

Estrategia de localización de un centro de acopio de residuos industriales para una empresa de coprocesamiento.¹

José Wanderson do Amaral Souza², Julián Barco Pérez³

Resumen:

Teniendo en cuenta la gran cantidad de residuos generados por las empresas en su proceso productivo y la necesidad de disponer apropiadamente de ellos, así como la constante actualización normativa del país para regular la disposición de residuos industriales, se pretende por parte de las empresas cementeras, la alternativa a los generadores de coprocesar estos residuos industriales, mediante la incorporación de ellos en el proceso industrial de producción de cemento; sin embargo muchos pequeños y medianos generadores no cuentan con los recursos necesarios para acceder a dicho servicio o transportar estos residuos a su lugar de disposición final. De esta problemática surge la necesidad de determinar una estrategia para ubicar un centro de acopio para residuos industriales en la ciudad de Bogotá, cuyo objetivo sea consolidar estos residuos para ser posteriormente transportados. Mediante la formulación de un modelo de máxima cobertura capacitada (CMCLP), la determinación de los parámetros que lo comprenden y su ejecución, se generan decisiones de apertura entre diez posibles locaciones candidatos para ubicar este centro de acopio. Adicionalmente, en los resultados se plantean tres diferentes escenarios con sus respectivos parámetros, para así determinar cuánta demanda sería posible cubrir en ellos. Por último, se generan conclusiones respecto a estos escenarios y se propone un trabajo a futuro a desarrollar con las variables no cubiertas en el proyecto.

Palabras Clave: Residuos industriales, coprocesamiento, centro de acopio, modelo de localización, CMCLP.

¹ Monografía Especialización en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

Asesor Temático: Ph.D Pablo Andrés Maya Duque, Profesor, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia - Asesor Metodológico: Mg. Gloria Osorno. Profesora, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia

² Especialista en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Analista de Compras y Logística en CREST, una empresa del grupo LafargeHolcim.

³ Especialista en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Analista de Compras y Logística en CREST, una empresa del grupo LafargeHolcim.

1. Introducción

Teniendo en cuenta los diversos cambios que vienen aconteciendo en Colombia por temas ambientales relacionados con la disposición final de residuos, queda clara la necesidad de una organización acerca de los procesos, principalmente en el ámbito legal donde participan empresas y ciudadanos. El peso más grande está en los grandes generadores de residuos, que necesitan disponer de manera legal sus desechos, ahí entra un papel muy importante las empresas de procesamiento de dichos residuos que por medio de procesos logísticos cada vez más eficaces buscan atender de manera óptima sus clientes así como las normativas vigentes.

El coprocesamiento es una alternativa ambientalmente segura para la disposición de residuos, convirtiéndolos en recursos, por medio de la recuperación de la energía y materia contenida en ellos. Algunos ejemplos de residuos que se les puede dar disposición son por ejemplo residuos farmacéuticos (medicamentos vencidos), residuos de industrias de alimentos (empaques y embalajes), tierras y lodos de la industria petrolera, aceites y lubricantes del sector automotriz, residuos de materias primas de la industria cosmética y residuos generales de varias industrias como por ejemplo plástico. Para la industria cementera tales residuos pueden ser convertidos en combustible o materia prima alternativa mediante la incorporación de estos residuos al proceso productivo del horno de cemento, disminuyendo la utilización de combustibles fósiles.

Coprocesar es un proceso que consiste en ingresar al horno cementero desechos previamente acondicionados que sirvan como energía térmica o materia prima en el proceso de combustión del horno, desechos que se eliminan en forma eficiente sin que se generen nuevos residuos, cenizas o emisiones diferentes a las del proceso original, ya que todo el material involucrado se convierte en energía o se incorpora al clinker (material intermedio necesario para la fabricación del cemento) de manera permanente e irreversible, manteniendo las garantías ambientales y de calidad del producto. [1]

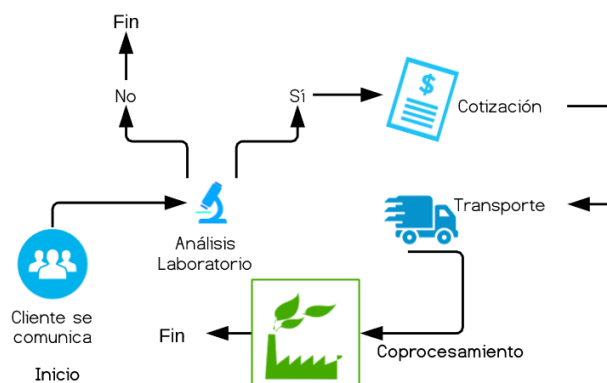
La empresa cementera de la cual fue objeto esta monografía tiene como propósito principal la disposición final y sostenible de residuos industriales, brindando a la sociedad una alternativa

ambiental, técnicamente segura, económicamente viable y eficaz en el coprocesamiento de residuos.

