NEW CHALLENGES. In *Operations Research/Computer Science Interfaces* (Vol. 43). Springer, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8>
- Hernández-Padilla, F., & Angles, M. (2021). Earthquake Waste Management, Is It Possible in Developing Countries? Case Study: 2017 Mexico City Seism. *Sustainability*, 13(5), 2431.  
<https://doi.org/10.3390/su13052431>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (McGraw-Hill (ed.); 9th ed.).
- Hobeika, A. G., Ardekani, S. A., & Martínez-márquez, A. (1987). Transportation problems and needs in the aftermath of the 1985 Mexico City Earthquake. *FMHI Publications, Institute of Behavioral Science*, 6. [http://scholarcommons.usf.edu/fmhi\\_pub/29](http://scholarcommons.usf.edu/fmhi_pub/29)
- Hu, Z. H., & Sheu, J. B. (2013). Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 55, 118–141.  
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.05.010>
- Irnich, S., Toth, P., & Vigo, D. (2014). The Family of Vehicle Routing Problems. In *Vehicle Routing*

- (Issue January 2019, pp. 1–33). <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594.ch1>
- Linfati, R., Escobar, J. W., & Gatica, G. (2014). A Metaheuristic Algorithm for the Location Routing Problem with Heterogeneous Fleet. *Ingeniería y Ciencia*, *10*(19), 55–76. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.10.19.3>
- Lorca, Á., Çelik, M., Ergun, Ö., & Keskinocak, P. (2015). A Decision-support Tool for Post-disaster Debris Operations. *Procedia Engineering*, *107*, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.069>
- Machuca de Pina, J. M., Dorin, M., & García Yi, A. I. (2018). Evaluación experimental de un modelo de programación lineal para el problema de ruteo de vehículos (VRP). *Interfases*, *011*, 103–117. <https://doi.org/10.26439/interfases2018.n011.2956>
- Min, H., Patterson, W., & Oh, A. F. B. (1998). *Combined location-routing problems : A synthesis and future research directions*. 2217(97).
- Nagy, G., & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, *177*, 649–672. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.004>
- Networking and Emerging Optimization Research Group. (2013). *Vehicle Routing Problem*. Department of LCC, University of Malaga Spain. <https://neo.lcc.uma.es/vrp/>
- Onan, K., Ülengin, F., & Sennaroğlu, B. (2015). An evolutionary multi-objective optimization approach to disaster waste management: A case study of Istanbul, Turkey. *Expert Systems with Applications*, *42*(22), 8850–8857. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.039>
- RAE. (2020). *Definición de heurística*. Diccionario de La Lengua Española. <https://dle.rae.es/heurístico>
- Ramos Rodrigues Pereira, T., Gomes, M. I., & Póvo Barbosa, A. P. (2020). Multi-depot vehicle routing problem: a comparative study of alternative formulations. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *23*(2), 103–120. <https://doi.org/10.1080/13675567.2019.1630374>
- Ramos, S. A. (2007). *Modelos y Optimización I*. <http://materias.fi.uba.ar/7114/Docs/ApunteHeuristicas.pdf>
- Reinhart, D. R., & McCreanor, P. T. (1999). Disaster Debris Management – Planning Tools. *Submitted to US Environmental Protection Agency Region IV*, 1–31.
- Reyes Ramírez, A. G., & Rojas Nava, M. A. (2020). *Propuesta de gestión de residuos sólidos por sismo caso de estudio: Ciudad de México, 2017* [Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/17221/Tesis.pdf?sequence=3>
- Rodríguez, H., L. Quarantelli, E., & R. Dynes, R. (2007). *Handbook of disaster research*. Springer.
- Rodríguez Lloret, J., & Olivella, R. (2010). Introducción a los sistemas de información geográfica : conceptos y operaciones fundamentales. *Univerisidad Oberta De Catalunya*, 1–39. [http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/53645/1/Introducción a los sistemas de información geográfica.pdf](http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/53645/1/Introducción%20a%20los%20sistemas%20de%20informaci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica.pdf) [http://ccuc.cbuc.cat/record=b5170112~S23\\*spi](http://ccuc.cbuc.cat/record=b5170112~S23*spi)

- Secretaría del medio ambiente. (2015). *Sitios autorizados para la disposición de materiales de excavación y de construcción*. 5–8.  
<https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/descargas/Sitios Autorizados Disposición de Materiales.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2018). *Listado de establecimientos mercantiles, de servicios y/o unidades de Transporte de residuos sólidos de competencia local, con autorización y registro otorgado por la SEDEMA (RAMIR)*.  
<https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Listado RAMIR - AUTORIZADOS Febrero 2018.pdf>
- Sistema Geológico Mexicano. (2017). *Sismología de México*.  
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html#>
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones* (9th ed.). PEARSON EDUCACIÓN.
- Tasaki, T., Watanabe, K., Hashimoto, S., & Kubota, R. (2012). *Strategy of separation and treatment of disaster waste ~ Focusing on the Great East Japan Earthquake 2011 ~*. 1–117.  
<http://eprc.kyoto-u.ac.jp/saigai/>
- UNISDR. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Marco de Sendai Para La Reducción Del Riesgo de Desastres 2015-2030.  
<https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework>
- Vázquez, C. S. (2012). *PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS DE VEHÍCULOS PARA LA RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS*. Universidad Complutense de Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia.  
<http://www.fdi.ucm.es/profesor/jjruz/WebProyectos/Carlos Salvador Vazquez/index.htm>
- Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms* (4th ed.). CENGAGE Learning.