



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“MODELADO DE LA LOCALIZACIÓN DE PLANTAS,  
PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y  
TRANSPORTE EN LA CADENA DE SUMINISTROS  
DE LA INDUSTRIA CERVECERA EN MÉXICO”

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA DE SISTEMAS - INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

P R E S E N T A :

**RICARDO HERNÁNDEZ TABLAS**

TUTOR:

**HÉRICA SÁNCHEZ LARIOS**

2011



**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr.: Servio Tulio Guillén Burguete

**Secretario:** Dra.: Idalia Flores de la Mota

**Vocal:** Dra.: Hérica Sánchez Larios

**1<sup>er</sup> Suplente:** Dra.: Mayra Elizondo Cortés

**2<sup>do</sup> Suplente:** Dr.: Juan Manuel Estrada Medina

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** GRUPO MODELO S.A.B de C.V., GRUPO DIFA S.A. de C.V., INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATEMÁTICAS APLICADAS Y EN SISTEMAS E INSTITUTO DE INGENIERÍA.

**TUTOR DE TESIS:**  
HÉRICA SANCHEZ LARIOS

-----  
FIRMA



## RESUMEN

La industria cervecera es una de las más fuertes y redituables en el país. Desde sus inicios, a principios del Siglo XX, ha ido creciendo hasta tener presencia a nivel mundial. No obstante, este gran crecimiento se ve opacado por el poco desarrollo operacional que ha tenido.

Debido al gran tamaño que posee la industria cervecera, la mayor parte de los problemas que se pueden plantear tendrán una gran cantidad de variables, lo que lleva a que las técnicas aplicadas tradicionalmente, basadas en la experiencia del personal, sean insuficientes.

En este trabajo se propone la aplicación de diversas técnicas, del ámbito de la Investigación de Operaciones (I de O), para la modelación y solución de varios problemas relacionados con la cadena de suministros de la industria cervecera en México.

Enero 19, 2011



## ABSTRACT

The beer industry is one of the strongest and profitable industries in the country. Since it was born, at the beginning of the XX century, it has been growing up until getting a global position of the different brands it has. Nevertheless, such growth has been slowed down due to the lack of development in the management and operation of supply chain.

The beer industry has big problems, thousands or millions of variables arise from the majority of the problems. Such massive amount of variables leads traditional techniques, based on the experience of people in the company, to be inefficient.

In this work, Operations Research (OR) techniques have been proposed to model and solve some important supply chain problems in the beer industry.

January 19, 2011



Quiero agradecer a CONACYT por el apoyo económico brindado.

-RHT-

---

Just arber!

-RHT-

---

# Índice

---

Índice	IX
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XV
Estado del Arte	1
Introducción	5
La Cadena de Suministros de la Industria Cervecera en México. . . . .	7
Objetivo . . . . .	9
Objetivos específicos . . . . .	10
Resumen de capítulos . . . . .	10
<b>1. Modelos de Regresión para los Costos de Transporte</b>	<b>13</b>
1.1. Introducción . . . . .	13
1.2. Desarrollo . . . . .	15
1.2.1. Datos . . . . .	16
1.2.2. Tratamiento de los datos . . . . .	17
1.2.3. Antecedentes para la modelación . . . . .	19
1.3. Modelado de la función de costos . . . . .	23
1.3.1. Introducción . . . . .	24
1.3.2. Metodología para estabilizar la varianza . . . . .	26



1.3.3. Metodología para marcar datos atípicos. . . . .	28
1.4. Metodología Haciendo Uso de Programación No Lineal . . . . .	30
<b>2. Modelo de Programación Matemática Para Las Cervecerías</b>	<b>33</b>
2.1. La demanda . . . . .	34
2.2. Costos asociados al modelo . . . . .	35
2.3. El cierre de plantas . . . . .	35
2.4. Modelo matemático. . . . .	37
2.4.1. La función Objetivo . . . . .	41
2.4.2. Restricciones . . . . .	42
2.5. Comentarios Adicionales . . . . .	43
2.6. Validación del modelo . . . . .	44
<b>3. Modelo de Programación Matemática para las Vidrieras</b>	<b>45</b>
3.1. Modelo matemático . . . . .	46
3.1.1. Descripción del Modelo Matemático . . . . .	47
3.1.2. Función Objetivo . . . . .	49
3.1.3. Restricciones . . . . .	50
3.2. Validación del modelo . . . . .	52
<b>4. Resultados de la Aplicación de los Modelos</b>	<b>53</b>
4.1. Resultados para los costos de transporte . . . . .	53
4.1.1. Planta cervecera de Guadalajara . . . . .	54
4.1.2. Planta cervecera de México . . . . .	57
4.1.3. Planta cervecera de Mazatlán . . . . .	60
4.2. Resultados para modelo cervecerías . . . . .	63
4.2.1. Costo total . . . . .	63
4.2.2. Producción en las plantas . . . . .	63
4.2.3. Inventarios y Preconstrucciones . . . . .	64
4.2.4. El cierre de las plantas . . . . .	65

4.3. Resultados para el modelo de las vidrieras . . . .	65
<b>Referencias</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE

---

# Índice de figuras

---

1.	Red de la cadena de suministros de la industria cervecera en México. . . . .	8
1.1.	Formato del área de L & T para el caso de los costos de transporte. . . . .	16
1.2.	Formato requerido de las tablas de L & T. . . . .	18
1.3.	Gráfica de la tarifa en función de la distancia, para el caso de la planta cervecera de Guadalajara. . . . .	19
1.4.	Gráfica de la tarifa/distancia en función de la dis- tancia (km). . . . .	20
1.5.	Procedimiento de segmentación. . . . .	21
1.6.	Gráfica de Tarifa en función de la distancia para la planta cervecera de Guadalajara. . . . .	24
1.7.	Tabla de costos de transporte obtenidos de L & T. . . . .	25
1.8.	Gráfica para la validación de varianza constante. . . . .	26
1.9.	Tendencia marcada de los residuos, claro indicio de que la varianza no permanece constante. . . . .	27
1.10.	Residuos estabilizados al haber realizado trans- formación de las variables. . . . .	27
1.11.	Gráfico de normalidad para los residuos. . . . .	29
1.12.	Cálculo para la creación de la gráfica de normal- idad para los residuos. . . . .	29
2.1.	Sistema estudiado en este proyecto (Plantas-Zonas de Demanda). . . . .	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.1.	Gráfica de los datos usados para el modelo de regresión lineal en el caso de la planta de Guadalajara.	54
4.2.	Gráfica de la ecuación (4.2).	55
4.3.	Gráfica de la función buscada originalmente para los costos de transporte de la planta cervecera de Guadalajara.	55
4.4.	Gráfica del porcentaje de error en función de la distancia.	56
4.5.	Resumen de las estadísticas para el modelo de regresión realizado.	56
4.6.	Gráfica de los datos usados para el modelo de regresión lineal en el caso de la planta de México.	57
4.7.	Gráfica de la ecuación (4.3).	58
4.8.	Gráfica de la función buscada originalmente para los costos de transporte de la planta cervecera de México.	58
4.9.	Gráfica reacomodando términos de la ecuación (4.3).	59
4.10.	Resumen de las estadísticas para el modelo de regresión realizado.	59
4.11.	Gráfica de los datos usados para el modelo de regresión lineal.	60
4.12.	Gráfica reacomodando términos de la ecuación (4.4).	61
4.13.	Gráfica de la función buscada originalmente para los costos de transporte de la planta cervecera de Mazatlán.	61
4.14.	Gráfica reacomodando términos de la ecuación (4.4).	62
4.15.	Resumen de las estadísticas para el modelo de regresión realizado.	62
4.16.	Vista de resultados proporcionados por el modelo.	63
4.17.	Producción anual en cada una de las plantas.	64

4.18. Producción anual de inventario para cada una de las cervecerías. . . . .	64
4.19. Preconstrucción bimestral anual para cada una de las cervecerías. . . . .	65
4.20. Pre-producción trimestral anual para cada una de las cervecerías. . . . .	65
4.21. Parte del plan de producción para la industria vidriera. Hay que notar que se aprecia la información completa para el caso de la vidriera NF en el horno 1, máquina 11 (renglones 2-10 de la figura), y para la vidriera VTB en el horno 2, máquina 23 (renglones 267-270 de la figura). . . .	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

# Índice de tablas

---

2.1. Capacidades de cervecerías . . . . .	41
2.2. Significado de las restricciones para el modelo de las cervecerías. . . . .	43
3.1. Significado de las restricciones del modelo de vidrio.	51



# Estado del Arte

---

La industria cervecera es una de las más fuertes y redituables en el país. Desde sus inicios, a principios del Siglo XX, ha ido creciendo hasta tener presencia a nivel mundial. No obstante, este gran crecimiento se ve opacado por el poco desarrollo operacional que ha tenido.

Debido al gran tamaño que posee la industria cervecera, la mayor parte de los problemas que se pueden plantear tendrán una gran cantidad de variables, lo que lleva a que las técnicas aplicadas tradicionalmente, basadas en la experiencia del personal, sean insuficientes.

En este trabajo, se propone la aplicación de diversas técnicas, del ámbito de la Investigación de Operaciones (I de O), para la modelación y solución de varios problemas relacionados con la cadena de suministros de la industria cervecera en México.

Realizando una revisión en la bibliografía, hasta la fecha<sup>1</sup>, no se encuentran aplicaciones a la industria cervecera en México, parte de esto se debe a que la industria cervecera es ferviente consumidora de paquetes de software que son adaptados (en la medida de lo posible) a las situaciones que enfrenta. Esta ideología por si misma crea problemas que son mencionadas en la introducción de este trabajo.

---

<sup>1</sup>08/11/2011

---

Viendo críticamente las cosas, una de las grandes ventajas del uso de estos paquetes de software es que no se debe invertir en investigación ni en capacitación especializada del personal; al comprar el software, el personal solamente debe capacitarse en el uso del mismo (claro con la misma empresa que lo vendió o con una de sus asociadas) y no se debe preocupar por más...a menos que lo necesite. Esto es como comprar un carro: pagas, algún papeleo, te dan las llaves, te subes al auto y listo.

Otra de las ventajas de usar paquetes de software, es que las empresas que los ofrecen van obteniendo mucha experiencia al implementar su software en diversas empresas; lo que implica una reducción considerable en el tiempo de implementación en nuevas industrias. Claro que de la mano vienen las revisiones subsecuentes del software y, de esta manera, tener lo último de lo último en el ámbito de software para la cadena de suministros.

Sin embargo, haciendo referencia a los buenos libros de antes, *el usuario atento y observador* notará que las técnicas que usa este tipo de software no son más que técnicas de I de O, adaptadas en lo posible a una cadena de suministros genérica, y que las restricciones teóricas del software son las mismas que plantean autores como George L. Nemhauser y Laurence A. Wolsey en su libro de *Integer and Combinatorial Optimization* del año de 1988, [Laurence A. Wolsey, 1999]. Las técnicas son las mismas, pero...¿los algoritmos son los mismos?

Esta es una pregunta a la que no daremos respuesta en este trabajo, sin embargo, nos gusta pensar que cada empresa desarrolladora de este tipo de software tiene su propio departamento de investigación y que día a día existe gente que se dedica a mejorar estos algoritmos en pro de la investigación y por supuesto en pro de un buen salario. En lo personal, no me gusta pensar que gran

parte de las mejoras que vemos día con día en el software sólo son productos de la mercadotecnia y que el trabajo no tangible, como el matemático, es descuidado en pro de una mejor utilidad para los inversionistas.

Que no haya referencias para la industria cervecera en México no implica que no haya referencias para la industria cervecera en general, sin embargo, las referencias no profundizan y no modelan al nivel de detalle que se hace en este trabajo. Una referencia que trata con problemas de la industria cervecera es el libro de Jeremy Shapiro [Shapiro, 2006], sin embargo, en este libro no se modela nada de la industria vidriera. Existen en Internet presentaciones con ejemplos de Programación Lineal aplicados a la industria cervecera, pero solamente se quedan en eso.

Rusell L. Ackoff (q.e.p.d), trabajó gran parte de su vida para Anheuser-Busch y supongo que el aplicó e implementó gran cantidad de técnicas de I de O, sin embargo, no hago referencia a sus trabajos debido a que no encontré un trabajo que hiciera referencia específica a lo que se realizó en este trabajo. En gran medida creo que se debe a que los modelos que se proponen en este trabajo tienen un gran número de variables (miles o millones) que hasta principios de los años 90's, modelos de este tamaño seguían siendo poco prácticos para una toma de decisiones empresarial.

Finalmente, algunas de las referencias que son recomendables para comprender lo que se ha realizado en este trabajo son mencionadas a continuación: el libro de Wosley y Nemhauser, [Laurence A. Wolsey, 1999], sigue siendo un muy buen libro para empezar con programación matemática, sobre todo con las técnicas de programación entera. Otro libro muy bueno es el de Har-

---

vey M. Salkin<sup>2</sup>, [Salkin, 1975]. De los clásicos, que nunca debe faltar en la biblioteca personal, es el libro de Frederick Hillier y Gerald J. Lieberman (q.e.p.d), [Frederick Hillier, 2009] y, finalmente, pero sin quedarse atrás el libro de Wayne L. Winston [Winston, 2003].

Otros libros más específicos son mencionados en cada una de las secciones de este trabajo, sin embargo, todas y cada una de estas referencias tienen gran valor por sí mismas.

---

<sup>2</sup>Nota personal: Este libro al principio no era de mi total agrado, pero con el tiempo se gano simpatía.

# Introducción

---

La programación lineal (**PL**) cambió drásticamente la forma en que las empresas se administran. Actualmente, en México, son pocas las empresas que han realizado modelos de **PL** para la planeación, abastecimiento y/o producción.

A pesar de lo anterior, empresas que han tratado de adoptar este enfoque científico-administrativo, pero simplemente lo han relegado a la compra de costosos sistemas informáticos que realizan ciertas operaciones con las que la empresa trata comúnmente. Esto genera que poca gente conozca el por qué y relega a la mayoría a ser usuarios de los diferentes sistemas. Lo que propicia que las empresas inviertan una fuerte suma de dinero en *software* que no se usa, ni se usará, al 100 % de su capacidad, creando empresas que no exigen; sólomente reciben; y gastan, sin saber si realmente están invirtiendo en algo útil y, sobre todo, relegando a la Investigación de Operaciones como un tipo de artilugio matemático que puede sustentar las malas o buenas decisiones realizadas por los tomadores de decisiones. Todo esto hace que se haga a un lado su uso principal: *Guía para la toma de decisiones*.

En el ámbito de la **PL** existen modelos para la asignación-localización de recursos a diferentes productores, estos modelos son bastante conocidos y se han aplicado exitosamente en

---

diferentes situaciones. Algoritmos especiales han sido desarrollados para este tipo de problemas; sin embargo, uno de los problemas abordados en este proyecto difiere de un problema clásico de asignación, debido a que se deben considerar otros factores, como son: manejo de inventarios, pre-construcciones, posibles cierres y frescura de un producto. Estos factores cambian la forma en que el problema de asignación es tratado, aumentando la complejidad de la formulación y de la solución.

En algunas empresas, en México, se han realizado modelos de **PL**; sin embargo, debido a la falta o carencia de experiencia en modelación de sistemas de la mayor parte de las personas en las empresas, esta tarea se relega a unas cuantas personas, por lo que los demás son solamente usuarios de los modelos. Un problema inherente a esta situación, es que las personas encargadas de modelar se “cierran” a otras áreas, debido a una serie de factores, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Desconocimiento del sistema que están modelando: esto hace que las personas realicen supuestos acerca del sistema modelado, cuando realmente carecen de conocimiento del mismo.
- Mala interpretación de conceptos: Generalmente una empresa busca flexibilidad; sin embargo, es importante saber en donde se puede dar esta flexibilidad y en donde no. En muchas ocasiones la gente que realiza los modelos (por su propio aislamiento) distorsiona conceptos y los adapta a su realidad; tratan de adaptar la realidad a su modelo y no el modelo a la realidad.
- Falta de retroalimentación: Al realizar un modelo, la retroalimentación, en todas las etapas del mismo, es sumamente

importante; sin embargo, por miedo a las críticas o a encontrar errores en el propio modelo, la gente que realiza esta actividad se “cierran” y presenta sus resultados sin decir cuales fueron sus consideraciones, haciendo del proceso de retroalimentación algo prácticamente inexistente.

