



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

“OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LECHE
PARA LA MÁXIMA COBERTURA DE DEMANDA EN
CHIHUAHUA”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:
IRVING FLORES AYALA

TUTORA: DRA. ESTHER SEGURA PÉREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: ING. JOAQUÍN GONZÁLEZ MARÍN

Vocal: DRA. ESTHER SEGURA PÉREZ

Secretario: M.I. MARÍA GUADALUPE DURÁN ROJAS

Suplente 1: M.I. RICARDO TORRES MENDOZA

Suplente 2: ING. YAIR BAZÁN TINAJERO

TUTORA DE TESIS:

DRA. ESTHER SEGURA PÉREZ

AGRADECIMIENTOS

A mi padre de quien guardo los mejores consejos y que ahora me lleva de la mano desde el cielo y mi madre quien me ama y apoya diariamente, sin ellos mi desarrollo personal y profesional jamás habría sido posible.

A toda mi familia, cuando los veo todos representan algún consejo, algún recuerdo, de alguna u otra manera con todos he tenido un momento que prevalece en mi memoria. A mi mejor amigo Christian.

A la Dra. Esther por su apoyo, su amistad y su guía en la realización de este trabajo. Al Dr. J. M. Dorador por las mejores clases y su orientación, Al Dr. Leopoldo G. G. por su ayuda con los trámites de titulación. Finalmente a mi Universidad, en la UNAM he dejado los mejores años de mi vida y a cambio me llevo las mejores experiencias y la mejor preparación.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo optimizar la red de distribución de leche LICONSA que existe actualmente en Chihuahua a través de la localización de centros de distribución (CEDIS) que permitan aumentar de manera dinámica la respuesta a la demanda de leche logrando la máxima cobertura de beneficiarios del programa de abasto social de la empresa estatal. Se realiza un análisis de la esencia de la empresa, sus objetivos y su estructura actual, logrando complementar y fortalecer el sistema de distribución en el estado de Chihuahua.

En el **capítulo 1** se introduce al lector a una visión global del problema de localización de instalaciones, sus inicios y evolución a través del siglo XX así como su importancia en términos de costos logísticos para las empresas en México. Por otro lado se abordan las interrogantes que deben formularse al plantear un problema de este tipo y el papel que juegan los diversos factores que influyen en un sistema de distribución tales como la estrategia y la información que fluye entre los componentes de la cadena de suministro.

Durante el **capítulo 2** se clasifican y revisan los modelos matemáticos más importantes para la localización de instalaciones, aquellos dentro de los cuales se encuentra la mayoría de los problemas que pudieran surgir en la industria, los modelos analíticos, continuos, en redes y discretos, estos últimos, protagonistas del caso particular de estudio. Finalmente se incluyen los 7 pasos formales para la elaboración de un proyecto de optimización que servirán como base para el desarrollo del **capítulo 3** en el cual se describe la empresa, su esencia, estructura, objetivos y operación actuales.

Finalmente con base en la información de los capítulos previos plantea el problema y se define el modelo matemático que responde a las necesidades de la empresa. Durante el desarrollo se obtienen los segmentos de mercado que forman parte de la población objetivo del programa de abasto social para después construir la red de conexiones entre municipios que fungen como posibles candidatos para la localización de *CEDIS*. En seguida la construcción del programa lineal aplicado al caso particular de estudio permite la generación de escenarios que, con ayuda de software de solución *LINGO* se explican a

lo largo del **capítulo 4** para finalmente sugerir un escenario que se ajusta a las necesidades de la empresa y abordar futuras líneas de investigación en la materia.

OBJETIVO

- Optimizar la red de distribución de leche para la máxima cobertura de demanda en el estado de Chihuahua, México.

ÍNDICE

Introducción

Los costos del transporte en México.....	1
1.0 Marco contextual	
1.1 El problema de localización de instalaciones.....	5
1.2 La estrategia en la localización de instalaciones.....	12
1.3 La importancia de la cadena de suministro.....	18
2.0 Marco teórico y formulación matemática del problema	
2.1 Modelos matemáticos para determinar la localización de instalaciones (taxonomía).....	21
2.1.1 Modelos Analíticos.....	22
2.1.2 Modelos Continuos.....	23
2.1.3 Modelos en Redes.....	24
2.1.4 Modelos Discretos.....	25
2.1.4.1 Set Covering Model.....	26
2.1.4.2 Maximal Covering Model.....	28
2.1.4.3 P-Center Model.....	29
2.1.4.4 P-Median Model.....	30
2.1.4.5 UFCLM.....	31
2.1.4.6 Metodología para el desarrollo de un proyecto de optimización.....	33
3.0 Caso de aplicación (LICONSA S.A. de C.V.)	
3.1 Antecedentes de la empresa.....	34
3.2 Misión, visión y objetivos estratégicos.....	35
3.3 Estructura general de la empresa.....	35
3.4 Planteamiento del problema y definición del modelo a utilizar.....	40
3.5 Desarrollo.....	47
3.5.1 Construcción de la red.....	56
3.5.2 Construcción del programa lineal.....	59
3.5.3 Software de solución.....	62
4.0 Resultados	66
5.0 Conclusión y futuras líneas de investigación.....	78
6.0 Anexo.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedio de personas atendidas por punto de venta por el programa de abasto social de LICONSA.....	43
Tabla 2. Habitantes en condiciones de pobreza por municipio en el estado de Chihuahua.....	48
Tabla 3. Habitantes que tienen la edad requerida para formar parte de la población objetivo del programa de abasto social de LICONSA en Chihuahua.....	49
Tabla 4. Número y porcentaje de habitantes en Chihuahua por grupos de edad.....	50
Tabla 5. Población objetivo en Chihuahua por municipio y variables asignadas.....	54
Tabla 6. Obtención de factor de curvatura de las carreteras en Chihuahua.....	57
Tabla 7. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=100km.....	66
Tabla 8. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=100km.....	67
Tabla 9. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=200km.....	68
Tabla 10. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=200km.....	69
Tabla 11. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=300km.....	70
Tabla 12. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=300km.....	70
Tabla 13. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=400km.....	71
Tabla 14. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=400km.....	72
Tabla 15. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=500km.....	73
Tabla 16. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=500km.....	73
Tabla 17. Matriz de decisión “Porcentaje de cobertura”.....	77
Tabla 18. Supuesto de inversión inicial para un centro de distribución de leche en Chihuahua	79

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Costos logísticos de las empresas como porcentaje de las ventas.....	2
Gráfica 2. Costos totales de transporte como porcentaje del PIB.....	2
Gráfica 3. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=100km.....	68
Gráfica 4. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=200km.....	69
Gráfica 5. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=300km.....	71
Gráfica 6. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=400km.....	72
Gráfica 7. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=500km.....	74
Gráfica 8. Comparativo de porcentaje cubierto vs número de CEDIS para los cinco escenarios.....	75
Gráfica 9. Comparativo de la capacidad instalada necesaria dependiendo de la distancia de cobertura para los 5 escenarios.....	79

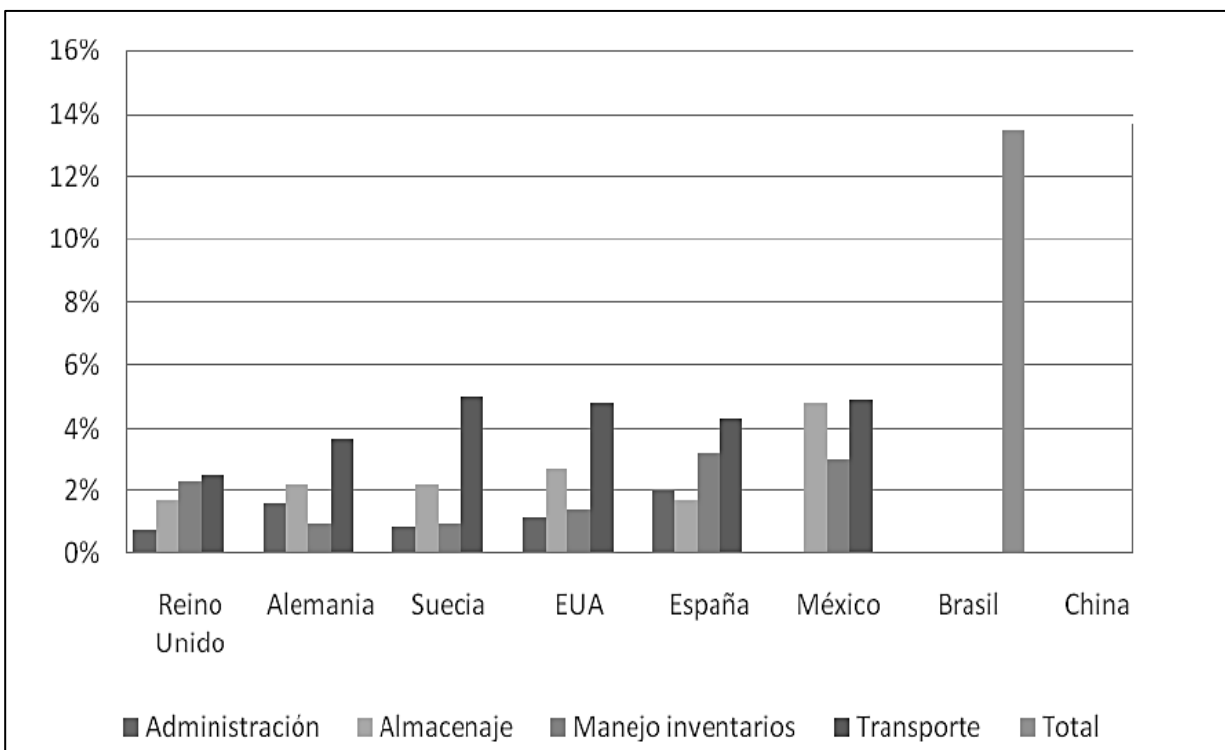
INTRODUCCIÓN

Las decisiones acerca de un sistema de distribución de una empresa son quizás tanto o más importantes como el producto o servicio que ofrece; el éxito de las ventas, la eficiencia de distribución, la minimización de los costos de transporte y el tiempo de respuesta son ejemplos de algunos de los factores que se ven afectados al decidir correctamente dónde se va a localizar una o varias instalaciones, ya sea una planta productora, uno o varios centros de distribución hasta las unidades operativas que están al servicio de los clientes.

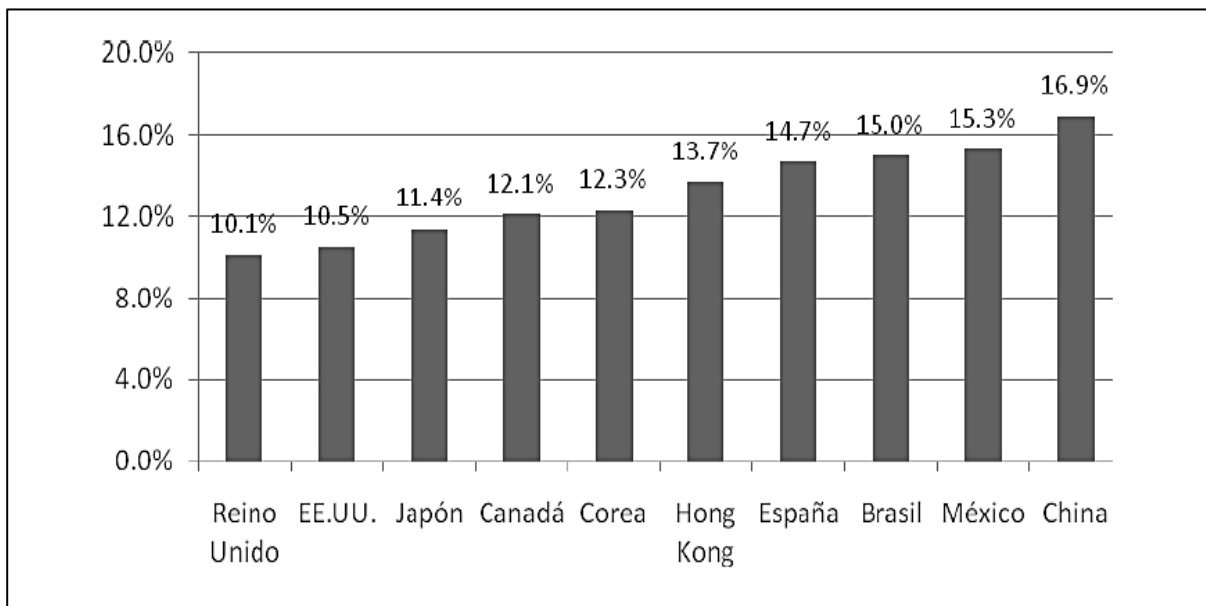
Según la Agenda de competitividad logística 2008-2012 de la Secretaría de Economía, aunque México tiene una posición geográfica privilegiada y un acceso preferencial que le otorgan los tratados comerciales, las exportaciones mexicanas, aunque se han incrementado de manera considerable, no reflejan todo el potencial que le otorgan dichas ventajas. Una de las razones de esta situación son los altos costos logísticos y la elevada regulación arancelaria a las que están expuestas las empresas establecidas en México.

De acuerdo con una estimación realizada por la empresa AT Kearney (Fuente: Foro de Competitividad y Mejores Prácticas Logísticas. Estimaciones de AT Kearney, 2004), en México los costos logísticos de las empresas representan en promedio 12.6% de sus ventas. 40% de ese costo corresponde al costo del transporte, mientras que el 60% restante lo aportan los inventarios, procesamiento de pedidos, almacenaje y planeación de gestión de operaciones de transporte (Gráfica 1). Aunque nuestro país tiene menores costos de logística que países como Brasil y China, este indicador es superior al registrado en países europeos y Estados Unidos, donde alcanza 10%.

Asimismo, como porcentaje del PIB, los costos logísticos en México representan 15.3%, casi cinco puntos porcentuales por arriba de lo observado en el Reino Unido y Estados Unidos (Gráfica 2). Es por ello que una correcta administración y diseño de los sistemas y redes de transporte y localización de instalaciones son de vital importancia en todas las empresas que pretendan reducir el costo de hacer llegar sus productos a los clientes.



Gráfica 1. Costos logísticos de las empresas como porcentaje de las ventas. Nota: Para el caso de México los costos de administración y almacenaje se sumaron para dar un 4.8 % de las ventas totales (Fuente: Foro: Competitividad y Mejores Prácticas Logísticas. Estimaciones de AT Kearney, 2004).



Gráfica 2. Costos totales de transporte como porcentaje del PIB (Fuente: Estimaciones de AT Kearney, 2004).

(H. A. Eiselt y Vladimir Marianov, 2011) refieren que un matemático podría definir el problema de localización de instalaciones con la siguiente frase: *“Dado un espacio y una serie de puntos conocidos determine un número adicional de puntos tales que optimicen cierto criterio (costo, distancia, número de clientes, etc.) entre los nuevos y los existentes puntos.”* Estos “puntos” de los que se habla en la definición se pueden entender como los lugares donde se localiza la demanda del producto o servicio. Los puntos clave de cualquier problema de localización de instalaciones son: un espacio definido en el cual las distancias son medibles, una serie de puntos dados y una serie de puntos que son candidatos para convertirse en una o varias unidades integradas a la red actual de distribución; para llevar a cabo este objetivo existen numerosos métodos los cuales se han desarrollado a lo largo de la historia, desde las primeras teorías de la localización de industrias de Alfred Weber en 1909 quien consideró minimizar la distancia total entre un almacén y sus clientes, pasando por aquellos problemas plasmados a mano que han quedado obsoletos ya que sus aplicaciones crecieron de manera acelerada con la llegada de la programación lineal a mediados del siglo XX. (Michael J. Kuby & Richard Church, 2010).

La década de 1930 vio llegar contribuciones a la localización de instalaciones de autores como Christaller (Bustos Gilbert, M. Luisa, 1993), que fundó la teoría del lugar central y Weiszfeld (ibídem, 1993), que desarrolló su famoso algoritmo que resuelve los problemas de Weber tomando un número arbitrario de clientes. El nacimiento de la moderna teoría ubicación cuantitativa a mediados de 1960, cuando Hakimi (ibídem, 1993) escribió su análisis de un modelo de localización en redes, que, en el lenguaje de hoy, es un problema de *p-mediana* en el cual se asume que la demanda ocurre en los nodos de una red de puntos determinados y que el costo de ubicar una nueva instalación es el mismo sin importar dónde se instale, éste y otras variantes de las redes de localización pertenecen al rubro de “Problemas Minisum” los cuales deben su nombre al hecho de que una suma de distancias entre instalaciones y clientes se reduce al mínimo. Por otro lado los “Problemas Minimax” trabajan bajo la primicia de que si los puntos de una red que se encuentran a través del algoritmo fueran instalaciones, la

distancia máxima entre un punto de demanda y su instalación más cercana se minimizaría.

Después de Hakimi vinieron otros investigadores quienes pulieron las teorías existentes y a partir de ellas desarrollaron nuevas aplicaciones, ReVelle, Iglesia, Drezner, Berman, (ibídem, 1993, p.3) y muchos otros han hecho importantes contribuciones a la ciencia de la localización. El desarrollo de los llamados “*Problemas de cobertura*” trajo una nueva forma de ver la localización de instalaciones, en éste tipo de problemas la distancia aparece como una restricción en el problema pero no es una variable determinante, ya que lo que generalmente se busca es que al localizar una instalación cierto número de clientes sea atendido o “cubierto” correctamente y a tiempo con ciertas variaciones dependiendo del modelo específico que se utilice. Como ejemplo, en una instalación de bomberos desde la cual todas sus unidades deben ser capaces de cubrir cierta área en un máximo de digamos ocho minutos, es decir, en este ejemplo el cliente será correctamente atendido considerando una distancia o tiempo preestablecidos.

Los primeros modelos que buscaron la competitividad en las empresas aparentemente comenzaron a principios de los 80's y han evolucionado hasta métodos que incluso consideran las leyes del electromagnetismo para modelar la interacción entre los clientes y la localización de las instalaciones comparando ésta interacción con la de las cargas eléctricas (Aldajani, Mansour A., 2008).

Michael L. Lawrence en el capítulo seis del libro *Administración de la producción y las operaciones*, (Adam, Everett E., 1991) ha definido el problema estratégico con una frase que me parece muy acertada –“¿Cuántas instalaciones conviene tener y donde deberían emplazarse estas?”- Este es un problema que enfrentan las industrias y que abordaré mediante métodos matemáticos para dar una solución clara y concisa ya que el éxito de la ubicación influye y se ve influido a la vez por las actividades de organización y control.

1.0 MARCO CONTEXTUAL

1.1 El problema de la localización de instalaciones

Un problema de localización es un problema de asignación de recursos dentro de un espacio determinado; en el problema general de la ubicación de instalaciones, una o más instalaciones de servicio ("Proveedores") sirven a un conjunto de demandas espacialmente distribuidas ("Clientes"). El objetivo es situar los servicios o proveedores para optimizar cierto criterio el cual generalmente es la atención de las demandas o clientes tomando en cuenta uno o varios criterios tales como costo, tiempo o distancia.

No es cotidiano que una empresa se enfrente al reto de localizar una o varias instalaciones y por ello se involucran diversos factores que deben ser tomados en cuenta para poder tomar una decisión de ésta magnitud la cual generalmente se lleva a cabo al más alto nivel corporativo, incluyendo la alta gerencia y el consejo de administración; la habilidad de una empresa para producir y posicionar sus productos en el mercado depende en gran medida de la localización de sus instalaciones lo cual en ocasiones y dependiendo del tipo de empresa se torna en un proyecto que puede llevar algunos meses o varios años.

La toma de decisiones acerca de la localización de instalaciones es un proceso que depende de cuatro preguntas clave (Daskin Mark S. 1995):

- ¿Cuántas instalaciones se necesitan?
- ¿A qué clientes debe atender cada instalación?
- ¿Dónde se necesitan las instalaciones?
- ¿Qué tamaño deben tener las instalaciones?

La respuesta a estas preguntas depende del contexto particular de cada problema, por ejemplo en el caso de estaciones de emergencia, ya sea de bomberos, de policía o de ambulancias, lo que el problema requiere es que las instalaciones se localicen lo más cerca posible de los puntos de demanda, mientras que en el caso los sitios de disposición de residuos tóxicos se busca que estos estén lo más lejos posible de los centros poblados y en una región geológicamente estable.

El número y tamaño de instalaciones generalmente depende de la relación costo/servicio; es decir, en muchos casos cuando el número de instalaciones aumenta, la calidad del servicio que se ofrece aumenta al igual que el costo del servicio.

Los modelos de localización también se preocupan por los clientes a los que debe atender cada instalación ya que en algunos casos una o varias de las unidades operativas sólo pueden ser atendidas por cierto almacén o centro de distribución generalmente porque vende determinado tipo de productos que sólo pueden ser suministrados por dicho almacén aunque también pueden influir otros factores como la distancia de cobertura que se asigna a cada instalación. También pueden entrar en juego razones administrativas y/o del mercado al que va dirigido el producto o servicio, por ejemplo en la cadena Wal-Mart en México las distintas tiendas que forman las subdivisiones no venden los mismos productos (Superama, Wal-Mart y Bodega Aurrera están dirigidos a diferentes sectores de la población y por lo tanto los productos que ofrecen no son los mismos). En otros casos como en los centros de atención médica o de emergencias, la demanda puede ser atendida por cualquiera de las instalaciones existentes; de ésta manera es importante que los problemas de localización de instalaciones tomen en cuenta las políticas de abastecimiento de la empresa y por lo tanto se debe asignar la demanda que atenderá cada instalación.

La toma de decisiones requiere una planeación de hasta 5 años para instalaciones muy complejas tales como refinerías o plataformas de petróleo, fundidoras de acero y plantas generadoras de electricidad, es decir, aquellas instalaciones que requieren ser construidas desde cero. También podría requerirse de un periodo tan corto como un año para instalaciones que no son tan complejas, por ejemplo bodegas, supermercados y unidades operativas (Schroeder, Roger G., 1992).

La llamada “teoría de la localización industrial” no es un tema nuevo, en 1909 Alfred Weber (Klose Andreas, Drexl Andreas, 2003) comenzó lo que después se convertiría en una de las áreas de investigación con mayor actividad en la investigación de operaciones durante los últimos 20 años. Su modelo parte de tres supuestos básicos que le permiten eliminar la complejidad de los problemas del mundo real: las fuentes de

materias primas y la demanda están definidos y además la mano de obra es ilimitada. Adicionalmente considera factores que son determinantes para su teoría: los costos de transporte son proporcionales al peso de la carga transportada y su objetivo general es minimizar la suma de las distancias entre los puntos de demanda y el único almacén existente; podemos darnos cuenta que el problema de Weber es aplicable a la industria antigua y a la industria ligera donde las complicaciones pueden reducirse aplicando dichos supuestos. La teoría de Weber fue criticada durante mucho tiempo por sus supuestos y consideraciones que le otorgan un elevado grado de abstracción y por lo tanto alejan sus posibles aplicaciones de la realidad, sin embargo no podemos negar que fue el punto de partida de las teorías de localización industrial actuales.

La formulación básica del problema de Weber (y base de todos los problemas de localización) consiste en encontrar las coordenadas (x, y) de una instalación (X) que minimiza la suma de las distancias a (n) puntos conocidos de demanda con coordenadas (a_i, b_i) y costo por unidad de distancia W_i , $i = 1, 2, \dots, n$, todos ellos en el mismo plano. Su formulación general es:

$$\text{Min } Z(X) = \sum_{i=1}^n W_i d(X, P_i)$$

Donde $d(X, P_i)$ es la distancia entre la instalación y cada punto de demanda i . Si la distancia es Euclidiana se representa con la siguiente expresión:

$$d(X, P_i) = \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2}$$

Este trabajo fue reconsiderado por Isard (1956) con su estudio de la localización industrial, uso del suelo, y problemas afines. Otra primera formulación fue propuesta por Hotelling (1929), donde un economista considera el problema de la ubicación de dos proveedores de la competencia a lo largo de una recta línea. Este trabajo fue ampliado más tarde por Smithies (1941) y Stevens (1961). Una serie de autores en la década de 1950 y principios de 1960 trabajaron con el problema de las instalaciones y su diseño (Apple 1963, Armour y Buffa 1963, Ireson 1952, Moore 1962, Muther 1955, Reed 1961).

Losch (1954) y Moisés (1958) consideran factores económicos asociados con la ubicación del centro de producción, intentan relacionar la teoría de la localización industrial con las repercusiones económicas argumentando que para ellos el objetivo de los empresarios deberá ser encontrar aquel lugar donde los beneficios sean máximos y, en comparación con los anteriores investigadores ellos piensan que ni la demanda ni los costos son constantes en el espacio (Bustos Gilbert, María Luisa, 1993). La ruptura con la línea anterior de investigación se resume en tres aspectos:

1. Es la primera teoría en considerar como principales factores de localización la demanda, las salidas y el mercado mientras que anteriormente se daba más énfasis a la oferta y las entradas.
2. Considera como localización óptima el lugar de máximo beneficio, es decir donde el total de ingresos supere en mayor proporción a los costos totales.
3. Su preocupación fundamental era comprobar cómo se ordenaría la actividad económica en el espacio bajo unas circunstancias dadas y finalmente llega a una serie de supuestos que resultan enormemente restrictivos, por ejemplo que las industrias que pertenecen a un mismo ramo tendrán los mismos costos sin importar el lugar donde se ubiquen, su mercado será idéntico, las tarifas de transporte y sus precios de venta serán los mismos.