El trabajo está enfocado principalmente en determinar la ubicación de un centro de acopio de residuos industriales. Todo esto, como una estrategia logística que logre capturar la demanda de pequeños y medianos generadores de residuos para una empresa de coprocesamiento, que hace parte de una empresa cementera. Esta empresa de coprocesamiento por medio de sus servicios de disposición final de residuos vienen apoyando a los grandes⁴ y medianos⁵ generadores a cumplir el artículo 11 del decreto 4741 de 2005 que habla sobre las responsabilidades del generador.

El proceso actual está representado por siguiente flujo de trabajo, detallado en la Figura 1; el cliente se comunica con la empresa y la empresa analiza mediante exámenes de laboratorio el material y determina si se puede disponer. Luego se presenta al cliente una cotización con base en los costos (incluyendo el transporte) y si el cliente acepta, se procede a la recolección y posteriormente la disposición. Una vez hecha la disposición, la empresa genera el certificado legal de disposición de residuos al cliente según la normativa vigente.

Figura 1: Proceso actual



Fuente: elaboración propia

⁴ Persona que genera residuos o desechos peligrosos en una cantidad igual o mayor a 1,000.0 kg/mes calendario considerando los períodos de tiempo de generación del residuo y llevando promedios ponderados y media móvil de los últimos seis (6) meses de las cantidades pesadas. [1]

⁵ Persona que genera residuos o desechos peligrosos en una cantidad igual o mayor a 100.0 kg/mes y menor a 1,000.0 kg/mes calendario considerando los períodos de tiempo de generación del residuo y llevando promedios ponderados y media móvil de los últimos seis (6) meses de las cantidades pesadas. [1]

Existen algunas empresas que con el fin de disponer legalmente de sus residuos, no tienen problema en incurrir en costos logísticos necesarios para asegurar su correcta disposición. Sin embargo para algunos medianos y pequeños generadores puede ser costoso acceder este servicio y podrían incurrir en una disposición no adecuada.

La problemática se presenta cuando estos medianos generadores no cuentan con una alternativa a su problema e incurrir en una disposición no adecuada, lo cual puede generar contaminación y sanciones legales. Adicionalmente el interés de la empresa de coprocesamiento es que todos los clientes posibles accedan al servicio, sin embargo esto se dificulta por la ubicación actual de la empresa. Como alternativa para acercar a estos medianos generadores se pensó inicialmente en rutas consolidadas, sin embargo la falta de un punto intermedio que funcionara como el intermediario logístico de esta operación generó la idea de este proyecto. Con el fin de brindar herramientas a futuro a la hora de considerar esta opción, se pensó en un proyecto que ayudará a localizar un centro de acopio como este punto intermedio.

Además del problema de localización fue presentado como un factor importante para la empresa de coprocesamiento la utilización óptima de sus vehículos, ya que actualmente no se utiliza la capacidad total de vehículos en los trayectos entre los clientes en Bogotá y la planta. Actualmente el transporte de los residuos se hace directamente desde el lugar que el cliente indique hasta la planta de coprocesamiento en Boyacá. La importancia del punto de acopio se genera cuando pequeños o medianos generadores no cuentan con residuos suficientes para llenar un vehículo o no cuentan con la capacidad económica suficiente para pagar el flete. En cualquiera de estos dos escenarios se hace útil establecer un puente logístico y determinar la ubicación óptima para este.