Estos y otros factores más son los principalmente asociados a la falta de confianza, a la negación, poca aceptación de los modelos y, finalmente, a que éstos no sean útiles. En el artículo de John R. Hall, Jr. y Sidney W. Hess [Hall R. and Sidney, 1978], se mencionan algunas de las características del por qué la Investigación de Operaciones está en declive y, aunque el artículo data de 1978, las razones del por qué puede morir la Investigación de Operaciones siguen siendo válidas.

Por todo lo mencionado con anterioridad, la conclusión del autor con respecto a la I de O en México es que: **la Investigación de Operaciones nació muerta.**

En este proyecto se retoman los principios de la Investigación de Operaciones y se proponen modelos útiles, prácticos y apegados a la realidad que no sólo están desarrollados desde el punto de vista del creador de los modelos, si no que complementan la visión con las personas que están interactuando día con día con el sistema. La validación de todos y cada uno de los modelos propuestos en este trabajo fue dada tanto por el desarrollador como por todas las personas que interactúan todos los días con los modelos.

---

## La Cadena de Suministros de la Industria Cervecera en México.

La cadena de suministros de la industria cervecera se encuentra compuesta, en general, por las siguientes partes:

- Proveedores de bote (o lata).
- Proveedores de botella de vidrio.
- Proveedores de cartón.
- Proveedores de malta y cebada.
- Plantas cerveceras.
- Agencias de distribución.
- Transportistas

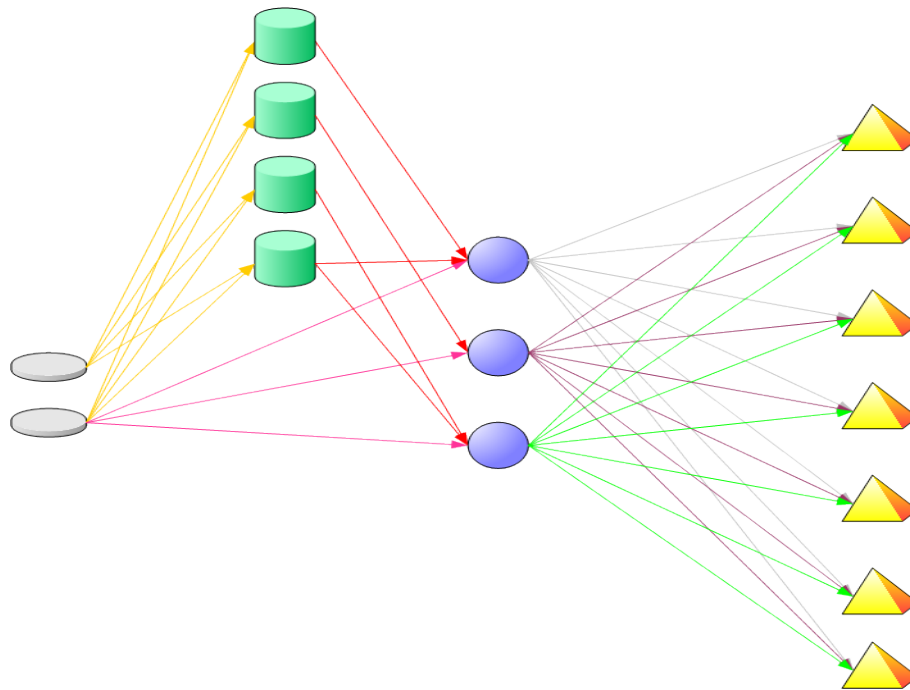


Figura 1: Red de la cadena de suministros de la industria cervecera en México.



Un modelo de PL prodría ser suficiente para tratar esta cadena de suministros, sin embargo, una de las principales complicaciones es que la empresa que posee las plantas cerveceras, es a su vez, dueña de todos o alguno de los proveedores<sup>3</sup>. Al modelar la proveduría se debe hacer la distinción entre las que son propias de las que no.

Los proveedores externos no representan mayor problema para la modelación; sin embargo, los proveedores propios de la empresa deben de ser modelados considerando las limitaciones que tengan. Particularmente los procesos de producción y distribución de estos proveedores deben de modelarse con sumo cuidado. Al adentrarse en estas limitaciones, los modelos matemáticos se vuelven más complejos y requieren mayor tiempo para su análisis y resolución, sin embargo, al superar esta parte la utilidad de los modelos en la toma de decisiones es muy alta.

En la Figura 1 se muestra una versión muy simplificada de la cadena de suministros de la industria cervecera en México. Los cilindros grises representan a los proveedores de bote; que pueden proveer directamente a las cervecerías (círculos azules) o deben de enviar primeramente su producto a otro proveedor, como son: el proveedor de cartón y al proveedor de vidrio (cilindros verdes). Las cervecerías se encargan de brindar el producto de consumo final que será entregado a cada una de las agencias o zonas de demanda (piramides amarillas). De este punto en adelante, no mostrado en la Figura 1, cada una de las agencias se encargará de distribuir a sus clientes, aqui es dónde los modelos tipo *Vehicle Routing Problem* y *Travelling Salesman Problem* son de gran utilidad.

---

<sup>3</sup>Una cadena de suministros global.

---

## Objetivo

Ayudar a la toma de decisiones al proponer, modelar y resolver con técnicas de programación matemática la asignación-localización de las plantas cerveceras, la producción en las plantas de botella de vidrio (propias de la compañía) y el transporte en la cadena de suministros de la industria cervecera y vidriera en México.

### Objetivos específicos

1. Proponer modelos matemáticos para la aproximación de costos de transporte de producto terminado en la industria cervecera en México.
2. Proponer un modelo matemático para la asignación-localización de las plantas cerveceras de la industria cervecera en México.
3. Proponer un modelo matemático para la asignación de producciones en la industria vidriera en México.

## Resumen de capítulos

El presente trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos. A continuación se presenta una breve descripción de cada capítulo.

En el capítulo 1 se presentan las propuestas y modelos en materia de costos de transporte.

En el capítulo 2 se presenta y desarrolla la propuesta de modelo matemático para la asignación-localización de plantas cerveceras. Este modelo, refleja la última parte de la cadena de suministros de la industria cervecera Figura 1.

En el capítulo 3 se presenta y desarrolla la propuesta de modelo matemático para la producción de botella de vidrio, que es surtida a las plantas ceveceras.

En el capítulo 4 se brindan los resultados obtenidos de cada uno de los modelos matemáticos, así como algunos de los resultados del análisis preeliminar de los costos de transporte.

---

# Modelos de Regresión para los Costos de Transporte

---

Previo a la construcción de un modelo, se debe obtener información y datos relevantes al mismo. Esta es una etapa primordial que involucra una gran parte de tiempo del desarrollo de un modelo matemático y que generalmente se trata de omitir. En la actualidad, muchos intentos se realizan para poder acortar esta etapa y tener disponibilidad casi instantánea de los datos. La implementación en las empresas de los ERP's (*Enterprise Resource Planning*) como *SAP*® (*Systems, Applications and Products in Data Processing*), son un reflejo de que esta es una situación deseada, aunque, no del todo controlada.

En este capítulo, se muestran las propuestas para la obtención de los costos de transporte que se usaron como entrada al modelo matemático.

## 1.1. Introducción

*Garbage In Garbage Out* (GIGO), es una frase acuñada en el ámbito de las Ciencias de la Computación, pero que aplica muy bien en el ámbito de la I de O; por muy bueno, complicado y robusto que sea un modelo de I de O, si la información alimentada

## 1.1 Introducción

---

al modelo no es buena: los resultados simplemente no lo serán.

Los modelos de I de O requieren que la información este dada en los términos de la variable medible, es frecuente que esos datos sean difíciles de conseguir, o en el caso extremo, que los datos no existan; esto lleva a aproximaciones.

Las aproximaciones no necesariamente son malas o no deseadas, para cada problema en particular diferentes criterios son usados con el propósito de realizar las mejores aproximaciones y cada una de estas aproximaciones deben ser validadas tanto estadística como profesionalmente. Estimaciones con menor desviación conducen a mejores soluciones y a una mejor toma de decisiones.

En la industria cervecera, el área de Logística y Transporte (L & T) es la encargada de administrar y realizar los envíos de producto desde las distintas fábricas. L & T posee datos de las rutas y sus respectivos precios; sin embargo, los modelos matemáticos generalmente usan una gran cantidad de estos datos al brindar todas las posibles opciones de viajes de plantas cerveceras a zonas de demanda. Dado el gran volumen de información requerido, el área de L & T no tiene la capacidad de generar toda esta información: la metodología que esta área maneja involucra la obtención de información que no se tiene disponible o que requiere solicitar a proveedores, transportista, etc. Además, para que el área de L & T diera la información requerida, se requeriría hacer proyecciones sin información disponible y el costo, en tiempo y personal, asociado a esta actividad es muy alto.

Al momento de realizar este trabajo, los costos ocupados en modelos de PL que se realizaban con anterioridad en la empresa, no se encontraban validados por el área; mucha desconfianza en

los resultados del modelo es generada. Así mismo, en estudios realizados por el autor, la aproximación de los costos de transporte llega a tener un error de hasta un 68%. Errores de este tipo en un modelo de PL, llevarán a tomar decisiones que no son óptimas, quitando credibilidad a los modelos y relegando la utilidad de la I de O en la empresa.

Las plantas cerveceras cuentan con diferentes medios para mover el producto, en términos generales, los medios más usados son dos: transporte tipo *FULL* y transporte tipo *SENCILLO*. A continuación se describe brevemente cada uno de estos tipos de transporte.

- *FULL*: El tipo de transporte *FULL* es un tráiler que tiene dos cajas, este transporte es el preferido dado que es el que más producto puede llevar y el que resulta más barato en distancias largas.
- *SENCILLO*: El tipo de transporte sencillo es un tráiler que solamente tiene una caja; este transporte es el usado para distancias relativamente cortas y cuando existen emergencias de envío de producto; por lo tanto, no se tienen tantos datos como en el tipo de transporte *FULL*, sin embargo, es un tipo de transporte que debe de existir en la modelación.

Aunado a esto, las plantas cerveceras también cuentan con diferentes transportistas que les brindan sus servicios en diferentes zonas de la República Mexicana; cada planta cervecera tiene un transportista que usa comúnmente y los demás son usados esporádicamente.

## 1.2. Desarrollo

Para la realización de este trabajo se usa la hoja de cálculo de *Microsoft®Excel®2007* (Excel), esta herramienta (aunque

## 1.2 Desarrollo

no es la mejor en el ámbito estadístico<sup>1</sup>) tiene lo necesario para abordar este problema, aunado a esto, es la principal herramienta con la que se contaba en el lugar de trabajo y es la que en el futuro podrán usar los encargados de trabajar con el modelo.

### 1.2.1. Datos

Para la modelación de los costos de transporte se realizó la solicitud de las tarifas actuales de transporte. L & T mantiene un formato de uso interno para este tipo de información. Este formato puede observarse en la Figura 1.1. Esta tabla cuenta con más de 1,000 registros; sin embargo, este formato, aunque útil para L & T, no es útil para la tarea que se requiere realizar.

ID Origen	Origen	ID Destino	Destino	Operación	Tipo de veh	Kilometraje	Tarifa	Transportista
100005000	CMT	9000100237	AMB Casa Cuervo	AUTOSERVICIO	SENCILLO	7.750	\$ 18,080	LOINOR
100005600	CMN	9000100237	AMB Casa Cuervo	AUTOSERVICIO	SENCILLO	12.400	\$ 30,400	LOINOR
1000001000	CMM	9000090023	3E (ITAPALAPA)	Autoservicios	SENCILLO	380	\$ 3,240	TRAMO
1000001000	CMM	9000090025	MAQUILADORA HERMON (TOLUCA)	Autoservicios	SENCILLO	675	\$ 4,550	TRAMO
1000001000	CMM	9000090032	MAQUILAS Y EMPAQUES ESP. (CUAUTITLAN)	Autoservicios	SENCILLO	675	\$ 3,880	TRAMO
1000001000	CMM	9000100233	GRUPO PROMETALIC (TACUBAYA)	Autoservicios	SENCILLO	350	\$ 3,170	TRAMO
1000001000	CMM	9000100235	MEXFLEX	Autoservicios	FULL	400	\$ 3,850	TRAMO
1000001000	CMM	9000100238	PESA (TOLUCA)	Autoservicios	SENCILLO	675	\$ 4,550	TRAMO
1000001000	CMM	9000100279	SIGPACK (TOLUCA)	Autoservicios	SENCILLO	650	\$ 4,500	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Acapulco	Autoservicios	SENCILLO	1.985	\$ 11,350	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Guadalajara	Autoservicios	SENCILLO	2.980	\$ 9,260	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Mexico	Autoservicios	SENCILLO	350	\$ 3,160	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Monterrey	Autoservicios	SENCILLO	4.805	\$ 11,000	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Tepic del Rio	Autoservicios	SENCILLO	650	\$ 4,200	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Querétaro	Autoservicios	SENCILLO	850	\$ 4,530	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Chihuahua	Autoservicios	SENCILLO	7.235	\$ 20,670	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Culiacan	Autoservicios	SENCILLO	6.455	\$ 20,430	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Merida	Autoservicios	SENCILLO	6.580	\$ 22,440	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Villahermosa	Autoservicios	SENCILLO	3.840	\$ 16,270	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Tijuana	Autoservicios	SENCILLO	14.210	\$ 37,570	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Wal Mart Mexico	Autoservicios	Thorton	-	\$ 1,650	TRAMO
1000001000	CMM		Autoservicios Wal Mart Mexico	Autoservicios	Camioneta	-	\$ 1,250	TRAMO
3330710000	CD Vallejo		Maquila BACA (Vallejo)	Autoservicios	SENCILLO	50	\$ 1,050	TRAMO
	Toluca		Autoservicios Mexico	Autoservicios	SENCILLO	675	\$ 4,550	TRAMO
	Toluca		Autoservicios Guadalajara	Autoservicios	SENCILLO	3.320	\$ 10,440	TRAMO
	Toluca		Autoservicios Monterrey	Autoservicios	SENCILLO	5.145	\$ 13,580	TRAMO
	Toluca		Autoservicios Querétaro	Autoservicios	SENCILLO	1.390	\$ 6,110	TRAMO
	Toluca		Autoservicios Villahermosa	Autoservicios	SENCILLO	4.085	\$ 16,440	TRAMO
	Toluca		Autoservicios Culiacan	Autoservicios	SENCILLO	5.910	\$ 21,758	TRAMO
	Queretaro		Autoservicios Guadalajara	Autoservicios	SENCILLO	1.845	\$ 6,909	TRAMO
	Queretaro		Autoservicios Monterrey	Autoservicios	SENCILLO	3.465	\$ 9,423	TRAMO

Figura 1.1: Formato del área de L & T para el caso de los costos de transporte.