Miehle (1958) considera el problema minimizando la longitud de los enlaces en las redes. No fue hasta mediados de los 60's que llegaron los modelos aplicables y realistas acompañados de las capacidades que otorga la computación. Numerosos resultados significativos se han logrado mediante una variedad de investigadores en los últimos años. Esta nueva etapa se puede resumir en los siguientes aspectos:

- La estructura industrial había cambiado, la pequeña empresa de una sola fábrica cambió para dar lugar a las nuevas corporaciones y dentro de este nuevo contexto las decisiones de localización no se tomaban de forma aislada sino que ahora están más vinculadas a las políticas generales de toda la empresa.
- Las teorías tradicionales se preocuparon principalmente por la búsqueda de localizaciones óptimas tomando en cuenta como criterio principal la minimización

del costo pero no tuvo en cuenta que en realidad las fábricas se pueden localizar en puntos que pueden ser no óptimos siempre y cuando estos puntos estén dentro de los márgenes de rentabilidad para la empresa.

- La teoría tradicional no consideraba en ningún momento el comportamiento humano y de estrategia, en el cual la búsqueda del máximo beneficio no necesariamente implica la minimización de costos, otros factores como la demanda, la distancia o el tiempo podrían ser entendidos como ese máximo beneficio.
- Esta nueva corriente consideraba que desde el punto de vista empírico, el supuesto de conocimiento absoluto del mercado es erróneo y que la teoría consideraba que las empresas eran independientes a diferencia de la realidad y, por lo tanto, en ese momento las estrategias de comportamiento se convirtieron en un elemento de gran importancia.
- Sorprendentemente no se había tomado en cuenta que dependiendo del tipo de industria los procesos de elección de una localización varían irremediablemente.

Parte de este trabajo ha sido reportado y revisado en libros y artículos (Hansen et al. 1987, Brandeau y Chiu 1989, Mirchandani y Francis 1990, Francis et al. 1992, Labbé et al. 1995). Problemas con y sin restricciones de capacidad han recibido una gran atención, especialmente atención en la creación de algoritmos. No obstante, un número significativo de aspectos prácticos de la ubicación de la planta permanecen sin vigilancia y sin estudiar.

Cabe señalar que en los últimos años han tenido lugar una serie de fenómenos como la crisis industrial, altas tasas de paro, etc. Todo esto ha hecho que el interés por la teoría de la localización industrial aumente de nuevo.

Los problemas de localización de instalaciones se pueden clasificar dependiendo de diferentes criterios cualitativos y cuantitativos, a continuación la clasificación de Klose Andreas, Drexl Andreas, (2003):

1. Por la forma o topografía del conjunto de plantas, los modelos de ubicación de red, y la ubicación discreta o entera mixta modelos de programación, respectivamente. Para cada una de las subclases las distancias se calculan utilizando alguna métrica.
2. Por los objetivos pueden ser o bien del tipo Minisum o del tipo Minimax. Minisum modelos están diseñados para minimizar distancias promedio mientras que los modelos Minimax tienen que minimizar distancias máximas. Predominantemente, los modelos Minisum abarcan los problemas de localización de las empresas privadas, mientras que los modelos Minimax centrarse en los problemas de localización que surgen en el sector público.
3. Los modelos sin limitaciones de capacidad no restringen la asignación de la demanda. Si las restricciones de capacidad de los sitios potenciales tienen que ser obedecidas, la demanda tiene que ser asignada cuidadosamente. En este último caso hay que examinar si la fuente de abastecimiento es sólo una o existen múltiples fuentes.
4. Los modelos mono-etapa se centran en los sistemas de distribución que cubren sólo una etapa explícita. En modelos de etapas múltiples el flujo de bienes que comprende varias etapas jerárquicas tiene que ser examinado.
5. Los modelos mono-producto se caracterizan por el hecho de que la demanda, costo y capacidad para varios productos se pueden agregar a un único producto homogéneo. Si los productos son homogéneos su efecto en el diseño del sistema de distribución tiene que ser analizado.
6. Con frecuencia, los modelos de localización toman como base el supuesto de que la demanda es inelástica, es decir, la demanda es independiente de decisiones espaciales. Si la demanda es elástica la relación existente, por ejemplo, con la distancia debe tomarse en cuenta explícitamente.
7. Los modelos estáticos tratan de optimizar el rendimiento del sistema durante un período representativo. En contraste, los modelos dinámicos reflejan los datos (costo, demanda, capacidad, etc.) que varían con el tiempo dentro de un horizonte de planificación determinado.

8. En la práctica, la demanda del modelo general no se conoce con certeza. Los datos se basan en los pronósticos y, por lo tanto, es probable que sean inciertos. Como consecuencia, tenemos modelos deterministas o bien donde la demanda se conoce con certeza o modelos probabilísticos si la demanda está sujeta a la incertidumbre.

9. En los modelos clásicos la calidad de la asignación de la demanda se mide en el aislamiento para cada par de oferta y puntos de demanda. Por desgracia, si la demanda se satisface a través de visitas de entrega entonces, por ejemplo, el costo de entrega no se puede calcular para cada par de puntos de oferta y demanda por separado.



Figura 1. Clasificación de los problemas de localización según diversos factores. (Fuente: Elaboración propia, MindManager8, 2013).

1.2 La estrategia en la localización de instalaciones

La estrategia en la toma de decisiones es una parte crítica en las operaciones de cualquier empresa y como tal afectan su éxito logístico y por consiguiente competitivo. Para hacer rentable el proceso de localizar una instalación éstas se planean para permanecer en cierto lugar operando por un largo periodo de tiempo.

El pensamiento estratégico es aquel que se plantea un fin, analiza los medios con los que cuenta para llegar a él y luego los dispone de tal modo que faciliten su alcance de la mejor manera posible al menor costo y con el máximo beneficio.

En la estrategia se requiere de gran intuición, lógica, observación, cognición, alto nivel de motivación, imaginación, capacidad analítica, sintética y de argumentación. No todo planteamiento es estratégico, solo es aquel que asegura que el resultado se obtenga pues el plan y la acción están unidos intrínsecamente, es un pensamiento flexible capaz de reorganizar los medios cuando los objetivos se pierden de vista, así como readaptarse a los cambios contextuales.

En el mundo empresarial es indispensable el pensamiento estratégico para lograr que los productos lleguen al mercado para lo cual se requieren distintas estrategias, para seleccionar el producto, reducir costos, seleccionar personal, etc.

La logística tiene como objetivo impulsar a la organización, hacerla más competitiva en todos los aspectos. El pensamiento estratégico incluye la aplicación del juicio basado en la experiencia pasada para determinar acciones, incorpora valores, misión, visión, estrategia y filosofía del trabajo, coordina las mentes creativas, es el fundamento de las decisiones estratégicas, sin este fundamento las decisiones y acciones quedan fragmentadas en consistentes con la salud de la empresa. Además el pensamiento estratégico es la capacidad de anticipar las consecuencias o resultados antes de la realización de los hechos.

“La logística es el conjunto de técnicas y herramientas aplicadas al movimiento, desplazamiento, suministro o abastecimiento de materia prima, producto terminado recursos humanos, etc.” (Apuntes de logística, García Robles, Sergio A. 2012).

En consecuencia debe tomarse en cuenta la capacidad, el momento y el lugar en el que se requiere esa capacidad a largo plazo; estos tres elementos deben considerarse de una manera integrada y se ven afectados por los siguientes factores (Schroeder, Roger G., 1992):

- 1) *Demanda que se predice (actualmente llamada pronóstico de la demanda)*: La formulación de una estrategia acerca de las instalaciones requiere un pronóstico de la demanda, aun cuando la valoración sea muy grande. Existen diversos métodos para realizar estos pronósticos de la demanda:

Métodos cuantitativos: regresión lineal, último valor, promedios móviles, suavizado exponencial, gráficos etc.

Métodos cualitativos: Delphi, juicio ejecutivo, planes visionarios y encuestas a clientes.

El pronóstico de la demanda sirve para determinar la materia prima, los recursos y el tiempo que se necesitará por producto por presentaciones por marca. Debemos realizar un análisis de lo general a lo particular gráficas de crecimiento con pendiente positiva negativa para determinar el aumento o desaparición de una marca cuando el crecimiento es menor a lo deseado entran en juego los planes de estrategia de ventas transformar plantas de producción centros de distribución maquinaria equipo recursos humanos recursos financieros e infraestructura.

Algunas recomendaciones para realizar el pronóstico de la demanda son: recopilar información histórica mínima de cinco años anteriores, utilizar herramientas matemáticas para el cálculo del pronóstico, utilizar métodos cualitativos para la decisión definitiva, analizar los productos por marca, analizar los comportamientos de ventas.

- 2) *Costo de las instalaciones*. El costo afecta la estrategia acerca de las instalaciones al considerar que deben construirse de tamaño pequeño o grande según nuestras necesidades. El costo también afecta por lo tanto la cantidad de la capacidad que se añade en un momento dado, su oportunidad y la ubicación de la capacidad.

- 3) *Probable comportamiento de la competencia.* Si se espera que la competencia responda lentamente esto podría hacer que la empresa añada capacidad para “atrapar el mercado” antes de que los competidores se hagan más fuertes. Por otro lado, cuando se espera una respuesta más rápida de la competencia, esto podría hacer que la compañía fuera más precavida al expandir su capacidad.
- 4) *Estrategia empresarial.* La estrategia empresarial podría indicar que una compañía debe poner más énfasis en el costo, en el servicio o en la flexibilidad en la elección de las instalaciones. Por ejemplo una estrategia empresarial que implica dar el mejor servicio puede ocasionar la construcción de instalaciones con cierto exceso de capacidad o localizaciones de mercado para un servicio rápido. Existen otras estrategias empresariales que pueden llevar a minimizar los costos o a otro tipo de selección de instalaciones.
- 5) *Consideraciones internacionales.* Conforme los mercados adoptan una naturaleza más global, las instalaciones deben localizarse tomando esto en cuenta. Esto involucra no solo la elección cuidadosa de mano de obra, sino la localización de las instalaciones de acuerdo con su ventaja estratégica más importante. Por ejemplo en caso de que nuestro producto sea propenso a la exportación o la materia prima tenga que ser importada.

Actualmente en México y el extranjero las comunidades claman por nuevas industrias que mejoren la economía del lugar donde se localizan, para que nuevas empresas se establezcan en un lugar determinado se ofrecen incentivos tales como terreno gratis, servicios sin costo, financiamiento favorable y beneficios fiscales.

La selección de fuentes de información como proceso inicial para determinar la ubicación de la planta consiste en la obtención de fuentes confiables tales como la folletería de las cámaras de comercio en las cuales se informa sobre las posibilidades de expansión en las distintas comunidades estatales y locales. “En EUA el Wall Street Journal y numerosas publicaciones sobre comercio contienen anuncios publicitarios pagados por las ciudades y comunidades que desean atraer nuevas actividades comerciales; La *National Industrial Conference Board*, los departamentos federales de comercio, la *Small Business Administration* y el *US Census of Manufacturers* son

algunas de las muchas fuentes que pueden proporcionar información general y detallada sobre localización de instalaciones. Esta información comprende análisis geográficos de disponibilidad de mano de obra, población, servicios de transporte, perfiles de los tipos de comercio existente e información semejante.” (Everett E. Adam, Jr. Y Ronald J.Ebert, 1991)

“En las tendencias actuales en cuanto a ubicación de planta, las empresas parecen preferir:

1) Los parques industriales en zonas suburbanas atractivas con instalaciones centralizadas de servicios.

2) Los proyectos de renovación urbana “en el centro”.

3) Localidades en el extranjero cerca del mercado de exportación o de los recursos naturales.

Están también los propietarios caprichosos que instalan sus empresas cerca del lugar donde desean vivir, aunque son minoría” (Riggs James L., 2010). Aunado a ello y a la cabeza de casi cualquier lista de características deseables en el lugar donde se localizará una empresa se encuentra además de la cercanía a la zona de demanda, la oferta de mano de obra.

Existe un amplio número de factores que influyen en la ubicación de una planta productora, de un centro de distribución o de cualquier tipo de instalaciones. En la cima de éstos factores casi siempre se encuentra el costo más bajo, es decir el costo mínimo de entregar el producto o servicio al cliente.

Por lo general se debe iniciar con un estudio que evalúa los factores geográficos regionales y pasar luego a las comunidades particulares dentro de la región preferida. La información de carácter general, como la economía, áreas de oportunidad y mercado meta por ejemplo, es suficiente para determinar las regiones.

Además en éste estudio entran en juego detalles específicos, podemos hablar de factores cuantitativos como costos de materiales de construcción, costo de la mano de

obra y gastos de transporte. Así mismo muchos otros factores son de carácter subjetivo por lo que en éste momento la ubicación se vuelve un factor estratégico el cual se basa en la experiencia y pericia de los directivos del proyecto; algunos de estos factores como lo son la actitud de la comunidad hacia la construcción de la fábrica, la competencia, el potencial de crecimiento a futuro y últimamente la seguridad que también ha tomado importancia sin precedentes en nuestro país.

Riggs James L. (2010) nos ofrece una clasificación de estos factores:

Mano de obra

La importancia de la mano de obra radica en que es el factor determinante de producción, debido a que es el que desarrolla toda la serie de actividades ayudada por técnicas, instrumentos e infraestructura entre otros:

- Personas disponibles en cada categoría de aptitud, edad y sexo.
- Salarios por categoría de aptitud y costo de beneficios marginales.
- Empleo por porcentaje de fuerza de trabajo y antecedentes de huelgas.
- Grado de sindicalización y leyes sobre el derecho del trabajo.

Servicios:

- Disponibilidad, tipo y costo del transporte de personal.
- Confiabilidad, rapidez, comodidad y costo de transporte de materiales.
- Disponibilidad y costo de electricidad y combustibles, entre otros servicios.

Lugares:

- Zonificación, calidad y costo de los terrenos; protección contra incendios y delitos.
- Suficiencia de edificios para arrendar o comprar y disponibilidad de financiamiento local.
- Disponibilidad de características especiales como caminos de acceso, áreas para estacionamiento, vías ferroviarias y espacio para almacenes.

Impuestos:

- Impuesto sobre el monto de las ventas, el ingreso, los bienes, el inventario, la maquinaria y las concesiones.
- Impuesto sobre retribución a los trabajadores y por seguro de desempleo.
- Tendencia de los impuestos local, municipal y estatal.

Legalidad:

- Leyes referentes a la contaminación del medio ambiente.
- Referentes a las obligaciones y derechos del trabajador y del patrón.



Figura 2. Factores estratégicos que influyen en la localización de instalaciones. (Fuente: Elaboración propia, MindManager8, con datos de Riggs James L. 2010.)

1.3 LA IMPORTANCIA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

En la literatura existen un sinnúmero de definiciones, sin embargo una definición simple y sencilla de la cadena de suministro es *“la red de instalaciones, medios y procesos para posicionar e intercambiar materiales, servicios, productos semi-terminados, productos terminados, operaciones de post-acabado logístico, de post-venta y de logística inversa, así como de información”* (Klatch, Wally, 2005), en la logística integrada que va desde la procuración y la adquisición de materia prima hasta la entrega y puesta en servicio de productos terminados al consumidor final. La cadena de suministro muchas veces puede ser entendida solamente como la relación entre el proveedor y el cliente, éste concepto no está del todo mal si lo vemos de una manera superficial pero hay que tener en mente que hay un mundo de procesos que la componen, procesos físicos como el transporte de producto, almacenamiento y distribución, procesos financieros, administrativos y de servicio al cliente como el control de inventario, creación de presupuestos y venta directa.

Así mismo el intercambio de información tanto de los proveedor-cliente, cliente-proveedor y horizontalmente entre los componentes antes citados es muy importante para cumplir el objetivo final de la cadena de suministro, para diseñar adecuadamente un sistema de distribución y localizar instalaciones.

Chopra y Meindl (2007) han definido seis principales motores para el rendimiento y gestión de la cadena de suministro: el transporte, el inventario, las instalaciones, información, precios y abastecimiento. (Elkafi Hassini, ChiragSurti, CorySearcy, 2012).

En éste trabajo la importancia de la cadena de suministro radica en dos de éstos motores los cuales son transporte e instalaciones y la relación que los une: la información. El primero que se encarga de proveer los insumos necesarios para satisfacer las necesidades de producción, materia prima y materiales, más adelante se encarga de llevar a cabo la correcta distribución en tiempo y forma de producto terminado cuidando los tiempos de entrega de los proveedores y los niveles de inventario haciendo llegar a los clientes y/o a su red de distribución, que puede incluir

otros almacenes temporales también llamados centros de acopio o centros de distribución (CEDIS).

En segundo lugar, las instalaciones y su localización se relacionan con la cadena de suministro y el transporte a través de la información que proporciona la cadena de suministro al tomador de decisiones, es decir, al saber cómo, cuándo, de dónde provienen y hacia dónde van los insumos o los productos según sea el caso es posible diseñar de mejor manera una red de distribución así como la localización de instalaciones.

La toma de decisiones estratégicas basadas en análisis económicos, de transporte, de seguridad y de mínimas distancias entre otros factores es muy importante para el segundo motor. La importancia de la localización de estas instalaciones para poder satisfacer las necesidades de los puntos de venta a lo largo del territorio que abarca nuestro mercado es optimizar cierto criterio el cual dependerá específicamente del problema al que nos enfrentemos, este criterio puede tratarse de la demanda, el costo, el tiempo de entrega, la distancia recorrida, etc. Es decir mientras mejor ubicados estén las instalaciones lograremos optimizar otros componentes de la cadena de suministro tales como pedidos del cliente, fabricación, ciclo de reabastecimiento, devolución del producto, transporte, control de inventarios y facilidad de entrega para proveedores minoritarios independientes.

A manera de resumen podemos decir que los objetivos principales de la cadena de suministro son:

- Abasto de materiales a partir de la velocidad de respuesta en todo los procesos involucrados.
- Optimización de costos y reducción de gastos de operación.
- Potenciar programas de calidad y servicio.
- Administración de operaciones o procesos.
- Incrementar la productividad.

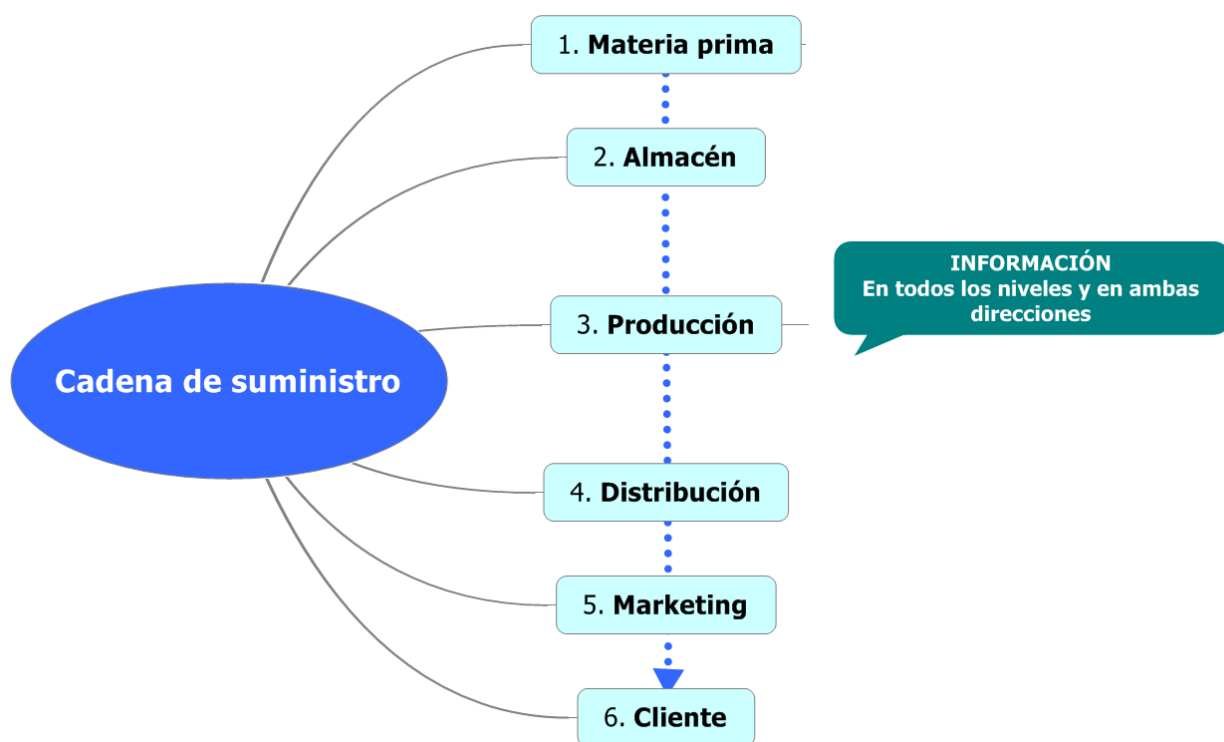


Figura 3. Cadena de suministro y sus componentes. (Fuente: Apuntes de Logística, MindManager8, García Robles, Sergio A., 2012).

Estos conceptos y definiciones son aplicables a todo tipo de productos y servicios, por supuesto, a reserva de tomar en cuenta las características propias del mismo para garantizar que el resultado será favorable y satisfactorio tanto para el cliente como para él o los proveedores.

2. MARCO TEÓRICO Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

2.1 Modelos matemáticos para determinar la localización de instalaciones

Son diversos los modelos que se emplean para determinar la mejor ubicación de las instalaciones. A veces estos modelos se construyen a partir de un modelo existente especialmente para ajustarse a las circunstancias específicas de un problema en particular; así mismo existen algunos modelos conocidos ampliamente y de carácter general que pueden ser adaptados a las necesidades de una gran variedad de sistemas. A grandes rasgos los modelos existentes para la solución del problema de localización de instalaciones se clasifican en cuatro grandes áreas:

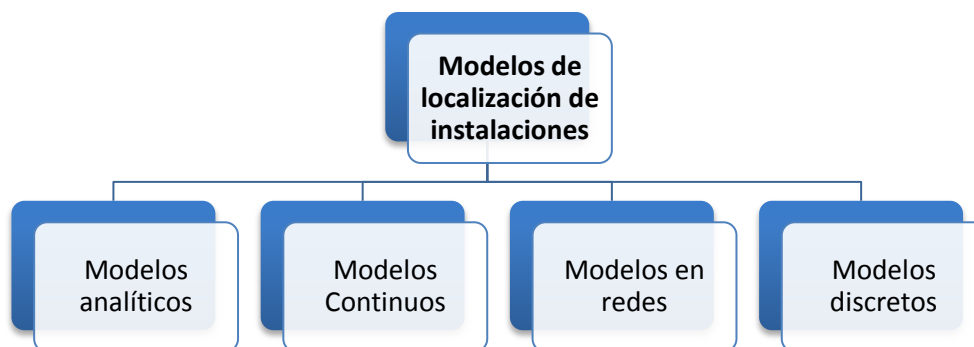


Figura 4. Taxonomía de los modelos de localización. (Fuente: Daskin, Mark S. 2008)

2.1.1 Los modelos analíticos

Los modelos analíticos son los más simples dentro del modelado de localización de instalaciones, estos modelos suelen asumir que la demanda se distribuye de alguna manera (por ejemplo de manera uniforme) a través de un área de servicio determinada y las instalaciones pueden ubicarse en cualquier lugar dentro de dicha área. Los modelos analíticos típicamente se resuelven con técnicas y cálculos simples, por ello su aplicación en problemas de la realidad es prácticamente nula debido principalmente a los supuestos iniciales que se toman para modelar los problemas.

Para ejemplificar estos modelos consideremos lo siguiente:

Una demanda se comporta de acuerdo a una función de distribución uniforme en un área cuadrada a . Los viajes ocurren en caminos que se ubican a 45 grados con respecto al lado del cuadrado. Entonces la distancia entre la instalación localizada en el centro de y cualquier punto de demanda seleccionado de manera aleatoria está dado por:

$$D = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{a}{2}}$$

Ahora si consideramos el problema de localizar N instalaciones para minimizar los costos fijos de localizar y de transporte. Sea f los costos fijos por localizar y c los costos unitarios del transporte y la función de distribución de la demanda. Con N instalaciones, cada instalación servirá un área de aproximadamente a/N y la distancia esperada a la instalación más cercana de las N instalaciones a cualquier punto de demanda seleccionado de manera aleatoria será:

$$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{a}{2N}}$$

La función de costo total en función de N , estará dada por:

$$TC(N) = fN + \left(\frac{2}{3} \sqrt{\frac{a}{2N}} \right) cpa$$

El número óptimo de instalaciones crece a razón de $2/3$ del costo unitario por instalación y la función de distribución de la demanda y decrece a razón de $2/3$ de los costos de localización y está dado por:

$$N^* = a \left(\frac{c p \sqrt{2}}{6f} \right)^{2/3}$$

Si sustituimos N^* en la función de costos totales $TC(N)$ obtenemos:

$$TC(N) = af^{\frac{1}{3}}(cp)^{\frac{2}{3}} \left[\left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cong 1.1447 af^{\frac{1}{3}}(cp)^{\frac{2}{3}}$$

El número óptimo de instalaciones crece de manera lineal con respecto el área de servicio, a razón de $1/3$ con respecto los costos fijos de localización y a razón de $2/3$ de los costos fijos de transporte y de la función de distribución de la demanda.

2.1.2 Los modelos continuos

Los modelos continuos también conocidos como modelos en el plano se caracterizan principalmente por dos cosas:

Primera: el espacio de solución es continuo, es decir, es factible localizar instalaciones en cada punto del plano. La demanda se da en puntos discretos dentro del mismo espacio.

