



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN  
DE COSTOS EN UNA IMPRENTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

**MATÍAS ARTURO DUFÉY CARVAJAL**

PROFESOR GUÍA:  
DANIEL VARELA LOPEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RICARDO LOYOLA MORAGA  
KAREN GUTIÉRREZ FUENTES

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL  
POR: **MATÍAS ARTURO DUFEY CARVAJAL**  
FECHA: 2020  
PROF. GUÍA: DANIEL VARELA LOPEZ

## **DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE COSTOS EN UNA IMPRENTA**

La industria de la impresión gráfica en Chile ha mantenido los mismos niveles de producción y ventas desde el año 2005. El 80 % de las empresas de este rubro se encuentran distribuidas en tres regiones de Chile, de las cuales un 70 % son microempresas.

El trabajo de memoria presente es realizado en la empresa Inser Impresores, la cual ofrece servicios de impresión gráfica. Esta genera ventas sobre los 7500 millones de pesos anuales, posicionándose dentro de las imprentas más grandes del país. Sin embargo, al estar dentro de un mercado que es altamente competitivo y concentrado que no aumenta sus ventas, solo el 8 % de este monto ingresa como utilidades.

El objetivo de este trabajo de memoria es proponer modelos y soluciones que permitan disminuir los costos operacionales de Inser Impresores con el fin de aumentar la rentabilidad de la empresa a través de una mejora en la utilización de sus recursos materiales.

Un indicador de eficiencia productiva en esta industria son las mermas de materiales, es decir, el material que se pierde en la operación diaria y que no es entregado al cliente. Inser Impresores fija sus objetivos de mermas en torno a 30 %, sin embargo, estas son ampliamente superadas, provocando pérdidas de más de 133 millones de pesos al año.

Dentro de las causas de estas mermas se trabaja sobre las pérdidas generadas por el anclaje de rollos a la máquina de impresión, donde se estima que 20 % de las pérdidas totales se generan por este motivo.

Como solución se proponen tres modelos matemáticos de optimización productiva capaces de minimizar las pérdidas generadas por el anclaje de rollos. Cada modelo aborda el problema desde distintas perspectivas, pero con el mismo objetivo. El comportamiento de cada uno de ellos es evaluado simulando escenarios de demanda pasados.

Finalmente, se elige el modelo que resuelve el problema de manera más eficiente y cuya implementación es factible dentro de la empresa. El modelo se desarrolla como un programa computacional que al ser implementado junto a una serie de mejoras propuestas, podría generar un ahorro esperado de 15.1 millones de pesos anuales, aumentando en 4 % la rentabilidad del área y 2.5 % la rentabilidad de la empresa.

*Para mi familia y mis mascotas.*

# Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que formaron parte de mi etapa Universitaria, principalmente a mi familia por disponer de su apoyo incondicional durante todo este proceso.

De manera especial me gustaría agradecer a mis mascotas Luna y Nala por acompañarme durante largas tardes de estudio.

También quiero agradecer a Andrés Santander y Mauricio Magloni por permitirme desarrollar mi memoria en Inser Impresores y por disponer de su tiempo siempre que lo necesité.

Agradezco a Nicole Adaros y Macarena Zárate por su constante compromiso con los estudiantes y con la docencia.

Por último agradezco a Martín Riquelme, Tomás Sarrás, Matías Soto, Camila Aguirre, Karla Wegner, Isidora Escudero, Carlos Lea, Ignacio Nova, Ricardo Fuentes, Felipe Alvarado y Sebastián Santibañez por transformar mi experiencia universitaria en algo más que un proceso académico.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Industria publicitaria en Chile . . . . .	1
1.1.1. Ventas y producción . . . . .	1
1.1.2. Importación de materiales . . . . .	2
1.1.3. Importación de máquinas . . . . .	4
1.1.4. Importaciones de tinta . . . . .	4
1.1.5. Composición y estratificación . . . . .	4
1.2. Inser Impresores . . . . .	7
1.2.1. Empresa . . . . .	7
1.2.2. Descripción de productos . . . . .	8
1.2.2.1. Vía pública . . . . .	8
1.2.2.2. Deco Exterior . . . . .	9
1.2.2.3. Deco Interior . . . . .	9
1.2.2.4. Visibilidad de productos . . . . .	10
1.2.2.5. Difusión de marca . . . . .	11
1.2.3. Uso de máquinas . . . . .	12
1.2.4. Proceso productivo . . . . .	12
1.2.4.1. Pre-Impresión . . . . .	13
1.2.4.2. Impresión . . . . .	14
1.2.4.3. Terminaciones . . . . .	14
<b>2. Problemática y descripción del proyecto</b>	<b>16</b>
2.1. Área de trabajo . . . . .	16
2.2. Mermas productivas . . . . .	16
2.2.1. Hipótesis y alternativas de solución . . . . .	18
2.2.2. Análisis comparativo de mermas . . . . .	21
2.3. Proyecto desarrollado . . . . .	24
2.4. Objetivo general . . . . .	25
2.5. Objetivos específicos . . . . .	25
2.6. Marco conceptual . . . . .	26
2.6.1. Programación lineal . . . . .	26
2.6.2. Modelos de programación productiva . . . . .	26
2.6.2.1. Modelos discretos . . . . .	27
2.6.2.2. Modelos continuos . . . . .	28
2.7. Metodología . . . . .	28
2.8. Alcances . . . . .	29

2.9. Resultados esperados . . . . .	29
<b>3. Desarrollo de Modelos</b>	<b>30</b>
3.1. Descripción general . . . . .	30
3.1.1. Modelo completo . . . . .	30
3.1.2. Modelo parcial . . . . .	31
3.1.3. Heurística . . . . .	31
3.2. Modelamiento matemático . . . . .	31
3.2.1. Modelo completo . . . . .	31
3.2.2. Modelo parcial . . . . .	34
3.2.3. Heurística . . . . .	36
3.3. Modelamiento computacional . . . . .	37
3.3.1. Herramientas utilizadas . . . . .	37
3.3.2. Procesamiento de datos . . . . .	38
3.3.3. Modelo completo . . . . .	39
3.3.4. Modelo parcial . . . . .	39
3.3.5. Heurística . . . . .	40
<b>4. Análisis y resultados</b>	<b>42</b>
4.1. Resultados . . . . .	42
4.2. Elección del modelo . . . . .	45
4.3. Restricción adicional . . . . .	46
4.4. Recomendaciones . . . . .	47
4.4.1. Situación actual . . . . .	47
4.4.2. Beneficios de agrupar demanda . . . . .	47
4.4.3. Beneficios de contar con rollos de mayor longitud . . . . .	48
4.4.4. Ahorro total esperado . . . . .	48
<b>5. Desarrollo y uso de software</b>	<b>49</b>
5.1. Descripción del programa . . . . .	49
5.2. Desarrollo del programa . . . . .	49
5.3. Manual de uso . . . . .	50
5.4. Integración dentro del proceso productivo . . . . .	51
<b>6. Conclusión</b>	<b>52</b>
<b>7. Bibliografía</b>	<b>54</b>
<b>8. Anexos</b>	<b>55</b>
8.1. Tablas de ahorro por material . . . . .	55
8.2. Gráficos de agrupaciones promedio por modelo . . . . .	61
8.3. Códigos computacionales . . . . .	67

# Índice de Tablas

1.1. Número de pases promedio por material . . . . .	12
2.1. Ahorro anualizado 2018 . . . . .	18
2.2. Ranking mermas por material entre 06/2018 - 06/2019 . . . . .	21
2.3. Ranking $m^2$ consumidos por material entre 06/2018 - 06/2019 . . . . .	22
2.4. Ranking costo total por material entre 06/2018 - 06/2019 . . . . .	22
2.5. Ranking perdidas en CLP por material entre 06/2018 - 06/2019 . . . . .	23
2.6. Ranking varianza de mermas . . . . .	24
4.1. Variaciones en el largo de rollos . . . . .	42
4.2. Variaciones en los días agrupados . . . . .	43
4.3. Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas . . . . .	43
4.4. Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en $m^2$ agregado . . . . .	44
4.5. Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en MM CLP agregado . . . . .	44
4.6. Variaciones en los días agrupados, ahorro en $m^2$ agregado . . . . .	44
4.7. Variaciones en los días agrupados, ahorro en MM CLP agregado . . . . .	45
4.8. Variaciones en el largo de rollos, ahorro en $m^2$ agregado . . . . .	45
4.9. Variaciones en el largo de rollos, ahorro en MM CLP agregado . . . . .	45
8.1. Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en $m^2$ por material . . . . .	55
8.2. Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en MM CLP por material . . . . .	56
8.3. Variaciones en los días agrupados, ahorro en $m^2$ por material . . . . .	57
8.4. Variaciones en los días agrupados, ahorro en MM CLP por material . . . . .	58
8.5. Variaciones en el largo de rollos, ahorro en $m^2$ por material . . . . .	59
8.6. Variaciones en el largo de rollos, ahorro en MM CLP por material . . . . .	60

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Índices de venta y producción de industria de impresión publicitaria en Chile [2]	1
1.2.	Importaciones de papel autoadhesivo en Chile [2]	2
1.3.	Importaciones de papel autoadhesivo en bobinas en Chile [2]	3
1.4.	Inversión en publicidad física y digital a través del tiempo [1]	3
1.5.	Importaciones de impresoras offset en Chile [2]	4
1.6.	Importaciones de tinta offset en Chile [2]	5
1.7.	Composición industria gráfica en Chile [2]	5
1.8.	Estratificación de industria gráfica en Chile [2]	6
1.9.	Organigrama Inser Impresores	7
1.10.	Proceso de Pre - Impresión	13
1.11.	Proceso de Impresión	14
1.12.	Proceso de Terminaciones	15
2.1.	Mermas a través del tiempo	17
2.2.	Diagrama de impresoras en formato rollo	25
4.1.	Efecto de urgencia en el modelo heurístico	47
8.1.	Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado	61
8.2.	Comparativa 3 modelos; 60m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado	62
8.3.	Comparativa 3 modelos; 70m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado	62
8.4.	Comparativa 3 modelos; 80m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado	63
8.5.	Comparativa 3 modelos; 90m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado	63
8.6.	Comparativa 3 modelos; 100m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado	64
8.7.	Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 3 combinaciones, 1 día agrupado	64
8.8.	Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 4 combinaciones, 1 día agrupado	65
8.9.	Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 2 días agrupados	65
8.10.	Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 3 días agrupados	66
8.11.	Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 4 días agrupados	66
8.12.	Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 5 días agrupados	67
8.13.	Importación y concatenación	67
8.14.	Transformación de datos	68
8.15.	Intersección de bases	68
8.16.	Filtro de bases	68
8.17.	Modelamiento computacional Modelo completo	69
8.18.	Modelamiento computacional modelo parcial	70
8.19.	Modelamiento computacional modelo heurístico	71



8.20. Código del programa, primera parte . . . . .	72
8.21. Código del programa, segunda parte . . . . .	73

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Industria publicitaria en Chile

#### 1.1.1. Ventas y producción

Los índices de producción y de ventas se calculan a partir de un año base el cual define el valor 100 y de esa forma se describen los años siguientes. En el caso de la industria gráfica se cuenta con información de producción desde el año 2003, por lo que se eligió este como año base. La variación de este índice a través del tiempo se puede observar en la figura 1.1. A partir de esto se aprecia una tendencia estable en la producción entre los años 2005 y 2015. Es importante destacar que el índice sigue estando cerca de 100 y producción se ha mantenido al mismo nivel desde el año 2005, indicando que se trata de una industria consolidada.

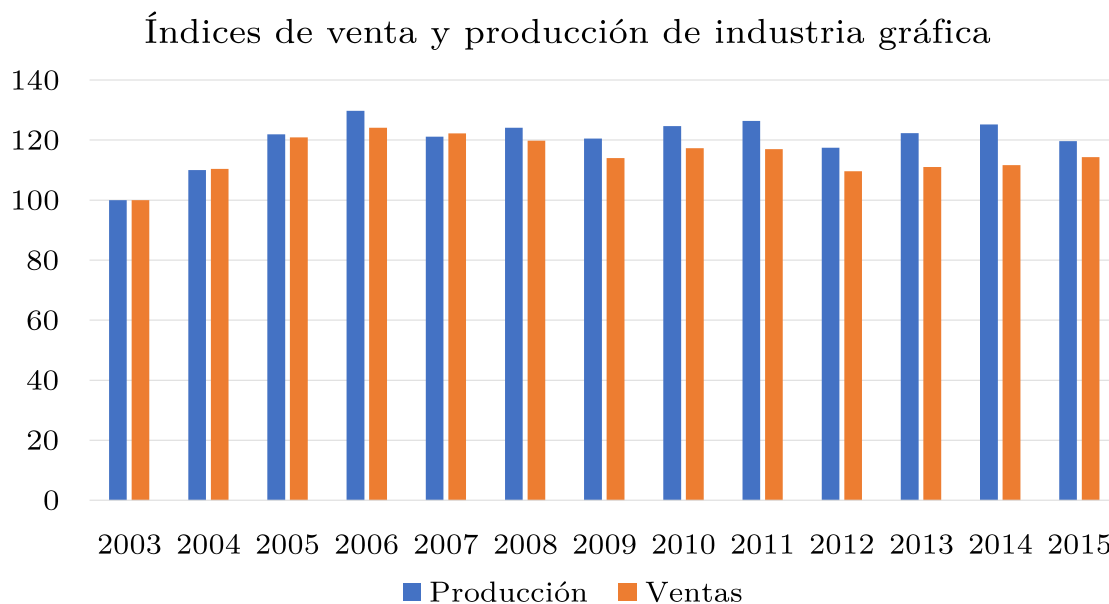


Figura 1.1: Índices de venta y producción de industria de impresión publicitaria en Chile [2]

En el caso de las ventas se tiene una tendencia estable entre los años 2005 y 2015 como se

puede observar en la figura 1.1, en donde el índice también está cercano a 100. A partir de esto se puede concluir que esta industria está en una etapa de madurez, donde la diferencia de rentabilidades entre empresas estará definida por su eficiencia productiva.