Este trabajo pretende diseñar una estrategia mediante un modelo de optimización para determinar la ubicación de un punto de acopio de residuos industriales para maximizar la cobertura de la empresa objeto de este trabajo. Para el diseño tendremos en cuenta variables previamente establecidas como demandas de generación de residuos por localidades de la ciudad de Bogotá, así como distancia entre localidades y capacidades del centro de acopio, todo eso en la búsqueda de un modelo flexible que pueda ser fácilmente modificado y aplicado en otras zonas del país, ya

que sólo intervienen algunas variables matemáticas que pueden ser cambiadas de acuerdo con la necesidad.

Para llegar al objetivo principal del trabajo se trazó un plan comprendido en primer lugar con el análisis del proceso logístico actual, para identificar las variables relevantes del modelo e identificar posibles mejoras logísticas. A su vez se analizaron los tipos de modelos de ubicación para determinar cuál sería el ideal. Por último, el trabajo de investigación presenta la formulación del modelo y su validación, para obtener resultados y verificar su eficiencia al momento de identificar localizaciones que buscarán optimizar el costo de transporte, teniendo en cuenta la mayor cobertura de demanda posible.

El siguiente capítulo describe la metodología utilizada en el trabajo. Posteriormente, se detallan los resultados obtenidos. Finalmente se enuncian las conclusiones y oportunidades de trabajo futuro.

2. Metodología

Una vez se tiene planteado el problema, se determinó el camino que seguiríamos para abordar el problema. Nuestra metodología se basó en las siguientes etapas: revisión de la literatura y trabajos previos, análisis de la información recopilada, consecución de información mediante requisición a entidad pública y análisis de las posibles variables y parámetros del modelo.

Revisión de la literatura y trabajos previos:

Una vez se identificó el objetivo principal, se realizó investigación a trabajos previos de localización y se encontraron dos tipos de modelos base de localización; el modelo de localización cuantitativo y el modelo de localización cualitativo. Para partir con el trabajo se debía considerar alguno de los dos, sin embargo se revisó brevemente la literatura y se encontró una dificultad con el modelo cualitativo; por lo general es necesario seleccionar ubicaciones candidatas (al igual que en el modelo cuantitativo), determinar los criterios a calificar y se requiere convocar un panel de expertos para dar una evaluación a los lugares según dichos criterios. Ya que el tiempo de investigación nos limitaba a convocar un panel de expertos óptimo, se decantó por realizar un modelo cuantitativo de acuerdo a la demanda de residuos de la ciudad de Bogotá y los costos de transporte, esto con el fin de determinar el costo más bajo posible para los futuros posibles clientes.

Como estudios anteriores al tipo de problema, se puede destacar dos trabajos en Colombia que utilizaron modelos cuantitativos para solucionar problemas de localización que son “Localización de un centro de acopio para los alimentos comercializados por la corporación VP” que tiene como objetivo diseñar una propuesta de localización de un centro de acopio y distribución para la corporación VP evaluando el escenario propuesto por la compañía y el obtenido por la metodología de localización utilizada. [2] y el trabajo “Problemas de Localización Multiobjetivo” que tiene como objetivo principal abordar los problemas de localización multiobjetivo, en los que consideran como criterios de decisión el costo y la cobertura, y desarrollar técnicas para encontrar soluciones eficientes a dichos problemas [3] En el trabajo de Villegas Ramírez, 2005 el realiza

diversas pruebas con diferentes modelos como por ejemplo Problema de localización de máxima cobertura, Problema de Localización sin Restricciones de Capacidad y Prueba de Wilcoxon.

Análisis de la información recopilada:

Inicialmente se tomó como base para la elaboración del modelo, las demandas por los grandes clientes de la compañía objeto de este trabajo, pero tuvimos dos conclusiones iniciales que nos hicieran descartar esta demanda para elaboración del modelo. La primera dificultad que se obtuvo, es que si bien la base de datos contenía datos de ventas, ciudad y ubicación del cliente, esta ubicación del cliente correspondía al domicilio de las oficinas centrales. Si bien muchos clientes tienen la ubicación de sus residuos cerca a sus oficinas, no era una constante en todos los datos y no era un dato fidedigno, ya que afectaba la demanda en especial con medianos y grandes generadores. La segunda dificultad es la confidencialidad en el dato de valor de transporte para los residuos que eran transportados a la empresa de coprocesamiento. Es por esto que el valor del transporte será simbólico y no será una variable relevante dentro del modelo, sin embargo se enuncia en el capítulo 5 de este trabajo, ya que como trabajo a futuro esta variable sería una restricción a tener en cuenta.