Segunda: las distancias se miden con algún método adecuado, típicamente se utiliza la distancia "Manhatan" o de ángulo recto o la distancia Euclidiana o distancia en línea recta.

Los problemas de localización continua requieren que se determinen las coordenadas (x_i, y_i) para un número P de instalaciones. El objetivo es minimizar la suma de las distancias entre las instalaciones y los puntos n de demanda para $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y la intensidad de la demanda está dada por h_i . El clásico problema de Weber es un típico caso de modelado de problemas de localización continua en el que el objetivo es:

$$\text{Minimizar } (X, Y) \quad \sum_{i=1}^n h_i \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2}$$

Este problema se resuelve usando métodos iterativos, uno de los cuales fue propuesto originalmente por Weiszfeld (1937) y fue mejorado después por Miehle (1958) quien hizo una serie de modificaciones para asegurar y acelerar su convergencia.

2.1.3 Los modelos en redes

En estos modelos la demanda se da únicamente en los nodos de una red y las instalaciones solo pueden ser ubicadas dentro de dicha red. En los modelos de ubicación de red las distancias se calculan como los caminos más cortos en una red de puntos unidos por arcos.

Un ejemplo de este tipo de problemas es el llamado “problema de 1-mediana en un árbol” donde n es el número de nodos de un árbol de decisión para $i = 1, 2, 3, \dots, n$, se comienza en cualquier nodo y si la demanda de dicho nodo es igual o mayor que la mitad de la demanda total de todos los nodos la ubicación óptima de la instalación es en ese nodo, si no, se elimina ese nodo y los arcos que lo unen a la red y se agrega su demanda a los nodos a los que estaba unido.

El procedimiento del algoritmo continúa hasta que la demanda de algún nodo i es igual o mayor que la mitad de la suma de la demanda total H de todos los nodos del árbol, esto es:

$$i * h_i \geq H/2$$

Donde h_i es la intensidad de la demanda en ese nodo.

2.1.4 Los modelos discretos

La cuarta y última clasificación aborda los modelos de localización discretos. En estos modelos, puede o no haber una métrica de distancia subyacente. Las distancias o costos entre cualquier par de nodos pueden ser arbitrarios, aunque generalmente siguen algunas reglas (por ejemplo, euclidianas, Manhattan, red, o grandes distancias circulares). Las demandas surgen generalmente en los nodos y las instalaciones solamente se pueden ubicar en un conjunto finito de lugares candidatos.

Los modelos discretos se pueden subdividir o clasificar en tres grandes áreas: *modelos discretos basados en cobertura* los cuales se usan en empresas donde se relaciona directamente la proximidad entre las instalaciones y los puntos de demanda como un indicador de alta calidad en el servicio; es decir entre más cerca esté una instalación del punto de demanda mayor será la calidad del servicio puesto que será atendido en menor tiempo.

Modelos discretos basados en la mediana minimizan la distancia media ponderada de la demanda entre un nodo y la instalación que se le asigna, estos modelos son utilizados generalmente cuando se requiere minimizar el costo de transporte. Finalmente hay algunos modelos no caen dentro de ninguna de las dos categorías anteriores, modelos discretos tales como el modelo P-dispersión que se usa cuando se requiere minimizar la “canibalización” en el mercado, por ejemplo en las franquicias Mc Donalds, donde debe existir cierta separación entre una y otra sucursal; este modelo también se puede usar para localizar instalaciones militares estratégicas donde de llegar a destruirse una de ellas se requiere que el daño a las adyacentes sea el menor posible. Dicha clasificación se muestra en la figura 5.

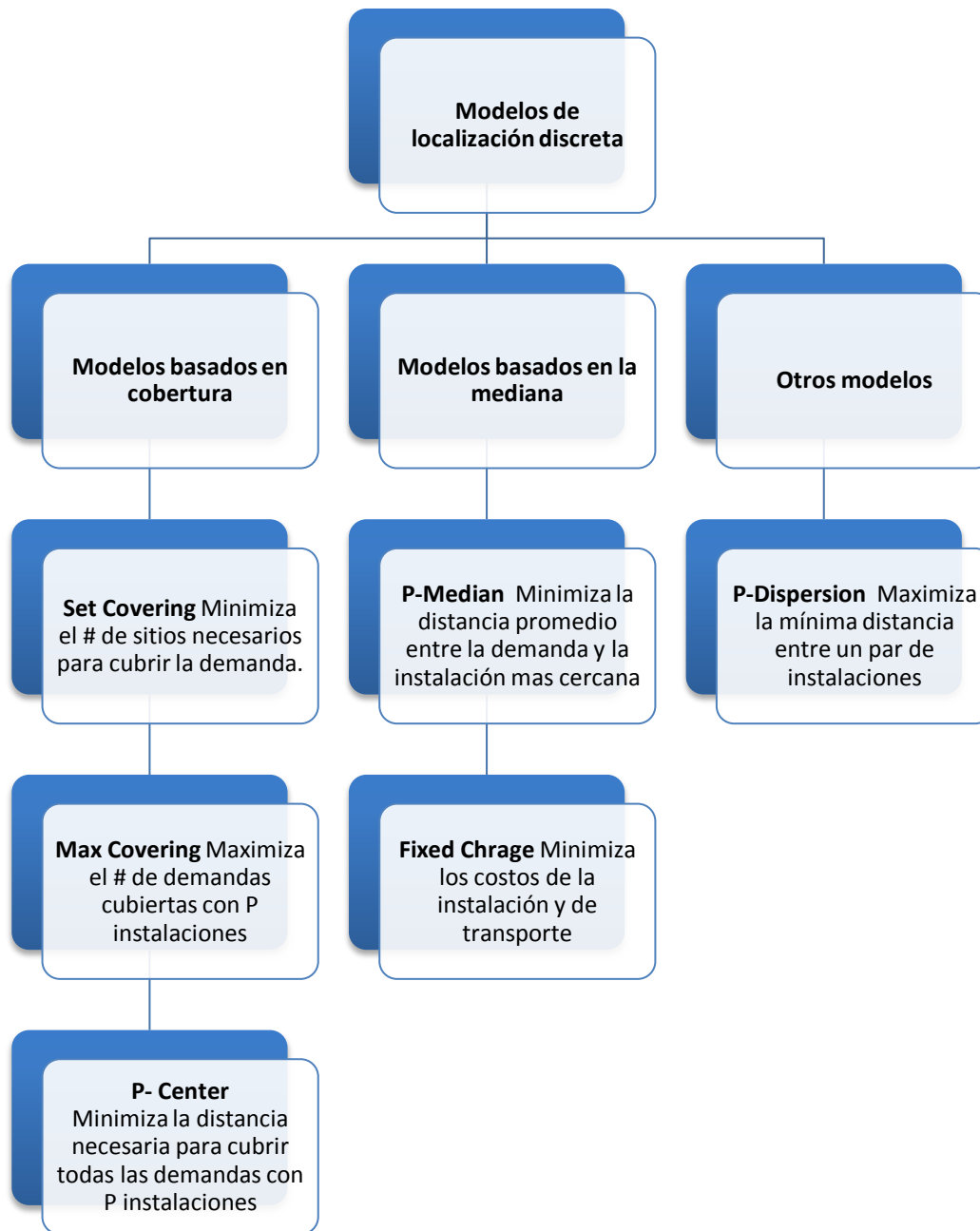


Figura 5. Clasificación de los modelos de localización discreta. (Fuente: Daskin, Mark S. 2008).

2.1.4.1 Set covering model.

Dentro de los modelos basados en cobertura encontramos el modelo “*Set Covering Model*” que encuentra un conjunto de instalaciones a mínimo el costo de entre un

conjunto finito de instalaciones candidatas preestablecidas siempre y cuando cada punto de demanda sea cubierto por al menos una instalación. Matemáticamente se representa de la siguiente manera:

Minimizar:

$$\sum_j f_j X_j \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (3)$$

Dónde:

- f_j representa el costo de localizar una instalación en el sitio candidato j
- X_j es la variable de decisión que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en el sitio candidato y 0 si no es así.
- N_i es el subconjunto de lugares candidatos para localizar las instalaciones.

La función (1) minimiza el número de instalaciones necesarias para cubrir todos los puntos de demanda, la restricción (2) estipula que cada punto de demanda debe ser cubierto y la restricción (3) establece que la variable de decisión solo puede tomar el valor de 0 ó 1 (se trata de un problema binario). En los problemas de localización generalmente N_i está definido en términos de las distancias entre los puntos de demanda y las ubicaciones candidatas, es decir el nodo de la demanda i es cubierto (es igual a 1) si la distancia $d_{ij} \leq D_c$, donde D_c es la distancia de cobertura preestablecida.

Este modelo presenta algunas debilidades, primera, el costo de construir todas las instalaciones necesarias para satisfacer la demanda total a menudo es demasiado alto así como también el número total de instalaciones necesarias excede el número de instalaciones que se pueden construir (por razones de presupuesto u otras). Segunda,

este modelo trata de igual manera un punto de demanda que solicita 10 unidades de un producto que uno que solicita 10,000 unidades.

2.1.4.2 Maximal covering model.

En segundo lugar y debido a las debilidades del modelo anterior tenemos el “*Maximal Covering Model*” que determina un número P de instalaciones que se van a localizar y maximiza el número de puntos de demanda cubiertos, con estas consideraciones este modelo se puede formular de la siguiente manera:

Maximizar:

$$\sum_{i \in I} h_i Z_i \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} X_j = P \quad (5)$$

$$Z_i - \sum_{j \in N_i} X_j \leq 0 \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$X_j \in (0,1) \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$Z_i \in (0,1) \quad \forall i \in I \quad (8)$$

Dónde:

- h_i es la intensidad de la demanda en el nodo i
- P es el número de instalaciones que se van a localizar
- Z_i es la variable de decisión que toma el valor de 1 si el punto de demanda se cubre y 0 si no.
- X_j es la variable de decisión que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en el sitio candidato y 0 si no.

La función (4) maximiza el número de puntos de demanda cubiertos, la restricción (5) establece no podemos localizar más de P instalaciones, la restricción (6) enlaza las variables de localización y de cobertura, finalmente las restricciones (7) y (8) establecen que este es un problema binario. Entre los métodos de solución para este modelo hay una variedad de algoritmos heurísticos tales como el algoritmo glotón de adición “greedy adding algorithm” y el algoritmo glotón de sustitución “greedy adding substitution algorithm” además del método convencional de programación entera mixta.

2.1.4.3 P-Center Model

El modelo encuentra la distancia de cobertura más pequeña tal que cada punto de demanda sea cubierto, si se representa con una red este modelo permite que las instalaciones sean localizadas tanto en los nodos como en los arcos, mientras que el “Vertex P-Center Model” restringe los sitios potenciales únicamente a los nodos de la red, matemáticamente se representa de la siguiente manera:

Minimizar:

$$W \quad (9)$$

Sujeto a:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (10)$$

$$\sum_j X_j = P \quad (11)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$W \geq \sum_j d_{ij} Y_{ij} \quad \forall i \quad (13)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (14)$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (15)$$

Dónde:

- W es la máxima distancia entre un punto de demanda y la instalación más cercana.
- d_i es la distancia desde el punto de demanda en el nodo i al sitio candidato para localizar la instalación.
- P es el número de instalaciones que se van a localizar
- Y_{ij} es la fracción de la demanda en el nodo i que es cubierta por la instalación en el nodo j
- X_i es la variable de decisión que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en el sitio candidato y 0 si no.

La función (9) minimiza la máxima distancia entre un punto de demanda y la instalación más cercana, la restricción (10) establece que cada punto de demanda debe ser cubierto por una instalación, la restricción (11) estipula que solo P instalaciones pueden localizarse, (12) establece que la demanda del nodo i no puede ser asignada a un lugar j a menos que haya una instalación en ese lugar j , (13) establece que la máxima distancia entre un punto de demanda y la instalación más cercana al nodo W debe ser mayor que la distancia entre cualquier punto de demanda i y la instalación j a la que está asignado. Finalmente (14) y (15) son restricciones binaria y de no negatividad respectivamente.

2.1.4.4 P-Median Model.

Dentro de los modelos de localización discreta basados en la mediana encontramos el “*P-Median Model*” el cual localiza P instalaciones para minimizar la distancia promedio ponderada entre los puntos de demanda y la instalación más cercana. Matemáticamente se representa de la siguiente manera:

Minimizar:

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (16)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (17)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i \in I; \forall j \in J \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J} X_j = P \quad (19)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \in J \quad (20)$$

$$Y_{ij} = 0,1 \quad \forall i \in I; \forall j \in J \quad (21)$$

Dónde:

- h_i es la intensidad de la demanda en el nodo i
- d_{ij} es la distancia desde el punto de demanda en el nodo i al sitio candidato para localizar la instalación j .
- P es el número de instalaciones que se van a localizar
- Y_{ij} es una variable de asignación que toma el valor de 1 si el punto de demanda es asignado a la instalación y 0 si no.
- X_j es la variable de decisión que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en el sitio candidato y 0 si no.

La función objetivo (16) minimiza la distancia promedio ponderada entre los puntos de demanda y la instalación más cercana, la restricción (17) establece que cada punto de demanda debe ser cubierto, (18), (19) establece que P localizaciones serán localizadas, finalmente (20) y (21) son restricciones que establecen que este es un problema binario.

Numerosos algoritmos han sido desarrollados para resolver problemas de este tipo por ejemplo el algoritmo glotón de adición “greedy adding algorithm”, el algoritmo de búsqueda de vecindario “neighborhood search algorithm” y la relajación de Lagrange “Lagrangian relaxation”.

2.1.4.5 UFCLM.

Finalmente se encuentra el “*Uncapacitated Fixed Charge Location Model*” (UFCLM) el cual es un pariente cercano del problema de la P-mediana el cual minimiza la función objetivo (22) que se representa de la siguiente manera:

Minimizar:

$$\sum_{j \in J} f_j X_j + c \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (22)$$

Sujeto a:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (23)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i, j \quad (24)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (25)$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (26)$$

Dónde:

- f_j es el costo asociado de localizar en el sitio candidato j
- h_i es la intensidad de la demanda en el nodo i
- d_{ij} es la distancia del nodo demanda i al sitio candidato j
- c es el costo por unidad de distancia por unidad de demanda
- Y_{ij} es una variable de asignación que toma el valor de 1 si el punto de demanda es asignado a la instalación y 0 si no.
- X_j es la variable de decisión que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en el sitio candidato y 0 si no.

Por las similitudes entre ambos problemas, este modelo puede ser resuelto con los mismos métodos que el modelo “P-median” incluyendo la Relajación de Lagrange, el algoritmo ADD y el algoritmo DROP, los cuales son algoritmos heurísticos de construcción. La diferencia entre ambos modelos es que en éste se toma en cuenta c ,

que es el costo de transporte por unidad/kilómetro y la ausencia de la restricción del número de instalaciones que pueden ser localizadas.

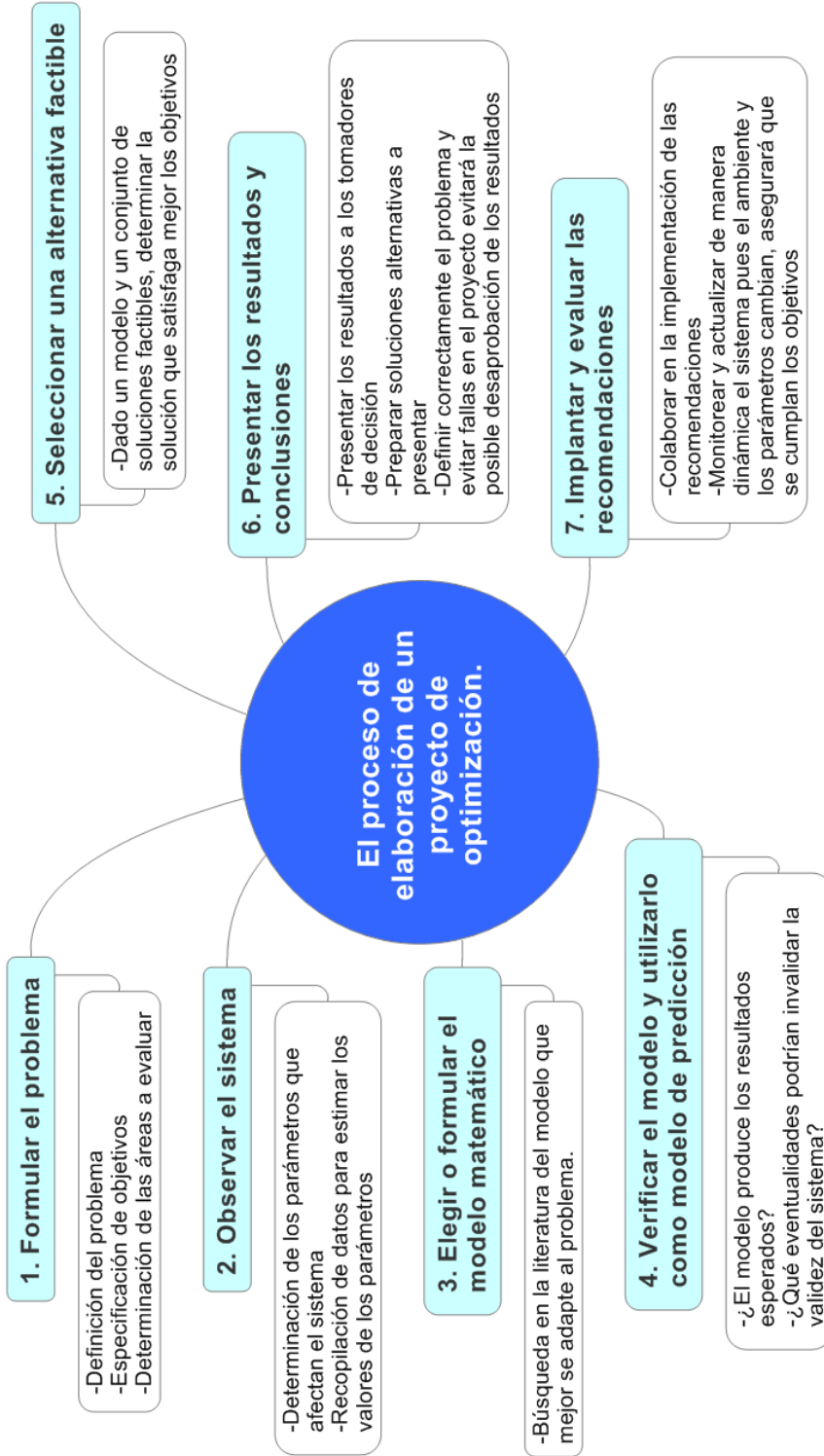


Figura 6. Los siete pasos del proceso de elaboración de un proyecto de optimización. (Fuente: Winston Wayne L., 2004), MindManager8.

3. CASO DE APLICACIÓN

“Optimización de la red de distribución de leche para la máxima cobertura de demanda en Chihuahua, LICONSA S.A. de C.V.”

3.1 Antecedentes de la empresa

En el año de 1944, el Programa de Abasto Social de Leche inició con la inauguración de la primera lechería de la empresa pública Nacional Distribuidora y Reguladora, S. A. de C. V. (Nadyrsa).

En 1945, un grupo de empresarios, conscientes de la necesidad de aumentar la oferta de leche en la Ciudad de México, constituyeron la empresa “Lechería Nacional, S. A. de C. V.” Para 1950 la Compañía Exportadora e Importadora Mexicana, S. A. (CEIMSA) asumió las funciones de elaboración, distribución y venta de leche importada que se reconstituía en el país, asegurando que ésta fuera de buena calidad y a precios accesibles para la población de escasos recursos.

En 1954 comenzó a operar en Tlalnepantla la que hoy es la planta de LICONSA que produce el mayor volumen de lácteo de todas sus unidades industriales; esta planta que inicialmente tenía capacidad para rehidratar 30 mil litros diarios de leche, a la fecha tiene capacidad para producir un millón 230 mil litros de leche al día.

Por disposición del Gobierno Federal, en 1961 se constituyó la Compañía Rehidratadora de Leche CEIMSA, S. A.; en 1963, esta empresa cambió su denominación por la de Compañía Rehidratadora de Leche Conasupo, S. A. Posteriormente, en 1972 se modificó para quedar como Leche Industrializada Conasupo, S. A. de C. V. A partir de 1994, con su resectorización en la Secretaría de Desarrollo Social cambió su denominación a LICONSA, S. A. de C.V. (Conoce a LICONSA, historia, liconsa.gob.mx).

3.2 Misión, visión y objetivos estratégicos de la empresa

Misión: Trabajar con responsabilidad social para mejorar la alimentación de las familias mexicanas con productos lácteos de la mejor calidad.

Visión: Ser la mejor empresa del sector lácteo, que por su competitividad, autosuficiencia y elevada vocación de servicio, contribuya al desarrollo del capital humano.

Objetivos estratégicos:

- Asegurar una atención eficaz a la población objetivo del Programa de Abasto Social de Leche.
- Asegurar una transferencia de ingresos a la población beneficiaria del Programa de Abasto Social de Leche.
- Garantizar la entrega de leche fortificada y de elevada calidad a los beneficiarios del mismo programa.
- Promover la reducción gradual y parcial de las necesidades de importación de leche por Liconsa.
- Elevar la eficiencia en la operación de la planta productiva y mejorar los sistemas operativos, administrativos y de control de la entidad.

(Fuente: liconsa.gob.mx, 2013)

3.3 Estructura general de la empresa

LICONSA, empresa de participación estatal mayoritaria, industrializa leche de elevada calidad y la distribuye a precio subsidiado en apoyo a la nutrición de millones de mexicanos, especialmente de niños de hasta 12 años, de familias en condiciones de pobreza, contribuyendo así a su adecuada incorporación al desarrollo del país.

Producción

LICONSA cuenta con 10 plantas industriales: tres en el estado de México (Tlalnepantla, Tláhuac y Valle de Toluca) y otras siete en igual número de entidades federativas: Querétaro, Jalisco, Oaxaca, Veracruz, Tlaxcala, Michoacán y Colima. En ellas se

producen alrededor de 1,150 millones de litros anuales de leche, fundamentalmente destinados a apoyar la nutrición de cerca de 6 millones de personas incluidas en el padrón de atención institucional. La insuficiente producción de leche en el país, obliga a LICONSA a acudir al mercado internacional para adquirir este vital producto; la importación se realiza principalmente de Nueva Zelanda, Estados Unidos, Irlanda y Argentina las cuales representan el 20% del total que maneja la empresa.

Distribución

LICONSA distribuye diariamente alrededor de 3.1 millones de litros de leche en 1,810 municipios. Para llevar la leche a 2.8 millones de hogares mexicanos, la institución cuenta con 33 programas de Abasto Social, uno por cada estado y dos en el área metropolitana de la Ciudad de México. El sistema de distribución se apoya en más de 9 mil puntos de venta, los cuales se surten a través de 539 rutas fijas con personal y vehículos que recorren más de 100,000 kilómetros diariamente, distancia que equivale a más de dos vueltas a la tierra. Para garantizar la adecuada y responsable distribución, LICONSA cuenta con una amplia base de datos, misma que está en permanente actualización y opera una tarjeta de dotación para acreditar a sus beneficiarios.

En apoyo a la comercialización de leche producida por pequeños y medianos ganaderos que carecían de infraestructura de acopio, el Gobierno Federal, a través de LICONSA, construyó y/o rehabilitó 42 centros de acopio en los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Zacatecas, Querétaro, Chihuahua, Campeche, Veracruz, Chiapas, Tamaulipas, Aguascalientes y Oaxaca. Las 42 unidades integran La Red de Acopio y Enfriamiento de Leche Fresca, con capacidad conjunta para manejar cerca de novecientos mil litros de leche diarios. En la figura 6 se muestra la estructura general de la empresa.

Esta red de acopio constituye una respuesta oportuna y directa a las demandas de más de 10 mil pequeños y medianos ganaderos, cuya principal limitación para participar competitivamente en el mercado nacional de la leche, era la de contar con instalaciones apropiadas para acopiar y enfriar su producto, a fin de ofertarlo en mejores condiciones de calidad y precio (liconsa.gob.mx, 2013).