### 1.1.2. Importación de materiales

Las importaciones de papeles autoadhesivos se han mantenido entre 29 y 33 millones de dólares entre los años 2013 y 2017 como se puede observar en la figura 1.2. Se aprecia una tendencia similar a las ventas y producción de la industria gráfica durante los mismos años. Este papel autoadhesivo puede ser importado en resmas o en bobinas, siendo las bobinas el principal formato de importación tal como se expone en las figuras 1.2 y 1.3.

Este comportamiento estable observado en las importaciones de papel autoadhesivo es el mismo que se observa para el resto de las importaciones de papeles de todo tipo. El único material que ha tenido una tendencia marcada en sus importaciones es la cartulina, el cual ha aumentado en un 250% sus importaciones entre los años 2013 y 2017.

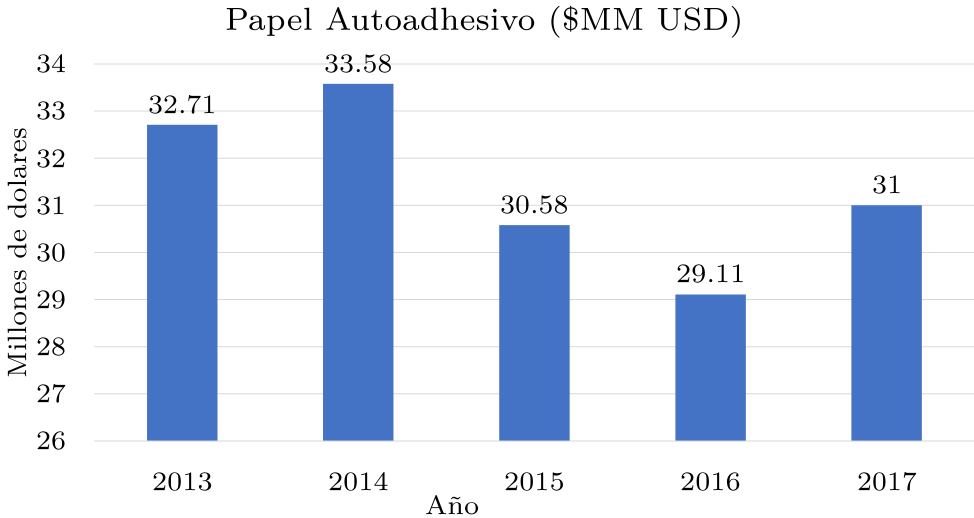


Figura 1.2: Importaciones de papel autoadhesivo en Chile [2]

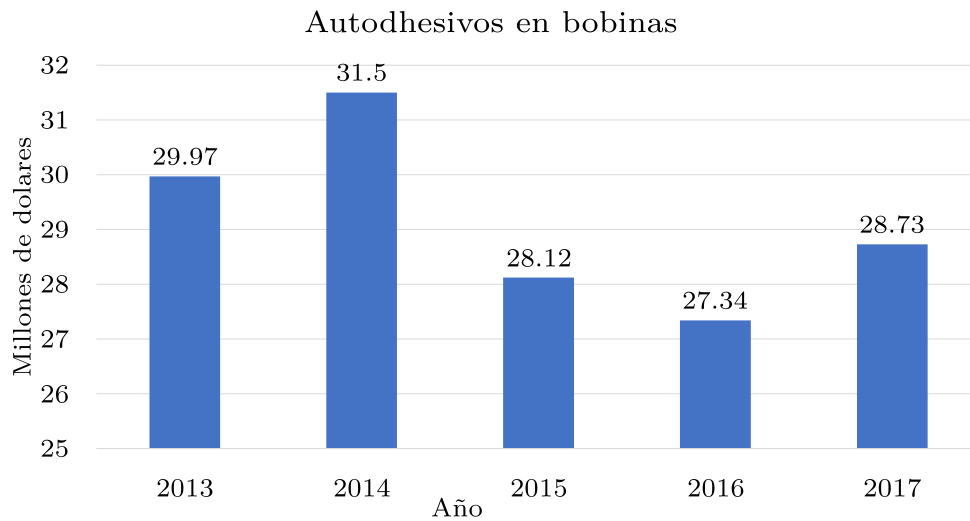


Figura 1.3: Importaciones de papel autoadhesivo en bobinas en Chile [2]

Por otro lado, la inversión en publicidad física, ya sea en diarios, revistas y vía pública, se ha mantenido relativamente constante a través del tiempo, mientras que la inversión en publicidad digital ha tenido un alza sostenida. Esto último se observa en la figura 1.4, en donde la inversión en publicidad física ha disminuido un 6.5% entre los años 2014 y 2018, mientras que la digital ha tenido un aumento de 250% en el mismo periodo. Lo anterior confirma que el mercado de impresión publicitaria se encuentra consolidado dentro de Chile.

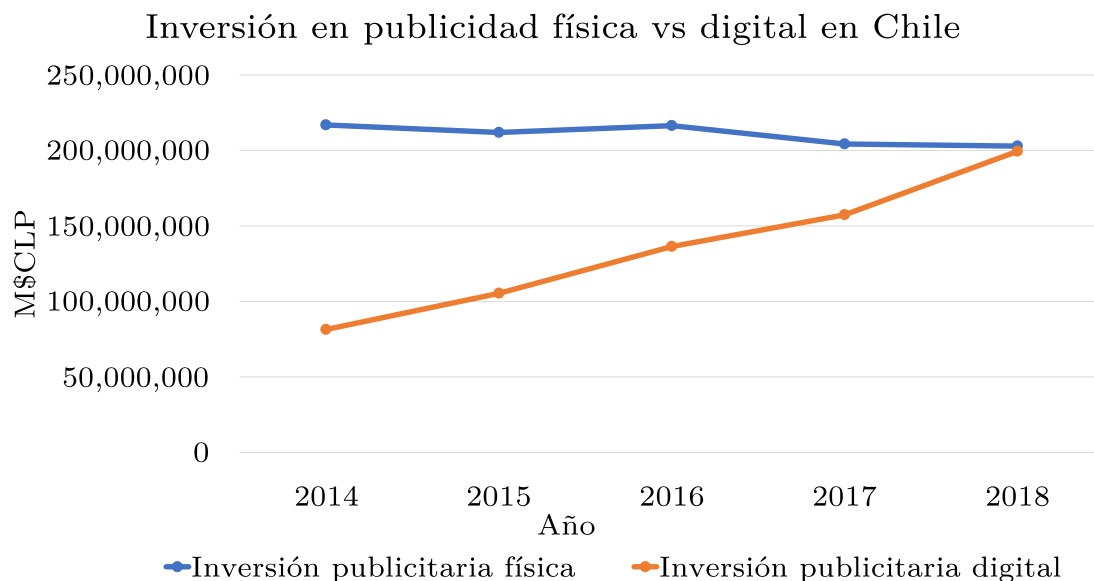


Figura 1.4: Inversión en publicidad física y digital a través del tiempo [1]

### 1.1.3. Importación de máquinas

Dentro de las máquinas utilizadas por Inser Impresores se encuentran las impresoras offset las cuales permiten imprimir imágenes de mayor tamaño que una impresora digital. Una impresora digital puede imprimir hojas de 33x48 centímetros mientras que una impresora offset imprime hojas de 70x100 centímetros. Las importaciones de estas máquinas han disminuido considerablemente entre 2013 y 2017 como se puede observar en la figura 1.5.

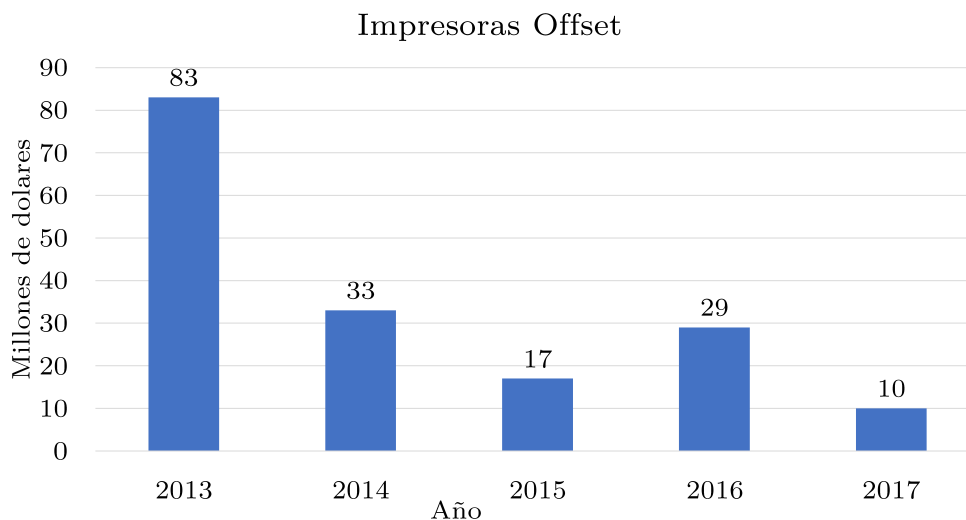


Figura 1.5: Importaciones de impresoras offset en Chile [2]

### 1.1.4. Importaciones de tinta

Las máquinas de offset utilizan un tipo de tinta específico para este tipo de tecnología. Las importaciones de tintas de offset oscilan entre 6 y 15 millones de dólares al año. A partir de la figura 1.6 se puede observar que no existe una tendencia clara en la importación de estas a lo largo del tiempo, oscilando año a año.

### 1.1.5. Composición y estratificación

Las empresas pertenecientes a la industria gráfica se encuentran principalmente en la región metropolitana concentrando más del 59% del total de empresas tal como se puede observar en la figura 1.7. La V región concentra el 9% de las empresas y la VII región un 8.5%. Esto habla de una industria concentrada en donde casi el 80% de las empresas se encuentran distribuidas en tan solo 3 regiones. Adicionalmente, se puede observar en la figura 1.8 que tan solo un 1.1% de las empresas son consideradas como grandes y el 96.4% son pequeñas o microempresas. Dado que Inser Impresores vende más de 7500 millones de pesos al año cae dentro de la categoría de empresa grande. La empresa genera 600 millones de pesos en utilidades, de las cuales se estima que 360 millones son generados por el área de impresión gran formato.

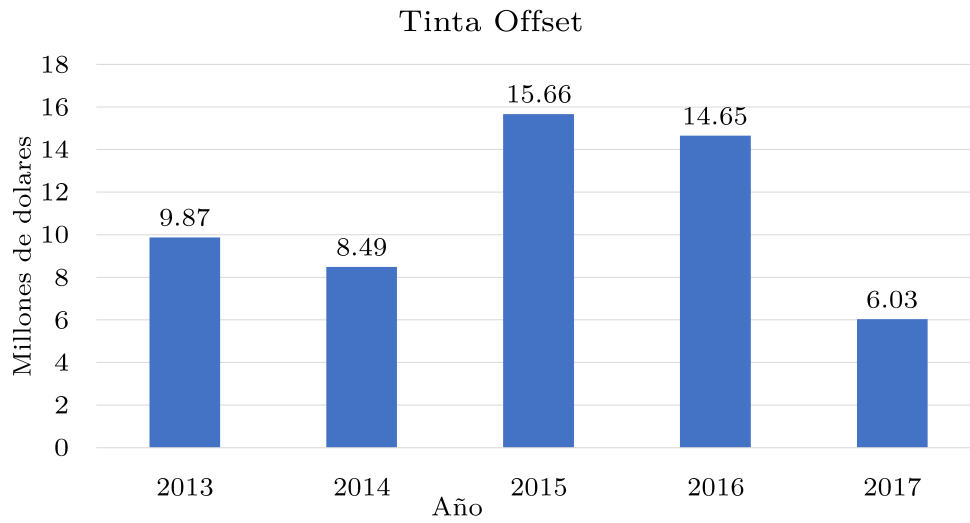


Figura 1.6: Importaciones de tinta offset en Chile [2]