<sup>1</sup>Knüsel, L. (2002), "On the reliability of Microsoft Excel XP for statistical purposes," *Computational Statistics and Data Analysis*, 39, 109-110



### 1.2.2. Tratamiento de los datos

En la Figura 1.1, se observa que la tabla presentada posee 9 campos, los cuales serán brevemente descritos a continuación:

- ID\_Origen : Es un identificador único e inequívoco que poseen los puntos de origen, esto es, son los puntos de donde se surtirá el producto a una agencia destino.
- Origen : Descripción a texto completo del punto de origen.
- ID Destino : Es un identificador único e inequívoco que poseen los puntos de destino, esto es, son los puntos a donde se surtirá el producto que llega de un punto de origen.
- Destino : Descripción a texto completo del punto de destino
- Operación : Es la clasificación dada por Logística y transporte a los movimientos de producto de un origen dado a un destino.
- Tipo de veh : Es el tipo de vehículo (transporte) usado para la operación dada.
- Kilometraje : Representa la distancia (en km) del punto de origen al punto de destino.
- Tarifa : Es el precio de la operación del punto origen al punto destino.
- Transportista : Es un identificador del transportista usado para la operación.

De los campos anteriores, seis son los más relevantes para este estudio: ID\_Origen, Tipo de veh, Kilometraje, Tarifa y Transportista.

## 1.2 Desarrollo

---

Los datos mostrados, en la Figura 1.1, se deben tratar y modificar para obtener una tabla semejante a la mostrada en la Figura 1.2. Esto se hace para cada una de las 8 plantas cerveceras (Guadalajara, México, Torreón, Piedras Negras, Trópico, Zacatecas, Mazatlán y Obregón), para cada tipo de transporte (2 tipos) y, en caso necesario para cada uno de los diferentes transportistas (en promedio 3 por planta cervecera). El procedimiento del tratamiento de información, de la tabla de la Figura 1.1, será descrito brevemente a continuación:

CERVECERIA	KILOMETRAJE	TARIFA_FULL_LOTO
Cer_GDJ	20	\$ 990.00
Cer_GDJ	53	\$ 1,950.00
Cer_GDJ	82	\$ 1,890.00
Cer_GDJ	158	\$ 3,140.00
Cer_GDJ	182	\$ 2,970.00
Cer_GDJ	190	\$ 3,040.00
Cer_GDJ	206	\$ 4,310.00
Cer_GDJ	208	\$ 3,750.00
Cer_GDJ	284	\$ 5,770.00
Cer_GDJ	320	\$ 6,170.00
Cer_GDJ	358	\$ 6,710.00
Cer_GDJ	364	\$ 6,900.00
Cer_GDJ	404	\$ 7,150.00

Figura 1.2: Formato requerido de las tablas de L & T.

Primeramente, se deben eliminar los campos no requeridos, estos son: Origen, Destino, ID\_Destino y Operación. Como parte del proceso de pasar de una tabla a una base de datos, los nombres de los campos deben estandarizarse. Por lo tanto, el nombre de los campos se coloca en mayúsculas, sin dejar espacio entre los caracteres.

Al haber eliminado campos y estandarizado los nombres de los mismos, los datos deben ordenarse, agruparse y limpiarse con el propósito de obtener registros únicos. Este paso es crucial,

debido a que si se llega a realizar suma de tarifas al agrupar los kilometrajes se obtendrán datos que muy seguramente se verán como atípicos en las gráficas, así mismo, estos datos generaran errores en las predicciones de los modelos.

El proceso de limpieza de información llevó un aproximado de seis días y, al final, se generaron 8 archivos de Excel®(1 por cada planta cervecera). Cada uno con dos hojas que corresponden a los tipos de transporte *FULL* y *SENCILLO*. En la sección 1.3, se brinda una breve descripción de cómo fue desarrollado el proceso de limpieza y validación de información.

### 1.2.3. Antecedentes para la modelación

La información de cada uno de estos 8 archivos de Excel®es graficada para poder observar el comportamiento de los datos, las gráficas generadas son de la tarifa en función del kilometraje. En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo del patrón encontrado en los datos para el caso de la planta cervecera que se encuentra ubicada en la ciudad de Guadalajara.

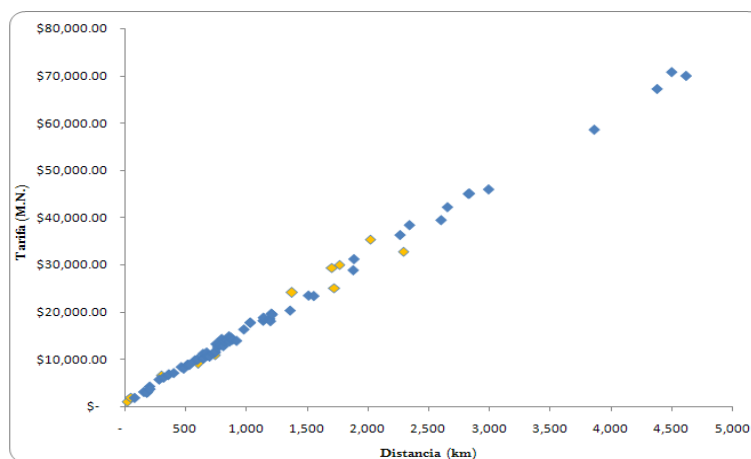


Figura 1.3: Gráfica de la tarifa en función de la distancia, para el caso de la planta cervecera de Guadalajara. Excel®

## 1.2 Desarrollo

---

Antes de proseguir con la metodología, el autor de esta tesis quisiera expresar una nota personal acerca de las problemáticas más grandes que se tuvieron al momento de la realización de este proyecto, aunado a esto, se debe mencionar que en la compañía no existía documentación alguna para poder formalizar alguna referencia en este trabajo.

Anteriormente en la compañía, había una persona que se encargaba de realizar este tipo de aproximaciones para cargar la información al modelo, sin embargo, esta persona consideraba, para sus aproximaciones, la gráfica mostrada en la Figura 1.4 y no la de la Figura 1.3. No obstante, por falta de conocimiento y mala interpretación de conceptos, esta persona no podía obtener una expresión matemática que pudiera interpretar la gráfica mostrada en la Figura 1.4, así que se recurría a un procedimiento alternativo para la realización de esta tarea.

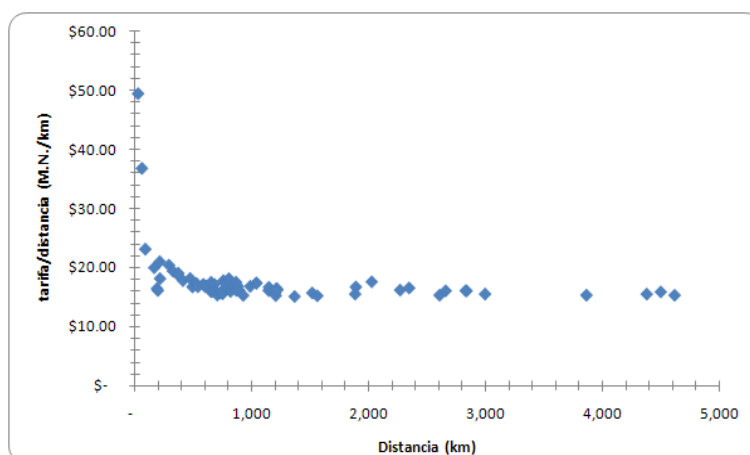


Figura 1.4: Gráfica de la tarifa/distancia en función de la distancia (km).

Se brinda una breve descripción de este procedimiento alternativo con el fin de que el lector tenga más contexto del porqué la modelación de los costos de transporte tuvo que llevar tanto tiempo.

El procedimiento consiste en lo siguiente:

- Se segmenta (de manera arbitraria) la gráfica mostrada en la Figura 1.4, de forma tal, que las segmentaciones realizadas sean lo más aproximado a una recta. En la Figura 1.5, se muestra un ejemplo del procedimiento de segmentación.
- Habiendo segmentado la gráfica, se procedía a realizar una regresión lineal para cada uno de los segmentos. Las ecuaciones resultantes de este procedimiento eran usadas para la aproximación de los costos de transporte, cada ecuación tenía un intervalo de validez referente a las segmentaciones realizadas.

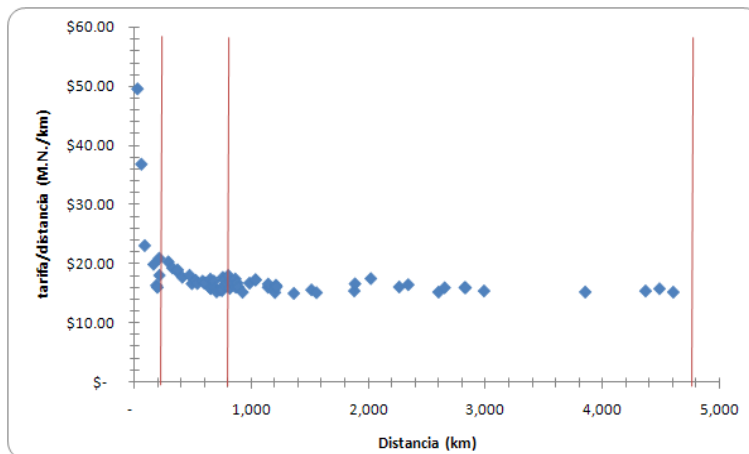


Figura 1.5: Procedimiento de segmentación.

En términos generales, el procedimiento es una aproximación de una curva a través de la segmentación de la misma, un concepto que surge de la geometría y el cálculo diferencial. Claro que existe un tratamiento formal para este tipo de aproximaciones, esto es lo que se conoce como *Multiphase and Spline Regressions* [Seaber and Wild, 2003]. Sin embargo, el realizar esta metodología de aproximación y no considerar los supuestos bajos los cuales se desarrolló formalmente la aproximación Multiphase and Spline Regresions conduce a que el método presente serias deficiencias, como son las siguientes:

Como los datos no son experimentales, cada una de las regresiones lineales realizadas deben cumplir los supuestos de una regresión lineal. [Bowerman and Murphee, 2009], comentan cuales son los supuestos que debe cumplir una regresión lineal para que se condidere confiable<sup>2</sup>:

- “Para cualquier valor de  $x$ , la población de los potenciales valores del término del error debe tener una media igual con cero.”
- “Supuesto de varianza constante: Para cualquier valor de  $x$ , la población de los potenciales valores del término del error debe tener una varianza que sea completamente independiente del valor de  $x$ . Esto es, las diferentes poblaciones de los potenciales valores del término del error que corresponden a diferentes valores de  $x$  deben de tener varianzas iguales.”
- “Supuesto de normalidad: Para cualquier valor de  $x$ , la población de los potenciales valores del término del error deben provenir de una distribución normal.”
- “Supuesto de independencia: Cualquier valor del término del error  $e$  es estadísticamente independiente de cualquier otro valor de  $e$ . Esto es, el valor del término del error  $e$  que corresponde a una observación de la variable  $y$  es estadísticamente independiente del valor del término del error correspondiente a cualquier otra observación de la variable  $y$ .”

---

<sup>2</sup>Traducción libre del autor de este trabajo.

Por lo tanto, una regresión que no cumpla alguna de estas características tendrá una variación en los datos mucho mayor que una que si lo cumpla. Si lo que se desea hacer es tomar decisiones con base en información confiable; tenemos que apegarnos lo más posible a estos supuestos.

Son estas algunas de las razones por las que el método presentaba errores tan altos en ciertas predicciones. Los errores no eran evidentes, debido a que se maneja una gran cantidad de datos, generalmente, los errores eran detectados hasta el momento de la resolución de un escenario del modelo.

En este trabajo, se proponen dos metodologías diferentes para la realización de las aproximaciones de los costos de transporte. Como primer aproximación se usan los datos, como los mostrados en la Figura 1.3 (Tarifa vs Distancia), para realizar una regresión lineal; con la ecuación obtenida de esta regresión, se realiza un procedimiento matemático para poder obtener una gráfica como la mostrada en la Figura 1.4. La segunda metodología propuesta se muestra en la sección 1.4.

### **1.3. Modelado de la función de costos**

La metodología seguida para realizar la modelación de los datos consta de dos partes. La primera parte consiste de una validación de datos; a partir de esta validación, se procede a realizar un regresión lineal (segunda parte). En este trabajo no se entra en detalle de cómo se hacen los cálculos, debido a que existe una gran cantidad de literatura sobre este tema, por ejemplo [Bowerman and Murphee, 2009]. En lo que sigue de esta sección se detalla la metodología que se implementó para poder llegar a realizar la regresión.

### 1.3.1. Introducción

Es de suma importancia que antes de iniciar una metodología de regresión, los datos sean sometidos a validación, esto se debe a que en este trabajo solamente se está midiendo la posible relación entre la tarifa y la distancia recorrida. Así los datos que presentan alguna otra característica externa, deberán ser eliminados. Algunas de estas características pueden ser las siguientes:

1. Viajes urgentes
2. Uso de nuevos transportistas
3. Uso de rutas que no son comunes.

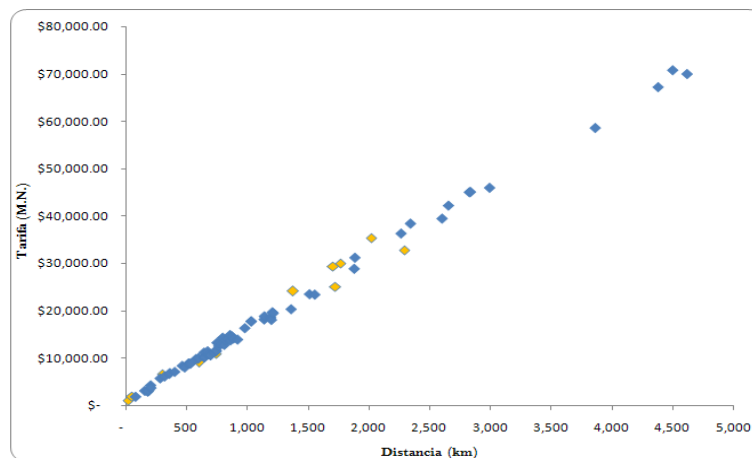


Figura 1.6: Gráfica de Tarifa en función de la distancia para la planta cervecera de Guadalajara.

En la Figura 1.7 se muestra parte de los datos que son marcados, en color amarillo, como atípicos. Estos datos están sujetos a validación por parte del área de L & T, y de acuerdo al criterio de esta área, los puntos marcados serán eliminados o serán



## Modelos de Regresión para los Costos de Transporte

---

ID_DATO	CERVECERIA	Kilometraje	TARIFA_FULL_LOTO
01	Cer_GDJ	20 \$	990.00
02	Cer_GDJ	53 \$	1,950.00
03	Cer_GDJ	82 \$	1,890.00
04	Cer_GDJ	158 \$	3,140.00
05	Cer_GDJ	182 \$	2,970.00
06	Cer_GDJ	190 \$	3,040.00
07	Cer_GDJ	206 \$	4,310.00
08	Cer_GDJ	208 \$	3,750.00
09	Cer_GDJ	284 \$	5,770.00
10	Cer_GDJ	300 \$	6,680.00
11	Cer_GDJ	320 \$	6,170.00
12	Cer_GDJ	358 \$	6,710.00
13	Cer_GDJ	364 \$	6,900.00
14	Cer_GDJ	404 \$	7,150.00
15	Cer_GDJ	466 \$	8,410.00
16	Cer_GDJ	486 \$	8,080.00
17	Cer_GDJ	518 \$	8,900.00
18	Cer_GDJ	520 \$	8,922.00
19	Cer_GDJ	532 \$	8,860.00
20	Cer_GDJ	578 \$	9,860.00
21	Cer_GDJ	594 \$	9,910.00
22	Cer_GDJ	600 \$	9,050.00
23	Cer_GDJ	600 \$	10,080.00
24	Cer_GDJ	645 \$	11,220.00
25	Cer_GDJ	646 \$	10,250.00
26	Cer_GDJ	648 \$	10,230.00
27	Cer_GDJ	674 \$	10,810.00
28	Cer_GDJ	674 \$	11,500.00
29	Cer_GDJ	686 \$	10,840.00
30	Cer_GDJ	696 \$	10,770.00

Figura 1.7: Tabla de costos de transporte obtenidos de L & T. incluidos en la modelación.