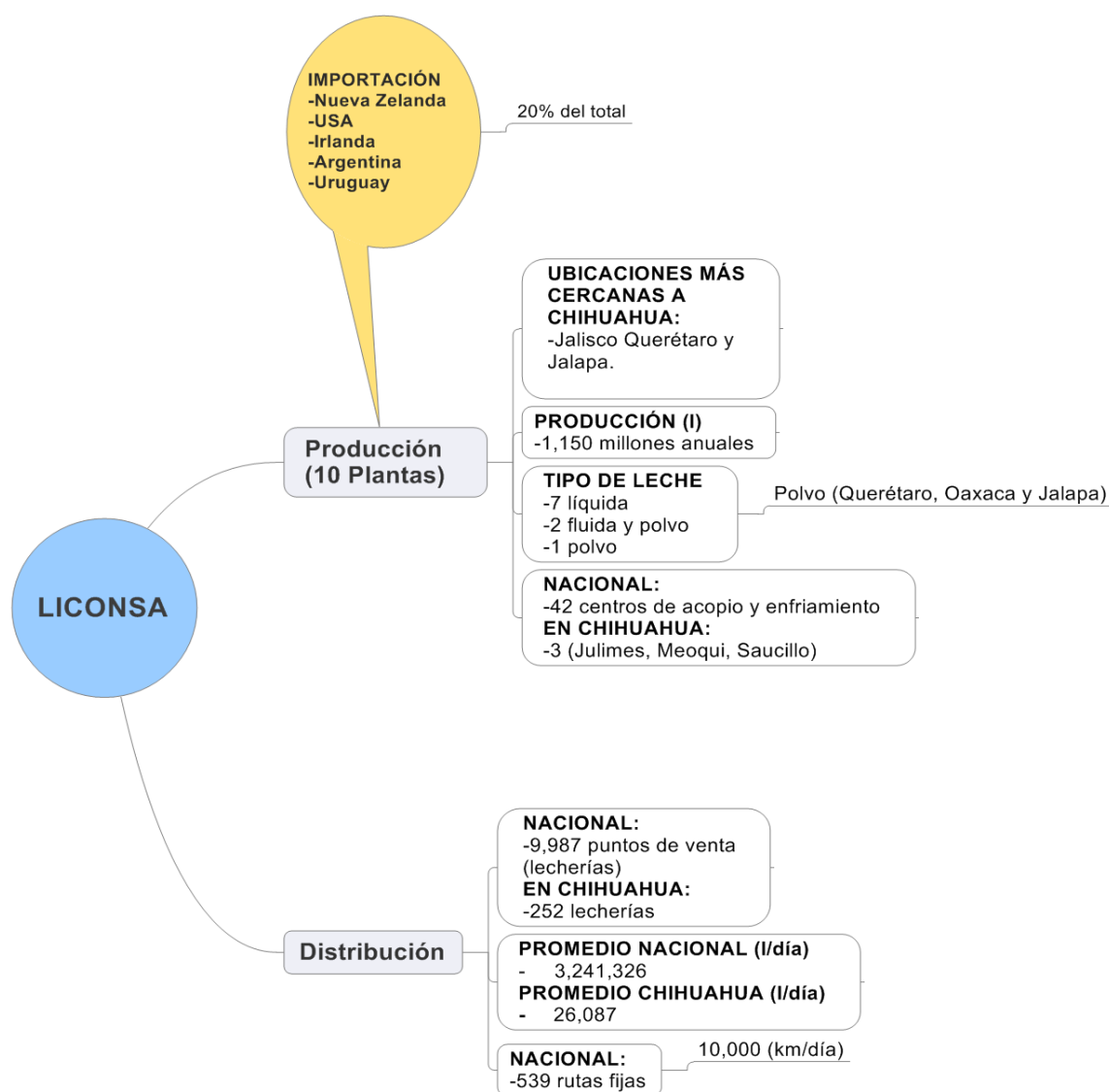


Figura 7. Estructura general de LICONSA S.A. de C.V. (Fuente: Elaboración propia, MindManager8, con datos de liconsa.gob.mx, 2013).

Dentro del documento “Manual de procedimientos para la programación y producción de leche en polvo y de leche líquida 2008” se describen de manera detallada los pasos a seguir de manera mensual para la producción y entrega de leche con las variaciones correspondientes dependiendo de si se trata de leche líquida (figura 8) o en polvo; de manera general con el objetivo de reafirmar el panorama de operación de la empresa el procedimiento para la producción y entrega de leche líquida con clave V8T-DP-PR-019-04 es el siguiente:

1. El director de producción envía a las subgerencias de producción de las plantas correspondientes, el programa mensual de producción de leche líquida para verificar las cantidades, efectuar aclaraciones y ajustes pertinentes y considerarlos en el proceso de producción de leche líquida.
2. El subgerente de producción en planta recibe el programa mensual de producción y elabora el programa diario de producción y despacho de acuerdo a las necesidades del programa de abasto social y lo envía a la dirección de producción.
3. Se inicia el proceso de producción de leche líquida, que es envasada en bolsas de dos litros cada una de acuerdo al programa diario de producción y despacho por planta a principios del mes.
4. Se preparan en el cuarto frío las canastillas, con 10 bolsas con dos litros de leche cada una y se entregan a la subgerencia de distribución con base a la cantidad de leche que se registra en la “guía de distribución de leche”.
5. Se requisita la remisión diaria de producto terminado, especificando la diferencia entre el despacho programado y real y la entrega a la subgerencia de distribución como soporte. En las devoluciones se registra la cantidad, especificando la causa correspondiente.
6. Se elabora el reporte diario de producción y lo envía mediante oficio a la dirección de producción.
7. Se elabora y envía mensualmente a la dirección de producción mediante oficio: la conciliación mensual de despacho de producto terminado, reporte mensual de falta, de retiro y devoluciones y el reporte mensual de producción.
8. El director de producción recibe la remisión diaria de producto terminado y reporte diario de producción para el control y seguimiento de la producción.
9. El subdirector de producción envía, mediante oficio, a la dirección de abasto social la conciliación mensual de despacho de producto terminado y el reporte mensual de falta de retiro y devoluciones.
10. Fin del procedimiento.

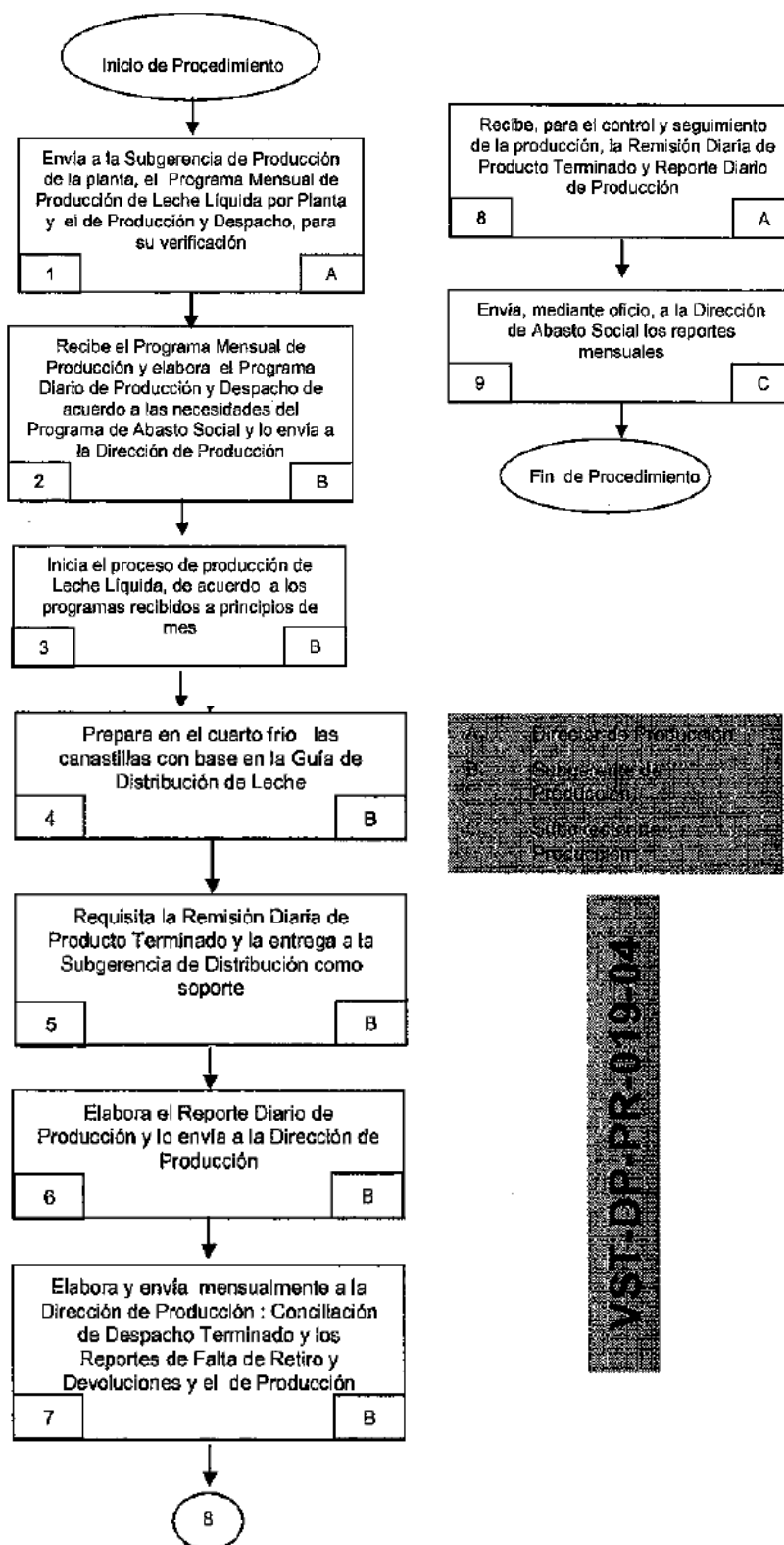


Figura 8. Diagrama de flujo del procedimiento para la producción y entrega de leche líquida. (Fuente: LICONSA, 2008).

3.4 Planteamiento del problema y definición del modelo a utilizar

El equilibrio en el nivel de atención entre la zona metropolitana y el resto del país es una de las principales metas de la empresa que se encuentran dentro de los objetivos del *Programa Institucional 2012* así como fortalecer la infraestructura de frío (almacenes de materia prima y producto terminado) en las plantas y centros de acopio, así como del transporte correspondiente, en atención a un mayor volumen de leche nacional.

Al localizar centros de distribución de leche entendidos como una infraestructura en la cual se almacene la leche y se embarquen órdenes de salida para su distribución a los puntos de venta o lecherías. La implementación de centros de distribución dentro de red de distribución de leche sería una manera de responder a la necesidad de lograr una distribución más eficiente, flexible y dinámica, es decir, asegurar una capacidad de respuesta rápida a las necesidades de atención y de equilibrio del nivel de atención diversas zonas del país.

Otra ventaja de la implementación de centros de distribución es el hecho de generar un vínculo planta productora - proveedores, probablemente podría implementarse un sistema de acopio y enfriamiento con el fin de reemplazar o complementar los 42 centros de acopio y enfriamiento existentes lo cual permitiría una atención adecuada tanto a pequeños productores como a puntos de venta, los cuales actualmente tienen distintos promedios de atención entendido como el número de habitantes que atiende cada punto de venta en promedio por entidad federativa.

Con base en la información planteada es necesario implementar una modificación al sistema de distribución actual, que permita mejorar la capacidad de respuesta a la demanda de leche en el estado de Chihuahua y extenderse al resto del país. Es posible suponer que los centros de acopio y enfriamiento funcionan como un nivel intermedio entre los productores nacionales independientes y la empresa, aunado a que también existe la compra de leche a productores directamente en las plantas productoras, por ejemplo, para el 2009 se tenía programado adquirir hasta 640 millones de litros, de los que al mes de agosto se habían comprado 460 millones que significaban el 71.9% del programa anual.

Es entonces, en las plantas productoras donde se almacena el producto terminado después de ser procesado según se dice en el mismo documento “*Manual de procedimientos para la programación y producción de leche en polvo y de leche líquida 2008*”. Más adelante el producto es distribuido a través de embarques que provienen directamente de plantas hacia los distintos puntos de venta en la República Mexicana tal como se versa en la *Convocatoria a la licitación pública nacional mixta LA-020VST001-N5-2013*, relativa a la contratación del servicio de transporte de leche líquida, en la cual se expuso la necesidad de convocar al concurso para el transporte y distribución de leche líquida en canastillas de plástico y leche en polvo en cajas de cartón corrugado en sus diferentes presentaciones por litro o por viaje, saliendo de las plantas de la empresa en Tlalnepantla, Tláhuac, Valle de Toluca, Tlaxcala, Guadalajara, Jiquilpan y Jalapa a los puntos de venta de las gerencias metropolitanas Norte y Sur, Gerencias estatales y Programas de abasto social en diferentes entidades del país.

Red de distribución actual en Chihuahua

En Chihuahua la infraestructura de la empresa consta de tres centros de acopio y enfriamiento en Julimes, Meoqui y Saucillo respectivamente (figura 9) mientras que los beneficiarios atendidos suman 87,632 de los cuales 16,904 pertenecen a las zonas prioritarias de atención en las regiones rurales del estado; utilizando el tamaño de la población objetivo obtenido en el apartado 3.5 actualmente solo se atiende el 13% del total de habitantes que tienen las características y son susceptibles de ser beneficiarios del programa, dato obtenido a través de la división del número de habitantes atendidos actualmente entre el número total de habitantes de la población objetivo. Todo esto a través de 252 puntos de venta. Con el objetivo de aplicar y desarrollar el modelo se eligió esta entidad federativa de acuerdo con el interés que ha manifestado el director general de LICONSA, Héctor Pablo Ramírez Puga¹ por aumentar el número de beneficiarios atendidos sobre todo en las zonas más pobres del país como son la Zona Tarahumara y la Huasteca Potosina, la cual corre a lo largo de la Sierra Madre Occidental la mayor parte desde el estado de Chihuahua hasta terminar en el estado de Sinaloa.

1. Director general de LICONSA desde el 12 diciembre de 2012.

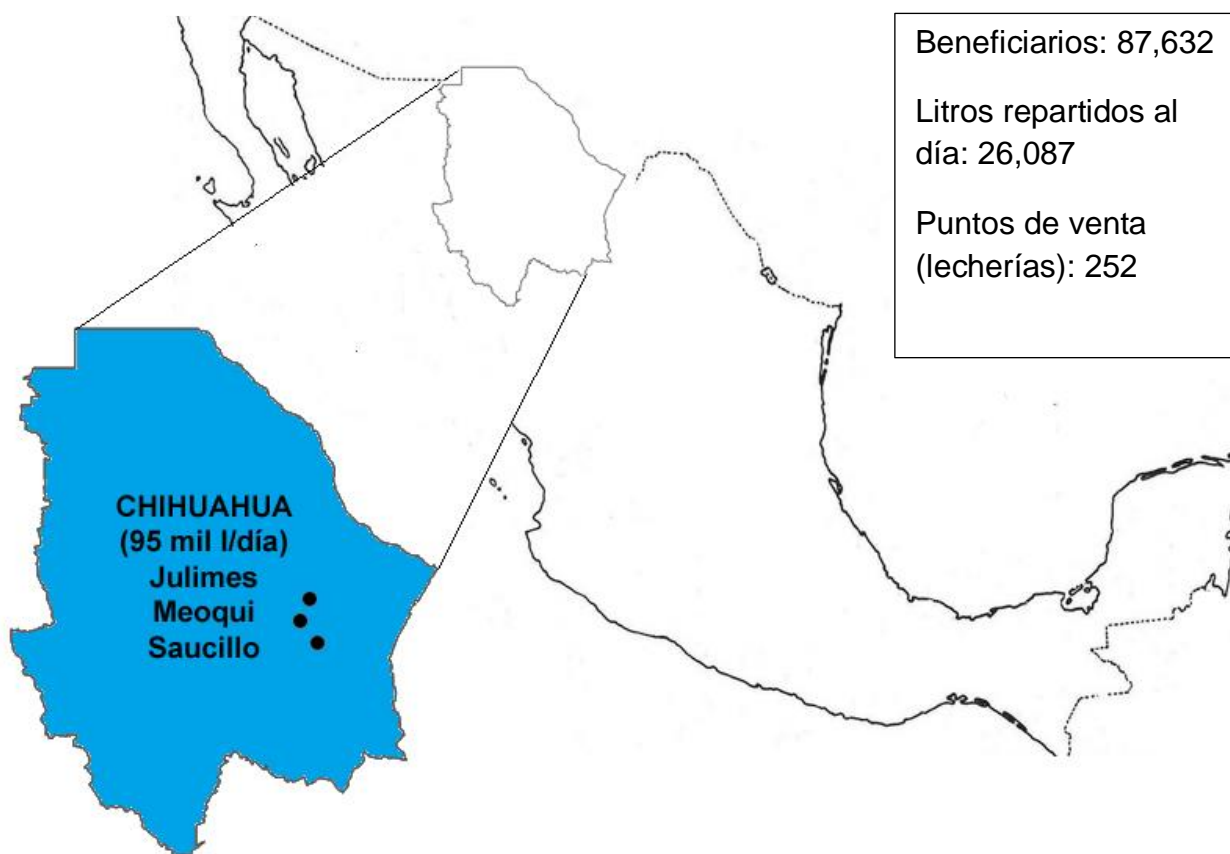


Figura 9. Nivel de atención, centros de acopio y enfriamiento en Chihuahua actualmente. (Fuente: elaboración propia con datos de liconsa.gob.mx Adobe Photoshop CS3, 2013).

En la tabla 1 es posible observar que el Distrito Federal y el Estado de México son dos de las entidades con mayor número de beneficiarios por punto de venta mientras que entidades como Oaxaca atienden menos personas siendo que cuentan con más puntos de venta. En Chihuahua de los 252 puntos de venta según la sección de “cobertura geográfica” de la página web de LICONSA, mientras que en la sección de “Lecherías registradas al final del 2012” de la misma fuente solamente figuran 125; aun así, con base en los datos anteriores es claro que el nivel de atención presenta un desequilibrio visto como el número total de beneficiarios adscritos al programa en las diferentes entidades del territorio nacional y el porcentaje de beneficiarios atendidos en el estado.

Tabla 1. Promedio de personas atendidas por punto de venta por el programa de abasto social de LICONSA.
(Fuente: Elaboración propia con datos de Liconsa.gob.mx, 2013).

Entidad Federativa	Beneficiarios	Puntos de venta	Beneficiarios/Punto de venta
Distrito Federal	1,024,829	572	1,792
Aguascalientes	45,699	84	544
Baja California	46,253	111	417
Baja California Sur	25,906	84	308
Campeche	29,604	139	213
Chiapas	108,028	554	195
Chihuahua	87,632	252	348
Coahuila	67,908	187	363
Colima	29,139	119	245
Durango	90,816	264	344
Guanajuato	211,018	191	1,105
Guerrero	115,001	419	274
Hidalgo	201,193	371	542
Jalisco	308,234	398	774
Estado de México	1,780,646	1,238	1,438
Michoacán	191,872	322	596
Morelos	118,513	137	865
Nayarit	104,052	245	425
Nuevo León	57,563	229	251
Oaxaca	119,453	791	151
Puebla	141,822	460	308
Querétaro	73,792	111	665
Quintana Roo	41,290	125	330
SLP	120,869	378	320
Sinaloa	75,104	206	365
Sonora	64,447	151	427
Tabasco	61,043	238	256
Tamaulipas	45,612	192	238
Tlaxcala	65,811	155	425
Veracruz	193,845	563	344
Yucatán	71,538	459	156
Zacatecas	108,271	252	430
PROMEDIO		312	483

Las compañías suelen definir la localización de sus centros de distribución en función del área o la región en la que este tendrá cobertura y esta vez no fue la excepción, aunado a las características de la población o mercado objetivo y los municipios donde se localiza.

Después de analizar la estructura, operación y objetivos de LICONSA fue claro que se trata de una empresa enfocada a cubrir el máximo número de personas que son parte o son susceptibles a formar parte de su padrón de beneficiarios; partiendo de esta premisa, el objetivo claramente es aplicar un modelo de localización de instalaciones para la localización de centros de distribución de tal forma que se maximice la demanda cubierta, entendida como el número de personas que tienen las características necesarias para formar parte del padrón de beneficiarios del programa de abasto social.

¿Cuáles son los objetivos de la empresa?

¿Quién es el segmento de la población o mercado objetivo de la empresa?

La respuesta a la primera pregunta lleva consigo la razón principal para optar por uno solo de entre la variedad de modelos de localización de instalaciones que fueron revisados en el capítulo 2, entre los objetivos estratégicos de la empresa se encuentran los siguientes:

- “Garantizar la entrega de leche fortificada y de elevada calidad a los beneficiarios del mismo programa”.
- “Asegurar una atención eficaz a la población objetivo del Programa de Abasto Social de Leche”.
- Además en el programa institucional, dentro de los elementos de la problemática a resolver para el año 2012 se citan los siguientes puntos:
- “Ampliar y mejorar la cobertura del Programa de Abasto Social de Leche”.
- “Complementar la red de frío en plantas y centros de acopio”.
- “Equilibrar la atención entre la zona metropolitana de la Ciudad de México con el resto del país”.
- “Fortalecer la infraestructura de frío en las plantas y centros de acopio, así como del transporte correspondiente, en atención a un mayor volumen de leche nacional”.

El modelo “max covering” o “máxima cobertura” localiza P número de instalaciones (centros de distribución) para maximizar el número de puntos de demanda cubiertos tomando en cuenta la intensidad de la demanda, a manera de resumen se puede decir que las características del modelo más importantes aplicadas a este caso de estudio en particular son:

- Nos entrega el máximo número de beneficiarios tomando en cuenta la intensidad de la demanda en cada nodo o municipio.
- Los centros de distribución solo pueden localizarse en los nodos de la red ³.
- Nos dice cuántas instalaciones deben localizarse.
- Nos dice dónde deben localizarse.
- Nos dice cuáles puntos de demanda se cubren con las instalaciones que se localizan.

3. Hakimi (1965) probó que cuando las redes son árboles presentan una propiedad: Al menos una solución óptima consiste en localizar P instalaciones en los nodos de la red. (Fuente: Daskin Mark S, 1995).

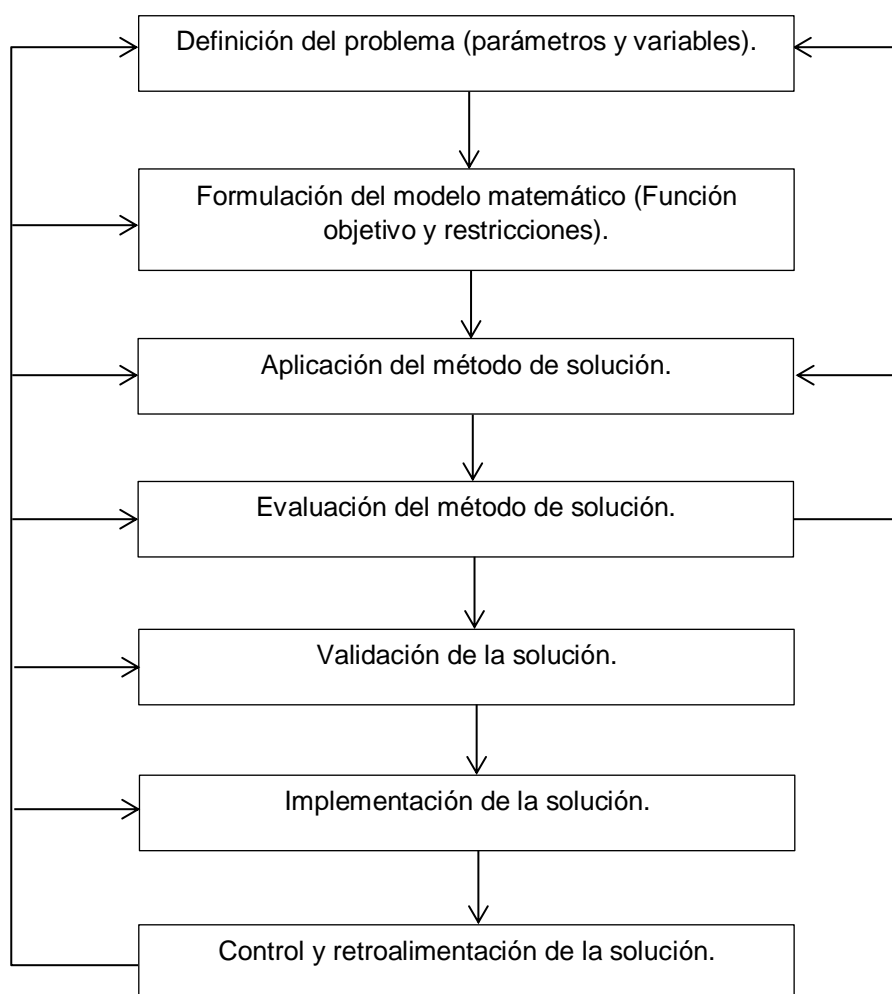


Figura 10. Metodología para el desarrollo de un problema de optimización. (Fuente: Winston Wayne L., 2004).