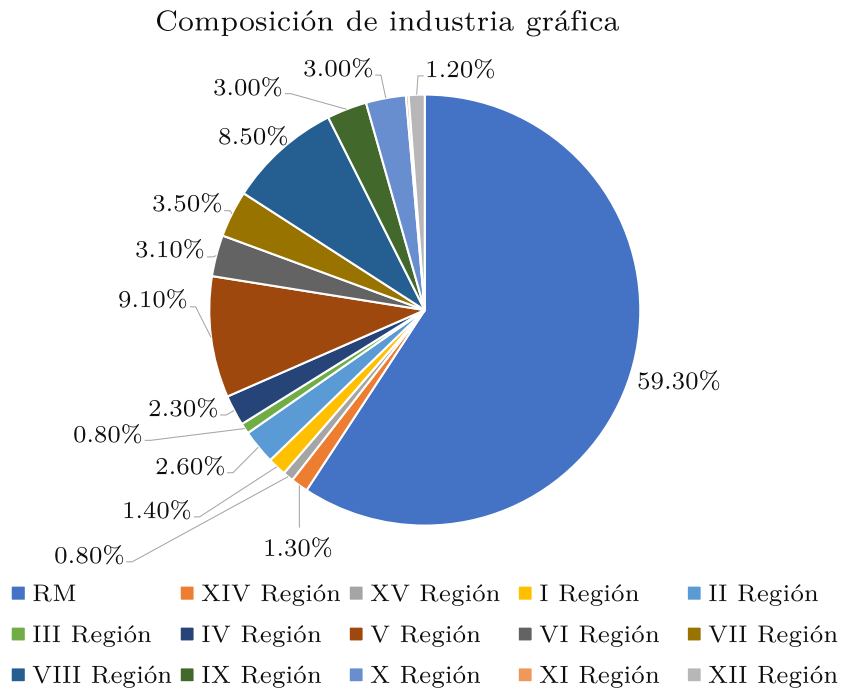


Figura 1.7: Composición industria gráfica en Chile [2]

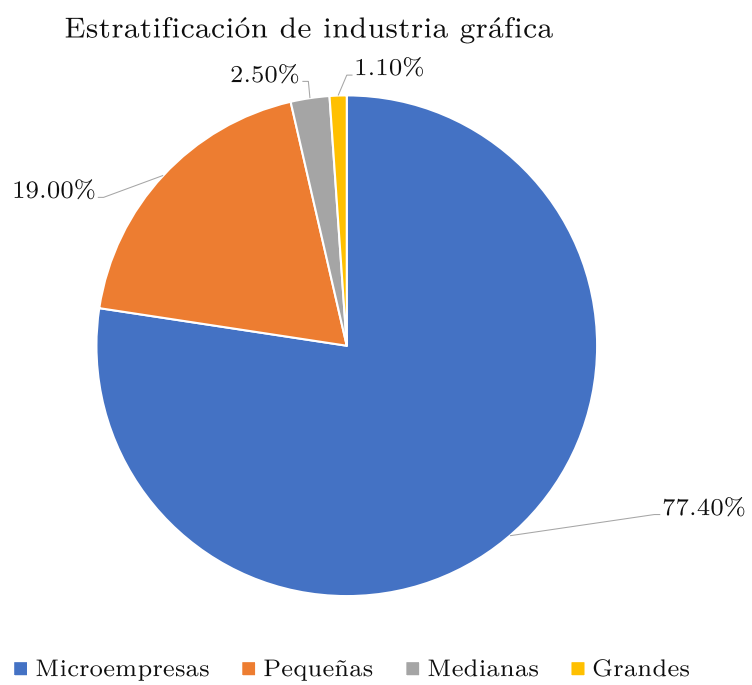


Figura 1.8: Estratificación de industria gráfica en Chile [2]

## 1.2. Inser Impresores

### 1.2.1. Empresa

Inser Impresores es una empresa con más de 50 años de experiencia dentro del rubro de Impresión Publicitaria. La empresa imprime productos para puntos de ventas, publicidad y vía pública. Se pueden destacar gigantografías, lienzos, afiches, pendones, adhesivos, letreros, señaléticas, volantes y estructuras, entre otros. Adicionalmente, se ofrece el servicio de despacho a todo Chile y servicios de implementación/instalación de gráficas. Estos productos y servicios son ofrecidos a clientes de una amplia gama de industrias, tales como retail, supermercados, banca y farmacéutica. Actualmente la empresa tiene más de 400, clientes de los cuales se destacan Jumbo, Santa Isabel, Walmart, Unimarc, Tottus, Banco Estado, Banco Chile, Banco Santander, Salcobrand, Johnsons y Ripley. Estos clientes son atendidos dentro de una única sucursal ubicada en San Isidro 1992. Dentro de esta sucursal la estructura organizacional es tal y como se representa en la figura 1.9.



Figura 1.9: Organigrama Inser Impresores



## 1.2.2. Descripción de productos

La empresa cuenta con una amplia variedad de productos publicitarios, los cuales se dividen en 5 categorías: Vía pública, Deco exterior, Deco interior, Visibilidad de productos y Difusión de marca. Los productos se describen a continuación.

### 1.2.2.1. Vía pública

- Fachada: Elemento para cubrir edificios o grandes estructuras/construcciones. Los materiales recomendados para esta aplicación son Tela PVC / Malla Mesh.
- Laterales buses: Elemento usado en la parte lateral de buses para atraer la atención de conductores y transeúntes. El material recomendado para esta aplicación es PVC Adhesivo Removible.
- Rotulación de vehículos: Elemento utilizado para cubrir vehículos con carrocerías lisas o corrugadas. De acuerdo a la duración de la campaña se determina el material a ser utilizado. El material recomendado para esta aplicación es PVC Adhesivo Específico/-Laminados.
- Parasol: Elemento utilizado en el vidrio delantero de los vehículos. Los materiales recomendados para esta aplicación son Carton Microcorrugado/Cartulina/PAI.
- Paraderos: Elemento publicitario en paraderos de buses donde la creatividad del diseño logra captar la atención de pasajeros y transeúntes. El material recomendado para esta aplicación es PVC Adhesivo Removible.
- Lunetas: Elemento usado en la parte trasera de automóviles y buses para atraer la atención de conductores y transeúntes. Los materiales recomendados para esta aplicación son PVC Adhesivo Removible/Window Vision.
- Gigantografías: Elemento de gran formato, monumentales, vallas publicitarias, entre otros. Los materiales recomendados para esta aplicación son Tela PVC / Malla Mesh /PVC Adhesivo.
- Banderas: Elemento utilizado sobre distintas estructuras que permite posicionarlo en diversidad de lugares. Los materiales recomendados para esta aplicación son Textil.
- Adhesivo piso: Elemento utilizado en pisos exteriores. Productos específicos para superficies como asfalto o cemento. El material recomendado para esta aplicación es PVC Adhesivo Específico.

### 1.2.2.2. Deco Exterior

- Vitrinas: Mueble cerrado de cristal que expone artículos a la venta. Los materiales recomendados para esta aplicación son PVC Adhesivo Removible/Window Vision/PVC Adhesivo Doble Faz.
- Lienzos: Elementos utilizados tanto en altura como a nivel de piso. Se utilizan múltiples sistemas para fijarlos, tensados a bastidores, con amarras plásticas o colgados con hilos o piolas. Dependiendo del material elegido se les puede dar forma troquelándolos. Los materiales recomendados para esta aplicación son Tela PVC/Malla Mesh/Trovicel.
- Pórticos: Estructura publicitaria con forma de arco. Los materiales recomendados para esta aplicación son Trovicel, Trupán, Fomecor, Cartón Panal, Cartón Corrugado y Cartón Microcorrugado.
- Cajas de luz: Elemento retroiluminado, impreso con una saturación tal, que ya sea prendido o apagado, la gráfica se vea bien. Inzer Impresores es pionero en impresión de textiles para cajas de luz, con materiales certificados y una calidad extraordinaria. Los materiales recomendados para esta aplicación son Tela PVC Backlight/Backlight Film/PVC Adhesivo Traslúcido/Textil Backlight.
- Pizarras: Los materiales recomendados para esta aplicación son Madera impresa o con adhesivo pegado con soporte de apoyo metálico.
- Palomas: Estructura con gráfica de forma triangular autosoportante que permite exhibir gráfica por dos de sus lados. El material recomendado para esta aplicación es Tela PVC con estructura de madera/metal.
- Cubre alarma: Elemento que cubre las alarmas de seguridad en la entrada de una tienda, adaptables a las distintas dimensiones de las alarmas existentes. Los materiales recomendados para esta aplicación son Textil/Tela PVC/Cartulina/Cartón Microcorrugado/Madera.
- Pendones: Elemento vertical con travesaños arriba/abajo o pletina inferior para mejorar su caída. Se usan generalmente colgados por una tripolida desde algún soporte simple como un clavo, o un porta pendón trípode. Los materiales recomendados para esta aplicación son Tela PVC con travesaños de aluminio/pvc.

### 1.2.2.3. Deco Interior

- Tótem: Estructura vertical con una función específica. Los materiales recomendados para esta aplicación son Cartulina/Fomecor/Trovicel/Cartón Panal/ Trupán, dependiendo del uso y durabilidad deseados.

- Pendón roller: Elemento compuesto por gráfica y una estructura de aluminio de simple traslado e instalación. Permite tener una base para exhibir la gráfica en cualquier lugar independiente de la existencia de un soporte para ello, ya que posee su propia estructura. La elección del material depende del tipo de presentación que se requiera. Los materiales recomendados para esta aplicación son Tela PVC/Textil/Papel Sintético.
- Panel Araña: Estructura con gráfica de fácil transporte y armado. Los materiales recomendados para esta aplicación son PAI/Textil.
- Colgantes: Elemento que, como su nombre lo indica, se usa colgado de un cielo de alguna construcción. Se pueden dar las más variadas formas troquelándolos. Los materiales recomendados para esta aplicación son Trovicel/PAI/Fomecor/Cartulina Emplacada/-Cartón Corrugado/Textil con estructura.
- Parlantes: Los materiales recomendados para esta aplicación son Acrílico/Trovicel/PAI/Fomecor/Cartulina/Emplacado.
- Cenefas: Los materiales recomendados para esta aplicación son Tela PVC/Trovicel/Textil/PVC Adhesivo laminado UV.

#### 1.2.2.4. Visibilidad de productos

- Porta precio: Elemento que permite presentar de manera sencilla los precios de los productos vendidos. Los materiales recomendados para esta aplicación son Acrílico/Mica/PAI/PVC cristal/PTG.
- Exhibidores: Elemento cuya función es mostrar una serie de productos de manera ordenada y segura, destacándolos dentro de un espacio común. Los materiales recomendados para esta aplicación son Trupán/Cartón Panal/Cartón Corrugado/Cartón Microcorrugado.
- Stoppers: Elemento publicitario para adosar en gondola. Los materiales recomendados para esta aplicación son Trovicel/Fomecor/Cartulina Emplacada/PAI.
- Muros: Se puede utilizar cualquier muro como elemento publicitario, existe una diversidad de adhesivos para casi todas las superficies existentes. Solo se debe tener cuidado con los muros pintados, donde se recomienda hacer pruebas de adhesión. El material recomendado para esta aplicación es PVC Adhesivo Específico.
- Muebles: Los materiales recomendados para esta aplicación son Trupán/Cartón Panal.
- Gráficas carro: Elementos publicitarios sobre carros de supermercados u otro tipo de carro. El material recomendado para esta aplicación es PAI.

- Flejes: Elemento que describe generalmente productos en góndolas. Los materiales recomendados para esta aplicación son Cartulina/PAI/Papel.
- Vibrines: Elemento publicitario colgante. Los materiales recomendados para esta aplicación son Mica/Cartulina/PAI/Papel.
- Micas: El material recomendado para esta aplicación es PVC Rígido Transparente. El espesor a utilizar dependerá del uso final del producto requerido. Este producto puede ser impreso con tintas que simulen folia, con colores especiales y aplicación de barnices.

#### 1.2.2.5. Difusión de marca

- Carpetas y archivadores: Artefactos de almacenamiento y organización de papeles. Los materiales recomendados para esta aplicación son Papeles con terminaciones como polilaminado, cuño, folia, barniz con reserva, entre otros. También existen las carpeta tipo archivador, producto de mayor duración con protección plástica y mecanismo de argollas para archivar hojas.
- Cuadernos: Cuadernos corporativos, cuadernos de notas, entre otros. Un producto totalmente personalizado de acuerdo a los requerimiento de cada cliente. Distintos tipos de tapas, encuadernación, cierre imantado, entre otros. Para el interior, una diversidad de papel, impresos full color o simplemente blancos, lo que cada cliente necesite. El material recomendado para esta aplicación es Papel.
- Libros: Los materiales recomendados para esta aplicación son Papel.
- Chapitas: Botones sobre un trozo de metal que puede ser sujeto temporalmente a una superficie. El material recomendado para esta aplicación es Papel con soporte metálico.
- Credenciales: Elementos de identificación. Los materiales recomendados para esta aplicación son PAI y PVC Rígido.
- Volantes: El material recomendado para esta aplicación es Papel.
- Afiches: Los materiales recomendados para esta aplicación son Cartulina/Fomecor/-Trovicel/PAI/Papel.
- Cupones: El material recomendado para esta aplicación es Papel con terminación de prepicado
- Imantados: Elemento que se adhiere a superficies metálicas. El material recomendado para esta aplicación es Imantado.

- Catálogos: Los materiales recomendados para esta aplicación son Papel y Papel Mineral. Para este producto existe una gran cantidad de terminaciones y efectos para lograr un producto destacado. Polilaminados, troqueles, barnices, cuños y folias, son algunos de estos.
- Etiquetas: Los materiales recomendados para esta aplicación son Papel Adhesivo/PVC Adhesivo Permanente.

### 1.2.3. Uso de máquinas

La intensidad del uso de máquinas por material se puede representar a través del número de pases promedio. Esta métrica indica cuántas veces el cabezal de la impresora pasa por el mismo punto. Esto se decide en el momento de la impresión y dependiendo de las características del material puede requerir una mayor o menor cantidad de pases para obtener una impresión de buena calidad. Es importante destacar que un mayor número de pases significa un mayor consumo de tinta y tiempo de uso de máquina. En la tabla 1.1 se observa en detalle el número de pases promedio por material.