En la Figura 1.6 se muestra la gráfica de los datos de la Figura 1.7, los datos marcados en color anaranjado son los datos que estarán sujetos a validación.

Para encontrar datos atípicos existen diversas metodologías [Kutner et al., 2005], sin embargo, en este proyecto se sugirió seguir una metodología muy sencilla, que únicamente está basada en el cumplimiento de los supuestos de una regresión lineal, esta metodología es descrita en la subsección 1.3.3, sin embargo, primeramente se analizará la metodología para la estabilización de la varianza.

### 1.3.2. Metodología para estabilizar la varianza

El supuesto número dos para la validación de una regresión lineal, es que la varianza de los datos debe permanecer constante, en la Figura 1.8 se muestra la gráfica en donde este supuesto se valida.

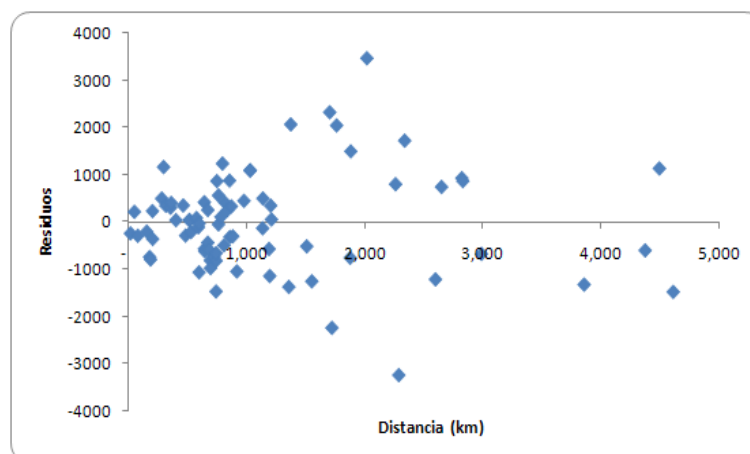


Figura 1.8: Gráfica para la validación de varianza constante.

La Figura 1.8 muestra que los residuos no tienen un comportamiento constante: si colocamos dos líneas, como se ve en la Figura 1.9, se observa que los residuos tienden a aumentar; el supuesto de varianza constante es violado. Lo cual indica que existe un error creciente en la varianza. Un gráfico de residuos que se comporta de esta manera, sugiere que los términos del error tienden a ser más dispersos mientras la distancia se incrementa.

Para la corrección de este supuesto se realiza una transformación de la variable, Box y Cox, [Box and Cox, 1964], proponen una metodología para realizar estas transformaciones; en este proyecto son particularmente utilizadas las transformaciones de la raíz cuadrada y logaritmo natural; sin embargo, como los datos son transversales y no serie de tiempo, tanto la variable

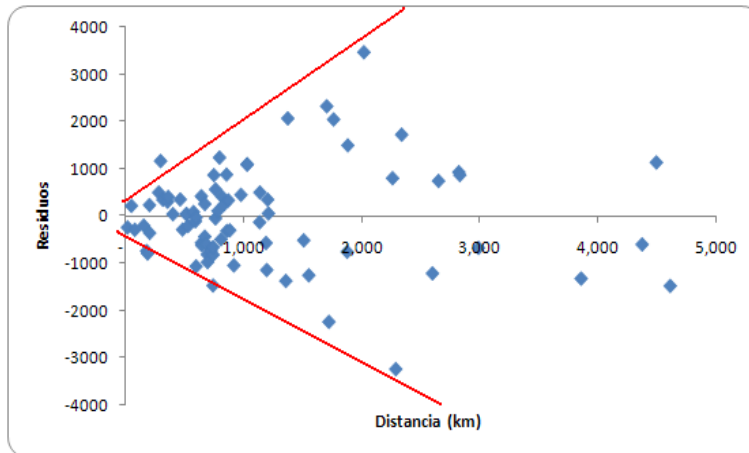


Figura 1.9: Tendencia marcada de los residuos, claro indicio de que la varianza no permanece constante.

dependiente como la independiente pueden ser sujetas a esta transformación.

Al obtener la raíz cuadrada de la distancia y de la tarifa: la varianza es estabilizada. Los datos estabilizados son mostrados en la Figura 1.10.

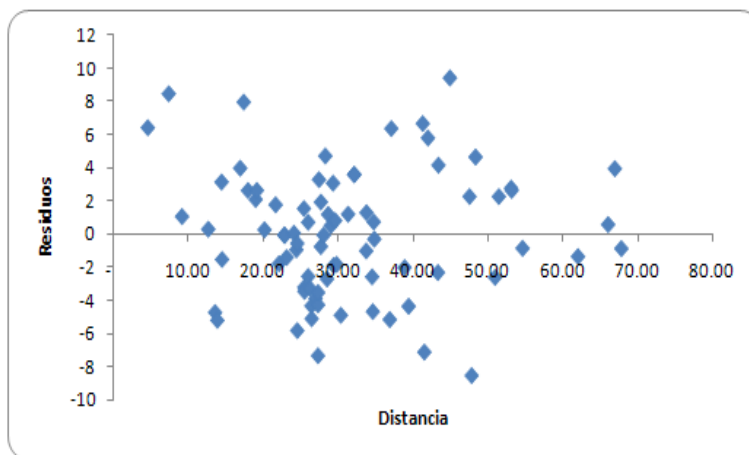


Figura 1.10: Residuos estabilizados al haber realizado transformación de las variables.

Esta metodología tiene que ser aplicada para cada uno de los conjuntos de datos que se tienen, para después proceder a la identificación de valores atípicos.

#### 1.3.3. Metodología para marcar datos atípicos.

La metodología propuesta es muy sencilla y es de fácil seguimiento (lo que permite la delegación del trabajo), no obstante, al haber sido aplicada ha resultado muy útil para encontrar los puntos que se pueden considerar atípicos y que después fueron validados con L & T.

Habiendo estabilizado la varianza con algún tipo de transformación (en caso necesario), se construye, para cada conjunto de datos, el gráfica de normalidad para los residuos. Para poder realizar esta gráfica, primeramente se deben ordenar en forma creciente los valores obtenidos de los residuos  $e_1, e_2, \dots, e_n$ . Entonces, se graficará  $e_i$  en función de  $z_i$ , donde  $z_i$  representa el área bajo la curva normal estándar. El valor de  $z_i$  se obtiene haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\frac{3i - 1}{3i + 1} \tag{1.1}$$

Calculado el valor de  $z_i$  se obtiene la probabilidad basada en la distribución normal. Al dibujar la gráfica de los resultados obtenidos, obtenemos la Figura 1.11, se observa que la gráfica de normalidad es casi una línea recta, sin embargo, en los extremos de esta gráfica se presentan datos que salen de la recta, estos son los datos que consideraremos atípicos.

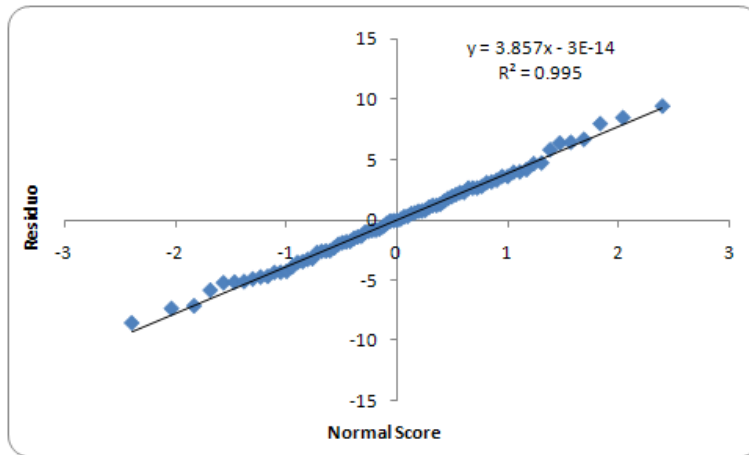


Figura 1.11: Gráfico de normalidad para los residuos.

Por lo tanto, las observaciones con número 69, 33, 63, 22, 6, 64, 59, 1, 62, 10, 2 y 67 son los valores que se consideran atípicos; se debe recordar que los datos se encuentran ordenados de forma ascendente, por lo tanto para obtener el número de observación real un procedimiento de búsqueda debe ser aplicado. Estas observaciones son mostradas en la Figura 1.12.

REAL_OBSERVATION	OBSERVATION	RESIDUALS	AREA	Z
69	1	-8.560824956	0.008403361	-2.390908897
33	2	-7.364984423	0.021008403	-2.033353648
63	3	-7.145740529	0.033613445	-1.830154156
22	4	-5.849570631	0.046218487	-1.682680417
6	5	-5.229555767	0.058823529	-1.564726471
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
64	73	5.78730507	0.915966387	1.378440822
59	74	6.354480253	0.928571429	1.465233793
1	75	6.409087714	0.941176471	1.564726471
62	76	6.65690105	0.953781513	1.682680417
10	77	7.955338499	0.966386555	1.830154156
2	78	8.455849836	0.978991597	2.033353648
67	79	9.410988536	0.991596639	2.390908897

Figura 1.12: Cálculo para la creación de la gráfica de normalidad para los residuos.

Esta metodología tiene que ser aplicada para cada uno de los conjuntos de datos que se tienen.

### 1.4. Metodología Haciendo Uso de Programación No Lineal

La primer metodología fue implementada, realmente con un segundo propósito en mente. Como la metodología implica realizar una regresión lineal, tiene, hasta cierto grado, una mejor aceptación que si se hubiera implementado alguna otra metodología más complicada. Esto no quiere decir que no se haya realizado una mejor metodología en este trabajo. En seguida se describe la metodología final que se siguió.

La Figura 1.4 muestra, sin temor a dudas, que la relación que hay entre las variables no es lineal. Es por esto, que la nueva metodología para abordar el problema de costos de transporte implica realizar una regresión no lineal de los datos.

El primer obstáculo a sortear fue: ¿Cuál es la función que mejor representa a los datos? la respuesta, aunque no obvia, la ofrece la misma Figura 1.4. Por el tipo de caída de la curva se puede inferir un comportamiento potencial. Al realizar algunas pruebas, una ecuación que representa las gráficas de tarifa/distancia en función de la distancia es de la siguiente:

$$\hat{y} = A + Bx^n \quad (1.2)$$

El problema se resume en encontrar los valores de  $A$ ,  $B$  y  $n$  que minimicen la suma de errores cuadráticos. Por la cantidad de datos que se tiene y por ser un método de uso general para las regresiones, se recomienda usar un método de *Levenberg-Marquardt* para realizar el trabajo. Un desarrollo matemático

más avanzado de este método se puede encontrar en literatura especializada, como [Bertsekas, 1995] y [Chong and H.Zak, 2008].

Además, si se posee un software de uso comercial, como el *Solver* de Excel® , la implementación de este problema de regresión no lineal es sumamente sencilla de realizar. Llevando, en algunos casos, a la reducción de los errores en la predicción hasta en un 60%. Se recomienda que al usar el Solver, se indique que se desea empezar a realizar la búsqueda con un método de gradiente, para después cambiar al método de Newton.

Para facilitar el uso de las nuevas aproximaciones realizadas, se realizó un XLL (*eXcel Link Library*) para que las funciones fueran nativas al Excel® . La realización de un XLL es una tarea compleja que requiere de un grado avanzado de conocimientos en programación, sin embargo, una buena guía para iniciar en el desarrollo de este tipo de aplicaciones es el libro de [Dalton, 2007].

## 1.4 Metodología Haciendo Uso de Programación No Lineal

---



---

## Capítulo 2

# Modelo de Programación Matemática Para Las Cervecerías

---

Para el desarrollo de este trabajo se considera el sistema formado por  $n$  plantas productoras de un bien y  $m$  zonas que tienen una demanda ( $D$ ) de este bien, a las cuales llamaremos: *zonas de demanda* o clientes. El modelo planteado será ejemplificado para el caso de una compañía cervecera de gran tamaño y reconocida entre las 10 mejores a nivel mundial.

El sistema esta conformado por 9 plantas cerveceras, estas son:  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$  y  $c_9$ . Cada una de estas cervecerías tiene una capacidad de producción de hecto-litros (hL) de cerveza mensual. Por motivos de simplificación, en este trabajo, solamen-

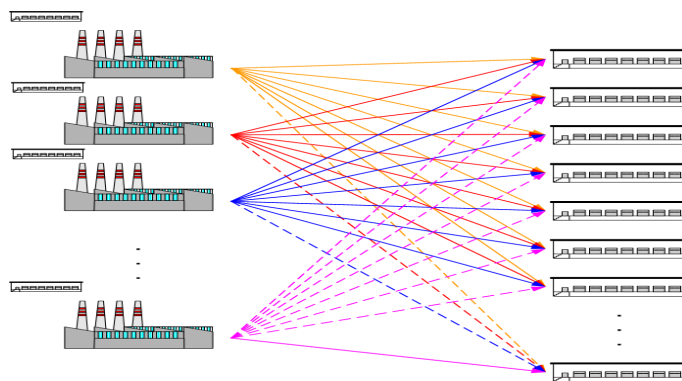


Figura 2.1: Sistema estudiado en este proyecto (Plantas-Zonas de Demanda).

te se considerará el envío de hL de cervecera a zona de demanda. En la Figura 2.1, se muestra una representación gráfica del sistema abordado en este proyecto.

### 2.1. La demanda

En el ámbito de la industria cervecera se tienen meses en los cuales la demanda es muy elevada, principalmente en los meses de julio y diciembre. Por el contrario, en el mes de enero, la demanda es muy baja, esto hace que en los meses de demanda baja las cervecerías tengan un porcentaje de utilización bajo, y en los meses de demanda alta las cervecerías no puedan surtir la demanda. Esta situación no es deseable en la compañía, por lo tanto, se genera un inventario que ayudará a la cobertura de esos meses con demanda alta y, también, ayudará a que las cervecerías mantengan un porcentaje de uso adecuado; sin embargo, en los meses de diciembre y julio la demanda puede llegar a ser tan alta, que la realización de un inventario con un mes de anticipación no es suficiente; por lo tanto, se realizan **pre-construcciones**. *Una pre-construcción es aquel inventario realizado con dos o tres meses de anticipación, ésto es, la pre-construcción realizada en el mes de enero ayudará a complementar la demanda del mes de marzo y así sucesivamente.*

Las pre-construcciones tienen propiedades muy semejantes a los inventarios, pero tienen una diferencia significativa: son realizadas con más de un mes de anticipación. La pregunta inmediata es la siguiente: ¿Con cuánto tiempo de anticipación se debe realizar una pre-construcción? La respuesta no es tan inmediata, sin embargo, el sistema nos brinda la solución a este problema, ahorrandonos la construcción de un modelo: por política de calidad, *la cerveza no puede estar más de tres meses en bodega.*

Las cervecerías tienen a su disposición diferentes tipos de transporte, con los cuales abastecen la demanda. En este modelo simplificado, sólo se considera el transporte tipo “*FULL*” debido a que son los más comúnmente usados y de los cuales se tiene el mayor número de tarifas disponibles.

## 2.2. Costos asociados al modelo

Todo modelo de programación debe tener una medida de evaluación del sistema, este modelo no es la excepción. Los costos asociados a este modelo son los siguientes:

**Costos de transporte:** Los costos de transporte son los asociados al envío de un hL de cerveza de una cervecería por tipo de transporte “*FULL*”.

**Costos de producción:** Cada cervecería tiene asociados costos de producción, estos varían de planta a planta debido al tamaño de las mismas. En este caso, el costo requerido es el costo de producir un hL de cerveza.

**Costo de almacenamiento:** Se requiere el costo de almacenamiento de un hL de cerveza en cada una de las diferentes cervecerías a nivel mensual.