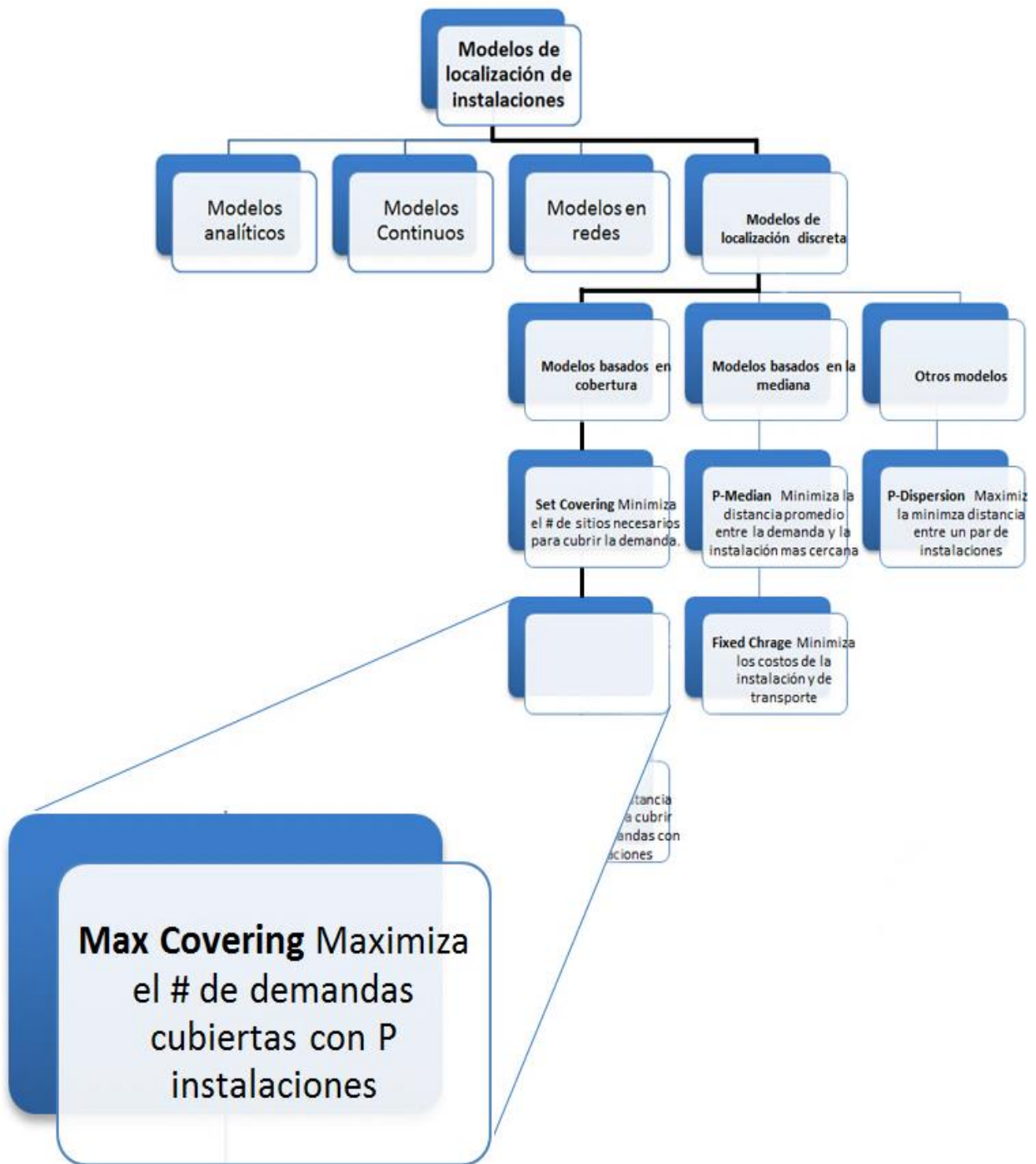


Figura 11. Selección del modelo a utilizar. (Fuente: elaboración propia Adobe Photoshop CS3, 2013).

3.5 Desarrollo

Obtención de la dimensión de la población objetivo.

La población objetivo del programa consiste en “Hogares en condiciones de pobreza con niñas y niños de 6 meses a 12 años de edad, mujeres en período de gestación o lactancia, mujeres adolescentes de 13 a 15 años, mujeres de 45 a 59 años de edad, enfermos y/o discapacitados y adultos de 60 y más años, que cumplan con los criterios de elegibilidad establecidos que justifiquen su condición” (liconsa.gob.mx).

Se distinguieron seis grupos de beneficiarios:

- Niños y niñas de 6 meses a 12 años de edad
- Mujeres en periodo de gestación o lactancia
- Mujeres adolescentes de 13 a 15 años
- Mujeres de 45 a 59 años de edad
- Enfermos y/o discapacitados
- Adultos de 60 años y más

Todos ellos con dos características en común, que se encuentren en hogares en condiciones de pobreza y que cumplan con los criterios de elegibilidad, los cuales son precisamente las características de edad, género y condición socioeconómica antes mencionados. Con el objetivo de analizar y obtener el número de personas pertenecientes a la población objetivo se definieron 3 subgrupos de personas:

- Niños y niñas de 0 a 14 años de edad, mujeres de 45 años y más, así como hombres de 60 años y más en condiciones de pobreza; como se puede observar las características principales de este subgrupo son la edad y la pobreza.
- Mujeres en periodo de gestación o lactancia en condiciones de pobreza.
- Enfermos y/o discapacitados en condiciones de pobreza.

Dado que la pobreza es la característica principal y común entre los grupos pertenecientes a la población objetivo del programa fue imperativo realizar la búsqueda

de estadísticas y datos que reflejaran el número de habitantes en condiciones de pobreza por municipio en el estado de Chihuahua. Datos del informe de pobreza y evaluación 2012 del Consejo Nacional de Evaluación de la política de desarrollo social (CONEVAL) reflejan que en el 2010 los municipios de Juárez, Chihuahua, Cuauhtémoc, Guadalupe y Calvo e Hidalgo del parral con 866,402 habitantes representan el 64.7% del total de la población del estado en condiciones de pobreza, por lo tanto el número total de habitantes en condiciones de pobreza en Chihuahua “A” está dado por:

$$A = \frac{100 * 866402}{64.7} = 1,339,107 \text{ habitantes}$$

Esa cantidad de habitantes representa el 39.3 % del total de habitantes del estado; en la tabla 2 se enlistan los 23 municipios del estado que representan aproximadamente el 90% de habitantes en condiciones de pobreza, el número de habitantes en condiciones de pobreza, el porcentaje que este número de habitantes representa en el municipio y la clave de identificación del municipio en el INEGI.

Tabla 2. Habitantes en condiciones de pobreza por municipio en el estado de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia con datos del CONEVAL, 2012).

Habitantes en pobreza por municipio en el estado de Chihuahua				
Clave INEGI	Municipio	Cabecera M.	# de Habitantes	% de habitantes
37	Juárez	Ciudad Juárez	494,726	37.7
19	Chihuahua	Chihuahua (capital)	220,480	27
17	Cuauhtémoc	Cuauhtémoc	73,869	43
29	Guadalupe y Calvo	Guadalupe y Calvo	43,474	89.8
32	Hidalgo del Parral	Hidalgo del Parral	33,853	31
27	Guachochic	Guachochic	32,608	83.2
21	Delicias	Delicias	28,095	21.4
50	N Casas Grandes	N Casas Grandes	25,074	39.2
11	Camargo	Rosalía de Camargo	20,745	38.5
36	Jiménez	Jiménez	19,931	43.2
65	Urique	Urique	18,205	86.8
7	Balleza	Balleza	17,554	85.7
9	Bocoyna	Bocoyna	17,125	65.9
40	Madera	Madera	16,280	57.5
52	Ojinaga	Ojinaga	15,965	51.8

10	Buenaventura	San Buenaventura	14,440	58.6
5	Ascención	Ascención	14,259	64.6
8	Batopilas	Batopilas	12,908	91.1
31	Guerrero	Guerrero	12,681	47.7
45	Meoqui	Meoqui	11,705	29
2	Almada	Aldama	11,414	44.1
62	Saucillo	Saucillo	11,257	33.7
12	Carichí	Carichic	10,843	84.8

Tabla 2 (continuación). Habitantes en condiciones de pobreza por municipio en el estado de Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia con datos del CONEVAL, 2012).

Cabe mencionar que el total de habitantes por municipio es el mismo según el INEGI y el CONEVAL, sin embargo, en la página web del CONEVAL se consultó cada municipio para obtener el referente del número de habitantes y el porcentaje de la población en pobreza que representan y, al verificar los datos el número de habitantes en condiciones de pobreza no concuerda con el porcentaje que lo representa, fenómeno que se repitió en todos y cada uno de los municipios haciéndose más evidente en Carichic donde el número de habitantes en pobreza superó el número total de habitantes en el municipio; es por ello que el porcentaje se convirtió en el dato confiable de información.

Por otro lado con datos de la tabla “Población total por municipio, sexo y grupos quinquenales de edad según tamaño de la localidad” del INEGI dentro de los resultados del Censo de población y vivienda 2010, se realizó la segmentación a nivel estado y municipio para el primer subgrupo de la población objetivo del programa que tiene las siguientes características:

- Niños y niñas de 0 a 14 años de edad, mujeres de 45 años y más así como hombres de 60 años y más en condiciones de pobreza; las características principales de este subgrupo son la edad y la pobreza.

La tabla 3 muestra la cantidad de habitantes que tienen la edad requerida para formar parte del programa de abasto social de LICONSA, se muestra el intervalo de edad disponible en los datos del INEGI a nivel estatal, el total de habitantes y la cantidad de hombres y mujeres que se encuentran dentro del intervalo correspondiente.

Tabla 3. Habitantes que tienen la edad requerida para formar parte de la población objetivo del programa de abasto social de LICONSA en Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2010).

Grupo de edad	2010		
	Total	Hombres	Mujeres
0 a 4 años	322,676	163,607	159,069
5 a 9 años	335,064	170,477	164,587
10 a 14 años	324,661	164,749	159,912
45 a 49 años	93,790	NA	93,790
50 a 54 años	77,081	NA	77,081
55 a 59 años	56,296	NA	56,296
60 a 64 años	89,542	42,534	47,008
65 a 69 años	68,809	32,811	35,998
70 a 74 años	54,419	26,273	28,146
75 a 79 años	34,386	16,544	17,842
80 a 84 años	20,704	9,435	11,269
85 a 89 años	10,184	4,404	5,780
90-94 años	3,294	1,383	1,911
95-99 años	1,101	428	673
100 y mas	286	113	173

En 2010, el estado contaba con 3, 406,465 habitantes de los cuales 1, 492,293 tenían la edad requerida para formar parte de la población objetivo los cuales representan el 43.8% del total de habitantes obtenidos a través de la suma de porcentajes de habitantes con las edades requeridas (tabla 4). El porcentaje de habitantes que compartían la característica de presentar condiciones de pobreza y estar dentro de alguno de los grupos de edades requeridas para ser beneficiarios del programa “EP” está dado por:

$$EP = 0.393 * 0.438 = 17.2\%$$

Mediante la teoría de multiplicación de probabilidades de eventos independientes se obtuvo el porcentaje “EP”, el cual representa 586,631 habitantes del estado susceptibles a pertenecer al primer grupo de beneficiarios con la edad y condición socioeconómica requeridas.

Tabla 4. Número y porcentaje de habitantes en Chihuahua por grupos de edad. (Fuente: elaboración propia con datos del INEGI, 2010).

Número y porcentaje de habitantes en Chihuahua por grupos de edad						
Edad	Número de habitantes			Porcentaje		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
Variada	3,406,465	1,692,545	1,713,920	100.0	49.7	50.3
0-14	982,401	498,833	483,568	28.8	14.6	14.2
45-59	227,167	NA	227,167	6.7	NA	6.7
60 y más	282,725	133,925	148,800	8.3	3.9	4.4

El segundo grupo de individuos perteneciente a la población objetivo se trata de mujeres en periodo de gestación o lactancia en condiciones de pobreza; datos de la encuesta nacional de dinámica demográfica (ENADID) 2009 señalan a nivel nacional y estatal el porcentaje de mujeres de 15 a 49 años que presentaron alguna vez en su vida algún embarazo, también se habla de aquel porcentaje de mujeres que están en edad fértil, tras una búsqueda exhaustiva en las distintas fuentes como el INEGI, IMSS y el Instituto Nacional de las mujeres se llegó a la conclusión de que no existe información como tal acerca del número de mujeres en esta condición en el año 2010, sin embargo al conocer en número de nacimientos en ese año, está implícito que las madres de los recién nacidos necesariamente se encontraban en periodo de lactancia durante ese año mientras que el número de nacidos en 2011 refleja una aproximación de la cantidad de mujeres que estuvieron en periodo de gestación durante el año anterior.

Bajo el supuesto de que no existieron nacimientos múltiples en el estado durante esos años, es decir, cada nacimiento fue producto de una madre diferente cada vez, sabiendo que había 1, 713, 920 mujeres en el estado y que el número de nacimientos durante el 2011 fue de 69,736, el porcentaje de mujeres en estado de gestación “G” durante el 2010 está dado por:

$$G = \frac{69,736 * 100}{1,713,920} = 4.1\%$$

Sabiendo que hubo 72,929 nacimientos durante ese año, el porcentaje de mujeres en periodo de lactancia “L” está dado por:

$$L = \frac{72,929 * 100}{1,713,920} = 4.3\%$$

El porcentaje de mujeres en condiciones de pobreza en Chihuahua “M” está dado por el producto del porcentaje de personas en condiciones de pobreza multiplicado por el porcentaje de mujeres de la entidad (tabla 4):

$$M = 0.393 * 0.503$$

$$M = 19.8 \%$$

Al multiplicar el porcentaje “M” de mujeres en condiciones de pobreza por “G” y “L” respectivamente fue posible obtener el porcentaje de mujeres en periodo de gestación o lactancia y que también presentaban condiciones de pobreza “PMGL”

$$PMGL = (0.198 * 0.041) + (0.198 * 0.043)$$

$$PMGL = 1.6 \%$$

Como resultado podemos decir que el 1.6 % de las mujeres, las cuales representan 28,218 habitantes se encontraban en periodo de gestación o lactancia y además presentaban condiciones de pobreza durante el año 2010.

Finalmente el INEGI presenta el Panorama sociodemográfico de Chihuahua, que integra, a manera de síntesis, datos relevantes para conocer las características demográficas, sociales y económicas básicas de la población y las viviendas de la entidad. Con la entrega de esta publicación, el INEGI pone a su disposición una rápida mirada a la información que se recopiló en todas las viviendas del territorio estatal, desagregada por municipio.

Dentro de este documento se dice que el 5.5 % de los habitantes del estado presenta algún tipo de limitación física o mental, siguiendo la misma metodología, el total de personas que pertenecían al tercer subgrupo de beneficiarios “PL” está dado por el producto del porcentaje de personas en condiciones de pobreza en el estado multiplicado por el porcentaje de personas con alguna limitación de estos dos tipos:

$$PL = 0.393 * 0.055$$

$$PL = 2.2 \%$$

El porcentaje “PL” representó 73,651 habitantes en condiciones de pobreza y con alguna limitación física o mental.

La totalidad de la población objetivo “TPO” se obtuvo de la suma del número de habitantes que representan los porcentajes obtenidos, tanto los que pertenecían a alguno de los rangos de edades requeridas “EP”, las mujeres que se encontraban en periodo de gestación o lactancia “PMGL” y los que presentaban alguna limitación física y mental “PL”, todos ellos en condiciones de pobreza:

$$TPO = 586,631 + 28,218 + 73,651$$

$$TPO = 688,500 \text{ habitantes}$$

El análisis se llevó a cabo de la misma manera para cada uno de los 23 municipios de la tabla 5, en la cual se muestra el número de habitantes de cada subgrupo “EP”, “PMGL”, “PL” y el total “TPO” por municipio ordenados de mayor a menor, cabe mencionar que el orden de los municipios cambió en algunos casos con respecto a la tabla 2 debido a que los habitantes pertenecientes a la población objetivo comparten la pobreza como característica común, sin embargo no significa que la cantidad de personas, en adelante “intensidad de la demanda” sea la misma en ambos casos.

Tabla 5. Población objetivo en Chihuahua por municipio y variables asignadas para los 23 municipios que contienen el 90% de la población objetivo. (Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2013).

Población objetivo en Chihuahua por municipio							
Variables		Clave INEGI	Municipio	EP	PMGL	PL	TPO
ZA	XA	37	Juárez	209,834	9,354	26,617	245,805
ZB	XB	19	Chihuahua	92,966	4,121	11,727	108,814
ZC	XC	17	Cuauhtémoc	29,579	1,525	2,393	33,497
ZD	XD	29	Guadalupe y Calvo	23,861	1,882	2,786	28,529
ZE	XE	27	Guachochic	20,477	2,099	1,860	24,436
ZF	XF	32	Hidalgo del Parral	15,110	724	2,821	18,655
ZG	XG	21	Delicias	13,237	637	1,387	15,261
ZH	XH	50	N. Casas Grandes	10,728	494	1,349	12,571
ZI	XI	31	Guerrero	9,060	408	1,795	11,263
ZJ	XJ	65	Urique	9,038	709	973	10,720
ZK	XK	9	Bocoyna	9,021	670	947	10,638
ZL	XL	36	Jiménez	8,397	378	1,390	10,165
ZM	XM	11	Camargo	8,633	383	768	9,784
ZN	XN	7	Balleza	7,694	792	1,045	9,531
ZO	XO	40	Madera	8,205	360	902	9,467
ZP	XP	5	Ascensión	6,938	188	914	8,040
ZQ	XQ	8	Batopilas	6,721	693	575	7,989
ZR	XR	52	Ojinaga	6,407	212	858	7,477
ZS	XS	10	Buenaventura	6,419	288	747	7,454
ZT	XT	45	Meoqui	6,026	209	457	6,692
ZU	XU	62	Saucillo	5,121	185	773	6,079
ZV	XV	2	Almada	4,627	206	472	5,305
ZW	XW	12	Carichí	3,921	801	305	5,027

Total: 613,201 habitantes

A manera de resumen, en teoría de probabilidades, se dice que *dos sucesos aleatorios son independientes entre sí cuando la probabilidad de cada uno de ellos no está influida porque el otro suceso ocurra o no*⁴, es decir, cuando ambos sucesos no están relacionados, no así la probabilidad de la intersección de ambos; de esta manera, la población objetivo del programa se obtuvo mediante el producto de los porcentajes que representan a cada subgrupo multiplicados por el porcentaje de habitantes en condiciones de pobreza.

4. Apuntes de probabilidad y estadística, Paniagua Ballinas, Jorge F., 2010.

El resultado es la figura 12 en la cual se muestran los 23 municipios analizados y la intensidad de la demanda en cada uno de ellos, representada por el gradiente de color: oscuro para los que tienen mayor demanda, es decir, mayor número de personas con las características deseadas y se hace más claro a medida que disminuye la intensidad de la demanda de leche.

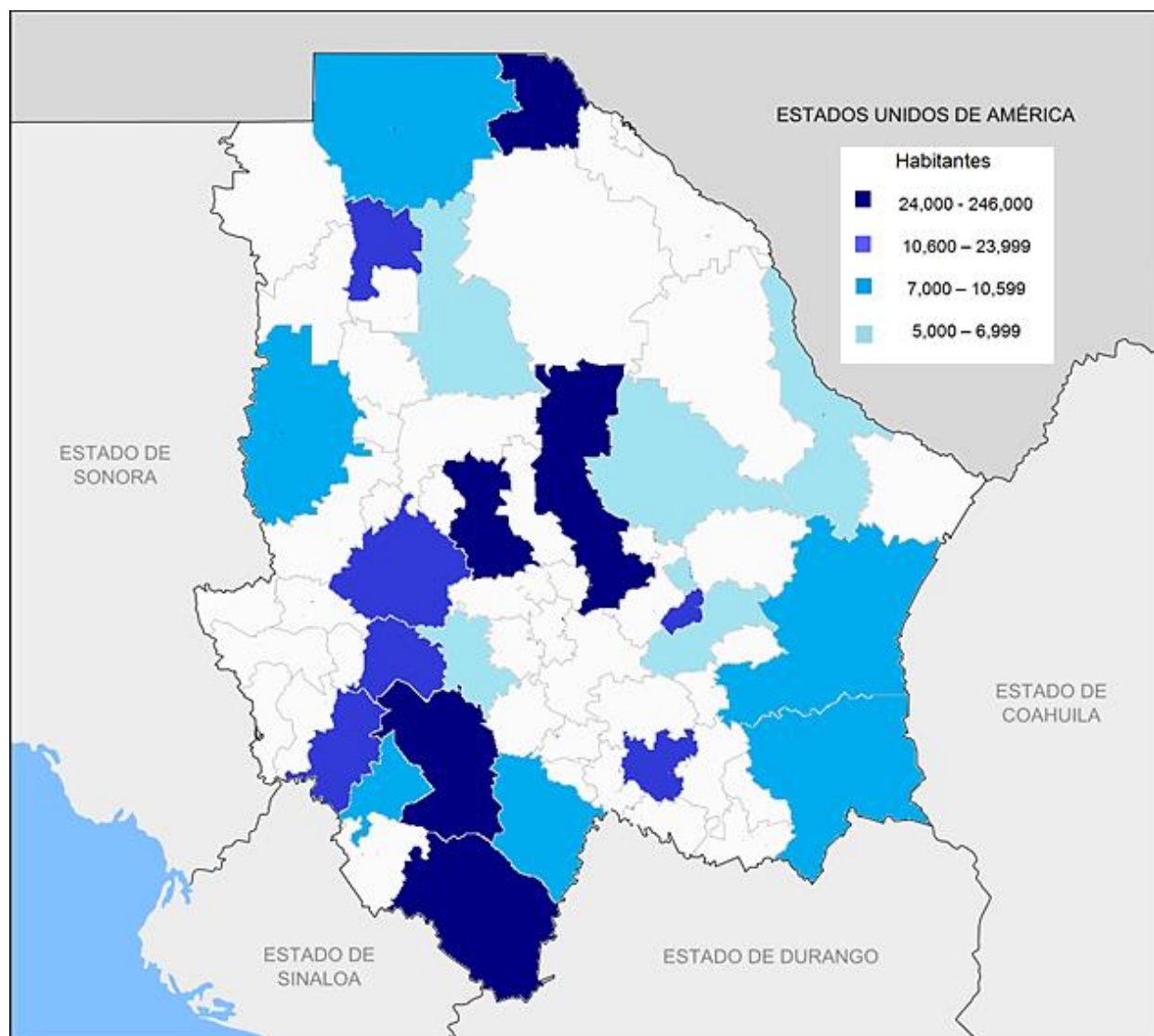


Figura 12. Intensidad de la demanda de leche en Chihuahua por municipio. (Fuente: Elaboración propia *MS Paint*, 2013).

3.5.1 Construcción de la red

Obtención de las distancias entre municipios.

Tras obtener las dimensiones de la población objetivo, otro de los parámetros necesarios para el planteamiento del modelo de máxima cobertura es la distancia entre municipios traducida como la longitud de las carreteras que los conectan entre sí, se utilizó para construir gráficamente la red que une los puntos de demanda así como para determinar las restricciones del modelo, más adelante el área que cubrirá cada centro de distribución dependerá de la distancia entre municipios en adelante “distancia de cobertura” forma parte determinante de la obtención e interpretación de resultados.

La herramienta “Rutas punto a punto” de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes SCT (sct.gob.mx, 2013), proporciona información aproximada de tiempo, distancia y costos (peaje y combustibles). En este caso sólo se utilizó la distancia, aunque algunas rutas entre municipios no están disponibles fue posible obtenerlas utilizando el factor de curvatura de las carreteras en el estado “FC”, el cual trabaja bajo el supuesto de que cada carretera presenta un factor de curvatura representado por la división de la longitud real de la carretera entre la distancia en línea recta de municipio a municipio obtenida con “Google Earth”, dicho factor está dado por:

$$FC = \frac{\textit{Longitud de la carretera}}{\textit{Distancia en línea recta}}$$

El promedio de los factores obtenidos con los datos disponibles tomando en cuenta al menos una vez la conexión de un municipio con otro, se usó para obtener una aproximación de la longitud de las carreteras faltantes mediante el producto del factor de curvatura multiplicado por la distancia en línea recta, en la tabla 6 se muestran las conexiones expresadas en términos de la variable asignada a cada municipio, la longitud de la carretera según la SCT, y la distancia en línea recta según Google Earth.

Tabla 6. Obtención de factor de curvatura de las carreteras en Chihuahua. (Fuente: elaboración propia con datos de la SCT y Google Earth, 2013).

Obtención del factor de curvatura de las carreteras en Chihuahua			
Conexiones	Distancia SCT (KM)	Distancia GE (KM)	FC
ZA-ZP	187	167	1.1
ZP-ZH	92	77	1.2
ZH-ZS	82	77	1.1
ZS-ZB	230	190	1.2
ZH-ZN	234	137	1.7
ZI-ZN	109	96	1.1
ZC-ZS	247	144	1.7
ZB-ZA	352	340	1.0
ZR-ZM	260	219	1.2
ZL-ZV	111	103	1.1
ZL-ZF	78	77	1.0
Promedio			1.2

Como resultado en la figura 13 se muestra la red de conexiones entre municipios, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes aclara que todos los parámetros se calculan considerando el tipo de vehículo y no se toman en cuenta detenciones de ninguna clase, suponen velocidades constantes y condiciones óptimas para el manejo y pueden variar como consecuencia de la modificación de la ruta o por ajustes a las velocidades asignadas a cada tramo.

Generalmente las carreteras tienen mayor accesibilidad en la zona urbana del estado y se va dificultando el acceso a las comunidades, en este caso las distancias disponibles se calcularon a través de la SCT para camiones tipo T3-S2-R4 de 9 ejes aunque para el transporte y entrega de leche se usan también vehículos tipo C2; C3; T3-S2; T3-S3 y T3-S2-R4 de acuerdo a la NOM-012-SCT-2-2008, según la convocatoria a la licitación pública nacional mixta número LA-020VST001-N5-2013 relativa a la contratación del servicio de transporte de leche líquida.