Material	Pases promedio
Trupán	4.0
Textil	3.8
Tela blacklight	3.7
Tela blackout	3.5
Laminado	3.0
Trovicel	2.8
Papel sintético	2.7
Tela PVC	2.6
Adhesivos	2.6
Papeles	2.5
Telas	2.4
Adhesivos 3M	2.4
PAI	2.3
Fomecor	2.1
Cartulinas	2.1
Cartón	2.0

Tabla 1.1: Número de pases promedio por material

### 1.2.4. Proceso productivo

El proceso productivo tiene tres macro procesos, Pre-Impresión, Impresión y Terminaciones, los cuales están representados en las figuras 1.10, 1.11 y 1.12 respectivamente. Estos tres procesos se conectan a través de un sistema propio de la empresa que cuenta con un servidor que almacena y actualiza el estado de cada orden de proceso. El diseño de los diagramas en esta sección fueron diseñados como parte del trabajo de memoria en base a entrevistas. Den-

tro de los diagramas que se presentan dentro de esta sección, cabe destacar que la notación OP hace referencia a una orden de proceso.

### 1.2.4.1. Pre-Impresión

En el proceso de impresión existen tres actores involucrados, un diseñador, un cliente y un planificador. El diseñador se encarga de trabajar sobre el diseño entregado por el cliente con el fin de adaptar lo mejor posible el producto final a lo solicitado. En esta etapa es donde se toman todas las decisiones sobre cómo se va a imprimir la orden de proceso. Se elige el material a utilizar, la máquina para imprimir, se definen las terminaciones requeridas y se distribuye la imagen sobre el plano. El diseñador utiliza el software Photoshop para editar imágenes, Illustrator para vectores y iDesigner para realizar diagramas. Adicionalmente, se utiliza el software iCut para optimizar patrones de impresión sobre un plano y agregar las marcas necesarias para que la máquina de recorte láser pueda cortar de manera precisa. Cada pedido es altamente específico al cliente que lo solicita, por lo tanto dentro de la figura 1.11 el diseño queda representado como un subproceso que cambia dependiendo del caso. En esta etapa es donde se presenta al cliente un "visto bueno" que contempla una representación preliminar de lo que el solicitó. Esto último es de suma importancia dado que el cliente debe firmar el producto, lo cual queda como respaldo ante un posible reclamo por una discrepancia entre lo entregado y lo solicitado.

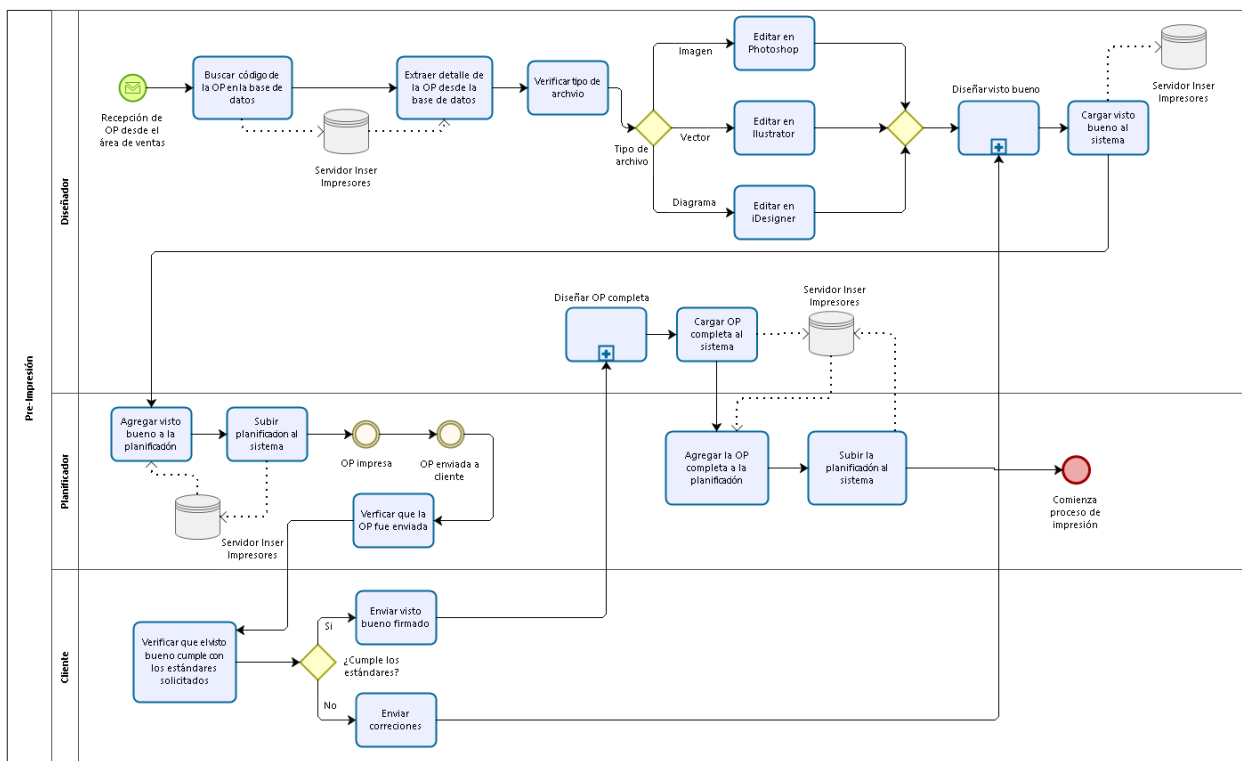


Figura 1.10: Proceso de Pre - Impresión

### 1.2.4.2. Impresión

El proceso de impresión cuenta con dos actores, un operador y un jefe de impresión. El jefe de impresión es quien elige finalmente qué orden de proceso se imprime y en qué orden basándose en la planificación. El operador debe revisar que el estado de la máquina permita imprimir sin errores, para esto se realizan periódicamente impresiones de prueba y mantenimientos a las máquinas. Dentro de la zona de impresión se tienen porciones de material utilizado recientemente los cuales son reutilizados cuando el largo lo permite. Es por esto que antes de imprimir una orden de proceso se debe verificar primero si se cuenta con un material disponible en la zona de impresión antes de buscar en bodega. Luego de imprimir correctamente el producto, este es enviado a terminaciones para realizar los recortes correspondientes.

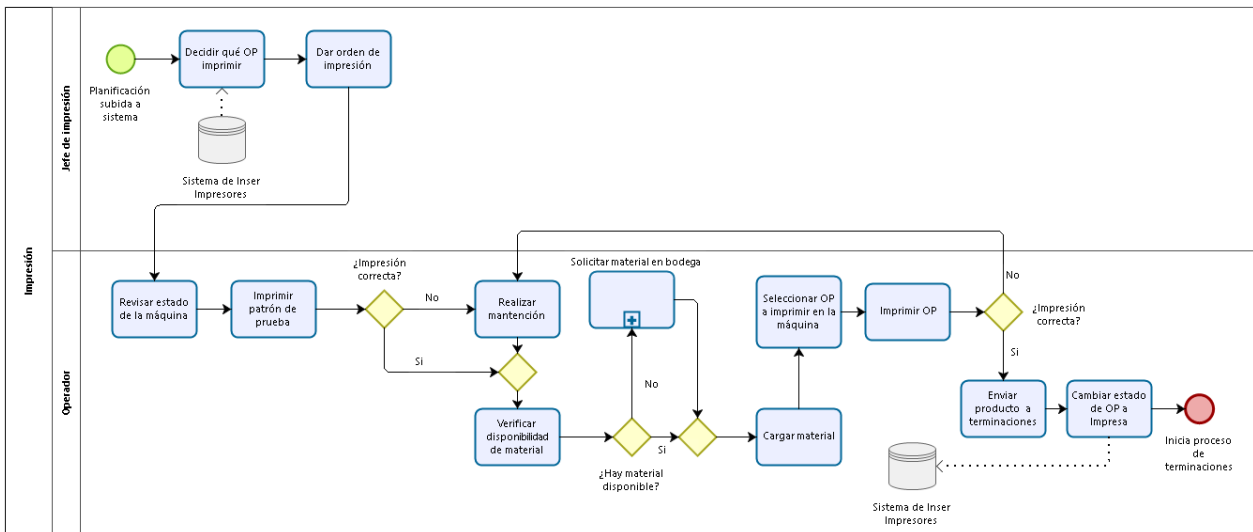


Figura 1.11: Proceso de Impresión

### 1.2.4.3. Terminaciones

El proceso de terminaciones tiene dos actores, el jefe de terminaciones y un operador. El jefe de terminaciones descarga la base de órdenes impresas y planifica la secuencia de trabajo en función de los plazos de entrega. El operador realiza todas las operaciones de terminaciones detalladas en la orden las cuales fueron fijadas en el proceso de pre-impresión. Una vez listo el producto, este es entregado a la unidad de despacho para ser entregado finalmente al cliente.

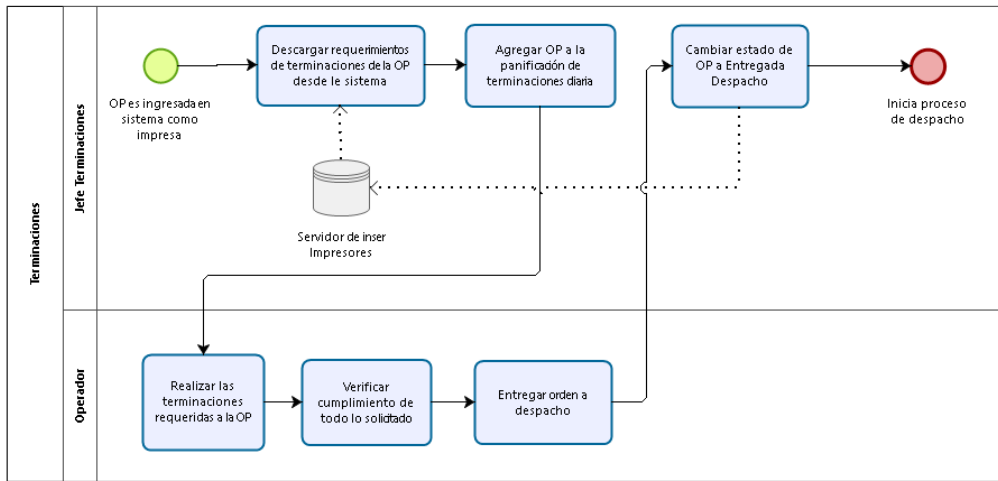


Figura 1.12: Proceso de Terminaciones



# Capítulo 2

## Problemática y descripción del proyecto

### 2.1. Área de trabajo

El trabajo se realizará en el área de Impresión Gran Formato la cual tiene tres subáreas, Pre-Impresión, Impresión y Terminaciones. Tal como lo indica su nombre, esta área está dedicada a elaborar impresiones grandes que se caracterizan por tener dimensiones de hasta 5 metros de ancho y 100 metros de largo dependiendo del pedido. Esta área a su vez está dentro del área de gestión de operaciones, donde actualmente trabajan más de 60 personas. Los perfiles profesionales de los colaboradores en esta área son diseñadores gráficos y estudiantes de escuelas gráficas. La gerencia de operaciones será el beneficiario principal de esta investigación y el solicitante de este trabajo es el gerente de esta área. Es importante destacar que esta área genera el 60 % de las ventas y utilidades de la empresa, lo que significa ventas por más de 4500 millones de pesos anuales y utilidades de 360 millones de pesos anuales.

### 2.2. Mermas productivas

Una merma productiva se define como el porcentaje de material extra necesario para imprimir un producto de determinadas dimensiones. Para efectos prácticos, a lo largo de este documento se calculará la merma en función de los  $m^2$  extraídos desde la bodega contra los  $m^2$  entregados al cliente por cada material. Matemáticamente esto queda expresado de la siguiente forma:

$$\text{Merma} = \frac{100 * (m^2 \text{ Material extraído de bodega} - m^2 \text{ Material entregado a cliente})}{m^2 \text{ Material entregado a cliente}}$$

Es decir, una merma del 30 % significa que para cada 100  $m^2$  entregado al cliente se necesitó 130  $m^2$  de material extraído de bodega. Es importante destacar que los  $m^2$  entregados al cliente se calculan sobre el cuadrado más pequeño que puede contener la figura impresa.

La gerencia general de Inser Impresores tiene como objetivo ser una empresa más rentable

con foco en la eficiencia de sus procesos productivos. Por otro lado, la gerencia de operaciones no está cumpliendo con sus objetivos de mermas, los cuales fueron fijados en torno al 30 % pero en la práctica se llega a 80 % en algunos materiales tal como se puede observar en la Figura 2.1. En la tabla 2.1 se calculó el ahorro que se hubiese tenido en 2018 si se hubiese llegado a estas mermas objetivo. Este ahorro supera los 133 millones de pesos. Cabe destacar que este valor es el ahorro máximo esperado del desarrollo del proyecto de memoria y la meta es ahorrar la mayor fracción posible del mismo. El valor final del proyecto se obtendrá simulando la implementación de la propuesta de mejora en escenarios de demanda anteriores. Solucionar este problema completamente significaría un aumento del 37 % en la rentabilidad del área y 22 % en la rentabilidad total de la empresa. También significaría un ahorro del 13 % en los costos de materiales del área, un aumento del 6.5 % en el margen operacional de la empresa y 9.5 % dentro del área.