Consecución de información mediante requisición a entidad pública:

Debido a esto se tuvo que buscar una alternativa para determinar la demanda en la ciudad de Bogotá y así determinar la ubicación idónea de un centro de acopio que atendiera a generadores de residuos. Con el apoyo de la Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos (UAESP) solicitamos un radicado para consultar los grandes generadores de residuos de acuerdo a zonas de recolección y empresas, y gracias a esto fue posible entender la división actual de cómo es realizada la recolección de residuos en Bogotá y su región metropolitana así como fue posible identificar las toneladas de residuos generados por Áreas de Servicio Exclusivo (ASE) que nos lleva a la tabla 1, creada con información del año de 2018. A partir de la información se puede concluir que la zona de Bogotá que más se generó residuos fue la ASE 2 (compuesta por las localidades de Teusaquillo, Puente Aranda, Los Mártires, Antonio Nariño, Rafael Uribe Uribe, Tunjuelito, Bosa y Ciudad Bolívar).

Tabla 1: Generación de residuos por áreas.

Área de Servicio Exclusivo (ASE)	Generación de residuos en toneladas
ASE 1	442.711
ASE 2	681.563
ASE 3	410.450
ASE 4	264.633
ASE 5	276.969

Fuente: UAESP, 2019

Para determinar la repartición de las ubicaciones candidatas, utilizaremos como base principal la información brindada por la UAESP que será nombrada como demanda por localidad, y una de las áreas que será foco de la ubicación de las ubicaciones candidatas será la ASE 2 que en comparación con la segunda área (ASE 1) con mayor generación de residuos supera en 35,04% la misma. Por ende, tendrá 5 ubicaciones en diferentes localidades.

La segunda es la ASE 3 donde según informaciones de la UAESP, 2019 [4] se tuvo una gran generación de residuos industriales por los considerados grandes generadores, que en este momento están concentrados apenas en 2 localidades (Kennedy y Fontibon) con un total de 76 barrios [5], por lo cual contará con dos ubicaciones candidatas. El resto de ubicaciones serán repartidas en las ASE restantes. En la tabla 2 podemos identificar la cantidad de residuos recogidos de grandes generadores en el año de 2018.

Tabla 2: Generación de residuos por grandes generadores

Área de Servicio Exclusivo	Generación de Residuos en Toneladas
ASE 1	13.404
ASE 2	13.270
ASE 3	31.871
ASE 4	9.690
ASE 5	2.687

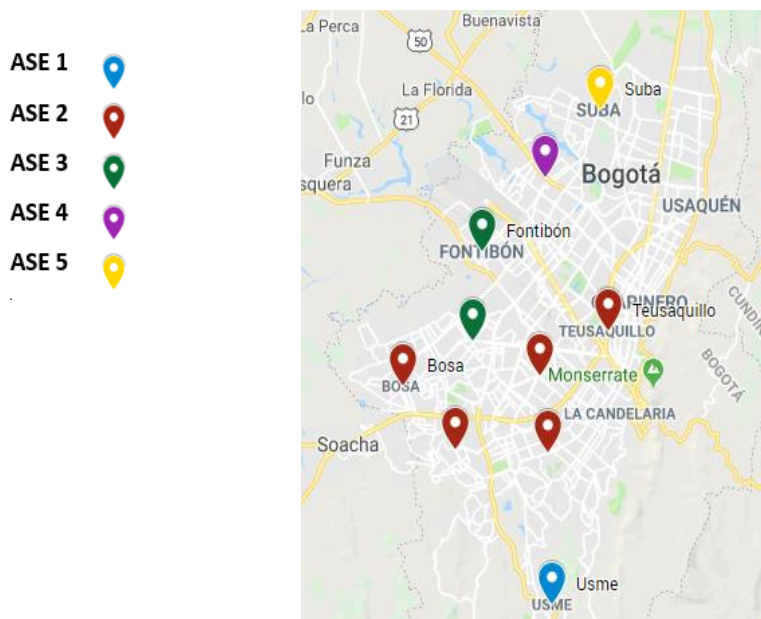
Fuente: UAESP, 2019

Es importante notar que si bien la información se encontraba discriminada por generación total de residuos por ASE, y generación de residuos por grandes generadores, la demanda a considerar es la de residuos totales por ASE, ya que la intención del modelo es capturar demanda de todos los generadores; grandes, medianos y especialmente, pequeños.