**Costo de pre-construcción:** Como las pre-construcciones son muy semejantes al inventario, tienen un costo semejante al de los inventarios, sin embargo, como una pre-construcción es guardada dos meses o tres meses, el costo asociado es el doble o el triple del costo de almacenamiento.

## 2.3. El cierre de plantas

El cierre de una planta es comúnmente asociado a la quiebra de una empresa. No obstante, esto no tiene porque ser así.

### 2.3 El cierre de plantas

---

Una empresa que se encuentra en proceso de expansión o desea tener costos más competitivos tiene la necesidad de decidir si las plantas que posee al día de hoy le siguen siendo útiles. Esto de ninguna manera implica que la empresa está en quiebra.

Uno de los supuestos básicos para realizar la formulación es que la planta se encuentra en operación y podrá dejar de operar en un tiempo determinado. De esta manera, el costo asociado a esta decisión será un costo de cierre de planta. De ninguna manera se puede considerar que la planta no existe y que se desea localizar una nueva planta; este problema involucra otros costos y no ejemplifica adecuadamente el estado del sistema.

Un problema inherente al cierre de una planta es que la zona de demanda cercana a esa planta tendrá que ser atendida por otra planta que se encontrará en un lugar más alejado. Lo que trae consigo un mayor costo en el transporte. Al pasar la producción de la(s) planta(s) a cerrar a otras plantas, éstas podrían bajar sus costos de producción (suponiendo economía de escala), y de esta manera compensar el costo más alto de transporte. Para que una decisión de este tipo sea válida los costos de producción, transporte e inventarios deberán ser lo suficientemente atractivos para que valga la pena cerrar una o varias plantas.

Asociado a un cierre, se encuentran ahorros. Al momento de cerrar una planta se pagan los finiquitos correspondientes a los trabajadores, no obstante, al mes siguiente la empresa ya no tendrá que pagar ninguno de los gastos asociados a los trabajadores y tampoco tendrá que pagar los impuestos correspondientes a la planta productora y todos sus derivados.

En este proyecto, no se han considerado ahorros asociados a un cierre, esto es porque todavía no se tiene información con-

fiable acerca de los ahorros esperados. Aunado a esto, no se ha considerado un modelo de economía de escala para las diferentes plantas productoras, dado que el análisis de este tema se puede llevar por separado y es muy costoso en cuestiones de tiempo.

## 2.4. Modelo matemático.

A continuación se explica el desarrollo del modelo de programación que ha sido diseñado para este sistema. Modelos similares han sido creados por [Schrage, 2003] y [Williams, 1999], no obstante, el modelo propuesto en este trabajo es una modelación *ad-hoc* para la industria cervecera en México y no se ha realizado ningún trabajo similar hasta el momento. Particularmente, los trabajos [Williams, 1974] y [Williams, 1978] demuestran que la formulación brindada es una muy buena formulación, esto llevó a que no se tuviera problema al momento de la resolución del modelo.

### ***Sea:***

- $x_{it}$  : La cantidad de hectolitros producidos en la planta  $i$  en el periodo  $t$ .
- $I_{it}$  : La cantidad de hectolitros producidos en la planta  $i$  en el periodo  $t$  que se destinarán para el inventario.
- $P_{it}^{(2)}$  : La cantidad de hectolitros producidos en la planta  $i$  en el periodo  $t$  que se destinarán para la pre-construcción con dos meses de anticipación.
- $P_{it}^{(3)}$  : La cantidad de hectolitros producidos en la planta  $i$  en el periodo  $t$  que se destinarán para la pre-construcción con tres meses de anticipación.
- $z_{ijt}$  : La cantidad de hectolitros enviados de la planta  $i$  al cliente  $j$  en el periodo  $t$ .

## 2.4 Modelo matemático.

---

- $y_{it}$  :  $\begin{cases} 1 & \text{Si la planta } i \text{ es cerrada en el periodo } t. \\ 0 & \text{Si la planta } i \text{ permanece abierta en} \\ & \text{el periodo } t \end{cases}$
- $\theta_{jt}$  : La cantidad de hectolitros demandados por el cliente  $j$  en el periodo  $t$ .
- $H_{it}^{max}$  : La cantidad de hectolitros máximos que puede producir la planta  $i$  en el periodo  $t$ .
- $H_{it}^{min}$  : La cantidad de hectolitros mínima que puede producir la planta  $i$  en el periodo  $t$ .
- $I_{it}^{max}$  : La cantidad de hectolitros máximos que se pueden almacenar en la planta  $i$  en el periodo  $t$ .
- $I_{it}^{min}$  : La cantidad de hectolitros mínima que se pueden almacenar en la planta  $i$  en el periodo  $t$ .
- $P_{it}^{max}$  : La cantidad de hectolitros máximos que se pueden pre-construir en la planta  $i$  en el periodo  $t$ .
- $P_{it}^{min}$  : La cantidad de hectolitros mínima que se pueden pre-construir en la planta  $i$  en el periodo  $t$ .
- $\gamma$  : Número total de plantas consideradas.
- $\delta$  : Número total de zonas de demanda consideradas.
- $\eta$  : Número total de periodos considerados.
- $C_i^{prod}$  : Costo de Producción de la planta  $i$ .
- $C_i^{alma}$  : Costo de Almacenaje de la planta  $i$ .
- $C_{ij}^{tran}$  : Costo de transporte de la planta  $i$  a la zona de demanda  $j$ .
- $C_i^{cierre}$  : Costo de cierre de la planta  $i$ .
- $M$  : Es una cantidad grande, que representa la cantidad máxima que cada una de las plantas puede enviar.

**Donde:**

$i \in \{\text{planta 1, planta 2, } \dots, \text{planta } \gamma\}.$

$j \in \{\text{zona de demanda 1, zona de demanda 2, } \dots, \text{zona de demanda } \delta\}.$

$j \in \{\text{cliente 1, cliente 2, } \dots, \text{cliente } \delta\} = \{\text{zona de demanda 1, zona de demanda 2, } \dots, \text{zona de demanda } \delta\}.$

$t \in \{\text{periodo 0, periodo 1, periodo 2, } \dots, \text{periodo } \eta\}.$

En este caso, la función objetivo estará destinada a la minimización de los costos. Esta queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Costo = & \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{t=1}^{\eta} C_i^{prod} x_{it} + \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{t=1}^{\eta} C_i^{alma} I_{it} \\
 & \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{t=1}^{\eta} 2C_i^{alma} P_{it}^{(2)} + \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{t=1}^{\eta} 3C_i^{alma} P_{it}^{(3)} + \\
 & \sum_{i=1}^{\gamma} \sum_{j=1}^{\delta} \sum_{t=1}^{\eta} C_{ij}^{tran} z_{ijt} + \sum_{i=1}^{\gamma} C_i^{cierre} y_{it=\eta} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Con las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^{\gamma} x_{it} + \sum_{i=1}^{\gamma} I_{i(t-1)} + \sum_{i=1}^{\gamma} P_{i(t-2)}^{(2)} + \sum_{i=1}^{\gamma} P_{i(t-3)}^{(3)} \\
 - & \sum_{j=1}^{\delta} \theta_{jt} - \sum_{i=1}^{\gamma} I_{it} - \sum_{i=1}^{\gamma} P_{it}^{(2)} - \sum_{i=1}^{\gamma} P_{it}^{(3)} = 0, \quad \forall t \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & x_{it} + I_{i(t-1)} + P_{i(t-2)}^{(2)} + P_{i(t-3)}^{(3)} \\
 - & \sum_{j=1}^{\delta} z_{ijt} - I_{it} - P_{it}^{(2)} - P_{it}^{(3)} = 0, \quad \forall i, t \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

## 2.4 Modelo matemático.

---

$$y_{it} - y_{it-1} \geq 0, \quad \forall i, t \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^{\gamma} z_{ijt} = \theta_{jt}, \quad \forall j, t \quad (2.5)$$

$$\sum_{j=1}^{\delta} z_{ijt} \leq x_{it} + I_{i(t-1)} + P_{i(t-2)} + P_{i(t-3)}, \quad \forall i, t \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^{\delta} z_{ijt} \leq M(1 - y_{it}), \quad \forall i, t \quad (2.7)$$

$$H_{it}^{min} \leq x_{it} \leq H_{it}^{max}(1 - y_{it}), \quad \forall i, t \quad (2.8)$$

$$I_{it}^{min} \leq I_{it} \leq I_{it}^{max}(1 - y_{it}), \quad \forall i, t \quad (2.9)$$

$$P_{it}^{min} \leq P_{it} \leq P_{it}^{max}(1 - y_{it}), \quad \forall i, t \quad (2.10)$$

$$P_{it}^{min} \leq P_{it}^{(2)} \leq P_{it}^{max}(1 - y_{it}), \quad \forall i, t \quad (2.11)$$

$$P_{it}^{min} \leq P_{it}^{(3)} \leq P_{it}^{max}(1 - y_{it}), \quad \forall i, t \quad (2.12)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, t \quad (2.13)$$

Con todas las variables no negativas.

Para la resolución del modelo se hizo uso de Microsoft®Excel®2007 junto con el complemento “**Premium Solver Platform®**” haciendo uso del “**Engine XPRESS®Solver**”<sup>1</sup>.

Algunas cantidades importantes que hay que tener en mente, son las presentadas en la Tabla 2.1, en donde  $S$  representa una cantidad muy grande, en este caso 2,000,000,000.00 hL. Planta<sub>c8</sub> es una fábrica que se agrega con el fin de tener holgura. En caso de que las fábricas reales no puedan completar la demanda solicitada, esta fábrica se encargará de hacerlo, pero a un costo muy elevado.

---

<sup>1</sup>El modelo toma aproximadamente 25 minutos en ejecutarse: en una computadora DEL®Precision Series con dos procesadores Intel Xeon a 2GHz.



Tabla 2.1: Capacidades de cervecerías

CDG_Planta	HL_POR_ANIO
Planta_c1	5,200,000.00 hL
Planta_c2	11,500,000.00 hL
Planta_c3	3,000,000.00 hL
Planta_c4	2,000,000.00 hL
Planta_c5	5,000,000.00 hL
Planta_c6	3,200,000.00 hL
Planta_c7	18,000,000.00 hL
Planta_c8	<i>S</i>
Planta_c9	22,000,000.00 hL

### 2.4.1. La función Objetivo

La función objetivo (2.1), se encuentra compuesta principalmente por los siguientes costos:

1. Costo de producción.
2. Costo de transporte.
3. Costo de almacenaje.
4. Costo de cierre.

El costo de cierre debe ser reflejado si y sólo si se ha decidido cerrar una planta, sin importar la fecha de cierre. Esto se debe a que un costo de cierre reflejará principalmente (entre otros factores) los costos de los finiquitos a los trabajadores. Sin embargo, el modelo tiene restricciones, como la restricción (2.4) , que nos aseguran que al cerrar una planta en un periodo determinado, esta permanecerá cerrada los periodos sucesivos. Intuitivamente se puede llegar a la conclusión de que la única

## 2.4 Modelo matemático.

---

variable que contará en la función objetivo es la del último periodo, esto es:  $t = \eta$  no obstante, una demostración formal es brindada a continuación:

Sin perder generalidad, tomemos la situación de una planta particular,  $i = 1$ .

$$y_{10}C_1^{cierre} + (y_{11} - y_{10})C_1^{cierre} + (y_{12} - y_{11})C_1^{cierre} + \dots + (y_{1\eta-1} - y_{1\eta-2}) + (y_{1\eta} - y_{1\eta-1})C_1^{cierre} \quad (2.14)$$

La resta de cada uno de los elementos viene asociado a la restricción (2.4), esto es, si ya se ha cerrado una planta en un periodo determinado, en este caso el primer periodo, entonces  $y_{11} = 1$  pero como la planta en un inicio se encuentra en operación o abierta  $y_{10} = 0$  la diferencia valdrá 1 y el costo de cierre será reflejado en el modelo. No obstante, por la restricción (2.4)  $y_{12}$  debe ser igual a 1 y así sucesivamente. Si sumamos todos los elementos de la expresión (2.14) podemos factorizar  $C_1^{cierre}$  obteniendo la siguiente expresión:

$$C_1^{cierre}(y_{10} + y_{11} - y_{10} + y_{12} - y_{11} + \dots + y_{1\eta-1} - y_{1\eta-2} + y_{1\eta} - y_{1\eta-1}) \quad (2.15)$$

De la expresión (2.15) observamos que el único término que no se cancelará es  $y_{1\eta}$ , por lo tanto el costo que debe ser reflejado en la función objetivo sólo considera la última variable de decisión del cierre, esto es:

$$C_1^{cierre}y_{1\eta}$$

### 2.4.2. Restricciones

En la Tabla 2.2, se muestra el significado de cada una de las restricciones planteadas para el modelo de las cervecerías.

Tabla 2.2: Significado de las restricciones para el modelo de las cervecerías.

# Restricción	Significado
(2.2)	Balance de producción, inventarios y preconstrucciones.
(2.3)	Balance para el envío de producto.
(2.4)	Si una planta es cerrada, debe permanecer cerrada.
(2.5)	Lo que se envía de producto debe satisfacer la demanda.
(2.6)	La cantidad enviada, no debe exceder lo disponible para el envío.
(2.7)	En caso de que una planta sea cerrada, se deben suspender los envíos.
(2.8)	Límites superior e inferior para la variable $x_{it}$ .
(2.9)	Límites superior e inferior para la variable $I_{it}$ .
(2.10)	Límites superior e inferior para la variable $P_{it}$ .
(2.11)	Límites superior e inferior para la variable $P_{it}^{(2)}$ .
(2.12)	Límites superior e inferior para la variable $P_{it}^{(3)}$ .
(2.13)	Restricción del domino para la variable $y_{it}$ .

## 2.5. Comentarios Adicionales

Se debe mencionar que una implementación con simplificaciones de este modelo posee 223,344 variables continuas y 432 variables binarias, además, de un aproximado de 30,194 restricciones. Sin embargo, este escenario para el modelo, a pesar de tener un tamaño significativo, no se compara con un escenario real del mismo.

Un caso real de este modelo tendrá poco más de 1,000,000 de variables continuas. La ventaja es que el número de variables binarias no aumentará y seguirá siendo de 432. Esto nos lleva a inferir que el modelo se puede resolver en un tiempo razonable y, por lo tanto, será una herramienta útil para la ayuda a la toma de decisiones.

## 2.6 Validación del modelo

---

Algunos de los resultados obtenidos al correr este modelo, son mostrados en el capítulo 4 de este trabajo.

Contar con un modelo para las cervecerías es el primer paso a desarrollar en la modelación de la cadena de suministros de la industria cervecera en México. En el siguiente capítulo se aborda la segunda parte de la cadena de suministros: la proveduría de botella de vidrio.

### 2.6. Validación del modelo

La validación del modelo fue sencilla: en su momento se presentaron los resultados a gerentes y directores, ambos decretaron que los resultados eran muy apegados a la realidad y el modelo rápidamente paso a ser usado como herramienta en la toma de decisiones.

Por otro lado la validación matemática del modelo llevó un aproximado de 4 meses. En este periodo se hacían pruebas con demanas ficticias y con datos para los costos de transporte generados aleatoriamente, esto brindó una gran cantidad de escenarios que ayudaron a la mejora continua del modelo y a la rápida de errores en la modelación.

---

## Capítulo 3

# Modelo de Programación Matemática para las Vidrieras

---

La cadena de suministros de la industria cervecera abarca desde los proveedores hasta la distribución, este es un manejo global de la cadena de suministros. Existen empresas, en donde la cadena de suministros se limita a la transformación de materia prima, en este tipo de cadenas algún proveedor externo se encarga de la distribución y del abastecimiento. Por lo tanto, los modelos de programación lineal son totalmente adecuados, debido a que el modelo no debe considerar las complicaciones que tengan los proveedores o los transportistas; la empresa solamente tiene que solicitar y esperar a que el proveedor le diga si puede o no puede cumplir su solicitud. En caso de que no lo pueda cumplir, la empresa buscará algún otro u otros proveedores y de esta manera completará los requerimientos que tenga para su producción.