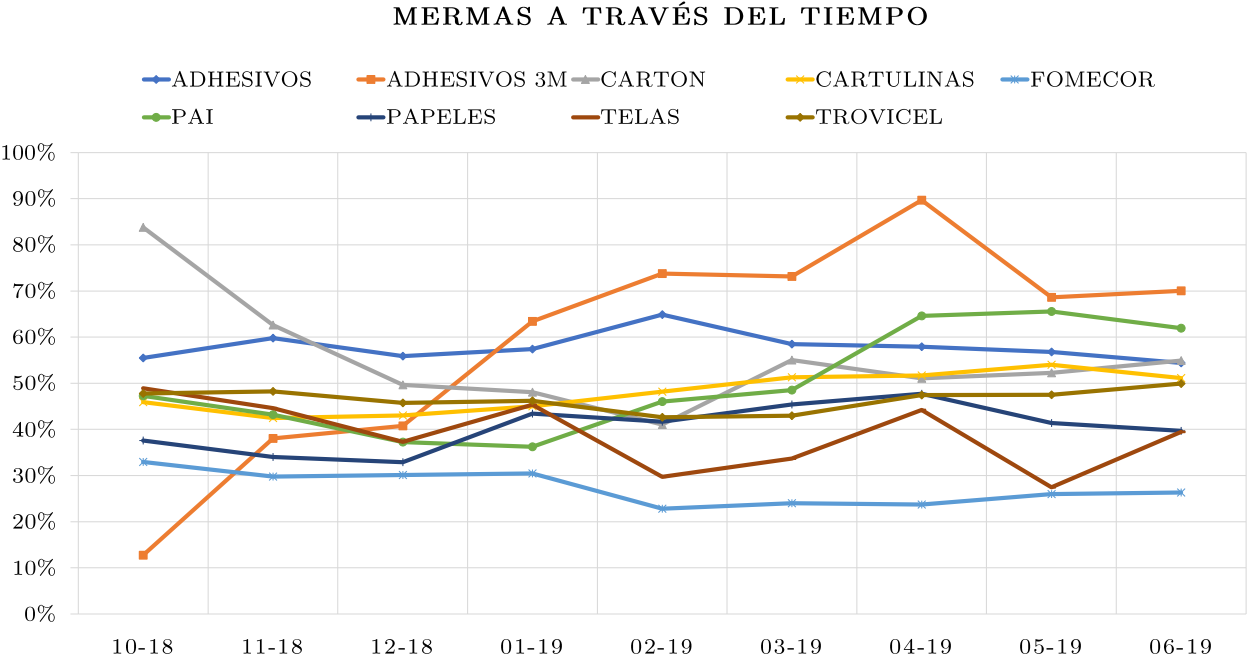


Figura 2.1: Mermas a través del tiempo

Además del efecto monetario que genera este exceso de mermas existe un efecto en el medioambiente. Actualmente Inser Impresores declara lo siguiente en su política medioambiental:

“Inser Impresores, la gestión de nuestra huella ambiental es una parte integral de nuestra filosofía de negocio. Estamos completamente comprometidos a llevar a cabo nuestras actividades de negocio de una manera ambientalmente responsable y sostenible, así como a minimizar las implicaciones ambientales de las mismas.”

Por lo tanto, el alto nivel de mermas de materiales genera como efecto el incumplimiento de su política medioambiental al utilizar más recursos de lo necesarios para la elaboración de sus productos. Esto genera más desechos y aumenta la huella ambiental de la empresa.

Sustrato	Costo sustrato (\$CLP)	Bodega ( $m^2$ )	Venta ( $m^2$ )	Merma del periodo	Merma objetivo	Ahorro anualizado (\$CLP)
Adhesivos	661	61,603	39,857	54.6 %	30 %	19,411,998
Adhesivos 3M	5,500	7,773	4,592	69.3 %	30 %	29,751,455
Cartón	1,804	17,154	11,469	49.6 %	20 %	18,350,157
Cartulinas	267	57,11	43,541	31.2 %	25 %	2,149,973
Fomecor	1,125	57,825	44,108	31.1 %	20 %	16,518,956
Otros	1,262	4,957	2,984	66.1 %	30 %	4,083,027
Pai	1,928	12,053	8,784	37.2 %	20 %	8,744,875
Papeles	531	41,312	32,154	28.5 %	30 %	-777,145
Telas	447	127,509	92,679	37.6 %	30 %	9,420,476
Textitl	2,049	4,621	1,799	156.8 %	30 %	14,028,497
Trovicel	1,658	12,971	8,771	47.9 %	20 %	12,166,786

Tabla 2.1: Ahorro anualizado 2018

### 2.2.1. Hipótesis y alternativas de solución

Se plantean hipótesis y alternativas de solución para resolver el problema. La elaboración de estas hipótesis y el descarte de las mismas se realizó en conjunto con el gerente de operaciones.

Hipótesis 1: Los diseños son colocados de manera ineficiente sobre el plano de impresión.

- Descripción: Si bien la empresa cuenta con un software que optimiza en cierta medida los patrones de impresión sobre un plano, cabe la posibilidad de que al esperar que llegue otro pedido durante el día este podría tener una mejor compatibilidad de dimensiones con lo que se envió a imprimir previamente.
- Propuesta solución: Agrupar la mayor cantidad de pedidos antes de optimizar los patrones de impresión.
- Motivo de descarte: Se decide descartar esta hipótesis debido a que el mayor aporte que se podría realizar en esta etapa desde la ingeniería industrial es el modelo de optimización de patrones el cual ya está implementado a través de un software especializado. Se entregará como recomendación agrupar la mayor cantidad de diseños posibles antes de optimizar.

Hipótesis 2: Los formatos de los materiales comprados y utilizados son inadecuados para el requerimiento del cliente.

- Descripción: Los materiales que utiliza Inser tienen medidas predeterminadas, las cuales son elegidas al momento de comprar el suministro a los proveedores. Estos proveedores tienen más de una medida por cada material, por ejemplo, existen cartulinas de 20x30 y de 35x50. Existe la posibilidad de que, para ciertos pedidos, utilizar ciertas medidas de un material signifique un mejor ajuste al diseño que otras, aprovechando de mejor manera el recurso. Es por esto que se plantea esta hipótesis, ya que es posible que

las medidas de los materiales que compra Inser no sea la mejor dado los pedidos de sus clientes.

- Propuesta solución: Realizar un modelo de predicción de demanda de productos según sus medidas con el fin de contar con un stock de materiales de medidas que permitan responder de manera eficiente a la demanda estimada.
- Motivo de descarte o validación: Se descarta esta hipótesis debido a que la naturaleza del negocio no permite realizar una estimación de las medidas de los productos que se pedirán en un futuro en base a la historia. Esto se debe a que los pedidos son altamente especializados y específicos a cada requerimiento en particular [4].

Hipótesis 3: Existe robo de materiales una vez que se extraen de bodega.

- Descripción: Dada la fórmula de mermas, se plantea la posibilidad de que el material se pierda entre que sale de bodega y se imprime debido a un robo del mismo.
- Propuesta solución: Evaluación económica de implementar un sistema de seguridad con cámaras para disminuir el robo.
- Motivo de descarte o validación: Se decide descartar esta hipótesis debido a que no existen datos sobre robos de materiales de la bodega, lo que dificultaría el desarrollo y justificación del tema de memoria.

Hipótesis 4: Costo elevado de carga de máquinas junto con una tasa elevada de recambio.

- Descripción: Cada máquina tiene un costo de inicialización de actividad, esto es particularmente alto en el caso de los rollos de impresión que deben ser anclados a la máquina, por lo que se estima que se pierde 4 metros de largo de material en cada carga de un rollo. Es por esto que cabe la posibilidad de que se esté perdiendo material por una mala programación de carga y descarga, lo cual al combinarse con un costo elevado de inicialización de actividad, genera que se pierda material sistemáticamente.
- Propuesta solución: Realizar un modelo de programación de impresión que minimice el costo de carga y descarga de máquina según los pedidos que ingresan en el día.
- Motivo de descarte o validación: Se valida esta hipótesis, esta será la hipótesis sobre la cual se desarrollará la memoria. Se verificó la información en terreno y el orden de impresión es por orden de llegada, por lo que no existe un sistema que agende los pedidos de manera eficiente. Adicionalmente, se observó que en el caso de las telas y autoadhesivos la pérdida de carga y descarga es mayor al resto de los materiales. Esto último es fundamental dado que son los materiales con mayores mermas y los autoadhesivos 3M son el sustrato más caro de todos como se puede observar en la tabla 2.1. Por esta razón se eligió esta hipótesis ya que presenta potencial de ahorro importante, es factible implementar un modelo matemático que reduzca las mermas y lo más relevante es que se tienen los datos históricos de impresión de todas las máquinas facilitando el desarrollo del proyecto y el modelo. Gracias a estos datos se podrá calcular

directamente el ahorro esperado que se tendrá luego de una posible implementación.

Hipótesis 5: Los operadores de máquinas realizan malas prácticas.

- Descripción: Los que operan las máquinas podrían realizar malas prácticas que signifiquen una mayor utilización de material. Un ejemplo de esto fue un caso en donde para laminar una cartulina que tenía tamaño menor al material de laminado, se utilizó una cartulina más grande debajo de la cartulina pequeña para ajustar el laminado. Esto fue una solución rápida al problema, sin embargo, significó utilizar más del doble del material requerido en un comienzo.
- Propuesta solución: Realizar un diagnóstico del comportamiento organizacional de la empresa para comprender el motivo de estas malas prácticas y cómo evitarlas.
- Motivo de descarte o validación: Se decide descartar esta hipótesis dado que no existe una forma eficaz y concreta de medición de pérdidas por malas prácticas.

Las siguientes hipótesis (6, 7, 8 y 9) tienen como efecto común la reimpresión del material. Por lo tanto, se considerará que pertenecen a una hipótesis mayor que corresponde a la existencia de una alta tasa de reimpresión de los productos y lo que se describe a continuación son las posibles causas de por qué se reimprimen los productos.

Hipótesis 6: Elevada tasa de fallo de maquinaria de impresión.

- Descripción: Cuando la impresión es defecutosa debido a una falla en la máquina de impresión, todo el material impreso debe ser desechado.
- Propuesta solución: Realizar un modelo de predicción de falla para realizar las mantenciones antes de que se produzca la falla.

Hipótesis 7: Elevada tasa de fallo de maquinaria de recorte.

- Descripción: Cuando existe una falla en la máquina de cortes el producto final es defectuoso, lo que implica que se debe reimprimir el diseño.
- Propuesta solución: Realizar un modelo de predicción de falla para realizar las mantenciones antes de que se produzca la falla.

Hipótesis 8: Pérdida del producto final en bodega.

- Descripción: Los productos finales son empaquetados en bultos, los cuales se almacenan en una bodega junto a todos los productos terminados. Es común que se extravíen bultos dentro de la bodega debido al desorden y falta de organización de esta. Esto genera que se deben reimprimir los productos para cumplir con los plazos acordados en un comienzo.
- Propuesta solución: Proponer un reordenamiento de la bodega que permita acceder a los pedidos de manera fácil y rápida. Implementar sistema de códigos de barra.

Hipótesis 9: Alta tasa de cambios de diseño una vez impreso el material.

- Descripción: Cuando un producto es impreso cabe la posibilidad de que tenga un error dentro del diseño lo cual implicaría reimprimir el producto.
- Propuesta solución: Creación de un protocolo que permita verificar el diseño final una vez acabado y reduzca la probabilidad de fallo.

Las hipótesis 6, 7, 8 y 9 se descartan por la siguiente razón:

En 2018, se reimprimió un promedio mensual de  $500 m^2$  de material de un total de  $70.000 m^2$ , esto explica un 0.7% de las mermas. Por este motivo se descartan todas estas hipótesis, dado que la reimpresión de materiales no explica la elevada tasa de mermas sea cual sea el motivo de reimpresión.

### 2.2.2. Análisis comparativo de mermas

Los materiales con mayores porcentajes de merma son textil, adhesivos y cartón respectivamente siendo los primeros dos trabajados en forma de rollos. Esto último se puede observar en la tabla 2.2.

Sustrato	Formato	Merma
Textil	Rollos	144 %
Adhesivos	Rollos	59 %
Carton	Planas	56 %
Pai	Pliego	51 %
Trovicel	Planas	47 %
Cartulinas	Planas	47 %
Telas	Rollos	39 %
Adhesivos 3M	Rollos	39 %
Papeles	Rollos	39 %
Fomecor	Planas	27 %

Tabla 2.2: Ranking mermas por material entre 06/2018 - 06/2019

Por otro lado, los materiales con mayor consumo en  $m^2$  son las telas, cartulinas y adhesivos respectivamente. Tanto las telas como los adhesivos son trabajados en formato de rollo. A partir de la tabla 2.3 se concluye que el 55% del consumo de materiales proviene de materiales trabajados en este formato.

Sustrato	Formato	Consumo $m^2$
Telas	Rollos	326.001
Cartulinas	Planas	231.133
Adhesivos	Rollos	209.700
Fomecor	Planas	164.720
Papeles	Rollos	107.672
Carton	Planas	64.972
Trovicel	Planas	42.280
Pai	Pliego	36.100
Adhesivos 3M	Rollos	15.641
Textil	Rollos	12.698

Tabla 2.3: Ranking  $m^2$  consumidos por material entre 06/2018 - 06/2019

Los materiales en que más dinero se gasta son fomecor, telas y adhesivos respectivamente. A partir de la tabla 2.4 se extrae que el 47% de los costos de materiales provienen por sustratos en formato rollos.