Análisis de las posibles variables y parámetros del modelo:

Como se mencionaba anteriormente, con base a las informaciones presentadas inicialmente con el resumen de las tablas 1 y 2 se determinó las 10 posibles ubicaciones para rodar el modelo donde hay 5 ubicaciones que son atendidos actualmente por la ASE 2 y comprende las localidades de Teusaquillo, Puente Aranda, Rafael Uribe Uribe, Bosa y Ciudad Bolívar y las otras 2 ubicaciones están en la ASE 3 y está compuesta por las localidades de Keneddy y Fontibón. Las otras 3 ubicaciones serán colocadas en cada ASE, ASE 1 en Usme, ASE 4 en Engativá y ASE 5 en Suba. El fin de determinar ubicaciones aleatorias es intentar capturar la mayor cantidad de demanda posible, tanto de ASE de gran cantidad de residuo como las demás. En la Figura 2 se pueden identificar las 10 ubicaciones pre seleccionadas.

Figura 2: Posibles ubicaciones para la elección del Centro de acopio.



Fuente: elaboración propia.

Hay dos parámetros que se dejaron indicados en el modelo, sin embargo no fueron objeto de revisión detallada de éste trabajo de monografía, y fueron propuestas como trabajo a futuro del modelo. Estas variables corresponden a la capacidad del centro de acopio y el costo de transporte.

La capacidad del centro de acopio fue determinada principalmente por la capacidad productiva de la planta de coprocesamiento. Desafortunadamente esta información es considerada un dato estratégico de la compañía y no es de fácil acceso. Teniendo esto en cuenta, se llegó a la reflexión que el objeto principal del trabajo es determinar la ubicación más que las características del centro de acopio; sin embargo no se puede ignorar la influencia de este dato en la determinación precisa de la ubicación. Es por esto que el modelo fue construido teniendo en cuenta esta variable.

Para efectos de este modelo, las diez posibles locaciones tendrán el mismo valor en capacidad, por lo que no será determinante en los resultados. Se determinó el número de 200.000 toneladas como capacidad máxima del centro de acopio, ya que la zona a la que se le asignó la mayor generación de residuos fue Ciudad Bolívar, con 206.778 toneladas. La capacidad de coprocesamiento de la planta en Boyacá es superior a este número, y la capacidad de transporte es también capaz de abarcar esta cantidad, por lo cual no fue un limitante como tal, sino más bien una variable que puede ser modificada en un trabajo futuro de acuerdo a la necesidad que se tenga.

Tabla 3: Demandas por zonas.

<i>Zona</i>	<i>Demanda (Toneladas)</i>	<i>Número de Barrios</i>
Z1 Usaquen	133.295	78
Z2 Chapinero	92.281	54
Z3 Santa Fe	140.131	82
Z4 La Candelaria	13.671	8
Z5 San Cristobal	140.131	82
Z6 Usme	201.651	118
Z7 Sumapaz	54.685	32
Z8 Teusaquillo	56.394	33
Z9 Puente Aranda	75.192	44
Z10 Los Martires	34.178	20
Z11 Antonio Nariño	27.343	16
Z12 Rafael Uribe Uribe	78.610	46
Z13 Tunjuelito	29.051	17
Z14 Bosa	124.750	73
Z15 Ciudad Bolívar	206.778	121
Z16 Keneddy	169.182	99
Z17 Fontibon	90.572	53
Z18 Engativá	140.131	82
Z19 Barrios Unidos	64.939	38
Z20 Suba	203.360	119

Fuente: UAESP, 2019

Un parámetro del modelo es el Radio de cobertura (R). Dentro de las matrices del modelo existe una matriz llamada Matriz de distancias, que concentra la distancia en kilómetros entre los 10 puntos de posible localización del acopio y las 20 localidades de Bogotá. Para determinar un radio de cobertura base con el cual experimentar en la sección de resultados, se hizo un promedio entre las 200 distancias de la matriz y esto arrojó una distancia de 11,53 kilómetros. El resumen

de las distancias entre localidades (zonas) y localizaciones determinadas pueden ser visualizadas en el apéndice 1.