Si se desea realizar un modelo matemático que abarque las plantas cerveceras y la proveeduría de botella de las diferentes vidrieras, se tendrá que considerar las complicaciones que tengan las plantas de vidrio que pertenezcan a la compañía. De esta manera, el modelo será más apegado a la realidad.

En este capítulo se propone un modelo para la producción de las plantas de vidrio que posee la compañía, al igual que en el caso del modelo para las cervecerías, la propuesta para la industria vidriera en México es *ad-hoc* y no existen antecedentes de un desarrollo semejante.

### 3.1. Modelo matemático

En este modelo, en comparación con el de las cervecerías, surgieron metas que se tenían que tomar en cuenta. La elección de las diferentes metas se realizó con ayuda de las personas que estaban más involucradas con el sistema estudiado, de esta manera, la modelación se llevó a cabo con la aprobación del personal; disminuyendo la resistencia al cambio.

El modelo matemático para las vidrieras es uno de Programación Lineal Entera Mixta con metas, la elección cuidadosa de las variables de decisión fue indispensable para que este modelo pudiera ser resuelto en un tiempo razonable y con los recursos disponibles. La mala formulación de un sistema de este tipo, lleva a que no se pueda resolver en un tiempo razonable o que no éste apegado a la realidad.

Las necesidades de la empresa llevaron al desarrollo de dos modelos diferentes: uno para la operación y otro para la planeación. El modelo operacional posee un gran número de variables binarias (cerca de 18,000) lo cual brinda un amplio espacio de búsqueda (aproximadamente  $2^{18000}$  para sólo un mes). Lo que hace de este, un modelo muy difícil de resolver. El *solver* más poderoso de Frontline Systems, *Premium Solver con XPRESS Engine* no pudo resolver este problema al consumir primera-

mente los 8GB de RAM de una computadora<sup>1</sup>. Aunado a esto, el modelo operacional no puede ser fácilmente acoplado al modelo de las cervecerías: la temporalidad de los modelos es diferente y la complejidad que nace de la unión de ambos modelos lo hace poco práctico.

En la industria vidriera, así como en la cervecera, se necesita planear al largo plazo, es por eso que se realizó un modelo de planeación para la industria vidriera. Este modelo de planeación no podía estar aislado del modelo de operación, es más, el primero tiene que brindar las directrices para el segundo. En este capítulo, se presenta una versión simplificada del modelo de planeación realizado.

En comparación con el modelo de operación, el modelo de planeación es totalmente adaptable al modelo de las cervecerías y, aunque, el número de variables enteras crece en gran medida con la inserción de este modelo, los tiempos de solución del modelo de planeación indican que hay una gran posibilidad de que al unir ambos modelos se obtenga un modelo soluble en un tiempo razonable.

### 3.1.1. Descripción del Modelo Matemático

A continuación se presenta la versión simplificada del modelo matemático realizado para la proveduría de envases de vidrio para las plantas cerveceras.

Llamemos *estiraje* a la cantidad de vidrio disponible para realizar la producción del vidrio, SKU a la unidad básica de almacenamiento (*Stock Keeping Unit*), UEN la Unidad Estratégica de Negocio, NF las siglas de Nueva Fábrica de Vidrio, VIP

---

<sup>1</sup>Computadora MacBook Pro con procesador Intel Core 2 Duo y 8GB en RAM con Windows 7 Professional de 64 bits.

### 3.1 Modelo matemático

---

las siglas de Vidriera Industrial del Potosí y VTB las siglas de Vidriera Tierra Blanca.

Sea:

- $S$  =  $\{SKU01, SKU02, \dots, SKU_s\}$
- $U$  =  $\{NF, VIP, VTB\}$
- $H$  =  $\{Horno\ 1, Horno\ 2, Horno\ 3, \dots, Horno\ h\}$
- $M$  =  $\{Máquina\ 1, Máquina\ 2, Máquina\ 3, \dots, Máquina\ m\}$
- $T$  =  $\{Periodo\ 1, Periodo\ 2, Periodo\ 3, \dots, Periodo\ t\}$
- $\theta_{st}$  = Demanda del producto  $s$  en el periodo  $t$  (
- $p_{uhmst}$  = Matriz de producción para cada periodo en unidades de botellas.
- $e_{uhmst}$  = Matriz de estiraje para cada periodo en unidades de kg por botella.
- $e_{uht}^{max}$  = Matriz de estiraje máximo por horno, UEN y periodo kg por botella.
- $u_{uhmt}^{max}$  = Matriz de el numero máximo de productos producidos por horno, UEN y periodo.
- $d_{uhmst}^{max}$  = Matriz de días máximos de producción para cada producto en cada periodo.
- $d_{uhmt}^{max}$  = Matriz de días máximos de producción para cada máquina en cada periodo.
- $I_{max,t}^+$  = Matriz de máximo inventario para cada periodo en unidades de botellas.
- $I_{max,t}^-$  = Matriz de máxima demanda no cubierta para cada periodo en unidades de botellas.
- $d_{uhmst}$  = Días que se produce el producto  $s$  en la maquina  $m$  del horno  $h$  en la UEN  $u$  en el periodo  $t$ .
- $I_{st}^+$  = Excedente de inventario del producto  $s$  en el periodo  $t$  en unidades de botellas.
- $I_{st}^-$  = Demanda no cubierta del producto  $s$  en el periodo  $t$  en unidades de botellas.



$$\delta_{uhmst} = \begin{cases} 1 : & \text{Si el producto } s \text{ es producido} \\ & \text{en la máquina } m \\ & \text{del horno } h \text{ en la UEN } u \text{ en el periodo } t. \\ 0 : & \text{Si el producto } s \text{ no es producido} \\ & \text{en la máquina } m \\ & \text{del horno } h \text{ en la UEN } u \text{ en el periodo } t. \end{cases}$$

$$\rho_{st}^{(1)} = \text{Penalización por generación de inventario (cantidad adimensional).}$$

$$\rho_{st}^{(2)} = \text{Penalización por no cumplimiento de demanda (cantidad adimensional).}$$

$$\rho_{uhmst}^{(3)} = \text{Penalización por el cambio de la producción de un producto a otro en una misma máquina (cantidad adimensional).}$$

$$s \in S$$

$$u \in U$$

$$h \in H$$

$$t \in T$$

### 3.1.2. Función Objetivo

La función objetivo en este modelo no está dada en términos de costos; está dada en términos de desviaciones, esto es: se penaliza fuertemente que la demanda no pueda ser cubierta,  $I^- > 0$ , también se penaliza que haya demasiado inventario,  $I^+ > 0$ , sin embargo, es preferible generar inventario a tener demanda no cubierta. Finalmente, se penaliza que una UEN, en un horno, en una máquina produzca demasiados productos: se busca que las variables  $\delta_{uhms}$  sean casi todas cero.

A pesar de lo exigente que puedan parecer estas metas, sólo reflejan el deseo de que la producción de vidrio siga una ideología tipo *Just In Time*. Para que esto se cumpla, la función objetivo

### 3.1 Modelo matemático

---

es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Min desviaciones} = & \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \rho_{st}^{(1)} I_{st}^+ + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \rho_{st}^{(2)} I_{st}^- + \\
 & \sum_{u \in U} \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \rho_{uhmst}^{(3)} \delta_{uhmst} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Esta función objetivo, y las restricciones, aseguran que la mejor solución de este problema ocurra cuando se produzca lo necesario en el tiempo justo.

#### 3.1.3. Restricciones

Las restricciones planteadas para este modelo son las siguientes:

$$d_{uhmst} \leq \delta_{uhmst} d_{uhmst}^{max}, \quad \forall u, h, m, s, t \quad (3.2)$$

$$Q_{st} = \sum_{u \in U} \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} d_{uhmst} p_{uhmst}, \quad \forall s, t \quad (3.3)$$

$$I_{st}^+ + I_{st}^- = Q_{st} - \theta_{st}, \quad \forall s, t \quad (3.4)$$

$$I_{st}^+ \leq I_{max,t}^+, \quad \forall s, t \quad (3.5)$$

$$I_{st}^- \leq I_{max,t}^-, \quad \forall s, t \quad (3.6)$$

$$\sum_{s \in S} d_{uhmst} = d_{uhmst}^{max}, \quad \forall u, h, m, t \quad (3.7)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{s \in S} d_{uhmst} e_{uhmst} \leq e_{uht}^{max}, \quad \forall u, h, t \quad (3.8)$$

$$\sum_{s \in S} \delta_{uhmst} \leq u_{uhmt}^{max}, \quad \forall u, h, m, t \quad (3.9)$$

$$d_{uhmst} \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall u, h, m, s, t \quad (3.10)$$

$$\delta_{uhmst} \in \{0, 1\}, \quad \forall u, h, m, s, t \quad (3.11)$$

$$I_{st}^+ \geq 0, \quad \forall s, t \quad (3.12)$$

$$I_{st}^- \geq 0, \quad \forall s, t \quad (3.13)$$

El significado de cada una de las restricciones planteadas es mostrado en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Significado de las restricciones del modelo de vidrio.

# Restricción	Significado
(3.2)	Solamente se puede producir, si se ha decidido hacerlo.
(3.3)	$Q_{st}$ es la producción total de cada producto (auxiliar)
(3.4)	El excedente (inventario) menos lo que no cubrí de demanda, debe ser igual a la demanda menos la producción.
(3.5)	Restricción de límite superior.
(3.6)	Restricción de límite superior.
(3.7)	Los días de producción de todos los productos en una máquina en un horno determinado en una UEN, deben de sumar los días del mes.
(3.8)	El estiraje de la producción no puede pasar el estiraje máximo permitido.
(3.9)	El número de productos producidos en una máquina, no puede pasar del total de productos producidos en la misma.
(3.10)	Restricción de dominio de la variable.
(3.11)	Restricción de dominio de la variable.
(3.12)	Restricción de no negatividad de la variable.
(3.13)	Restricción de no negatividad de la variable.

Una implementación con datos reales de este modelo posee 5,976 variables enteras (de las cuales la mitad son binarias) y 672 variables continuas. El gran número de variables enteras de este modelo, lleva a una gran complejidad en la solución del modelo, no obstante, esta complejidad en la solución se vio superada con una muy buena formulación del problema. Los tiempos de solución de una instancia de este modelo oscilan entre los 7 y

los 10 minutos<sup>2</sup>.

## 3.2. Validación del modelo

Aunado a la grata experiencia de poder resolver el modelo de planeación en tan corto tiempo y con resultados tan satisfactorios, existe una primer formulación que contenía un gran número de variables binarias, como se menciona en la primer parte de esta sección, sin embargo, el supuesto base es que la primer formulación y la segunda son semejantes. Este supuesto implica que ambos modelos están tratando de representar el mismo sistema y están tratando de considerar las mismas restricciones, es por esto, que al poder resolver el modelo de planeación, la solución brindada sirvió para poder acotar de manera drástica el espacio de búsqueda del modelo de operación, lo cual hace que este último se solucionará de manera instantánea.

Sin embargo, bajo el supuesto que se establece ambos modelos deberían de brindar la misma solución; lo cual no fue cierto. No obstante, si ambos modelos tienen una solución en común, a través de un procedimiento semejante a la iteración de punto fijo ambos modelos convergerían a una misma solución; al probar esta hipótesis se encontró que ambos modelos convergían a una misma solución. **Un éxito rotundo.**

---

<sup>2</sup>Tiempos brindados al usar una computadora MacBook Pro con procesador Intel Core 2 Duo y 8GB en RAM con Windows 7 Professional de 64 bits.

# Resultados de la Aplicación de los Modelos

---

<sup>1</sup>En este capítulo se muestran algunos de los resultados más importantes obtenidos al resolver cada uno de los modelos propuestos. Cabe señalar que todos los resultados aquí obtenidos fueron validados en su momento por personal calificado de la industria cervecera.

## 4.1. Resultados para los costos de transporte

Algunos de los resultados obtenidos, para el caso de los costos de transporte, se muestran a continuación. Se debe mencionar que la metodología aplicada tuvo que ser sencilla y fácil de entender debido a la presencia de una gran resistencia al cambio en la compañía. Al recibir retroalimentación y estar abierto a opiniones, se genera confianza; sin embargo, se debe convencer a los colaboradores de la empresa que la metodología es adecuada y que los resultados serán buenos en comparación con los que se venían obteniendo.

---

<sup>1</sup>Los resultados y nombres brindados en este trabajo no representan las opiniones o la realidad de la empresa en la que se realizó el estudio, aunado a esto, todo desarrollo matemático se llevó a cabo fuera de la misma.

## 4.1 Resultados para los costos de transporte

---

### 4.1.1. Planta cervecera de Guadalajara

Para la planta cervecera de Guadalajara se obtuvo el modelo de regresión lineal que se muestra en la Figura 4.1.

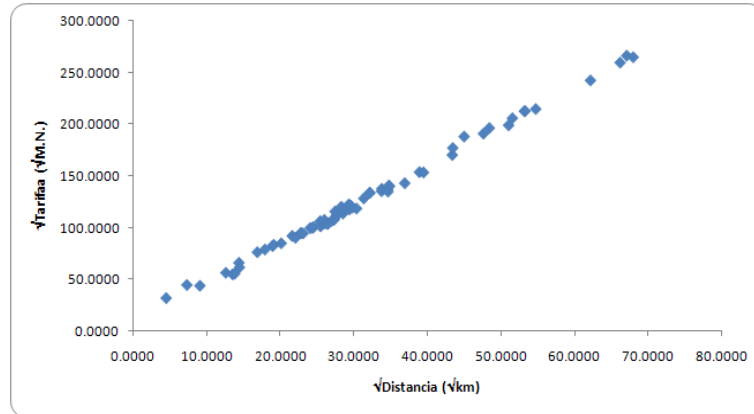


Figura 4.1: Gráfica de los datos usados para el modelo de regresión lineal en el caso de la planta de Guadalajara.

Como se mencionó en la subsección 1.3.2 del capítulo 1, la mejor transformación que se obtuvo para las variables distancia y tarifa es la raíz cuadrada de éstas, i.e.,

$$\sqrt{y} = m\sqrt{x} + b, \quad (4.1)$$

donde:

$$\begin{aligned} m &= 3.7988 \\ b &= 7.9150; \end{aligned}$$

Sustituyendo  $m$  y  $b$ , y reacomodando términos, (4.1) viene a ser:

$$\frac{y}{x} = \left( 3.7988 + \frac{7.9150}{\sqrt{x}} \right)^2 \quad (4.2)$$

En la Figura 4.2 se muestra la forma que tiene la gráfica de la ecuación (4.2).

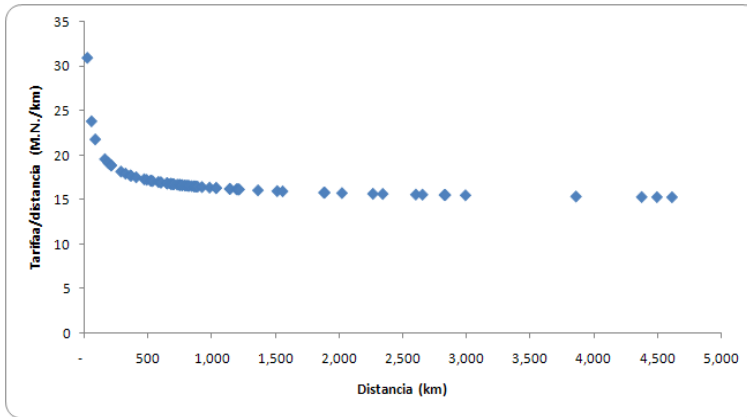


Figura 4.2: Gráfica de la ecuación (4.2).