Sustrato	Formato	Costo Total
Fomecor	Planas	\$185.258.876
Telas	Rollos	\$145.691.812
Adhesivos	Rollos	\$138.604.359
Carton	Planas	\$117.203.541
Adhesivos 3M	Rollos	\$86.031.433
Trovicel	Planas	\$70.115.554
Pai	Pliego	\$69.612.862
Cartulinas	Planas	\$61.721.763
Papeles	Rollos	\$57.127.357
Textil	Rollos	\$26.023.613

Tabla 2.4: Ranking costo total por material entre 06/2018 - 06/2019

Los materiales que generan una mayor cantidad de pérdidas debido a su exceso de mermas con respecto a los objetivos fijados son los adhesivos, fomecor y trovicel respectivamente. A partir de la tabla 2.5 se observa que el 78% de las pérdidas son generadas por materiales con formato rollos.

Sustrato	Formato	Pérdida CLP
Adhesivos	Rollos	\$33.395.073
Fomecor	Planas	\$25.512.069
Trovicel	Planas	\$16.147.441
Pai	Pliego	\$15.346.040
Textil	Rollos	\$11.982.558
Telas	Rollos	\$10.117.826
Adhesivos 3M	Rollos	\$8.381.676
Papeles	Rollos	\$6.023.060
Cartulinas	Planas	\$1.633.913
Carton	Planas	-\$39.248.015

Tabla 2.5: Ranking perdidas en CLP por material entre 06/2018 - 06/2019

Existen diferencias considerables en las varianzas de mermas de los materiales a través del tiempo. Como se observa en la tabla 2.6, los adhesivos 3M tienen la mayor varianza en sus mermas. Dentro de esta misma tabla se muestra el porcentaje de la producción total que representa dicho material y se extrae que los materiales con menor consumo, por lo general, poseen mayor varianza en sus mermas a través del tiempo. Es más, si se toma la suma de las varianzas de los primeros 4 materiales con mayor varianza, se llega a un total de 10,1% en donde estos representan tan solo el 10,7% de la producción total, mientras que si se aplica el mismo razonamiento para el resto de los 6 materiales se obtiene una suma total de 1.3% y estos representan el 89,3% de la producción total. En resumen, los 4 materiales que representan tan solo el 10% de la producción total tienen más de 7 veces la varianza que los 6 materiales que representan el 89% de la producción total. Las razones por las que se genera este fenómeno son las siguientes:

1. Tener una menor producción de productos de un material implica tener menos órdenes al día, esto genera que el software de optimización de patrones tenga pocas posibilidades de distribuir más patrones sobre el mismo plano. Por lo tanto, estos productos son más sensibles a los requerimientos entregados por el cliente. Esta razón está directamente relacionada con lo expuesto en la hipótesis 1.
2. En el caso de productos impresos en rollos, tener un bajo volumen de metros cuadrados impresos significa que el costo de carga de rollo representa un porcentaje mayor de pérdida por orden. Por ejemplo, un producto impreso en tela de ancho 3 metros y largo 25 metros tiene  $75 m^2$ , pero al cargar el rollo se pierden  $12 m^2$ , lo que significa un 13.7% de merma por esta causa. Por otro lado, un producto impreso en adhesivo 3M, de 3 metros de ancho y tan solo 10 de largo tiene  $30 m^2$  y pierde los mismos  $12 m^2$ , lo que significa un 28% de merma. Si bien en el ejemplo esta diferencia se produce por la diferencia entre los largos de ambos productos, esto está directamente relacionado con el volumen de producción de dicho material. Esto último se genera debido a que una orden generalmente contiene un diseño repetido más de una vez sobre el plano, por lo tanto, un menor volumen de impresión genera por lo general órdenes de menor largo, aumentando los costos de carga de rollo. Esto se explica también en la hipótesis 4.
3. Tener un menor volumen de producción para un material en particular genera que este



sea más sensible a reimpressiones y malas prácticas, hipótesis 6, 7, 8 y 9. Esto es lógico puesto que un error genera un impacto mucho más grande cuando se imprime menos, lo que aumenta la varianza de las mermas a través del tiempo.

Por lo tanto, los incrementos y disminuciones de mermas en materiales como adhesivos 3M, cartón y PAI se deben a que tienen una mayor sensibilidad a fallas dado su volumen de producción.

	Varianza de mermas	Porcentaje de producción total
Adhesivos 3M	5,6 %	1,3 %
Textil	1,8 %	1,0 %
Cartón	1,5 %	5,4 %
PAI	1,3 %	3,0 %
Telas	0,6 %	26,9 %
Papeles	0,2 %	8,9 %
Cartulinas	0,2 %	19,1 %
Fomecor	0,1 %	13,6 %
Adhesivos	0,1 %	17,3 %
Trovicel	0,1 %	3,5 %

Tabla 2.6: Ranking varianza de mermas

## 2.3. Proyecto desarrollado

El proyecto se desarrolla dentro del área de impresión gran formato en la empresa Inset Impresores. Tal como se pudo observar en la tabla 2.5, los materiales que se trabajan en formato rollo constituyen un 78 % de las pérdidas sobre los objetivos de la empresa. Por esto último se decidió trabajar con este formato para generar una solución con el mayor impacto posible. Una de las principales diferencias productivas entre estos materiales y los que son trabajados en planas o pliegos es que deben ser anclados a la impresora a ambos costados.

Tal como se puede observar en la figura 2.2, el solo hecho de cargar un material significa desaprovechar 4 metros a lo largo de material. Si se toma en consideración que cada rollo puede llegar a medir hasta 5 metros de ancho, esto significa una pérdida de hasta  $20 m^2$  por cada vez que se carga un rollo. Sobre este problema se desarrolla el proyecto, buscando implementar un modelo matemático que minimice el cambio de rollo mediante la agrupación de pedidos sobre un mismo material. Para esto se desarrollan 3 modelos matemáticos y luego se comparan entre sí utilizando métricas tales como número de agrupaciones promedio y tiempos de ejecución. Finalmente, se elige el modelo que mejor se ajuste a las necesidades de la empresa y se entrega a la misma un manual de uso para una eventual implementación del modelo en sus procesos.

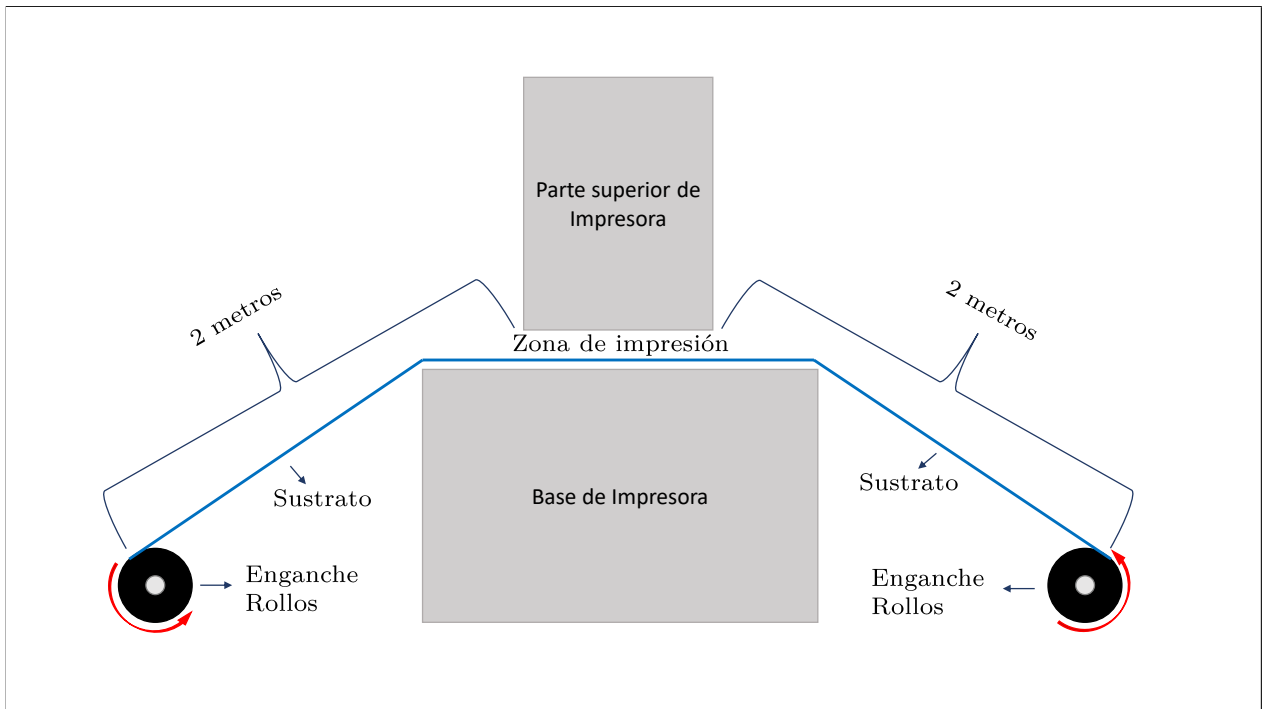


Figura 2.2: Diagrama de impresoras en formato rollo

## 2.4. Objetivo general

Proponer modelos y soluciones que permitan disminuir los costos operacionales de In-ser Impresores para aumentar la rentabilidad de la empresa a través de una mejora en la utilización de sus recursos materiales.

Para la medición de cumplimiento del objetivo general se debe realizar una comparación entre las mermas promedio que tiene Inser Impresores actualmente y el ahorro esperado que se tendría luego de implementar los cambios y modelos propuestos. El objetivo se cumplirá si el costo operacional disminuye.

## 2.5. Objetivos específicos

1. Modelar el proceso productivo para que la gerencia de operaciones pueda visualizar la etapa específica en donde se integra la solución propuesta.
2. Analizar las mermas por cada tipo de material para que la solución propuesta se enfoque en los materiales más afectados.
3. Crear un modelo matemático y un software que lo implemente para que la gerencia de operaciones pueda utilizarlo en su proceso productivo.
4. Diseñar un manual de uso del software diseñado para facilitar la implementación de la solución por parte de la gerencia de operaciones.

## 2.6. Marco conceptual

### 2.6.1. Programación lineal

La programación lineal es la optimización (maximización o minimización) de una función lineal mientras se satisfacen un conjunto de igualdades o desigualdades lineales [3].

A continuación, se presentarán definiciones de conceptos básicos para la programación lineal.

Función objetivo ( $Z$ ): Es la ecuación que se pretende maximizar o minimizar. Se construye de la forma  $x_1 * c_1 + x_2 * c_2 + x_3 * c_3 + \dots + x_n * c_n$ .

Variables de decisión ( $x_i$ ): Son las incógnitas que deben ser determinadas a partir de la solución del modelo.

Coefficientes de costos ( $c_i$ ): Parámetros que acompañan a las variables de decisión dentro de la función objetivo.

Restricciones: Conjunto de igualdades o desigualdades que limitan los valores que pueden tomar las variables de decisión a un conjunto acotado.

### 2.6.2. Modelos de programación productiva

Los modelos de programación productiva se comenzaron a desarrollar desde los inicios de la programación lineal. Estos modelos han sido aplicados satisfactoriamente en industrias químicas [6] [5], petroleras [8] y eléctricas [7]. Para abordar esta problemática los modelos se dividen en dos categorías: Modelos discretos y modelos continuos [4].

Ambas categorías comparten tres aspectos en común: asignación de recursos a tareas, secuenciación y sincronización de actividades. Dependiendo de la complejidad del problema se pueden generar subdivisiones dentro de las mismas.

Según complejidad de secuencia existen dos grupos:

1. Procesos secuenciales: Todos los productos siguen la misma secuencia al ser procesados. Solo se puede tener una unidad por etapa.
2. Procesos representados por redes: Procesos más complejos donde no todos los productos siguen la misma secuencia de producción, por lo que se deben establecer condiciones de flujo en cada etapa. Se aplica generalmente cuando los productos a elaborar comparten pocas similitudes.

Según complejidad en recambio de carga:

1. Dependencia secuencial: Cuando se requiere realizar un ajuste en la máquina entre la carga y descarga de cada producto, como por ejemplo limpiar cabezales de la máquina de impresión.
2. Dependiente de frecuencia: La carga y descarga se debe realizar luego de un determinado intervalo de tiempo.

Según forma de procesamiento de productos:

1. Procesamiento en lotes: Ingresa el suministro y luego de un tiempo se genera el producto final.
2. Procesamiento continuo: Tanto el suministro como el producto final son ingresados y extraídos de manera continua.