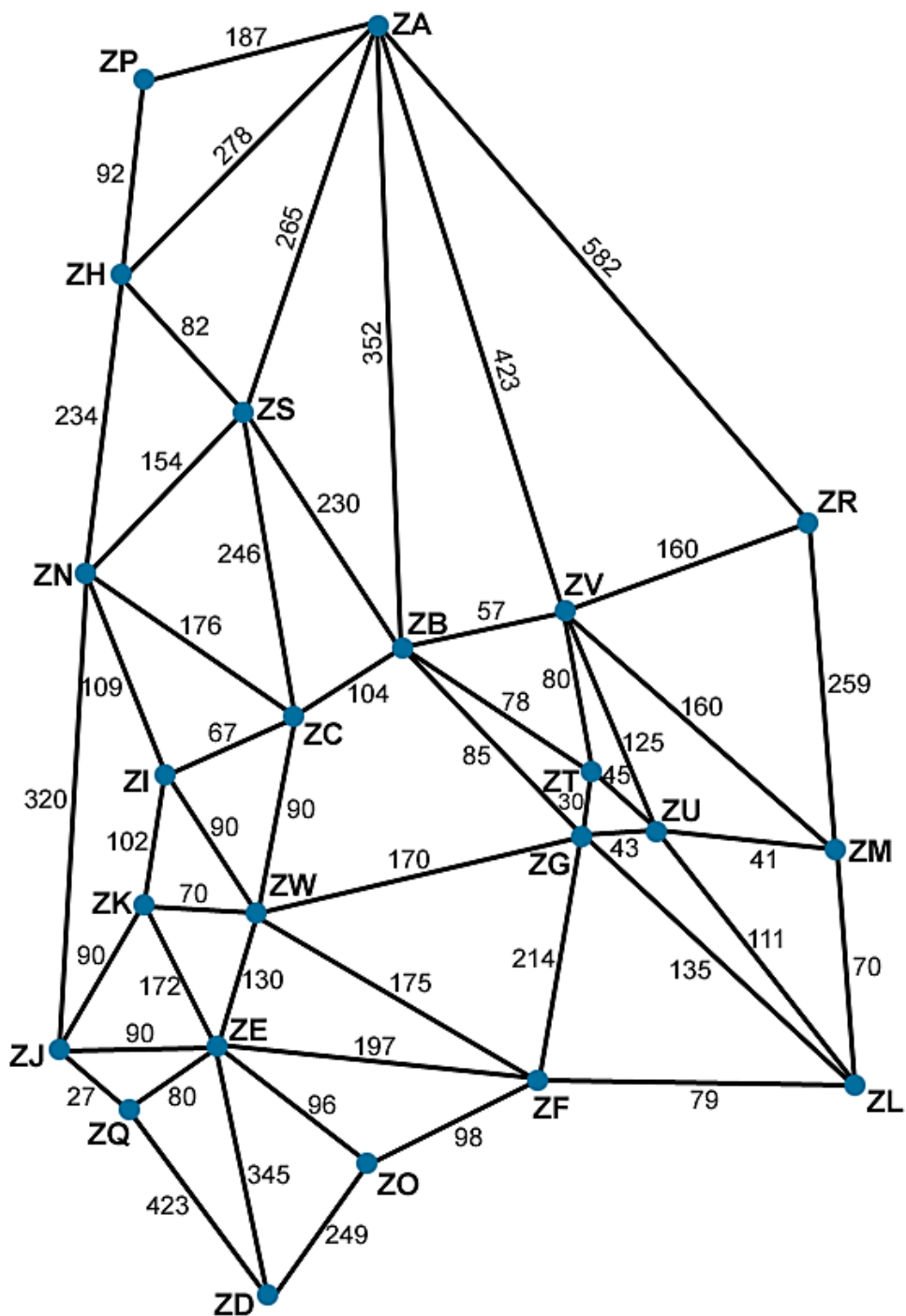


Figura 13. Red de conexiones entre municipios. (Fuente: Elaboración propia *Adobe Photoshop CS3*, 2013. Nota: las distancias no están dibujadas a escala).

3.5.2 Construcción del programa lineal

Función objetivo.

El modelo de máxima cobertura tiene como objetivo cubrir el mayor número de demandas Z con un número P de instalaciones tomando en cuenta la distancia de cobertura D_c y la intensidad de la demanda h_i . Retomando el capítulo 2, el modelo tiene la siguiente estructura:

Maximizar:

$$\sum_{i \in I} h_i Z_i \quad (1)$$

$$i = A, B, C, \dots, W$$

Sujeta a las restricciones:

$$\sum_{j \in J} X_j \leq P \quad (2)$$

$$j = A, B, C, \dots, W$$

$$Z_i - \sum_{j \in i} X_j \leq 0 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$X_j \in (0,1) \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$Z_i \in (0,1) \quad \forall i \in I \quad (5)$$

Dónde:

- h_i es la intensidad de la demanda en el nodo i
- P es el número de instalaciones que se van a localizar

VARIABLES DE DECISIÓN:

- Z_i es la variable de decisión que toma el valor de 1 si el punto de demanda se cubre y 0 si no.
- X_j es la variable de decisión que toma el valor de 1 si la instalación se localiza en el sitio candidato y 0 si no.

La función (1) maximiza el número de puntos de demanda cubiertos en nuestro caso representados por los coeficientes Z asignados a cada municipio en la tabla 5 multiplicados por la intensidad de la demanda h_i , es decir el número de habitantes de la población objetivo en cada municipio:

Maximizar:

$$A = (245805 * ZA) + (108814 * ZB) + (33497 * ZC) + (28529 * ZD) + (24436 * ZE) + (18655 * ZF) + (15261 * ZG) + (12571 * ZH) + (11263 * ZI) + (10720 * ZJ) + (10638 * ZK) + (10165 * ZL) + (9784 * ZM) + (9531 * ZN) + (9467 * ZO) + (8040 * ZP) + (7989 * ZQ) + (7477 * ZR) + (7454 * ZS) + (6692 * ZT) + (6079 * ZU) + (5305 * ZV) + (5027 * ZW)$$

Las restricciones están en función de la distancia de cobertura entre municipios, es decir, el número de variables de localización y demanda en cada restricción varían dependiendo de la distancia entre municipios. Como ejemplo tenemos las restricciones para una distancia de cobertura $D_c=100$ km, es decir, si la distancia entre municipios supera los 100 km inmediatamente se descartan algunos de ellos; es por eso que en el ejemplo en la restricción que corresponde al nodo A los municipios que superan la distancia de 100 km a partir de ese nodo son descartados, lo mismo sucede con los nodos D, N y R.

La restricción (B) que se refiere a la cobertura del nodo B establece que dicho nodo cubre los nodos V, T y G ya que se encuentran dentro de un radio menor o igual a 100km.

$$\begin{aligned}
XV + XT + XG &\geq ZB && (B) \\
XI + XW &\geq ZC && (C) \\
XO + XQ + XJ &\geq ZE && (E) \\
XO + XL &\geq ZF && (F) \\
XB + XT + XU &\geq ZG && (G) \\
XP + XS &\geq ZH && (H) \\
XC + XW &\geq ZI && (I) \\
XQ + XE + XK &\geq ZJ && (J) \\
XW + XJ &\geq ZK && (K) \\
XM + XF &\geq ZL && (L) \\
XL + XU &\geq ZM && (M) \\
XF + XE &\geq ZO && (O) \\
XH &\geq ZP && (P) \\
XJ + XE &\geq ZQ && (Q) \\
XH &\geq ZS && (S) \\
XV + XU + XG + XB &\geq ZT && (T) \\
XV + XM + XG + XT &\geq ZU && (U) \\
XT + XB &\geq ZV && (V) \\
XC + XK + XI &\geq ZW && (W)
\end{aligned}$$

La siguiente restricción establece que no puede haber más de P instalaciones, en esta corrida no puede haber más de 1 centro de distribución:

$$XA + XB + XC + XD + XE + XF + XG + XH + XI + XJ + XK + XL + XM + XN + XO + XP + XQ + XR + XS + XT + XU + XV + XW \leq 1$$

Las últimas dos restricciones establecen que las variables X , Z solo pueden tomar los valores 0 o 1, lo que convierte el problema en uno de programación lineal entera binaria.

$$XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW = 0,1$$

$$ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW = 0,1$$

Restricciones de nodos no factibles por exceso de distancia de cobertura:

$$\begin{aligned}
XA, ZA &= 0 \\
XD, ZD &= 0 \\
XN, ZN &= 0 \\
XR, ZR &= 0
\end{aligned}$$

3.5.3 Software de solución

LINGO es una herramienta completa diseñada para hacer de la construcción y resolución lineal, no lineal (convexa y no convexa / global), cuadrática, cuadrática restringida, de segundo orden, estocástico y modelos de optimización enteros más rápidos, más fáciles y más eficientes. LINGO proporciona un paquete completamente integrado que incluye un lenguaje de gran alcance para expresar los modelos de optimización, un ambiente con todas las funciones para la construcción y edición de problemas y un conjunto incorporado de rápidos solucionadores (Lindo.com, 2013).

Las características de la computadora donde se realizó la corrida del programa LINGO versión 13.0 son:


Marca y modelo: Dell Ultrabook XPS 13.

Sistema operativo: Microsoft Windows 8.

Procesador: Intel Core i5-2467M a 1.60GHz, 4GB RAM, 128GB en disco duro.



Figura 14. Computadora en la que se realizó la corrida del programa. (Fuente: dell.com, 2013).

LINGO es una herramienta que permitió expresar el modelo de optimización de la demanda de leche con una interfaz agradable para el usuario, en este caso los datos se introducen tal y como se expresan en el papel, con algunas diferencias de sintaxis que requiere el programa, después de iniciar el programa, se da clic en el icono  lo que nos lleva directamente al espacio de trabajo. La función objetivo debió ser expresada con la palabra “Max” ya que el objetivo de este modelo es precisamente maximizar la función, un signo de igualdad y enseguida la sumatoria de cada uno de los sumandos y terminando siempre con un punto y coma al final de cada línea de código como se muestra en la figura 15 a continuación:

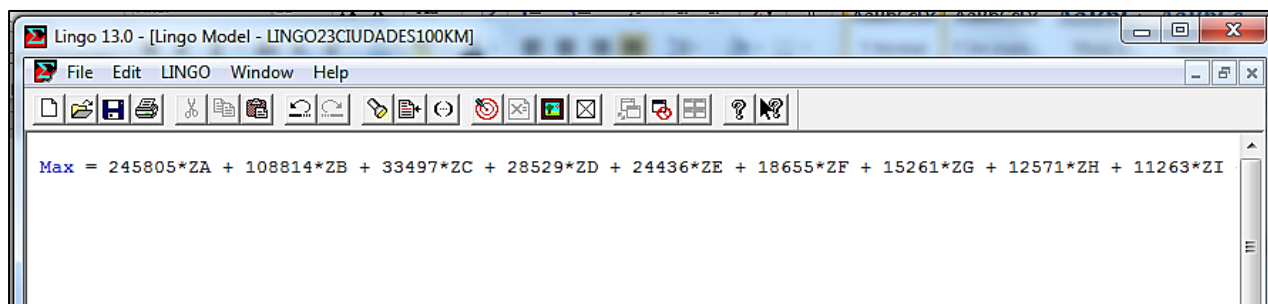


Figura 15. Interfaz de LINGO, 2013.

De la misma manera se expresan las restricciones que relacionan las variables de localización y de cobertura así como la restricción de instalaciones tomando en cuenta que el software no reconoce el símbolo \leq ni \geq por lo que es suficiente expresarlas simplemente con menor que o mayor que, según sea el caso como se muestra en la figura 16.

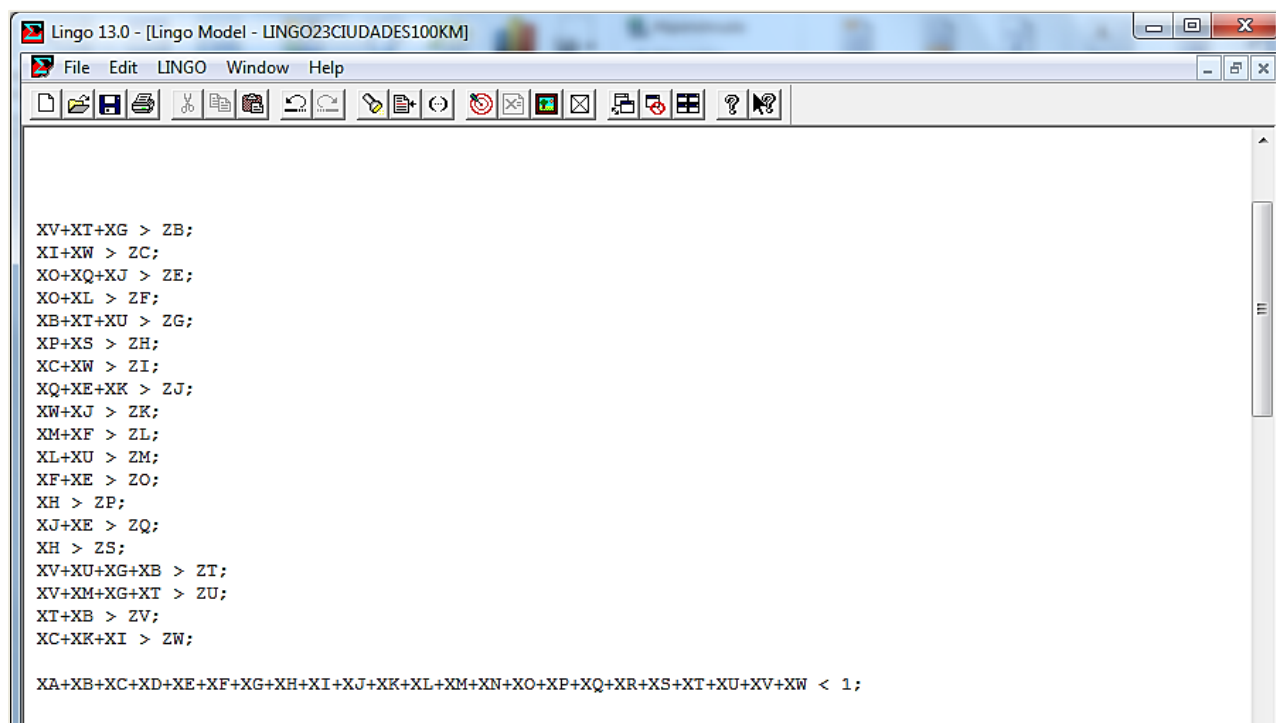


Figura 16. Las restricciones expresadas en LINGO, 2013.

Las restricciones de integralidad se expresan a través de un "@BIN" como se muestra en la figura 17.

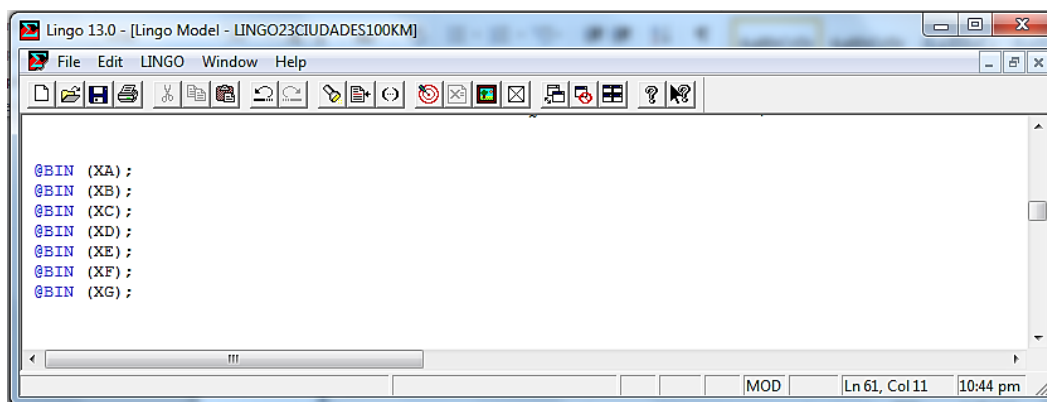



Figura 17. Restricciones de integralidad expresadas en LINGO, 2013).

Al presionar el icono  “resolver” se despliega una ventana que indica entre otras cosas el tipo de modelo que se resolvió “PILP” o Integer Lineal Programming Problem, el valor de la función objetivo así como el total de variables y restricciones que contiene el modelo. En la figura 18 se muestra un ejemplo de la ventana de solución inicial de LINGO 13.0

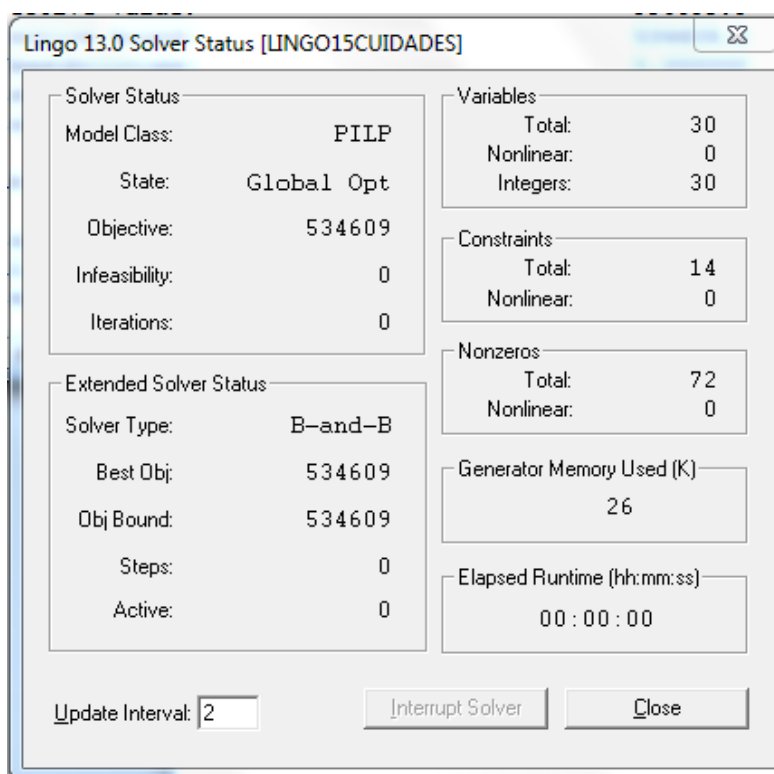


Figura 18. Ventana inicial de solución de LINGO, 2013.

Al dar clic en el botón “close” se puede observar la ventana de solución completa, es decir, con los valores que toman las variables Z y X como se muestra en el ejemplo de la figura 19. Cuando una variable Z toma valor de 1 significa que la demanda de ese municipio ha sido cubierta por el o los centros de distribución y 0 si no, por otro lado cuando la variable X toma el valor de 1 significa que en ese municipio se debe localizar el centro de distribución para cubrir Z demandas. Además también aparece una columna llamada “costo reducido” que no es más que el número de habitantes que se atenderán si la variable Z en ese nodo tomó el valor de 1.

Variable	Value	Reduced Cost
ZA	1.000000	-236452.0
ZB	1.000000	-104694.0
ZC	1.000000	-31972.00
ZD	1.000000	-26647.00
ZE	1.000000	-22337.00
ZF	1.000000	-17932.00
ZG	1.000000	-14625.00
ZH	1.000000	-12077.00
ZI	1.000000	-10856.00
ZJ	1.000000	-10012.00
ZK	1.000000	-9969.000
ZL	1.000000	-9787.000
ZM	1.000000	-9402.000
ZN	1.000000	-9108.000
ZO	1.000000	-8739.000
XG	1.000000	0.000000
XC	0.000000	0.000000
XB	0.000000	0.000000
XN	0.000000	0.000000
XI	1.000000	0.000000
XF	1.000000	0.000000
XO	0.000000	0.000000
XJ	0.000000	0.000000
XK	1.000000	0.000000
XL	1.000000	0.000000
XE	0.000000	0.000000
XM	0.000000	0.000000
XA	0.000000	0.000000
XD	0.000000	0.000000
XH	0.000000	0.000000

Figura 19. Ventana final de solución en LINGO, 2013.

En este caso podemos ver que las variables ZA, ZB,..., ZO. han tomado el valor de 1, lo que quiere decir que las demandas en esos nodos han sido cubiertas. Así mismo las variables XG, XI, XF, XK y XL han tomado el valor de 1 cuya interpretación es que en esos nodos deberá colocarse un CEDIS para cubrir dichas demandas “Z”.

4.0 Resultados

En total se hicieron 6 corridas para 5 diferentes distancias de cobertura 100, 200, 300 400 y 500 km con el objetivo de proponer diversos escenarios que permitan presentar una amplia gama de resultados y contribuir a una mejor toma de decisión con base el número de P CEDIS y la distancia de Cobertura. En cada corrida se varió el numero P de centros de distribución permitidos para obtener un porcentaje de cobertura de beneficiarios diferente cada vez.

Para la distancia de cobertura de $D_c = 100\text{km}$ se encontró que, como se muestra en la tabla 7, se necesitarían en total 9 centros de distribución con diferentes capacidades instaladas para cubrir el 52.5 por ciento de la población objetivo del programa en el estado debido a que en nodos como el A,D,N y R la distancia de cobertura superó los 100 kilómetros y por lo tanto esos nodos quedaron descartados tanto como candidatos para localizar instalaciones como demandas que pudieran ser cubiertas por CEDIS en otros nodos. Además también se muestra el aumento del porcentaje de demanda cubierta ligada a cada centro de distribución así como la demanda cubierta expresada en número de habitantes.

Tabla 7. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con $D_c=100\text{km}$. (Fuente: Elaboración propia, 2013).

CEDIS	Demanda cubierta (miles de personas)	% cubierto
1	135,459	22.1
2	190,857	31.1
3	233,948	38.2
4	262,124	42.7
5	278,600	45.4
6	294,094	48.0
7	306,665	50.0
8	316,830	51.7
9	321,857	52.5

El municipio en el que tendría que localizarse cada centro de distribución y las demandas que cubriría cada uno de ellos se muestra en la tabla 8, así como la

capacidad instalada que debería tener cada uno de ellos expresada en litros de leche por día. La capacidad fue calculada con base en la Evaluación de Resultados del Programa de Adquisición de Leche Nacional, a cargo de LICONSA, S.A. de C.V. para el periodo de 2004 a 2005 en el que se dice que el consumo promedio de leche por persona fue de 0.306 litros diarios.

La capacidad instalada mínima “CI” que deberían tener el conjunto de centros de distribución que forman la red en cada corrida asumiendo que cada beneficiario del programa recibiera su dotación diaria está dada por:

$$CI = 0.306 \left(\frac{\text{litros al día}}{\text{persona}} \right) * \left(\frac{\text{personas}}{\text{CEDIS}} \right)$$

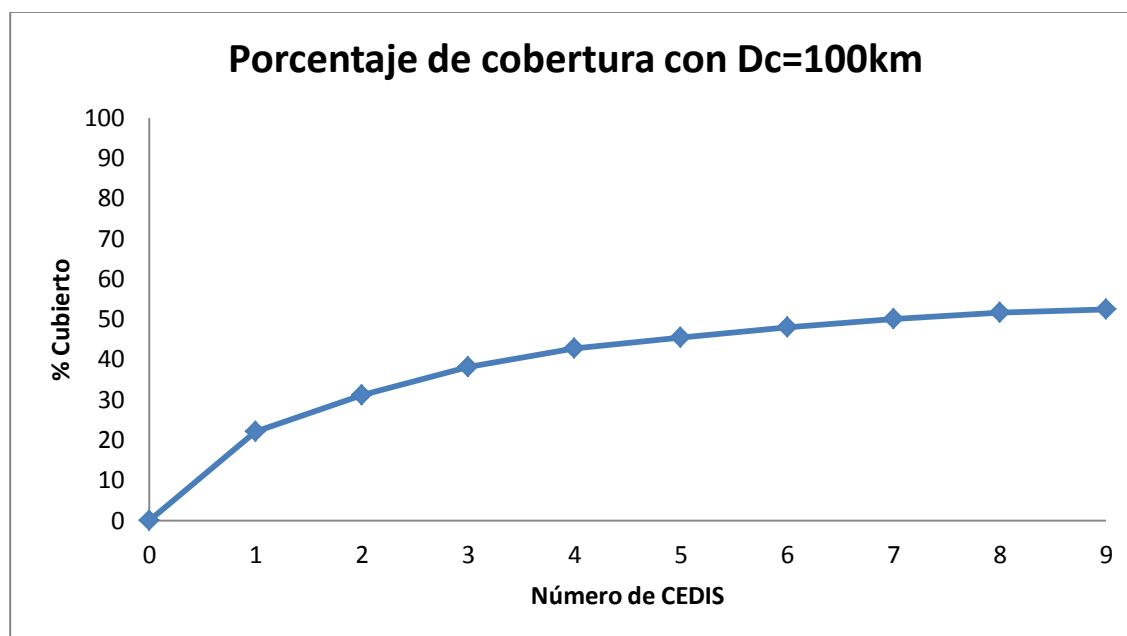
$$Ej. CI(T) = 0.306 \left(\frac{\text{litros al día}}{\text{persona}} \right) * 135459 \left(\frac{\text{personas}}{\text{CEDIS}} \right) = 41,450 \left(\frac{\text{litros}}{\text{día}} \right)$$

Tabla 8. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=100km. (Fuente: elaboración propia, 2013).

Localización, demanda y capacidad			
CEDIS	X (Localización)	Z Demandas cubiertas (municipios)	Capacidad (l/día)
1	T	B,G,U,V	41,450
2	T,W	B,C,G,I,K,U,V	58,402
3	T,W,O	B,C,E,F,G,I,K,U,V	71,588
4	T,W,O,E	B,C,E,F,G,I,J,K,O,Q,U,V	80,210
5	T,W,O,U,E	B,C,E,F,G,I,J,K,M,O,Q,T,U,V	85,252
6	T,W,O,U,E,H	B,C,E,F,G,I,J,K,M,O,P,Q,S,T,U,V	89,993
7	T,W,O,U,S,E,H	B,C,E,F,G,H,I,J,K,M,O,P,Q,S,T,U,V	93,839
8	T,W,O,U,S,E,F,H	B,C,E,F,G,H,I,J,K,L,M,O,P,Q,S,T,U,V	96,950
9	T,I,W,O,U,S,E,F,H	B,C,E,F,G,H,I,J,K,L,M,O,P,Q,S,T,U,V,W	98,488

La gráfica 3 muestra la relación entre el número de centros de distribución y el porcentaje de demanda cubierto. Cabe destacar que si se deseara cubrir la totalidad de la población, en este escenario sería necesario descartar las restricciones de nodos no factibles por exceso de distancia de cobertura, al hacerlo el software interpreta que esos nodos deben ser cubiertos a través corridas “especiales” en las que no importara la distancia a recorrer desde el CEDIS hasta el municipio. El resultado es la cobertura de

toda la población objetivo y además particularmente en este caso, se necesitarían 9 instalaciones para hacerlo.