La ecuación (4.2) imita la gráfica que estábamos buscando, como se ve en la Figura 4.3:

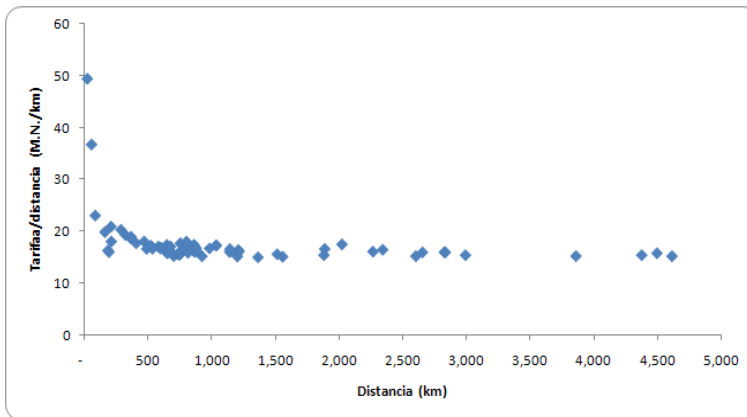


Figura 4.3: Gráfica de la función buscada originalmente para los costos de transporte de la planta cervecera de Guadalajara.

#### 4.1 Resultados para los costos de transporte

Este modelo tiene una propensión mayor a error en los valores de distancia menores a 500 km, como se muestra en la Figura 4.4:

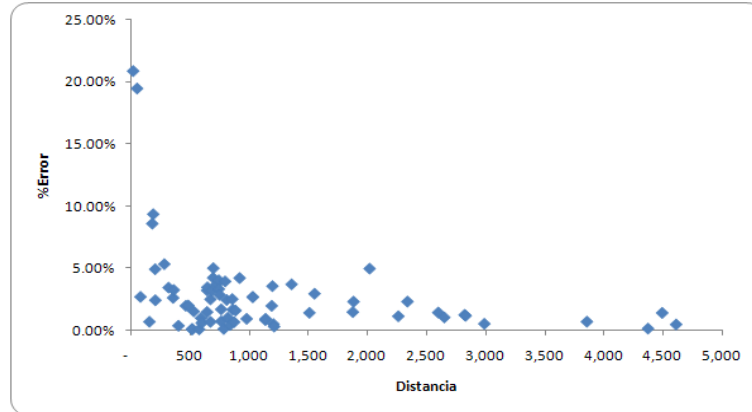


Figura 4.4: Gráfica del porcentaje de error en función de la distancia.

El resumen de las estadísticas se muestra en la Figura 4.5, se observa, marcado en rojo, que los valores de la significancia de los valores de la regresión son adecuados, i.e., son valores cercanos a cero.

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.998109257							
R Square	0.996222088							
Adjusted R Square	0.996167336							
Standard Error	3.259793253							
Observations	71							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	1	193345.2597	193345.2597	18195.05681	2.49419E-85			
Residual	69	733.2113914	10.62625205					
Total	70	194078.4711						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	7.914974672	0.954840774	8.289313657	5.91091E-12	6.010119471	9.819829874	6.010119471	9.819829874
SQRT(Kilometraje)	3.798833418	0.028162652	134.8890537	2.49419E-85	3.742650466	3.85501637	3.742650466	3.85501637

Figura 4.5: Resumen de las estadísticas para el modelo de regresión realizado.



#### 4.1.2. Planta cervecera de México

Para la planta cervecera de México se obtuvo el modelo de regresión lineal mostrado en la Figura 4.6:

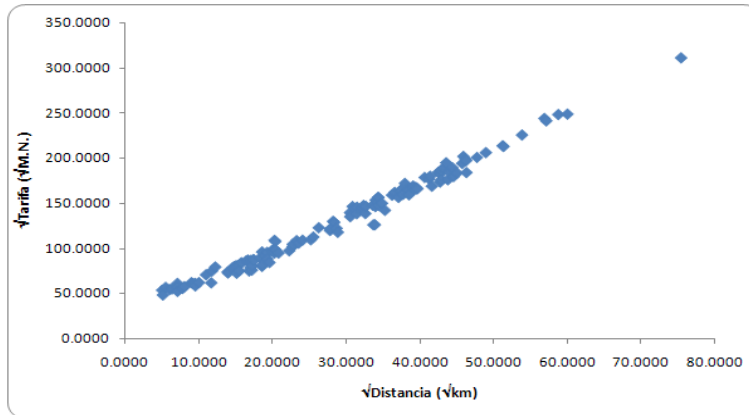


Figura 4.6: Gráfica de los datos usados para el modelo de regresión lineal en el caso de la planta de México

Como se mencionó en la subsección 1.3.2 del capítulo 1, la mejor transformación que se obtuvo para las variables distancia y tarifa es la raíz cuadrada de éstas, i.e.,

$$\sqrt{y} = m\sqrt{x} + b$$

donde:

$$m = 3.6768$$

$$b = 24.0649$$

Sustituyendo  $m$  y  $b$ , y reacomodando términos, (4.1) viene a ser:

$$\frac{y}{x} = \left( 3.6768 + \frac{24.0649}{\sqrt{x}} \right)^2 \quad (4.3)$$

En la Figura 4.7, se muestra la forma que tiene la gráfica de la ecuación (4.3).

## 4.1 Resultados para los costos de transporte

---

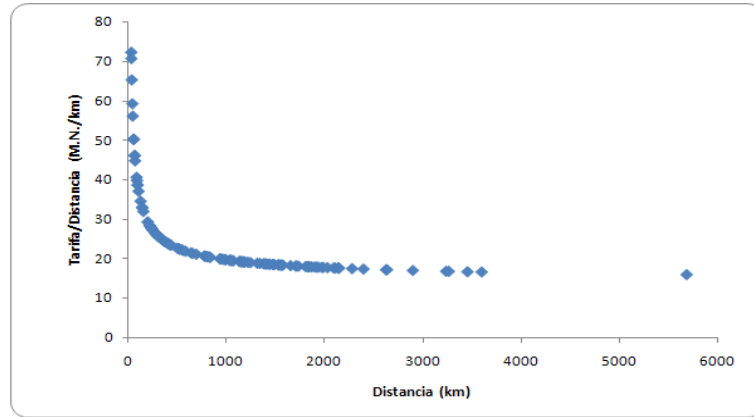


Figura 4.7: Gráfica de la ecuación (4.3).

La ecuación (4.3) imita la gráfica que estábamos buscando, como se ve en la Figura 4.8:

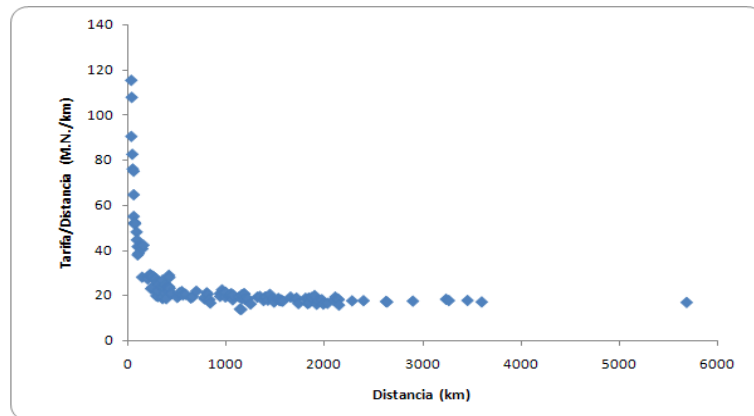


Figura 4.8: Gráfica de la función buscada originalmente para los costos de transporte de la planta cervecera de México.

Este modelo tiene una propensión mayor a error en los valores de distancia menores a 500 km, como se muestra en la Figura 4.9.

## Resultados de la Aplicación de los Modelos

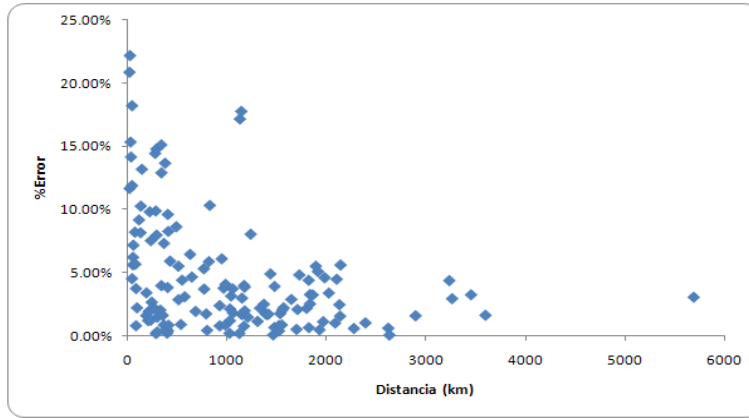


Figura 4.9: Gráfica reacomodando términos de la ecuación (4.3).

El resumen de las estadísticas es mostrado en la Figura 4.10, se observa, marcado en rojo, que los valores de la significancia de los valores de la regresión son adecuados.

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.99285103							
R Square	0.985753168							
Adjusted R Square	0.985649177							
Standard Error	6.280880958							
Observations	139							
<b>ANOVA</b>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	1	373948.3098	373948.3098	9479.173012	2.3204E-128			
Residual	137	5404.576789	39.44946561					
Total	138	379352.8866						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	24.0649397	1.209150771	19.90234823	2.98528E-42	21.67392726	26.45595214	21.67392726	26.45595214
SQRT(Kilometraje)	3.676776014	0.037764344	97.36104463	2.3204E-128	3.602099622	3.751452406	3.602099622	3.751452406

Figura 4.10: Resumen de las estadísticas para el modelo de regresión realizado.

## 4.1 Resultados para los costos de transporte

---

### 4.1.3. Planta cervecera de Mazatlán

Para la planta cervecera de Mazatlán se obtuvo el modelo de regresión lineal mostrado en la Figura 4.11:

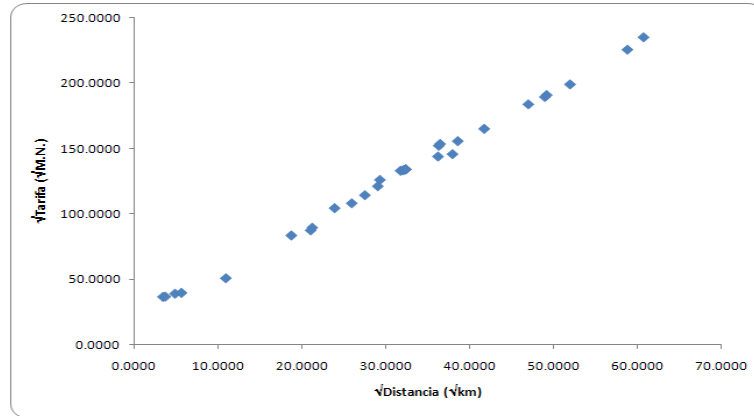


Figura 4.11: Gráfica de los datos usados para el modelo de regresión lineal.

Como se mencionó en la subsección 1.3.2 del capítulo 1, la mejor transformación que se obtuvo para las variables distancia y tarifa es la raíz cuadrada de éstas, i.e.,

$$\sqrt{y} = m\sqrt{x} + b$$

donde:

$$m = 3.4974$$

$$b = 19.6963$$

Sustituyendo  $m$  y  $b$ , y reacomodando términos, (4.1) viene a ser:

$$\frac{y}{x} = \left( 3.4974 + \frac{19.6963}{\sqrt{x}} \right)^2 \quad (4.4)$$

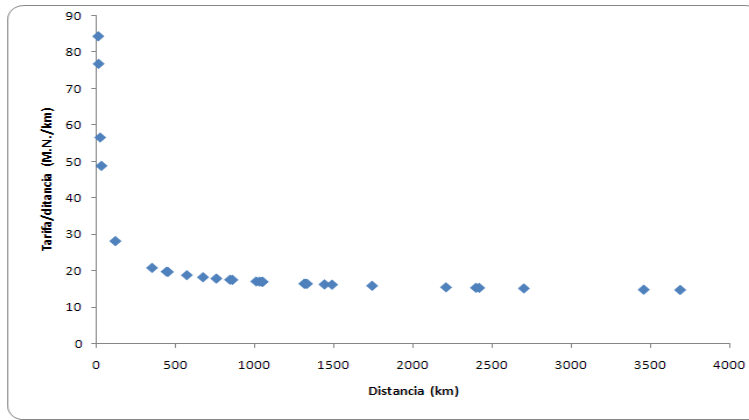


Figura 4.12: Gráfica reacomodando términos de la ecuacion (4.4).

La ecuación (4.4) imita la gráfica que estábamos buscando, como se ve en la Figura 4.13:

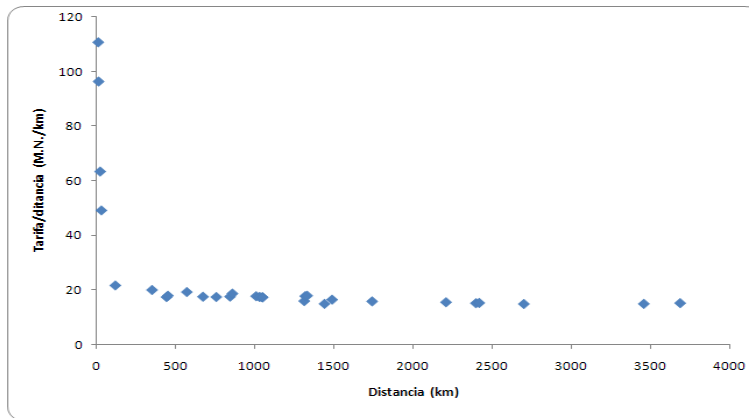


Figura 4.13: Gráfica de la función buscada originalmente para los costos de transporte de la planta cervecera de Mazatlán.

Este modelo tiene una propensión mayor a error en los valores de distancia menores a 500 km, como se muestra en la Figura 4.14.

## 4.1 Resultados para los costos de transporte

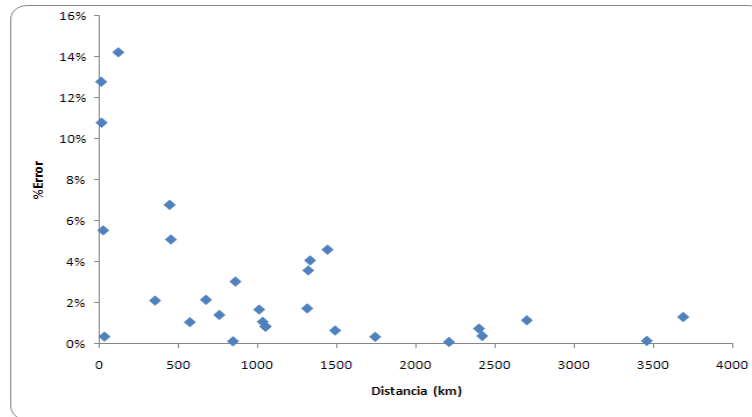


Figura 4.14: Gráfica reacomodando términos de la ecuación (4.4).

El resumen de las estadísticas es mostrado en la Figura 4.15, se observa, marcado en rojo, que los valores de la significancia de los valores de la regresión son adecuados.

SUMMARY OUTPUT							
<i>Regression Statistics</i>							
Multiple R		0.998100603					
R Square		0.996204814					
Adjusted R Square		0.996064252					
Standard Error		3.472714442					
Observations		29					
<i>ANOVA</i>							
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>		
Regression	1	85470.74467	85470.74467	7087.275928	3.18165E-34		
Residual	27	325.6131311	12.0597456				
Total	28	85796.3578					
<i>Coefficients</i>							
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>
Intercept	19.69630614	1.439598233	13.68180767	1.16662E-13	16.74249459	22.65011769	16.74249459
SQRT(Kilometraje)	3.497412702	0.041543895	84.1859604	3.18165E-34	3.412171672	3.582653733	3.412171672

Figura 4.15: Resumen de las estadísticas para el modelo de regresión realizado.