El objetivo general de un modelo de programación productiva puede ser uno de los siguientes:

1. Minimizar el tiempo de producción
2. Minimizar costos productivos
3. Maximizar utilidades

### 2.6.2.1. Modelos discretos

En los modelos discretos de programación productiva el horizonte de tiempo corresponde a intervalos de duración uniforme. La ventaja principal de utilizar esta representación del tiempo es que define una segmentación de tiempo común para todas las operaciones que utilizan un mismo recurso. Esto facilita considerablemente la definición de restricciones temporales y el modelamiento del problema. Una de las componentes más comunes de estos modelos es la asignación de productos a tareas específicas. Para modelar estas asignaciones se define una variable binaria  $W_{i,j,t}$  para determinar si la tarea (i) se asigna al recurso (j) en el intervalo de tiempo (t). Esto permite definir de manera sencilla las restricciones de asignación, formuladas de la siguiente forma:

$$\sum_{i \in I_j} W_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (2.1)$$

$$\sum_{i' \in I_j} \sum_{t'=t}^{t+\alpha_{i,j}-1} W_{i',j,t'} - 1 \leq M(1 - W_{i,j,t}) \quad \forall j \in J, i \in I_j, t \in T \quad (2.2)$$

Donde  $I_j$  es el conjunto de tareas que pueden ser realizadas en el recurso (j),  $\alpha_{i,j}$  es el tiempo de procesamiento de la tarea (i) en el recurso (j) y M es un número positivo lo suficientemente grande. La restricción (1) indica que en cada intervalo de tiempo se puede realizar a lo más una sola tarea en el recurso (j). La restricción (2) indica que una vez que inicia una tarea en un recurso no se puede usar dicho recurso hasta que trascorra un tiempo  $\alpha_{i,j}$ .

Los modelos discretos tienen dos desventajas. Por definición, al utilizar una discretización del tiempo solo se está trabajando con una aproximación de la realidad, lo cual no es suficiente en algunos casos en donde se requiere precisión. La segunda desventaja es que si se desea aumentar la precisión discretizando en intervalos más pequeños el costo computacional aumenta considerablemente.

### 2.6.2.2. Modelos continuos

Dada las limitaciones de los modelos discretos se ha trabajado para desarrollar modelos en tiempo continuo. En estos modelos el tiempo no queda definido entre intervalos si no que se considera como una variable continua lo que complejiza la definición de las restricciones.

Para estos modelos las restricciones varían caso a caso y dependen de la complejidad de la secuencia. Sin embargo, estos tienen en común la definición de las siguientes variables de decisión:  $Y_{i,j}$  binaria que representa si se asigna el producto (i) a la tarea (j);  $X_{i,i',L}$  binaria que define si el producto (i) precede a otro producto (i') en la etapa (L);  $C_{i,L}$  tiempo de término del producto (i) en la etapa (L).

## 2.7. Metodología

A continuación, se detallará la metodología a seguir para abordar la problemática planteada.

1. Levantamiento del proceso productivo. La información sobre los procesos se solicita al gerente de operaciones. Adicionalmente, se realizan visitas para verificar toda la información recibida en terreno. Se entrevista a las partes involucradas dentro de cada proceso con el fin de obtener una visión global del sistema productivo.
2. Modelación del proceso en el software Bizagi. Se utiliza la información recopilada para modelar el proceso en este software. El objetivo de este punto es observar gráficamente cada una de las etapas del proceso productivo. De esta forma se pueden aislar las etapas para poder analizarlas por separado. Para la realización de este modelo se utiliza notación BPMN.
3. Análisis comparativo de los materiales con mayores porcentajes de pérdida. Se analizan y clasifican los materiales según sus mermas y se identificarán las causas de las diferencias entre cada uno de los materiales. El objetivo de esta etapa es comprender en profundidad las diferencias en mermas entre productos.
4. Proponer modelos matemáticos que permitan resolver el problema. Se plantean tres distintos modelos que resuelven el problema desde distintas perspectivas.
5. Analizar factibilidad de la propuesta de solución para los materiales con mayores porcentajes de pérdidas. En esta etapa se busca comprender en qué tipos de materiales los modelos matemáticos propuestos son factibles de ser aplicados y en cuáles tendría mayor impacto. También se busca volver a plantear soluciones luego de tener la información adicional.
6. Desarrollar el modelo matemático que permita implementar la solución planteada. En esta etapa se ajustan los modelos de manera tal que pueda ser factible su implementación.
7. Validar los resultados del modelo. Se calculan los ahorros obtenidos para validar que

tenga un impacto relevante sobre el problema

8. Desarrollo de manual de uso para poder implementar el entregable final en el caso de que la gerencia de operaciones lo desee. Esta etapa busca facilitar la integración del modelo matemático al proceso productivo en el caso de ser implementado.

## 2.8. Alcances

Para el desarrollo del proyecto se definen los siguientes alcances.

1. Dado los plazos para la entrega del proyecto, se decide no resolver todas las causas del problema, sino que se abordará la causa con mayor impacto siempre y cuando sea factible resolverla.
2. Dentro del proyecto no está considerada la implementación de las propuestas de mejora, dado que involucraría recursos que no se tienen actualmente.
3. Para este proyecto se busca trabajar con la información disponible de las máquinas, trabajadores y la gerencia de operaciones. Para el desarrollo de este se limitará a trabajar con esta información y no habrá un enfoque a recopilar nuevos datos que no se tienen. Es por esto que las soluciones propuestas estarán dirigidas a los procesos que cuenten con información cuantitativa de a lo menos un año.

## 2.9. Resultados esperados

A continuación, se especifican los productos que se obtendrán a partir de este proyecto.

1. Modelo de proceso productivo actual modelado en notación BPMN en el software Bizagi. Este modelo permitirá a la gerencia de operaciones visualizar de manera gráfica el proceso productivo. Esto será útil al momento de tomar decisiones para implementar cambios en el proceso en un futuro.
2. Análisis comparativo de materiales con mayores mermas. Al cuantificar el porcentaje de mermas para todos los materiales, la gerencia de operaciones podrá enfocarse en implementar medidas que apunten a los materiales más afectados.
3. Modelo matemático que permita reducir las mermas en la carga y descarga de máquinas. Este es el entregable final.
4. Manual de uso del modelo matemático. Esto permitirá a la gerencia de operaciones implementar el modelo en el caso que lo estipulen necesario.

# Capítulo 3

## Desarrollo de Modelos

### 3.1. Descripción general

Los 3 modelos desarrollados buscan resolver el mismo problema abordándolo desde distintas perspectivas. Si bien el objetivo es minimizar el cambio de rollos, esto se puede hacer maximizando el número de agrupaciones sobre los planos. Por ejemplo, si se tienen 4 órdenes y se imprimen por separado, se deben realizar 4 cambios de rollos, pero si estas son agrupadas sobre un mismo plano, solo se debe realizar 1 cambio de rollo. La forma en que se realicen estas agrupaciones tiene un impacto directo en cuantos cambios de rollo se pueden ahorrar, dado que se debe considerar el largo de las órdenes y sus materiales para que la agrupación sea compatible. El modelo completo contempla todas las formas de agrupación posible y retorna la que maximiza el número de agrupaciones. El modelo parcial resuelve parcialmente el problema y no contempla todas las soluciones posibles, si no que un subconjunto de las mismas. Por otro lado, el modelo heurístico retorna 1 posible solución, la cual no necesariamente es la mejor.

#### 3.1.1. Modelo completo

Este modelo busca encontrar la forma de agrupación óptima de órdenes. Se considera que, para realizar una agrupación, se debe cumplir que los materiales de las órdenes sean los mismos y que el largo de la agrupación total no supere el largo máximo de los rollos. Para encontrar el óptimo, este modelo evalúa todas las combinaciones posibles y retorna la combinación que maximice el número de agrupaciones. Es por esto que el modelo contempla un tipo de variable, que indica si un conjunto de ordenes serán agrupadas. Luego se plantean tres conjuntos de restricciones, los cuales definen la compatibilidad de materiales, capacidad de los rollos y las restricciones entre todas las variables binarias creadas. Finalmente, se maximiza el número de agrupaciones dentro de la función objetivo. Es importante destacar que este modelo alcanza el óptimo global, es de decir, la mejor de todas las soluciones posibles.

### 3.1.2. Modelo parcial

Este modelo busca encontrar una buena alternativa de agrupación de órdenes. En su construcción es bastante similar al modelo completo, dado que tiene las mismas variables y restricciones. Sin embargo, no se resuelve el problema completo, si no que se resuelven pequeñas partes de este para llegar a una solución cercana a lo que sería el óptimo global, es decir, se llega a un óptimo local. Para lograr esto, se resuelven subproblemas que contemplan un máximo de dos órdenes agrupadas en cada iteración y finalmente a través la suma de dichas soluciones construye el resultado final. Al aplicar este método es posible acercarse al óptimo global siendo mucho más eficiente desde un punto de vista computacional, dado que resolver pequeños subproblemas en vez de problema completo requiere menos trabajo.

### 3.1.3. Heurística

Este modelo busca alcanzar de manera rápida una forma de agrupación de órdenes. Esencialmente no constituye a la resolución de un problema de optimización como en los casos anteriores. En un número reducido de iteraciones se alcanza una de las posibles agrupaciones de órdenes, siendo esta no necesariamente la mejor opción. En este sentido, no se llega a un óptimo local o global, simplemente se alcanza una solución factible dentro del problema, que contempla las mismas restricciones que los dos modelos descritos anteriormente. Para lograr esto, se diseña un algoritmo, en donde se toma una orden y se intenta agrupar con todas las órdenes disponibles. Luego, una vez se prueba con todas las ordenes disponibles o el rollo ya no tiene capacidad de más agrupaciones, se elige otra orden y se repite el proceso, esto se detiene una vez se prueba con todas las órdenes disponibles.

## 3.2. Modelamiento matemático

Para resolver el problema se proponen tres modelos matemáticos capaces de reducir las mermas provocadas por el cambio de rollos. Si bien estos tienen el mismo objetivo, abordan el problema desde distintas perspectivas. El primer modelo se llamará Modelo completo, el segundo Modelo parcial y el tercero Heurística.

### 3.2.1. Modelo completo

Este modelo busca maximizar la cantidad de agrupaciones de órdenes dentro de un mismo rollo. Para eso se consideran todas las combinaciones posibles hasta un máximo número de combinaciones permitidas.

Conjuntos

$\mathbb{D}$ : Conjunto de días

$\mathbb{O}_d$ : Conjunto de órdenes disponibles en el día  $d \in \mathbb{D}$

Parámetros

$L_i$ : Largo de la orden en centímetros con  $i \in \mathbb{O}_d$



$M_i$ : Material de la orden  $i \in \mathbb{O}_d$

$N$ : Máximo de agrupaciones

$LR$ : Largo máximo de rollos

Variables

$$x_{i,j}^d = \begin{cases} 1 & \text{Si se agrupan las órdenes } i, j \text{ en el día } d \\ 0 & \text{Si no} \end{cases} \quad \forall i, j \in \mathbb{O}_d \quad (3.1)$$

$$x_{i,j,k}^d = \begin{cases} 1 & \text{Si se agrupan las órdenes } i, j, k \text{ en el día } d \\ 0 & \text{Si no} \end{cases} \quad \forall i, j, k \in \mathbb{O}_d \quad (3.2)$$

$\vdots$

$\vdots$

$$x_{i,j,\dots,n}^d = \begin{cases} 1 & \text{Si se agrupan las órdenes } i, j, \dots, n \text{ en el día } d \\ 0 & \text{Si no} \end{cases} \quad \forall i, j, \dots, n \in \mathbb{O}_d \quad (3.3)$$

Función objetivo

$$\max \sum_{(i,j) \in \mathbb{O}_d} 1 * x_{i,j}^d + \sum_{(i,j,k) \in \mathbb{O}_d} 2 * x_{i,j,k}^d + \dots + \sum_{(i,j,\dots,n) \in \mathbb{O}_d} (N - 1) * x_{i,j,\dots,n}^d \quad \forall d \in \mathbb{D} \quad (3.4)$$

Restricciones de compatibilidad de material

$$M_i * x_{i,j}^d = M_j * x_{i,j}^d \quad \forall i, j \in \mathbb{O}_d \quad (3.5)$$

$$M_i * x_{i,j,k}^d = M_j * x_{i,j,k}^d = M_k * x_{i,j,k}^d \quad \forall i, j, k \in \mathbb{O}_d \quad (3.6)$$

$\vdots$

$\vdots$

$$M_i * x_{i,j,\dots,n}^d = M_j * x_{i,j,\dots,n}^d = \dots = M_n * x_{i,j,\dots,n}^d \quad \forall i, j, \dots, n \in \mathbb{O}_d \quad (3.7)$$

Restricciones de capacidad de largo de rollos

$$x_{i,j}^d * (400 + L_i + L_j) \leq LR \quad \forall i, j \in \mathbb{O}_d \quad (3.8)$$

$$x_{i,j,k}^d * (400 + L_i + L_j + L_k) \leq LR \quad \forall i, j, k \in \mathbb{O}_d \quad (3.9)$$

⋮

⋮

$$x_{i,j,\dots,n}^d * (400 + L_i + L_j + \dots + L_n) \leq LR \quad \forall i, j, \dots, n \in \mathbb{O}_d \quad (3.10)$$

Restricción de relación entre variables

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \mathbb{O}_d} (x_{i,j}^d + x_{j,i}^d) + \sum_{j,k \in \mathbb{O}_d} (x_{i,j,k}^d + x_{j,i,k}^d + \dots + x_{k,i,j}^d + x_{k,j,i}^d) + \dots + \\ + \dots + \sum_{j,\dots,n \in \mathbb{O}_d} (x_{i,j,\dots,n}^d + \dots + x_{n,\dots,j,i}^d) \leq 1 \quad \forall i \in \mathbb{O}_d \end{aligned} \quad (3.11)$$

La complejidad de este modelo se encuentra en la definición de las variables binarias dado que se deben considerar todas las combinaciones posibles de índices, desde agrupaciones de 2 órdenes hasta el máximo número de ordenes agrupadas (N). Esto se aprecia en la ecuación 3.1 donde son consideradas agrupaciones de 2 órdenes, luego en la ecuación 3.2 agrupaciones de 3 órdenes, hasta la ecuación 3.3 que contempla (N) órdenes agrupadas. El problema incrementa de manera factorial en función de esta cantidad. Esto último se debe a que dada una cantidad  $O_d$  de órdenes en el día d, el número de variables creadas  $V_d$  queda definido como:

$$V_d = \sum_{n=2}^N \binom{O_d}{n} \quad (3.12)$$

Esto implica que para un día con 30 órdenes y con un (N) igual a 5 se deben crear 174.406 variables binarias.