Gráfica 3. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=100km. (Fuente: elaboración propia, 2013).

Para una distancia de cobertura de 200 km el número de centros de distribución disminuyó a siete, la tabla 9 muestra que el porcentaje de cobertura también aumentó con respecto al escenario anterior, es decir, se necesitaría tener al menos tres instalaciones que cubran 100 kilómetros para cubrir el mismo porcentaje de demanda que se cubriría con una sola de 200 kilómetros de cobertura.

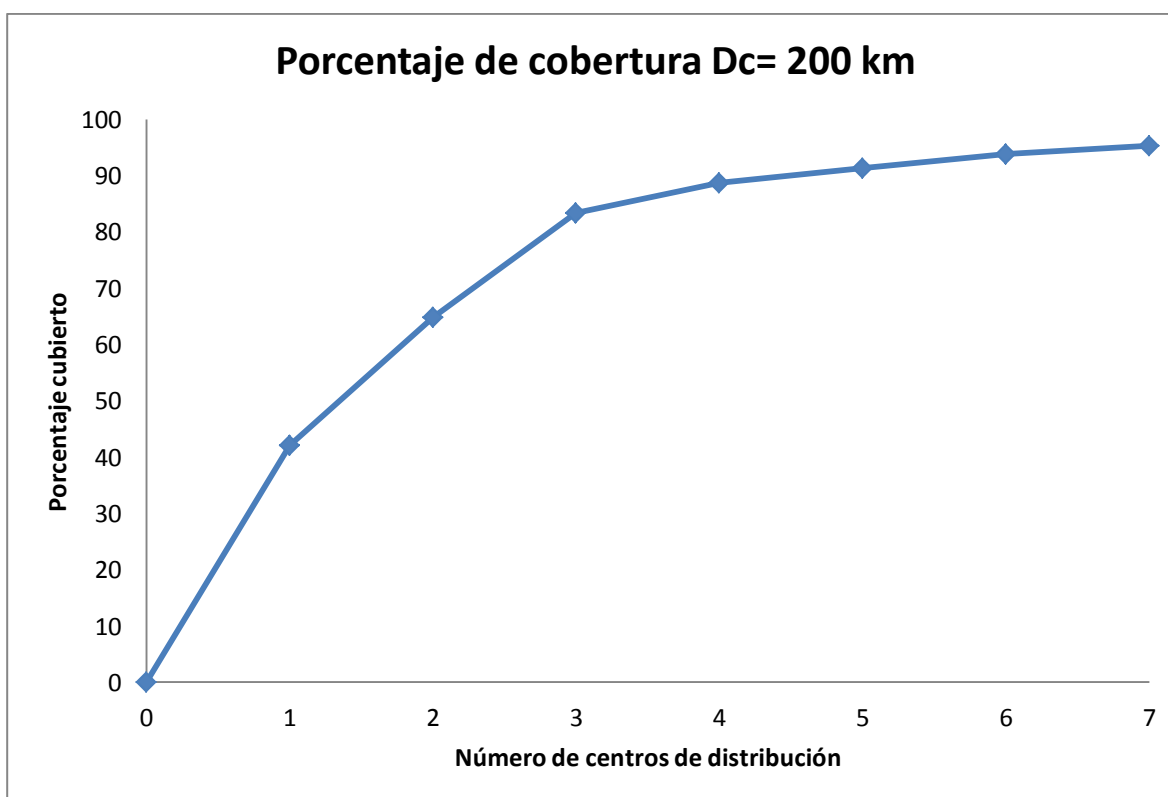
Tabla 9. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=200km. (Fuente: Elaboración propia, 2013).

CEDIS	Demanda cubierta (miles de personas)	% cubierto
1	258,376	42.1
2	397,222	64.8
3	510,972	83.3
4	544,175	88.7
5	559,669	91.3
6	575,139	93.8
7	584,670	95.3

Tabla 10. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=200km. (Fuente: elaboración propia, 2013).

Localización, demanda y capacidad			
CEDIS	X (Localización)	Z Demandas cubiertas (municipios)	Capacidad (l/día)
1	P	A,H	79,063
2	P,V	A,B,H,M,R,T,U	121,550
3	P,V,W	A,B,C,E,F,G,H,I,K,M,R,T,U	156,357
4	P,V,W,E	A,B,C,E,F,G,H,I,J,K,M,O,Q,R,T,U,W	166,518
5	P,V,W,E,H	A,B,C,E,F,G,H,I,J,K,M,O,P,Q,R,S,T,U,W	171,259
6	P,V,W,E,U,H	A,B,C,E,F,G,H,I,J,K,L,M,O,P,Q,R,S,T,U,V,W	175,993
7	P,V,I,K,E,U,H	A,B,C,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,V,W	178,909

Cabe mencionar que en los escenarios 1 y 2 la localización “X” de las instalaciones se mantuvo progresivamente como se muestra en las tablas 8 y 10; sin embargo más adelante en los escenarios 3,4 y 5 se observa que la variable de localización puede o no mantenerse corrida a corrida.



Gráfica 4. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=200km. (Fuente: elaboración propia, 2013).

En el escenario 3 para una distancia de cobertura de 300km, el porcentaje de cobertura se comportó de manera similar al escenario 2 como se muestra en la tabla 11, con la excepción de que el número de instalaciones disminuyó como era de esperarse al aumentar la distancia de cobertura de cada una de ellas.

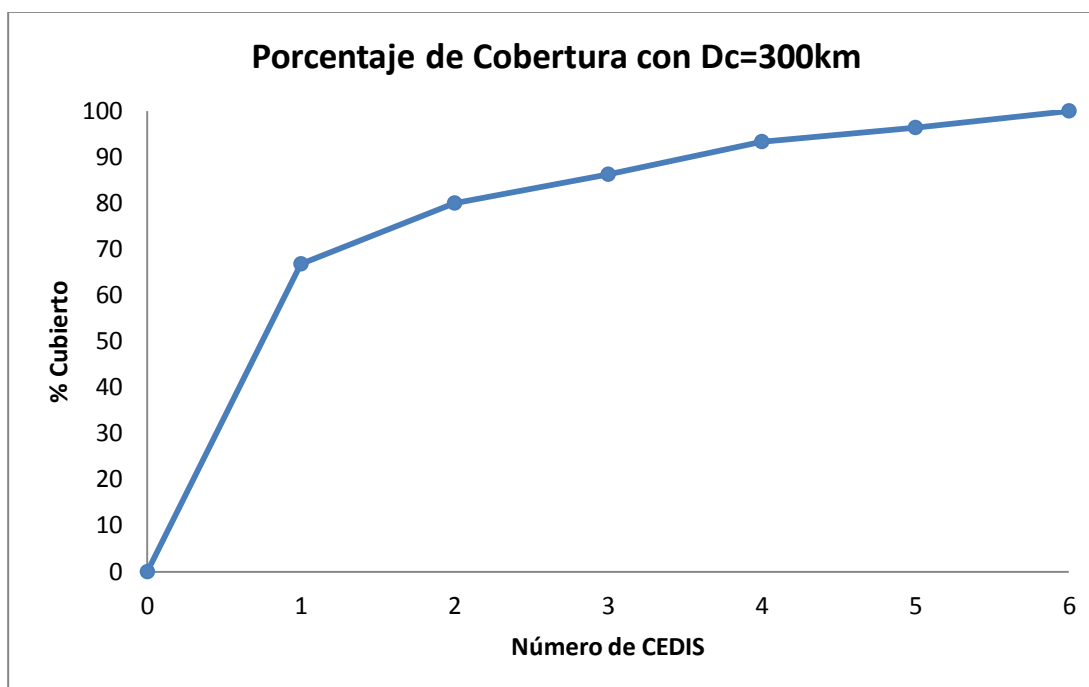
Tabla 11. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=300km. (Fuente: Elaboración propia, 2013).

CEDIS	Demanda cubierta (miles de personas)	% cubierto
1	410,218	66.9
2	490,471	80.0
3	529,045	86.3
4	572,886	93.4
5	591,603	96.5
6	613,199	100.0

Tabla 12. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=300km. (Fuente: elaboración propia, 2013).

Localización, demanda y capacidad			
CEDIS	X (Localización)	Z Demandas cubiertas (municipios)	Capacidad (l/día)
1	S	A,B,C,H,N	125,527
2	S,W	A,B,C,E,F,G,H,I,K,N	150,084
3	S,O,U	A,B,C,D,E,F,G,H,L,M,N,T,V	161,888
4	S,O,E,U	A,B,C,D,E,F,G,H,J,K,L,M,N,O,Q,T,V,W	175,303
5	S,N,O,E,U	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,Q,S,T,V,W	181,031
6	H,V,N,O,E,U	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,V,W	187,639

En la tabla 12 se observa que por primera vez la localización “X” en cada corrida pudo variar ya que de la corrida 1 a la 4 se mantuvo presente el municipio de Buenaventura denotado como “S”, no así para la corrida 5 en la cual no figuró; de la misma manera sucedió con los demás municipios que formaron parte de los resultados cada vez.



Gráfica 5. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con Dc=300km. (Fuente: elaboración propia, 2013).

Para una distancia de cobertura de 400 km de nuevo el porcentaje de demanda cubierta se comportó de manera similar para el primer centro de distribución, no así para las corridas subsecuentes en las que observó que se necesitarían menos instalaciones para cubrir mayor número de personas, es decir, cuando aumenta la distancia de cobertura de cada instalación también aumenta el porcentaje de personas cubierto por el conjunto de centros de distribución que se tuvo en cada corrida como se muestra en la tabla 13.

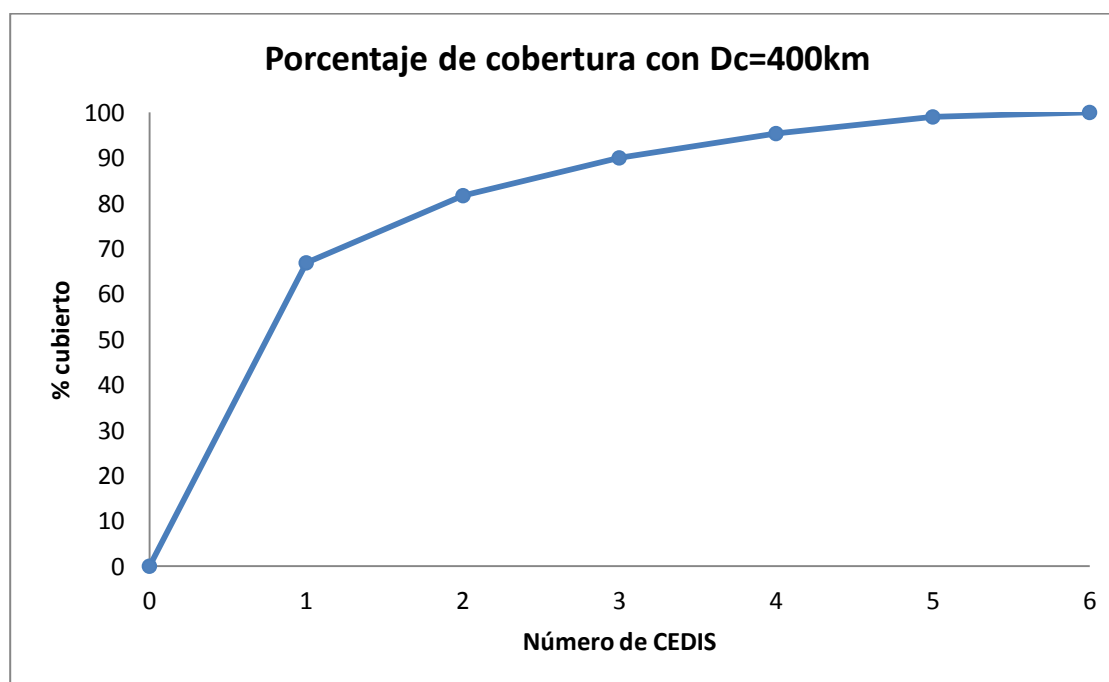
Tabla 13. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=400km. (Fuente: Elaboración propia, 2013).

CEDIS	Demanda cubierta (miles de personas)	% cubierto
1	410,218	66.9
2	501,243	81.7
3	552,203	90.1
4	585,158	95.4
5	607,894	99.1
6	613,199	100.0

La tabla 14 muestra que la capacidad de cada centro de distribución tendería a aumentar con la distancia de cobertura, cada instalación debería ser capaz de procesar una mayor cantidad de producto aunque también cubriría un mayor porcentaje de personas si se observa el comportamiento a partir de que se localizan dos o más centros de distribución (gráfica 6).

Tabla 14. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con $D_c=400\text{km}$. (Fuente: elaboración propia, 2013).

Localización, demanda y capacidad			
CEDIS	X (Localización)	Z Demandas cubiertas (municipios)	Capacidad (l/día)
1	S	A,B,C,H,N	125,527
2	S,E	A,B,C,D,F,H,J,K,N,O,Q,W	153,380
3	S,E,W	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,N,O,Q,W	168,974
4	H,V,W,E	A,B,C,D,E,F,G,I,J,K,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,W	179,058
5	H,V,N,E,F	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,W	186,016
6	H,S,V,W,E,M	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,V,W	187,639



Gráfica 6. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con $D_c=400\text{km}$. (Fuente: elaboración propia, 2013).

El último escenario, con una distancia de cobertura de 500 km (la inmediata superior a la máxima distancia entre dos municipios de la red) mostró un dramático aumento en el porcentaje de cobertura y principalmente en la velocidad con que se alcanzó a cubrir el cien por ciento de la población objetivo, así mismo el número de instalaciones fue el mínimo de todos los escenarios con cinco CEDIS. Por otro lado cada viaje que saliera de las instalaciones tendría que cubrir una distancia mayor que en los escenarios 1 al 4.

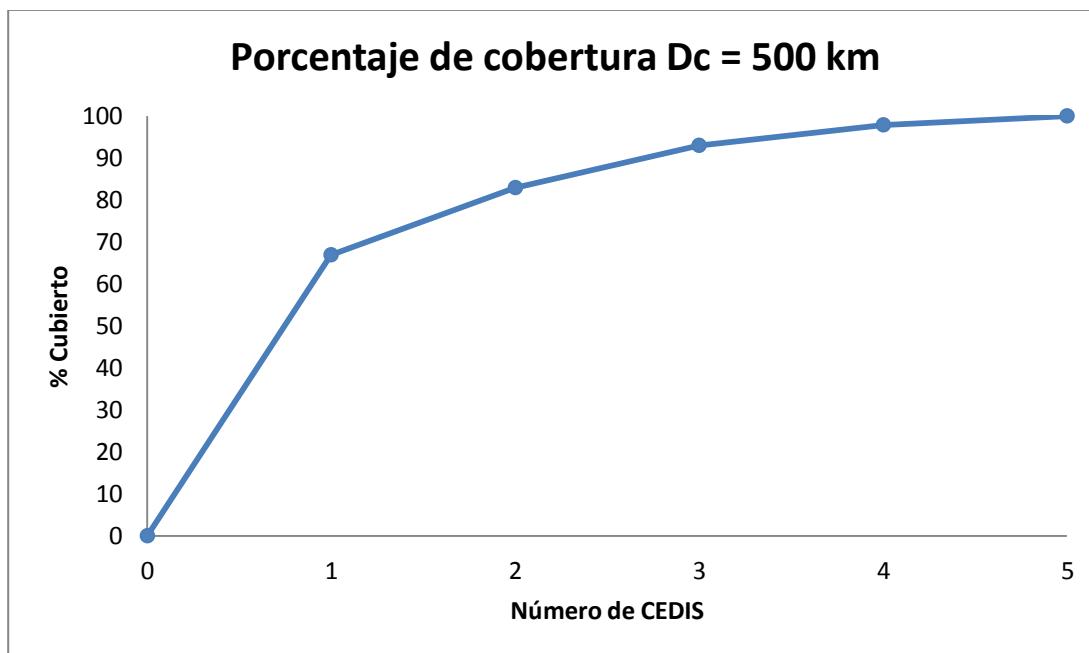
Tabla 15. Demanda y porcentaje de cobertura por conjunto de centros de distribución con Dc=500km. (Fuente: Elaboración propia, 2013).

CEDIS	Demanda cubierta (miles de personas)	% cubierto
1	410,218	66.9
2	507,932	82.8
3	569,664	92.9
4	599,854	97.8
5	613,199	100.0

Tabla 16. Localización, demanda y capacidad por conjunto de centros de distribución con Dc=500km. (Fuente: elaboración propia, 2013).

Localización, demanda y capacidad			
CEDIS	X (Localización)	Z Demandas cubiertas (municipios)	Capacidad (l/día)
1	S	A,B,C,H,N	125,527
2	V,W	A,B,C,E,F,G,I,K,M,N,R,T,U	155,427
3	V,W,E	A,B,C,D,E,F,G,I,J,K,M,N,O,Q,R,T,U,W	174,317
4	V,N,E,F	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,Q,R,S,T,U,W	183,555
5	V,A,W,E,M	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,V,W	187,639

La tabla 16 y la gráfica 7 reafirman el concepto de que a mayor distancia de cobertura mayor será también el porcentaje de demanda cubierto y también la capacidad y por consiguiente el tamaño de cada instalación.



Gráfica 7. Porcentaje de cobertura versus número de sitios con $D_c=500\text{km}$. (Fuente: elaboración propia, 2013).

El comparativo de la gráfica 8 muestra en diferente color cada uno de los 5 escenarios en términos de la distancia de cobertura y su relación con el porcentaje de demanda cubierto, resultó particularmente interesante observar como 3 de los 5 escenarios mostraron un comportamiento muy similar debido a que la distancia entre los municipios es similar a la distancia de cobertura que se asignó en cada caso mientras que los escenarios 1 y 2 mostraron claramente las limitaciones de la distancia de cobertura que se les asignó al no cubrir la totalidad de la población objetivo, sin importar el número P de instalaciones que se les asignó su gráfica mostró un comportamiento asintótico al límite que representa la suma del número de habitantes existentes en los nodos descartados por las restricciones de exceso de distancia de cobertura.

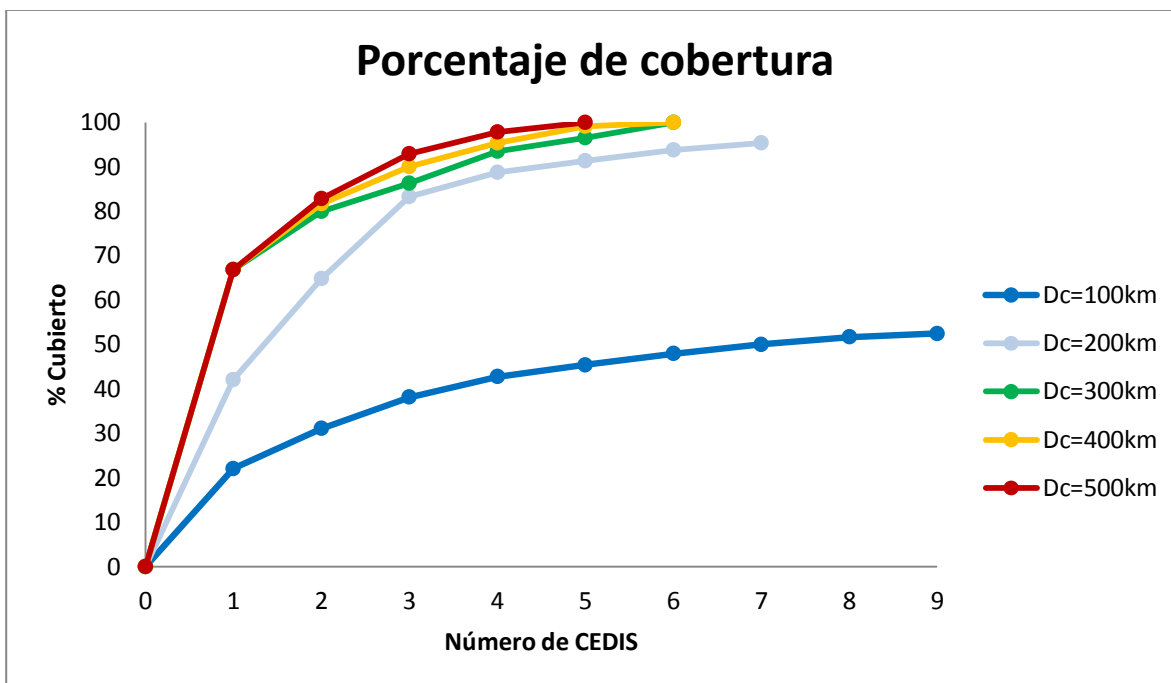
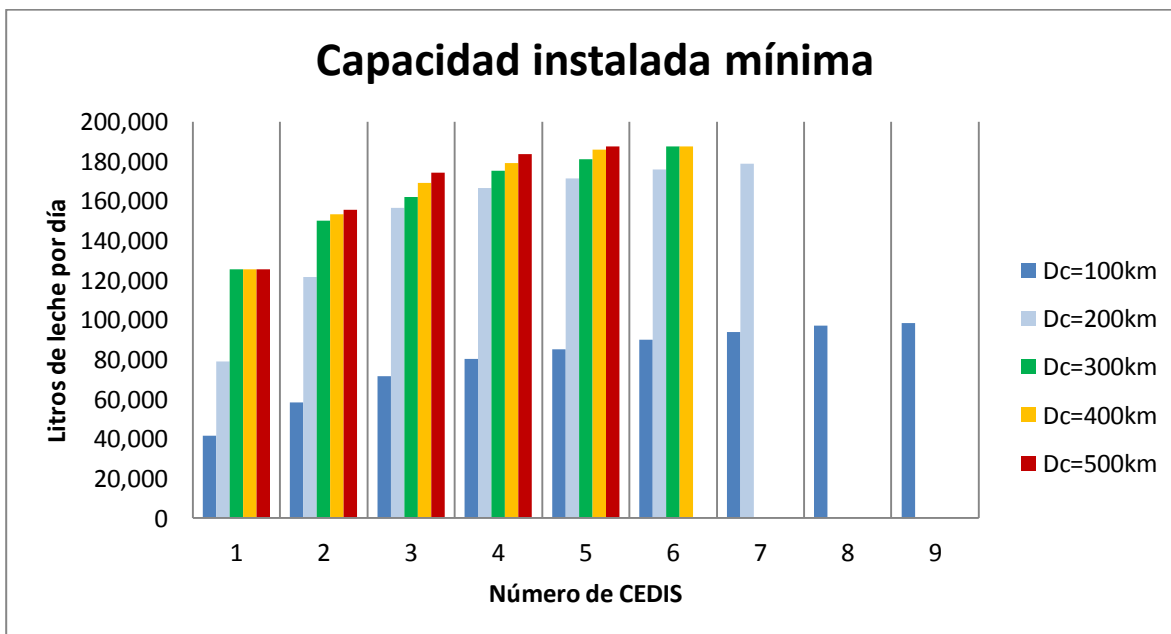


Gráfico 8. Comparativo de porcentaje cubierto vs número de CEDIS para los cinco escenarios (Fuente: elaboración propia, 2013).



Gráfica 9. Comparativo de la capacidad instalada mínima necesaria para atender a los beneficiarios dependiendo de la distancia de cobertura para los 5 escenarios. (Fuente: elaboración propia, 2013).

La capacidad instalada (gráfica 9) es un indicador del tamaño del proyecto y lo que conlleva en términos de la inversión, tiempo y demás factores anteriormente mencionados que forman parte del estudio técnico, una de las partes fundamentales de la evaluación de proyectos (figura 20) y que serían necesarios para llevarlo a cabo, la gráfica 8 muestra que si se desea atender al cien por ciento de la población objetivo del programa de abasto social de leche en el estado hay cinco opciones (cuatro de las cuales permitirían lograrlo) dependiendo del criterio que resulte de mayor importancia para quien tome la decisión y de acuerdo a las posibilidades de inversión de recursos, tiempo y dinero en el proyecto. Estos criterios se resumen en distancia de cobertura deseada para cada centro de distribución, porcentaje de demanda que se desea cubrir y finalmente tamaño y número de instalaciones que se está dispuesto a construir. No hay que olvidar que este trabajo estuvo enfocado a la primera parte del estudio técnico que va de la mano con el estudio de mercado así como una visión de conjunto acerca de la capacidad instalada de la red de distribución en cada escenario.