El número de centros de acopio (K) es un parámetro dentro del modelo; tal cual lo indica el trabajo de investigación, el punto de partida será un centro de acopio. Sin embargo, en el capítulo de resultados se presentará el resultado de escenarios donde el número de centros sea mayor.

Con respecto al dato del transporte, realizando indagaciones sobre cómo se calcula el valor del transporte, se encontró con que hay sólo dos factores que determinan el valor de un flete para la compañía de coprocesamiento; el primero, es la ciudad de origen y el segundo, es el tipo de vehículo que realizará el flete. Esto llevó a dos conclusiones; la primera es que el modelo considera locaciones dentro de la ciudad de Bogotá y su área metropolitana, por lo que el valor será el mismo para todas las locaciones; en segundo lugar, el tipo de vehículo se define por el peso de la carga, y si el mismo peso aplica a las diez locaciones, el mismo tipo de vehículo también aplicará. Caso contrario fuera si el transporte es determinado por kilómetro recorrido, o por hora de conducción. Tomando esto en cuenta, no se tuvo en cuenta el factor de transporte para determinar la ubicación óptima del centro de acopio, y el modelo toma como enfoque otros aspectos, como el radio de cobertura, cantidad de centros, capacidad del punto de acopio, etcétera.

Por último, se establecieron supuestos que delinearán y darán forma al modelo. A continuación, los supuestos del modelo:

- La capacidad de procesamiento del centro de acopio que se trabajó es de 200.000 toneladas lo que puede atender casi 100% de las demandas por localidades.
- La cantidad de centros de acopio que se pueden abrir con la ejecución del modelo inicialmente es de uno en la ciudad de Bogotá, entre las 20 localidades de la ciudad.
- Las distancias entre las localidades fueron medidas desde la ubicación central que arroja la aplicación Google Maps de la localidad hacia la otra teniendo en cuenta la malla vial, y con eso se generó la matriz de distancias entre localidades y posibles localidades para el punto de acopio.

- Se utilizó la cantidad de 20 localidades de Bogotá y fueron elegidas 10 de estas para escoger ubicaciones candidatas y rodar el modelo.
- Las demandas por localidad fueron calculadas de acuerdo con la generación de residuos de 2018, con una distribución homogénea, y generando un valor a cada localidad de acuerdo con su cantidad de barrios.
- La demanda de la localidad será atendida completamente por el centro de acopio definido para tal localidad.

3. Resultados

Después de definir todas las variables y análisis de las informaciones colectadas, se plantea el modelo de localización de Maximización de la Cobertura Máxima Capacitada (o Capacitated Maximal Covering Location Problem, CMCLP):

Conjuntos:

I: conjunto de localidades de Bogotá donde se pueden localizar el centro de acopio.

J: conjunto de localidades de Bogotá de demanda j.

Parámetros:

K: número de centros a abrir

d_i : demanda zona i

Cap_j : capacidad del centro de acopio

R: Radio de cobertura

Variables de decisión:

$$X_j = \begin{pmatrix} 1: \text{Si se abre el centro en la localidad} \\ 0: \text{Si no se abre el centro} \end{pmatrix}$$

$$Y_{ij} = \begin{pmatrix} 1: \text{Si la zona esta asignada al centro} \\ 0: \text{Si la zona no está asignada al centro} \end{pmatrix}$$

Función Objetivo:

$$FO: \max \sum_{i \in Z} d_i \sum_{j \in L} I_{ij} Y_{ij}$$

Sujeto a:

$$\begin{array}{llll} 1) \sum_{j \in L} X_j & \leq & K & \\ 2) \sum_{j \in L} Y_{ij} & \leq & 1 & \forall i \in Z \\ 3) \sum_{i \in Z} Y_{ij} & \leq & 20 X_j & \forall i \in L \\ 4) \sum_{i \in Z} d_i Y_{ij} & \leq & Cap_j & \forall i \in L \end{array}$$

La finalidad de la función objetivo es maximizar la demanda cubierta teniendo en cuentas los siguientes grupos de restricciones:

El grupo de restricciones (1) controla la cantidad máxima de centros de acopio habilitados para atender la ciudad, el grupo de restricciones (2) indica que una localidad debe ser asignada sólo a un centro; es decir que no puede ser asignada a 2 o más centros, el grupo de restricciones (3) garantiza que las localidades solo se asignan a centros abiertos, el grupo de restricciones (4) garantizan que se respete la capacidad instalada del centro de acopio en atender la demanda en toneladas.