## 4.2. Resultados para modelo cervecerías

Por tratarse de un modelo de tamaño considerable, solamente se presentarán los resultados más relevantes del mismo.

### 4.2.1. Costo total

El costo total asociado a la función objetivo del modelo es de 35,437 millones de pesos, en este costo ya se encuentra considerado el costo de transporte, de almacenamiento y el de producción. En la Figura 4.16 se muestra la vista que proporciona la hoja de cálculo al presentar los resultados.

COSTO TOTAL		
<b>COSTO TOTAL</b>		<b>35,437 mdp</b>
COSTO TOTAL PRODUCCIÓN		15,001 mdp
COSTO TRANSPORTE		20,431 mdp
COSTO ALMACENAJE		6 mdp
INVENTARIO		1.64 mdp
PRE-PRODUCCION BIMESTRAL		2.15 mdp
PRE-PRODUCCION TRIMESTRAL		1.80 mdp
COSTO CIERRE PLANTA		- mdp
c1		- mdp
c2		- mdp
c3		- mdp
c4		- mdp
c5		- mdp
c6		- mdp

Figura 4.16: Vista de resultados proporcionados por el modelo.

### 4.2.2. Producción en las plantas

Uno de los resultados más relevantes de este modelo es la producción anual de cada una de las plantas. Este dato influye en los posibles escenarios a construir. En la Figura 4.17 se muestra la producción óptima obtenida para cada una de las plantas.

## 4.2 Resultados para modelo cerveceras

CDG_CERVECERIA	2010	2011	2012	2013
Cer_C1	5,000.00 miles hL	5,000.00 miles hL	5,000.00 miles hL	5,000.00 miles hL
Cer_C2	10,000.00 miles hL	10,000.00 miles hL	10,000.00 miles hL	10,000.00 miles hL
Cer_C3	3,000.00 miles hL	3,000.00 miles hL	3,000.00 miles hL	3,000.00 miles hL
Cer_C4	1,127.12 miles hL	1,166.43 miles hL	1,214.04 miles hL	1,257.66 miles hL
Cer_C5	3,471.92 miles hL	10,924.41 miles hL	9,975.12 miles hL	10,000.00 miles hL
Cer_C6	- 0.00 miles hL	- 0.00 miles hL	- 0.00 miles hL	- 0.00 miles hL
Cer_C7	11,110.89 miles hL	11,459.82 miles hL	12,296.30 miles hL	13,111.62 miles hL
Cer_C8	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C9	17,443.29 miles hL	11,204.64 miles hL	13,513.25 miles hL	14,940.74 miles hL

Figura 4.17: Producción anual en cada una de las plantas.

### 4.2.3. Inventarios y Preconstrucciones

La producción anual de cada una de las cerveceras ésta dividida entre la demanda, los inventarios y las pre-construcciones. En las figuras 4.18, 4.20 y 4.20 se muestra, respectivamente, la cantidad de inventario, la preconstrucción bimestral, y la preconstrucción trimestral óptimas que cada una de las plantas debería de estar manejando. Este número, no obedece a políticas de inventarios de ninguna índole, solamente refleja la cantidad necesaria que se debería de estar produciendo en caso de que la demanda fuera exactamente la reportada en el modelo.

CDG_CERVECERIA	2010	2011	2012	2013
Cer_C1	133.89 miles hL	355.01 miles hL	132.71 miles hL	116.78 miles hL
Cer_C2	67.85 miles hL	185.60 miles hL	273.39 miles hL	172.79 miles hL
Cer_C3	70.25 miles hL	99.64 miles hL	51.60 miles hL	99.91 miles hL
Cer_C4	9.97 miles hL	13.72 miles hL	21.09 miles hL	69.05 miles hL
Cer_C5	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C6	- 0.00 miles hL	0.00 miles hL	- 0.00 miles hL	0.00 miles hL
Cer_C7	- miles hL	- miles hL	- miles hL	0.00 miles hL
Cer_C8	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C9	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL

Figura 4.18: Producción anual de inventario para cada una de las cerveceras.



## Resultados de la Aplicación de los Modelos

CDG_CERVECERIA	2010	2011	2012	2013
Cer_C1	30.60 miles hL	- miles hL	104.13 miles hL	75.92 miles hL
Cer_C2	226.87 miles hL	276.31 miles hL	187.98 miles hL	104.40 miles hL
Cer_C3	22.54 miles hL	- miles hL	31.36 miles hL	- miles hL
Cer_C4	- miles hL	- miles hL	12.97 miles hL	29.50 miles hL
Cer_C5	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C6	0.00 miles hL	0.00 miles hL	0.00 miles hL	0.00 miles hL
Cer_C7	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C8	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C9	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL

Figura 4.19: Preconstrucción bimestral anual para cada una de las cervecías.

CDG_CERVECERIA	2010	2011	2012	2013
Cer_C1	62.51 miles hL	- miles hL	- miles hL	15.39 miles hL
Cer_C2	91.72 miles hL	1.24 miles hL	109.10 miles hL	142.66 miles hL
Cer_C3	50.90 miles hL	54.29 miles hL	54.99 miles hL	- miles hL
Cer_C4	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C5	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C6	0.00 miles hL	0.00 miles hL	0.00 miles hL	0.00 miles hL
Cer_C7	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C8	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL
Cer_C9	- miles hL	- miles hL	- miles hL	- miles hL

Figura 4.20: Pre-producción trimestral anual para cada una de las cervecías.

### 4.2.4. El cierre de las plantas

La recomendación del modelo en cuanto al cierre de plantas, fue que ninguna sea cerrada. Esto se debe a que los costos de transporte son tan altos, que el abastecer una zona natural de una planta que ha sido cerrada es demasiado costoso.

## 4.3. Resultados para el modelo de las vidrieras

Las respuestas brindadas por el modelo han sido altamente satisfactorias: se han brindado diferentes caminos para la mejora

### 4.3 Resultados para el modelo de las vidrieras

en el proceso productivo y surgieron diversas áreas de oportunidad en la planeación de la producción.

En la Figura 4.21, se presenta un plan de producción para las vidrieras.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	UEN	HORNO	MAQUINA	PRESENTACION	COLOR	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	TOTAL_DIAS
2	NF	1	11	11.5 oz	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	NF	1	11	12 oz	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	NF	1	11	24 oz	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	NF	1	11	7 oz	AMBAR	-	-	-	7	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	11
6	NF	1	11	BARRIL	AMBAR	31	30	31	-	-	-	-	-	4	31	-	6	-	30	-	163
7	NF	1	11	CHAPARRA	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	NF	1	11	FAMILIAR	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	NF	1	11	MEGA_FAMILIAR	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	NF	1	11	PREMIUM	AMBAR	-	-	-	24	28	31	28	31	26	-	31	24	31	-	20	274
260	VTB	2	22	7 oz	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	3	8	-	-	-	17
261	VTB	2	22	BARRIL	AMBAR	-	10	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	-	4	-	24
262	VTB	2	22	BARRIL 15 oz	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
263	VTB	2	22	CHAPARRA	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	22	-	-	-	28
264	VTB	2	22	FAMILIAR	AMBAR	12	-	18	22	28	26	-	25	-	-	-	-	31	18	31	211
265	VTB	2	22	MEGA_FAMILIAR	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
266	VTB	2	22	PREMIUM	AMBAR	6	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	23
267	VTB	2	23	12 oz	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
268	VTB	2	23	7 oz	AMBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	7	4	-	-	-	-	-	11
269	VTB	2	23	BARRIL	AMBAR	13	30	31	31	28	24	30	31	23	17	15	30	28	30	22	383
270	VTB	2	23	CHAPARRA	AMBAR	18	-	-	-	-	7	-	-	-	10	16	-	3	-	9	63

Figura 4.21: Parte del plan de producción para la industria vidriera. Hay que notar que se aprecia la información completa para el caso de la vidriera NF en el horno 1, máquina 11 (renglones 2-10 de la figura), y para la vidriera VTB en el horno 2, máquina 23 (renglones 267-270 de la figura).

El modelo implementado ha llevado a que la planeación de la producción se realice por una sola persona en cuestión de minutos. Anteriormente, este proceso llevaba más de una semana e involucraba a más de 2 personas, aunado a esto, la mejor solución que podía dar el personal no era ni siquiera cercana a la solución que brindó el modelo.

A pesar de todos estos beneficios que ha tenido la creación e implementación del modelo todavía sigue habiendo gran resistencia al cambio por un sector de la empresa. El crear confianza en los modelos y poder superar la resistencia al cambio es todavía uno de los retos que se tienen en la implementación del modelo del vidrio.

### 4.3 Resultados para el modelo de las vidrieras

---

# Conclusiones y Recomendaciones

---

En la parte de los costos de transporte, los resultados obtenidos se consideran altamente satisfactorios. Al aplicar los resultados a los modelos, se ha reducido el margen de error que se tenía y, sobre todo, se superó la resistencia al cambio al haber obtenido la validación por parte de Logística y Transporte. Esto es uno de los logros más importantes, y brindó, por un lado, mayor confianza en los resultados obtenidos de los modelos de programación desarrollados y, por otro lado, mejores herramientas para la toma de decisiones. Cada uno de los modelos presentados en este trabajo, cumple lo mejor posible los supuestos de una regresión lineal al hacer uso de una transformación adecuada de las variables. En estos casos, obtener la raíz cuadrada de cada una de las variables involucradas a logrado estabilizar la varianza y cumplir el supuesto de la distribución normal en los errores. Un punto muy importante en este trabajo es la limpieza que se realizó de los datos, conociendo lo que se quería medir, fue mucho más sencillo orientar a las personas para poder dar una opinión y un criterio definido para la eliminación de valores atípicos. Los modelos generados, a pesar de que provienen de una regresión lineal, se manejan algebraicamente para poder representar la función no lineal deseada, evitando realizar múltiples regresiones lineales que también deberían estar validadas.

Para la parte del modelo de cervecerías, la cantidad de hL producida ilustrada en la Figura 4.17 de la subsección 4.2.2, muestra el cómo debería ser la asignación en las plantas; sin embargo, es muy probable que existan factores que no permitan la implementación de esta solución. Algunos de estos factores pueden ser los siguientes: existencia de líneas de producción, existencia de rutas comerciales, existencia de materia prima necesaria para la producción de algún producto. Esto no implica que la solución sea errónea, sino que da la pauta para poder planificar y llevar a cabo las acciones necesarias para que las futuras asignaciones se vayan aproximando cada vez más a la que tiene el costo mínimo. Por lo tanto, cualquier decisión que se lleve a cabo deberá estar orientada hacia lograr el escenario que nos brinda el costo mínimo.

En la subsección 4.2.3 se menciona que este modelo no sigue algún tipo de política para los inventarios, no obstante, una forma rápida de manejar estas políticas es agregarlas a las restricciones de inventario. De esta manera se pueden modelar situaciones como: *el inventario de las cervecerías debe ser de al menos 14 días de la demanda del siguiente mes*, u otras similares. Este tipo de situaciones requerirían que se agregue el número de días por periodo; lo cual no será una modificación drástica del modelo.

Se debe prestar especial atención a los costos logísticos o de transporte, debido a que una mala estimación de los mismos puede llevar al direccionamiento del modelo por una solución poco factible; sin embargo, éstos costos pueden ayudarnos a darnos cuenta de que algunas plantas son muy competitivas en

costos de producción, menos en el costo de transporte, lo cual las lleva a no ser usadas a su máxima capacidad. En este caso, se sugiere llevar a cabo estrategias para que la planta comience a bajar sus costos de transporte y así, hacerla más competitiva para que naturalmente pueda absorber mayor volumen de producción.

Los cierres de las plantas deben ser complementados con la posible apertura de otras plantas. Así, los costos logísticos podrían disminuir dando paso a un cierre de planta. También se puede considerar que un posible efecto de economía de escala pueda afectar los resultados.

## Recomendaciones generales

La interacción con los responsables de diversas áreas productivas de la empresa, en el sentido de solicitarles su aprobación de los modelos propuestos, condujo a modelos robustos que ejemplifican de una manera más apegada la realidad de la empresa. De esta interacción han surgido propuestas de mejora y de implementación que son importantes, y relevantes para una mejor aproximación de la realidad. Una de las cuales es usar una función de costos que dependa del volumen producido (economía de escala) por cada una de las cervecerías y el número de productos que maneja la misma. No obstante, esta mejora o implementación trae consigo una modificación en la función objetivo que nos puede colocar (dependiendo de la función de costos) en un problema de Programación No Lineal Entera Mixta, o con el mismo problema, nada más que agregando una gran cantidad de variables enteras, lo cual, inherentemente, aumentaría el tiempo de solución del modelo.

Otra de las cosas que siempre debe mantenerse en mejora es el

### 4.3 Resultados para el modelo de las vidrieras

---

cálculo de los costos de transporte, dado que por falta de datos reales, muchas de las aproximaciones pueden resultar vagas y con altas desviaciones.

### **Trabajo futuro**

Como trabajo futuro, quedará la modelación de la proveduría de bote (o lata), cartón y demás materias primas. De esta manera, se abarcaría la totalidad de la cadena de suministros de la industria cervecera.

Claro que también queda como tarea la venta de estos modelos a la industria cervecera con el fin de obtener el apoyo económico para poder desarrollar futuras investigaciones.



# Referencias

---

- [Bertsekas, 1995] Bertsekas, D. P. (1995). *Nonlinear Programming*. Athena Scientific.
- [Bowerman and Murphee, 2009] Bowerman, B.L, O. T. and Murphee, E. (2009). *Bussiness Statistics in Practice*. McGraw-Hill IRWIN.
- [Box and Cox, 1964] Box, G. and Cox, D. (1964). An analysis of transformations. *Journal of the Statistical Society. Series B*, 26(2):211–252.
- [Chong and H.Zak, 2008] Chong, E. K. and H.Zak, S. (2008). *An Introduction to Optimization*. John Wiley.
- [Dalton, 2007] Dalton, S. (2007). *Financial applications using Excel add-in development in C/C++*. John Wiley.
- [Frederick Hillier, 2009] Frederick Hillier, G. J. L. (2009). *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- [Hall R. and Sidney, 1978] Hall R., J. J. and Sidney, H. W. (1978). Or/ms: Dead or dying? rx for survival. *Interfaces*, 8(3):42–44.
- [Kutner et al., 2005] Kutner, Nachtsheim, Neter, and Li (2005). *Applied Linear Statistical Models*. Mc Graw-Hill Irwin.

## REFERENCIAS

---

- [Laurence A. Wolsey, 1999] Laurence A. Wolsey, G. L. N. (1999). *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley-Interscience.
- [Salkin, 1975] Salkin, H. M. (1975). *Integer Programming*. Addison-Wesley Educational Publishers Inc.
- [Schrage, 2003] Schrage, L. (2003). *Optimization Modeling with Lingo*. Lindo Systems Inc.
- [Seaber and Wild, 2003] Seaber, G. and Wild, C. (2003). *Non-linear Regression*. John Wiley.
- [Shapiro, 2006] Shapiro, J. F. (2006). *Modeling the Supply Chain*. South-Western College Pub.
- [Williams, 1974] Williams, H. (1974). Experiments in the formulation of integer programming problems. *Mathematical Programming Study*, 2:180–197.
- [Williams, 1978] Williams, H. (1978). The reformulation of two mixed integer programming problems. *Mathematical Programming*, 14(1):325–331.
- [Williams, 1999] Williams, P. H. (1999). *Model building in Mathematical Programming*. John Wiley and Sons.
- [Winston, 2003] Winston, W. L. (2003). *Operations Research: Applications and Algorithms*. Duxbury Press.