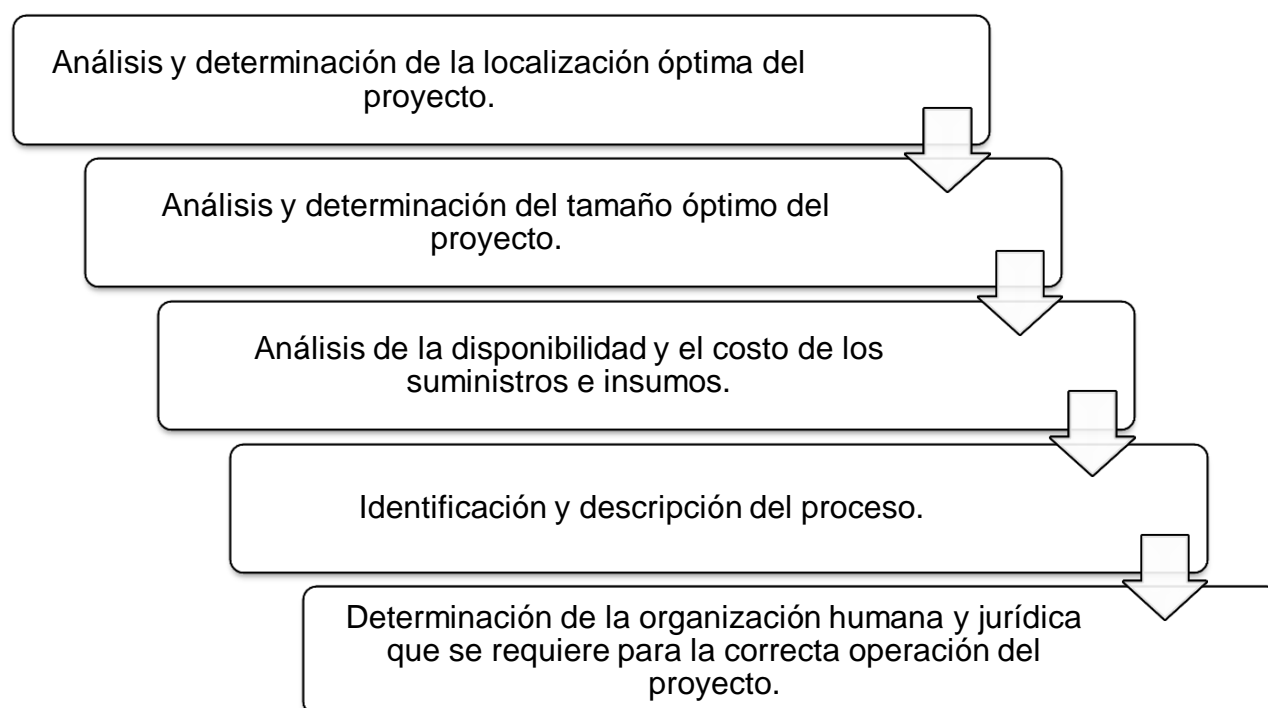


Figura 20. Partes que conforman un estudio técnico. (Fuente: Baca Urbina, G, 2013).

Tabla 17. Matriz de decisión “Porcentaje de cobertura”.(Fuente: Elaboración propia, 2013).

Matriz de decisión <i>porcentaje de cobertura</i>						
		Distancia de cobertura D_c				
		100KM	200KM	300KM	400KM	500KM
Número P de instalaciones	1	22.1 %	42.1%	66.9%	66.9%	66.9%
	2	31.1 %	64.8 %	80.0%	81.7%	82.8%
	3	38.2 %	83.3 %	86.3%	90.1%	92.9%
	4	42.7 %	88.7 %	93.4%	95.4%	97.8%
	5	45.4 %	91.3 %	96.5%	99.1%	100.0%
	6	48.0 %	93.8 %	100.0%	100.0%	
	7	50.0 %	95.3 %			
	8	51.7 %				
	9	52.5 %				

La tabla 17 muestra la matriz de decisión *porcentaje de cobertura*, resultado de la conjunción de los 33 escenarios posibles, en ella se encuentran los porcentajes de cobertura que resultarían si se eligiese construir cierto número P de instalaciones con su correspondiente distancia de cobertura D_c , de esta forma se resumen de manera práctica los resultados del capítulo 4.

5.0 CONCLUSIÓN Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Hablar de costo en términos de la distancia recorrida que tendrían que llevar a cabo la flota de vehículos desde los centros de distribución hasta los puntos de venta y no en términos de la inversión inicial de construir o remodelar las instalaciones, el escenario número dos representa la mejor opción ya que cuenta con la menor distancia de cobertura y que además permite cubrir el 95.3% de la población objetivo con 7 instalaciones.

La figura número 21 muestra el mapa de solución con la red de distribución que incluye la localización de los centros de distribución y la capacidad instalada mínima que deberían tener cada uno de ellos, considerando que cada uno debe cubrir la demanda generada en el municipio y las demandas adyacentes al mismo, respetando por supuesto la restricción de distancia de cobertura.

Los escenarios 3,4 y 5 representan una menor inversión inicial hablando de número de instalaciones mas no de capacidad instalada total ya que como se observa en las tablas correspondientes de cada caso al final el número de litros por día que deben ser repartidos por la red es el mismo.

Hay que recordar que el modelo utilizado para la solución del problema no toma en cuenta costos de ningún tipo; A groso modo la tabla 18 muestra el supuesto de un análisis de la inversión inicial para un centro de distribución en cuyo caso se puede inferir el costo por habitante “CPC” y el de menor cantidad sería un buen escenario. De ésta manera queda claramente establecida la meta de la investigación de operaciones, que es apoyar a los gerenciales a una mejor toma de decisión con base herramientas matemáticas.

$$CPC = \frac{\textit{Inversión inicial}}{\textit{Número de habitantes atedidos}}$$

Tomando en cuenta el supuesto de la tabla 18 y la demanda cubierta por el primer centro de distribución de la tabla 9, el costo por habitante sería:

$$CPC = \frac{\$ 14,105,000.00}{258,376 \text{ (habitantes)}} = 54.6 \left(\frac{\$}{\text{habitante}} \right)$$

Tabla 18. Supuesto de inversión inicial para un centro de distribución de leche en Chihuahua. (Fuente: Elaboración propia, 2013).

CEDIS CHIHUAHUA				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	SUBTOTAL
Terreno	m ²	3000	\$ 500.00	\$ 1,500,000.00
proyecto	Lote	1	\$ 500,000.00	\$ 500,000.00
PRELIMINARES				
Limpieza	Lote	1	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
Despalme	Lote	1	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
nivelación	Lote	1	\$ 100,000.00	\$ 100,000.00
			SUBTOTAL	\$ 300,000.00
CIMENTACIÓN				
Plantilla	m ²	1500	\$ 1,000.00	\$ 1,500,000.00
Zapatas	m ³	500	\$ 5,000.00	\$ 2,500,000.00
			SUBTOTAL	\$ 4,000,000.00
ESTRUCTURA (ACERO)				
Columnas	pza	30	\$ 1,500.00	\$ 45,000.00
Trabes	pza	50	\$ 1,500.00	\$ 75,000.00
Muros y techo	lámina	500	\$ 1,000.00	\$ 500,000.00
			SUBTOTAL	\$ 620,000.00
INSTALACIONES				
WC	pza	10	\$ 2,000.00	\$ 20,000.00
Tubería sanitaria	m	200	\$ 200.00	\$ 40,000.00
Comedor	N/A	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00
			SUBTOTAL	\$ 85,000.00
ENFRIAMIENTO	N/A			\$ 3,000,000.00
MAQUINARIA	N/A			\$ 2,500,000.00
ACABADOS				
Pintura	m ²	500	1000	\$ 500,000.00
Azulejo	m ²	200	3000	\$ 600,000.00
			SUBTOTAL	\$ 1,100,000.00
			SUBTOTAL	\$ 13,305,000.00
			MUEBLES	\$ 500,000.00
			TOTAL	\$ 14,105,000.00

Aunque algunos investigadores iniciaron el estudio de los aspectos estocásticos y dinámicos de la localización de instalaciones hace muchos años, la mayor parte de la investigación dedicada a estos problemas y que se ha publicado en los últimos años aún toma como premisa consideraciones determinísticas, *todos los insumos (tales como demandas, distancias y tiempos de viaje) se toman como cantidades y el producto conocidos están especificados como la toma de valores en una sola vez*. Formulaciones estocásticas intentan capturar la incertidumbre en los parámetros de entrada problemáticas como pronóstico la demanda o de la distancia los valores. La literatura estocástica se divide en dos clases: la que considera explícitamente la distribución de probabilidad de los parámetros inciertos y la que capta la incertidumbre a través de la planificación de escenarios. La amplia gama de formulación de modelos y enfoques de solución se discuten con aplicaciones que se extienden a través de numerosas industrias.

Varias funciones objetivo y modelos particulares se han formulado para hacer tales modelos susceptibles a numerosas aplicaciones. Desafortunadamente, los modelos resultantes pueden ser extremadamente difíciles de resolver óptimamente (la mayoría de los problemas se clasifican como NP-duro), lo cual el términos coloquiales significa que no existe hoy en día algún algoritmo acotado en tiempo en número polinomial de pasos que resuelva el problema de manera óptima.

Parece ser que el futuro de la localización de instalaciones depende de esta área de la investigación de operaciones con modelos que consideran el funcionamiento de la instalación durante cierto periodo de tiempo para después cambiar de sitio acorde con la demanda y los demás factores. Específicamente se busca la mejora de la heurística para apoyar la solución de problemas más grandes, más complejos y más realistas.

El aumento del uso de técnicas de planificación de escenarios conducirá los avances a la solución de modelos que crecen rápidamente con el número de escenarios generados. Asimismo se busca el desarrollo de modelos que manejan tanto el espectro estocástico y los aspectos dinámicos de la localización de instalaciones.

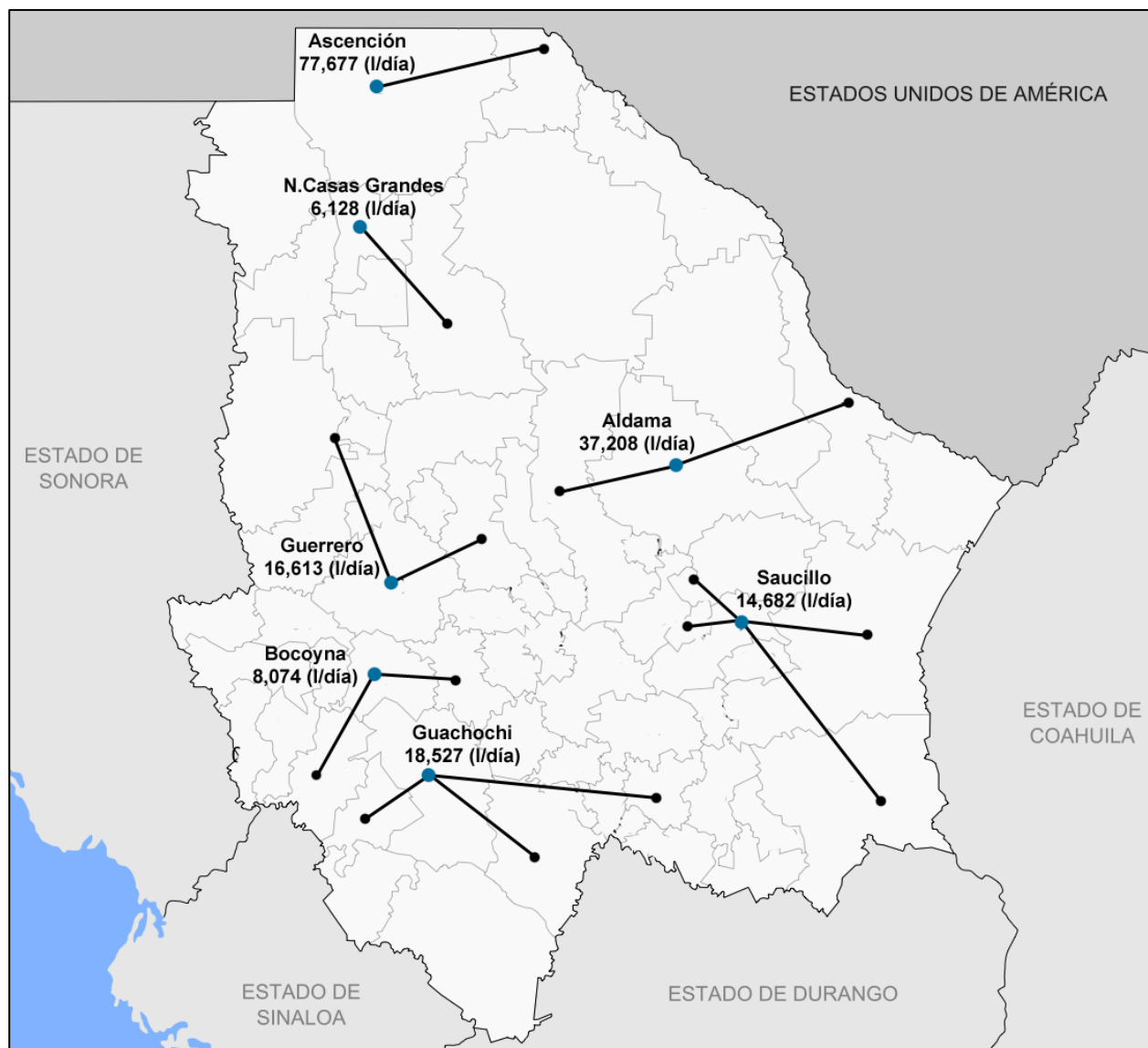


Figura 21. Mapa de solución para una distancia de cobertura de 200km, utilizando el modelo de máxima cobertura se lograría cubrir el 95.3% de la población objetivo. (Fuente: Elaboración propia, Adobe PhotoShop CS3, 2013).

Por último es importante mencionar que el modelo de optimización y la metodología de solución del caso práctico son trasladables a otros estados de la república e inclusive a otros campos realizando los ajustes necesarios dependiendo del problema en particular.

REFERENCIAS

- H.A. Eiselt & Vladimir Marianov, **Foundations of Location Analysis**, International Series in Operations Research & Management Science, p.3-10, 2011.
- J. Kuby, Michael & Church, Richard, **Introduction to the Special Issue on Location Modeling**, Springer, p.293-295, 2010.
- Aldajani, Mansour A., **Facilities optimization method**, United States patent No. 7,949,503, 2008.
- Daskin Mark S., **Network and Discrete Location, models, algorithms and applications**, John Wiley & Sons, p. 92-125,198,208,1995.
- Schroeder, Roger G., **Administración de operaciones**, McGraw-Hill, p.239-253, 1992.
- Elizondo Cortes, Mayra, **Una estrategia para resolver el problema de inventario-Distribución**, Facultad de ingeniería UNAM, 2005.
- Bustos Gilbert, María Luisa, **Las teorías de localización industrial, una breve aproximación**, p. 53-73, 1993.
- Klose Andreas, Drexl Andreas, **Facility location models for distribution system design**, Elsevier B.V., p.2-16, 2003.
- Everett E. Adam, Jr. & Ronald J.Ebert, **Administración de la producción y las operaciones**, Prentice Hall, 1991.
- Riggs, James L., **Production Systems : planning, analysis, and control**, John Wiley & Sons, 2010.
- Elkafi Hassini, Chirag Surti, Cory Searcy, **A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics**, Elsevier B.V., 2012.
- Daskin, Mark S., **What You Should Know About Location Modeling**, Wiley Interscience, 2008.

-
- Klatch, Wally, **Supply chain for liquids: out of the box approaches to liquid logistics**, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis, 2005.
 - Hesse Owen, Susan & Daskin, Mark S., **Strategic Facility Location: A review**, Elsevier B.V., p. 424-444, 1998.
 - Reza Zanjirani Farahani, Nasrin Asgari, Nooshin Heidari, Mahtab Hosseininia, Mark Goh, **Covering problems in facility location: A review**, Elsevier B.V., 2011.
 - Alireza Boloori Arabani & Reza Zanjirani Farahani, **Facility location dynamics: An overview of classifications and applications**, Elsevier B.V., 2011.
 - Winston Wayne L., **Investigación de operaciones: Aplicaciones y algoritmos**, 4ª edición, Cengage learning / Thomson internacional, 2004.
 - Contreras Ivan & Fernandez, Elena, **General network design: A unified view of combined location and network design problems**, Elsevier B.V., 2011.
 - **Manual de procedimientos para la programación y producción de leche en polvo y de leche líquida**, SEDESOL, Liconsa, 2008.
 - **Convocatoria a la licitación pública nacional mixta LA-020VST001-N5-2013, Relativa a la contratación del servicio de transporte de leche líquida**, SEDESOL, Liconsa, 2013.
 - **Informe de pobreza y evaluación en el estado de Chihuahua**, Consejo Nacional de Evaluación (CONEVAL), 2012.
 - **Panorama sociodemográfico de Chihuahua**, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2011.
 - **Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica**, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010.
 - NOM-012-SCT-2-2008, **Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal**, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2008.

- **Programa institucional 2012**, Liconsa S.A de C.V., 2012.
- **Lecherías al cierre de Septiembre 2012**, Liconsa S.A. de C.V., 2012.
- **Evaluación de Resultados del Programa de Adquisición de Leche Nacional, a cargo de Liconsa, S.A. de C.V.**, ITESM, 2006.
- **Análisis del impacto de la fortificación de la leche Liconsa con hierro, zinc y otros micronutrientes sobre el rendimiento escolar de la población de beneficiarios del programa de Abasto Social de Leche a cargo de Liconsa**, Instituto nacional de salud pública centro de investigación en nutrición y salud, 2009.
- **Agenda de Competitividad en Logística 2008-2012**, Subsecretaría de Industria y Comercio, Dirección General de Comercio Interior y Economía Digital, 2008.
- **Población total por municipio, sexo y grupos quinquenales de edad según tamaño de localidad**, Tabulados del cuestionario básico, INEGI, 2010.

REFERENCIAS DE INTERNET

- “Conoce a Liconsa, historia” <http://www.liconsa.gob.mx/conoce-a-liconsa/historia/>, Enero, 2013.
- “Programa estratégico institucional”, <http://www.liconsa.gob.mx/wp-content/uploads/2012/08/Programa-Estrategico-Institucional-2009-2012.pdf>, Enero, 2013.
- “Programa de abasto social, producción” <http://www.liconsa.gob.mx/programa-de-abasto-social/produccion/>, Enero, 2013.
- “Programa de abasto social, distribución” <http://www.liconsa.gob.mx/programa-de-abasto-social/distribucion/>, Enero, 2013.
- “Conoce a Liconsa, cobertura geográfica” <http://www.liconsa.gob.mx/conoce-a-liconsa/cobertura-geografica/>, Marzo, 2013.
- “An Overview of LINGO”, http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=10, Junio, 2013.
- “Análisis y medición de la pobreza”, <http://www.coneval.gob.mx/Medicion/Paginas/Medici%C3%B3n/Informacion-por-Municipio.aspx>, Marzo, 2013.

6.0 ANEXO

El algoritmo glotón de adición: un algoritmo heurístico para resolver el modelo de máxima cobertura para la localización de instalaciones.

Numerosos algoritmos han sido propuestos para resolver el modelo de máxima cobertura (Daskin, Mark S. 1995). El algoritmo heurístico conocido como el *algoritmo glotón* y sus variantes se pueden usar para resolver (al menos aproximadamente) un gran número de problemas de localización, este algoritmo hace lo que es mejor en cada paso, sin ver hacia adelante como impactarán sus decisiones en futuras alternativas y otras decisiones.

Por otro lado, si se fuera a localizar una sola instalación ($P=1$) se podría resolver el problema óptimamente simplemente con evaluar cuantas demandas cubre cada sitio candidato y seleccionado aquél que cubra el mayor número de demandas. Esto puede hacerse en $O(IJ)$ tiempo, donde I es el número de nodos de demanda y J es el número de sitios candidatos. En teoría esta enumeración total se podría usar para resolver problemas con cualquier número de instalaciones. Sin embargo, el tiempo necesario para resolver el problema con P instalaciones seleccionadas de J sitios candidatos es de al menos $O\left(I\binom{J}{P}\right)$, donde $\binom{J}{P}$ representa el número de combinaciones de P sitios en J . De hecho, si solo tomamos en cuenta operaciones elementales (sumas, restas y comparaciones), se necesitarían $O\left(IP\binom{J}{P}\right)$ operaciones, desde que evaluar cada combinación de sitios requiere P comparaciones para ver si alguna de las P instalaciones cubre alguno de los nodos demanda.

Por ejemplo, si $I=100$, $J=50$ y $P=1$, se necesitarían 5000 operaciones, para $P=3$ se necesitarían 5, 880,000 operaciones y finalmente para $P=10$ se necesitarían 1.027×10^{13} operaciones. Si se pudieran evaluar 10^7 operaciones por segundo, se necesitaría casi 12 días para resolver este problema. Para resolver un problema con 15 instalaciones, se necesitarían alrededor de 10 años. Claramente el método de enumeración total no es muy atractivo en estos casos.

Si se quisiera localizar dos instalaciones y ajustar la primera instalación a la localización determinada por el algoritmo de enumeración total explicado arriba, es posible evaluar el mejor lugar para localizar la segunda instalación (dada la localización de la primera) en $O(IJ)$ tiempo. Se podría repetir este procedimiento para localizar la tercer instalación (dadas las localizaciones de la primera y la segunda) y así consecutivamente; de esta manera se puede reducir la complejidad del algoritmo a $O(IJP)$. El tiempo requerido para localizar 15 instalaciones con una computadora capaz de evaluar 10^7 operaciones por unidad de tiempo se requeriría de 1 segundo. Renunciando a la garantía de obtener una solución óptima este método parece trabajar muy bien, particularmente si se va a localizar un gran número de instalaciones. La figura A.22 muestra el diagrama de flujo de este algoritmo.

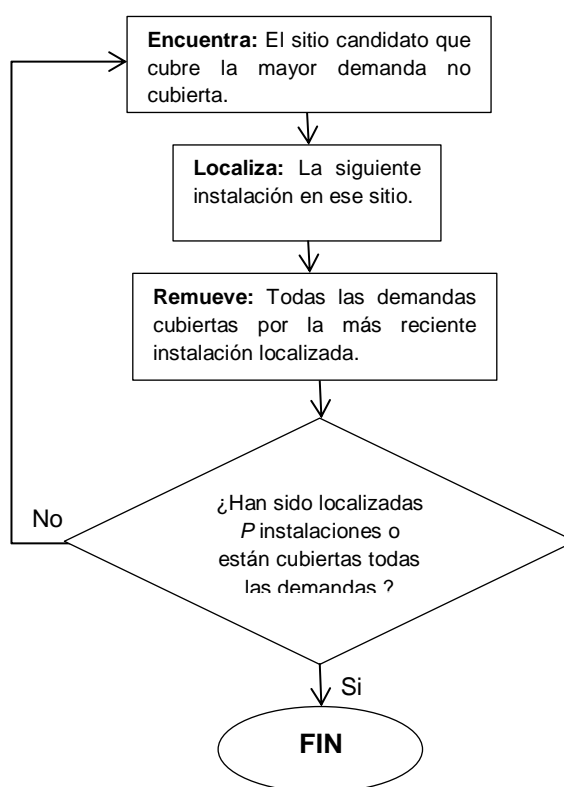


Figura A.22. Diagrama de flujo del algoritmo glotón de adición para resolver el modelo de máxima cobertura. (Fuente: Daskin, Mark S. 1995).

Participación en el XI Congreso de Ingeniería del Transporte “CIT” 2014

Como nota final y en colaboración con la Dra. Esther Segura Pérez, hemos decidido enviar un artículo con los resultados obtenidos en este trabajo para participar en el XI Congreso de Ingeniería del Transporte “CIT” 2014, que se realizará en la universidad de Cantabria, España. A continuación, el resumen que enviamos para la evaluación del trabajo:

RESUMEN

En México LICONSA S.A. de C.V., empresa subsidiada por el gobierno federal distribuye diariamente alrededor de 3 millones de litros de leche a 2.8 millones de hogares con niños menores de doce años, adultos mayores, mujeres en periodo de gestación o lactancia y personas con algún tipo de discapacidad física o mental en condiciones de pobreza.

Mediante un análisis basado en el promedio de beneficiarios atendidos por punto de venta en las 32 entidades federativas del país y en declaraciones emitidas por la empresa se llegó a la conclusión de que existe un desequilibrio en el nivel de atención respecto al que se presenta en la zona centro del país.

Este trabajo tiene como objetivo optimizar la red de distribución de leche que existe actualmente en Chihuahua a través de la localización de centros de distribución (CEDIS) que permitan aumentar de manera dinámica la respuesta a la demanda de leche logrando la máxima cobertura de beneficiarios, una de las directrices del programa.

Se realizó un análisis de la esencia de la empresa, sus objetivos y su estructura actual, logrando complementar y fortalecer el sistema de distribución mediante la aplicación del modelo de localización discreta de máxima cobertura, el cual permitió relacionar el número de instalaciones con el porcentaje de demanda cubierto donde las restricciones del modelo dependen únicamente de la distancia de cobertura deseada para cada centro de distribución, de manera que a mayor distancia de cobertura se necesitaría un menor número de CEDIS para cubrir el total de la demanda de leche.

Con base en los siete pasos formales para la elaboración de un proyecto de optimización se planteó el problema y se definió el modelo matemático que responde a las necesidades de la empresa. Durante el desarrollo se obtuvieron los segmentos de mercado que forman parte de la población objetivo del programa de abasto social para después construir la red de conexiones entre municipios que fungen como posibles candidatos para la localización de CEDIS. En seguida la construcción del programa lineal aplicado al caso particular de estudio permitió la generación de escenarios que, con ayuda de software de solución LINGO resultaron en una matriz de decisión cuyo contenido representa el porcentaje de cobertura que se obtendría al implementar cierto número de CEDIS con su correspondiente distancia de cobertura; en síntesis, el conjunto de instalaciones con 100km de cobertura cubren como máximo el 52.5%, en el conjunto con 200km el porcentaje se eleva hasta el 95.3%, y para los conjuntos que cubren distancias de 300, 400 y 500 km es posible cubrir el 100% de la población objetivo. Una breve visión de conjunto reveló que, tanto el costo per cápita de la construcción de las instalaciones y el tiempo de retorno de la inversión hacen de este un proyecto viable en el aspecto económico.