El modelo anteriormente mencionado fue implementado en Microsoft Excel y se soluciona con la ayuda del complemento Open Solver, ya que el complemento genérico del programa no pudo abarcar la magnitud del cálculo, por la cantidad de localidades.

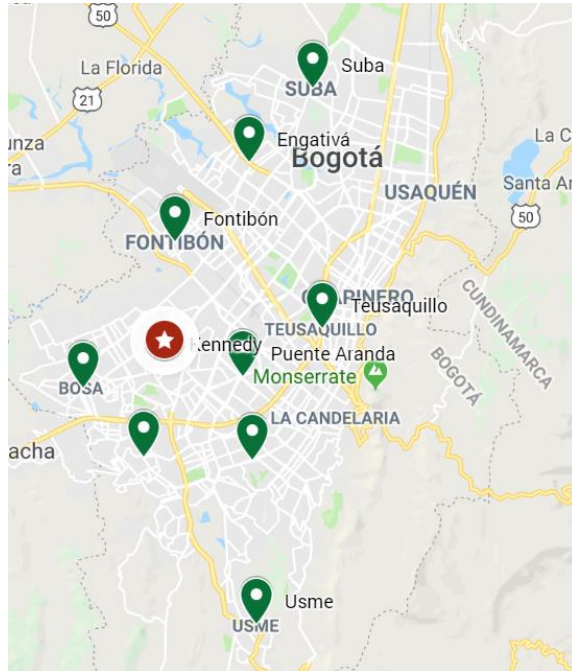
De acuerdo al modelo formulado se presentaron diferentes escenarios y estos fueron los resultados obtenidos:

Escenario 1: Configuración base del modelo:

Teniendo en cuenta el radio inicial propuesto de 11,2 km, una capacidad de 200.000 toneladas para el centro de acopio y sólo la apertura de un centro.

La decisión de apertura según el modelo se centró en la localidad de Kennedy, como muestra la figura 3. El modelo arrojó una cobertura de 199,942,43 toneladas de las 2'076.325 toneladas de la demanda total. Esto representa el 9,63% de la demanda total de la ciudad de Bogotá.

Figura 3: Definición de ubicación 1



Fuente: elaboración propia

Escenario 2: Cobertura máxima buscando abarcar el 95% de la demanda con un centro.

Para alcanzar un cubrimiento superior al 95% de la demanda, se utilizó los siguientes parámetros; un radio de 55 km (la distancia más larga que comprende el modelo entre localidades y posible ubicaciones) y una capacidad del centro de 2'000.000 de toneladas. Esto arrojó un cubrimiento de 1'999.424 toneladas de las 2'076.325 toneladas que comprenden la demanda total, y generó como resultado una cobertura del 96,29% de la demanda total.

La decisión de apertura sería en el centro de Puente Aranda, señalado en la figura 4.

Figura 4: Definición de ubicación 2



Fuente: elaboración propia

Escenario 3: Variables razonables utilizando varios centros para obtener al menos un 70% de cubrimiento.

Buscando alcanzar una porción de demanda del 70%, se definieron los siguientes parámetros dentro del modelo; la cantidad de centros es 4, el radio de cobertura es 20 kilómetros y la capacidad de los centros es de 370.000 toneladas.

Esto arrojó una cobertura de 1'473.080 de las 2'076.325 toneladas de la demanda total. Esto es un 70,94% de la demanda disponible.

La decisión de apertura de los 4 centros sería en Teusaquillo, Puente Aranda, Ciudad Bolívar y Kennedy, como se presenta en la figura 5.

Figura 5: Definición de ubicación 3



Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

- Si bien el trabajo comprende la decisión de apertura de un centro de acopio, es muy difícil que un sólo centro logre concentrar una demanda importante dentro de la ciudad de Bogotá. Esto llevaría a que tuviera una cobertura de 55 kms a la redonda y una capacidad instalada superior a las 2'000.000 de toneladas. Esto en la práctica es poco realista. Por ende, esto nos lleva a la conclusión a que deben ser por lo menos 4 centros de acopio con capacidades de 370.000 toneladas y un radio de cobertura de 20 kilómetros, para así poder abarcar por lo menos un 70% de la demanda de Bogotá.
- Realizando un promedio entre las distancias de los 10 centros de acopio con las 20 localidades de Bogotá, se encontró que los centros ubicados en Suba, Engativá y Bosa son los tres más alejados. Estos nunca fueron elegidos como candidatos, por ende una rápida conclusión es lo determinante que es la distancia de cobertura en la decisión de apertura. Mientras más cercana se encuentre la demanda, es más posible que un centro sea elegido candidato
- Para atender más de 95% de la demanda en un único centro, sería necesario un incremento de más de 1000% en la capacidad del centro de acopio propuesto inicialmente, lo que tornaría inviable para la compañía cementera.
- Se torna consistente que el centro elegido como decisión de apertura se encuentra por lo general en el centro del mapa. Esto va acompañado con que los mayores generadores de residuos también se encuentran en el centro de Bogotá. Por ende, es probable que la decisión de apertura sea en una locación central con respecto a la demanda.
- Como propuesta de este trabajo encontramos razonable la propuesta 3 como la más viable dentro de los descubrimientos obtenidos. Se debe tener en cuenta que la decisión de apertura está influenciada por otros factores como la cantidad de dinero que está dispuesta la empresa de cemento en invertir, la cantidad de centros que quiere abrir, la tasa de retorno a la inversión esperada, el costo de apertura de cada centro de acopio, la cantidad de toneladas de residuos que desea procesar la empresa de coprocesamiento, entre otros estudios complementarios que no son objeto de esta monografía.

5. Trabajo Futuro

El modelo fue diseñado para cubrir ciertas posibilidades de trabajo a futuro, y también la monografía plantea varias opciones; a continuación, los aspectos a futuro que pueden tratarse para este trabajo:

- Este modelo fue diseñado para ser utilizado de forma genérica para cualquier tipo de problema de localización que comprenda locaciones, zonas, capacidades del centro, radio de cobertura y número de centros. Esto le permite tener alta versatilidad para implementarse en problemas similares.
- Una nueva posibilidad para el modelo sería poder dividir las capacidades para centros diferentes en cuanto a porcentajes, es decir que cuando yo cambie el número de centros para 2 o más, pueda determinar como parámetro el porcentaje de la demanda cubierta que cada centro puede cubrir.
- Uno de los parámetros que requiere más exactitud es la demanda por barrios. En este caso particular, se debió segregar la demanda de forma matemática, sin embargo la impredecible demanda no responde a variables exactas. Es por esto que un estudio a fondo, podría dar una mayor exactitud a la decisión de apertura.
- El transporte en este caso no fue considerado pues era una variable constante para todas las posibles ubicaciones, sin embargo para casos donde otras empresas miden esta variable de acuerdo a cantidad de kilómetros recorridos o tiempo de conducción, entre otras variables heterogéneas, es una variable a considerar y que debe ser introducida al modelo.

6. Agradecimientos

En primer lugar, dar gracias a Dios por permitir la conclusión exitosa de esta monografía. A nuestros padres; Soledad y Antonio para el caso de Julián, Sandra y João para el caso de Wanderson, quienes han sido un apoyo incondicional y testigos permanentes de todos los pasos importantes de nuestras vidas. A nuestro asesor temático Pablo Andrés Maya Duque y nuestra asesora metodológica Gloria Milena Osorno Osorio, gracias por todo el apoyo y orientación.

Al jefe de planta de la empresa de coprocesamiento, el señor Pedro Vargas, y a la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos de Bogotá, agradecimientos especiales por la información brindada y por creer en nosotros en nuestro objetivo desinteresado de sacar adelante este trabajo monográfico.

7. Referencias

- [1] Decreto 4741, *Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*, 2005.
- [2] Ó. M. Victoria Eugenia López e Ó. Ortiz Montes, *ICESI*, Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2014.
- [3] J. G. Villegas Ramirez, *Uniandes*, Bogotá, Cundinamarca, 2003.
- [4] UAESP, “Radicado,” Bogotá, 2019.
- [5] Veeduría Distrital, *Veeduría Distrital*, Bogotá, Cundinamarca, 2018.
- [6] T. Neuman e S. Wagon, “Wolfram Demonstrations Project,” 6 2 2013. [Online]. Available: <http://demonstrations.wolfram.com/TheFacilitiesLocationProblem/>.