Si bien el objetivo del problema es minimizar el cambio de rollos esto se puede modelar maximizando la cantidad de órdenes agrupadas. Es por esto que la ecuación 3.4 queda definida como la maximización de la suma de las variables binarias ponderadas por el número de índices que contiene la variable menos uno. Esto último es de gran relevancia debido a que estos coeficientes representan el beneficio obtenido por no realizar un cambio de rollo gracias a la agrupación. Por ejemplo, imprimir 4 órdenes por separado implica cambiar el rollo 4 veces, sin embargo, al agruparlas solo se debe cargar la máquina una vez, por lo tanto el beneficio percibido son 3 cambios de rollos menos, lo que se traduce en un ahorro de 12 metros de largo de material. Es por esto que los costos de la función objetivo son en realidad beneficios y lo que se busca es maximizar el beneficio total. Adicionalmente, esta función objetivo permite priorizar agrupaciones grandes sobre pequeñas, por ejemplo, agrupar 4 órdenes brinda un beneficio de 3 mientras que realizar dos agrupaciones de 2 órdenes retorna un beneficio de 2, por lo tanto, se prefiere agrupar la mayor cantidad en un mismo plano sobre realizar un mayor número de agrupaciones aisladas.

El primer conjunto de restricciones está dado por la compatibilidad de materiales. Esto significa que para permitir agrupar órdenes sobre el mismo plano se debe contemplar que ambas posean el mismo material. Para esto cada material debe tener asociado un número único que permita realizar la comparación de igualdad. Cabe destacar que esto se debe cumplir para todas las variables tal como se puede observar en las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7. Adicionalmente, para cada variable de  $n$  índices se crean tantas restricciones de igualdad como combinaciones dobles sobre  $n$ . Sea  $Y_n$  el número de restricciones de materiales para una variable de  $n$  índices, luego

$$Y_n = \binom{n}{2} \quad (3.13)$$

Por lo tanto, el número total de restricciones de materiales está dado por:

$$Y_{total} = \sum_{n=2}^N \binom{n}{2} \quad (3.14)$$

El segundo conjunto de restricciones corresponden a las restricciones de capacidad que tiene cada rollo. Esto está dado por el largo del material que limita la cantidad de órdenes que se pueden agrupar sobre el mismo. Las ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10 representan el hecho de que si se agrupan  $K$  órdenes, entonces la suma de sus largos más los 4 metros de enganche no deben superar al largo del rollo. En este caso, a diferencia de las restricciones de material, solo se tienen  $(N)$  restricciones en total.

Finalmente, la última restricción corresponde a la relación entre variables. En la ecuación 3.11 se aprecia que cada orden puede agruparse como máximo una vez con otro conjunto de órdenes en cualquier orden posible.

### 3.2.2. Modelo parcial

Este modelo consiste en resolver  $N$  subproblemas del modelo completo para alcanzar un óptimo local y de esta forma ser más eficiente en los cálculos computacionales. La cantidad de subproblemas a resolver estará dada por el máximo de agrupaciones. El modelo queda definido de la siguiente manera:

Conjuntos

$\mathbb{D}$ : Conjunto de días

$\mathbb{S}$ : Conjunto de subproblemas

$\mathbb{O}_{d,s}$ : Conjunto de órdenes disponibles en el día  $d \in \mathbb{D}$  en el subproblema  $s \in \mathbb{S}$

Parámetros

$L_i$ : Largo de la orden en centímetros con  $i \in \mathbb{O}_{d,s}$

$M_i$ : Material de la orden  $i \in \mathbb{O}_{d,s}$

$N$ : Máximo de agrupaciones

$LR$ : Largo máximo de rollos

Variables

$$x_{i,j}^{d,s} = \begin{cases} 1 & \text{Si se agrupan las órdenes } i, j \text{ en el día } d \text{ en el subproblema } s \\ 0 & \text{Si no} \end{cases} \quad \forall i, j \in \mathbb{O}_{d,s}$$

Función objetivo del subproblema

$$I_s^d = \max \sum_{(i,j) \in \mathbb{O}_{d,s}} x_{i,j}^{d,s} \quad \forall s \in \mathbb{S} \quad (3.15)$$

Función objetivo

$$I_N^d = \sum_{s \in \mathbb{S}} I_s^d \quad \forall d \in \mathbb{D} \quad (3.16)$$

Restricciones de compatibilidad de material

$$M_i * x_{i,j}^{d,s} = M_j * x_{i,j}^{d,s} \quad \forall i, j \in \mathbb{O}_{d,s} \quad (3.17)$$

Restricciones de capacidad de largo de rollos

$$x_{i,j}^{d,s} * (400 + L_i + L_j) \leq LR \quad \forall i, j \in \mathbb{O}_{d,s} \quad (3.18)$$

Restricción de relación entre variables

$$\sum_{j \in \mathbb{O}_{d,s}} (x_{i,j}^{d,s} + x_{j,i}^{d,s}) \leq 1 \quad \forall i \in \mathbb{O}_d \quad (3.19)$$

De esta forma se resuelve en cada iteración un problema de agrupación de a lo más 2 órdenes por rollo. Sin embargo, para que este modelo funcione de manera correcta se debe seguir el siguiente algoritmo.

1. Inicia  $s=1$
2. Resolver el subproblema  $I_s$ .
3. Para todas las  $x_{i,j}^{d,s}$  con valor 1 se eliminan  $i$  y  $j$  de  $\mathbb{O}_{d,s+1}$  ya que fueron agrupadas.
4. Para todas las  $x_{i,j}^{d,s}$  con valor 1 se crea una nueva orden igual a la concatenación de  $i$  con  $j$  dentro de  $\mathbb{O}_{d,s+1}$  para representar en la siguiente iteración una nueva orden correspondiente a la unión de  $i$  con  $j$ . Esta unión quedará representada como  $i+j$ .

5. Para todas las ordenes agrupadas  $i+j$  asigna un material de la siguiente forma  $M_{i+j} = M_i = M_j$ .
6. Para todas las ordenes agrupadas  $i+j$  asigna un largo de la siguiente forma  $L_{i+j} = L_i + L_j$ .
7. Repetir puntos 2 a 7 con  $s=s+1$ .

El algoritmo termina cuando se resuelve el último subproblema lo cual está determinado por  $N$ , es decir, cuando  $s=N$ .

A diferencia del Modelo completo, el Modelo parcial considera en cada subproblema una variable de tan solo dos índices como se puede apreciar en la ecuación 3.2.2. Esto permite que disminuya considerablemente la cantidad de variables creadas. Dada una cantidad  $O_d$  de órdenes en el día  $d$ , la cantidad de variables creadas  $V_d$  queda definida como:

$$V_d = (N - 1) * \binom{O_d}{2} \quad (3.20)$$

Esto implica que para un día con 30 órdenes y con un  $(N)$  igual a 5 se deben crear 1.740 variables binarias, lo que es 100 veces menos que en el modelo completo con los mismos parámetros.

Para cada subproblema, se resuelven las mismas restricciones del Modelo completo pero aplicado a una variable de dos índices, esto se observa directamente en la ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19. La diferencia fundamental entre estos modelos es que el conjunto de órdenes  $O_d$  ya no es fijo y depende de cada subproblema por lo que se debe agregar el índices, quedando definido como  $O_{d,s}$ , en donde este depende directamente de  $I_{s-1}^d$ . La condición inicial para el primer subproblema es la siguiente:

$$O_{d,1} = O_d^0$$

Donde  $O_d^0$  es el conjunto de órdenes totales que se tiene al inicio del día  $d$ .

### 3.2.3. Heurística

Con la finalidad de obtener una solución rápida se desarrolla un Modelo Heurístico. Se espera que este modelo sea más rápido que el Modelo completo y el Modelo parcial debido a que no constituye a una optimización en estricto rigor. Este queda definido de la siguiente forma:

Conjuntos

$\mathbb{D}$ : Conjunto de días

$\mathbb{O}_d$ : Conjunto de órdenes disponibles en el día  $d \in \mathbb{D}$

$\mathbb{V}_d$ : Conjunto de órdenes no agrupadas en el día  $d \in \mathbb{D}$

## Parámetros

$L_i$ : Largo de la orden en centímetros con  $i \in \mathbb{O}_d$

$M_i$ : Material de la orden  $i \in \mathbb{O}_d$

$N$ : Máximo de agrupaciones

$LR$ : Largo máximo de rollos

$LRA$ : Largo de rollo actual

## Algoritmo

1. Se inicia el conjunto  $\mathbb{V}_d$  de la siguiente manera:  $\mathbb{V}_d = \mathbb{O}_d$
2. Se elije al azar una orden  $i \in \mathbb{V}_d$
3. Se inicia  $LRA$  de la siguiente manera:  $LRA = L_i$
4. Se itera sobre todas las órdenes  $j \in \mathbb{V}_d$
5. Se agrupa  $i$  con  $j$  si tienen el mismo material y  $LRA + L_j + 4mts$  no supera el largo del rollo ( $LR$ ).
6. Cada vez que se agrupa  $i$  con  $j$  ambas órdenes son eliminadas de  $\mathbb{V}_d$
7. Al agrupar  $i$  con  $j$  se actualiza  $LRA$  de la siguiente forma:  $LRA = L_i + L_j$
8. Se detiene la iteración si la cantidad de órdenes agrupadas iguala al máximo permitido ( $N$ )
9. Repetir pasos 2 a 8 hasta iterar sobre todo  $\mathbb{V}_d$

En resumen, este modelo elige una orden al azar y la intenta agrupar con todas las órdenes posibles del mismo material mientras el largo del rollo lo permita. De esta forma al repetir el proceso se termina con una cantidad de órdenes agrupadas sobre un plano, las cuales no fueron distribuidas de manera óptima pero representan una solución factible dentro del problema de optimización completo.

## 3.3. Modelamiento computacional

### 3.3.1. Herramientas utilizadas

Para desarrollar los modelos se utiliza el lenguaje de programación Python en su versión 3.7 en conjunto con la distribución de librerías de Anaconda para Windows 10. Se trabaja con el ambiente de trabajo Jupyter Notebook el cual permite programar código en bloques. Adicionalmente, para desarrollar de manera correcta los modelos se utilizan las siguientes librerías:

1. Pandas: Permite manipular y analizar datos de manera eficiente. Adicionalmente, define estructuras de datos y operaciones que facilitan los análisis numéricos.
2. Os: Permite utilizar funciones propias del sistema operativo, en particular fue utilizada para acceder a los directorios en donde se encuentran las bases de datos.

3. Datetime: Permite manipular fechas de manera sencilla.
4. Numpy: Facilita el manejo de arreglos de datos de N dimensiones.
5. Pulp: Permite programar modelos de optimización y resolverlos.
6. Matplotlib: Permite realizar visualizaciones de datos de todo tipo.
7. Statistics: Contiene las herramientas estadísticas necesarias para realizar análisis.

### 3.3.2. Procesamiento de datos

Dentro de los desafíos del proyecto se encuentra el procesamiento de datos. Esta es una etapa fundamental dentro del modelamiento computacional debido a que define las bases sobre las cuales se trabaja. El primer paso consiste en importar las bases, esto queda expresado en la figura 8.13. Luego, se unen las bases que se tienen sobre el registro de la operación en las máquinas. Estas bases están separadas en 3 archivos distintos por fecha debido a que su extracción desde el servidor fue segmentada por el gran tamaño de los archivos.

Luego de tener la información consolidada se realizan modificaciones a los datos para poder trabajar con un formato estándar. Las órdenes se encuentran dentro de una cadena de texto separada por guiones. Es por esto último que se procesa esa columna para extraer el valor numérico de la orden. Para realizar esto se implementa el código expuesto en la figura 8.14. También se modifica el formato en el que se recibe la fecha, dato que este se encuentra en formato de texto y se transforma a formato fecha para facilitar su posterior manipulación. El largo y ancho también se encuentran dentro de cadenas de textos en donde los últimos dos valores son un símbolo de la moneda euro. Para implementar los modelos matemáticos es necesario que tanto largo como ancho se encuentren en formato numérico. Adicionalmente, se reemplazan todas las comas por puntos dado que el lenguaje de programación utilizado considera un punto como indicador de decimal.

En la figura 8.15 se muestra el procedimiento de intersección de bases. Este paso es fundamental, ya que es donde se intersectan las bases de consumo y producción con la información obtenida en las máquinas. Es necesario realizar esto debido a que el registro de la máquina no indica con total claridad cuál es el material específico con el cual se está trabajando. Por lo tanto, para saber qué material corresponde a cada orden es necesario utilizar el código de la orden para buscarla dentro de la base de consumo y producción. De esta forma es posible relacionar las órdenes impresas a una orden de requerimiento de material en bodega y de esta forma saber específicamente qué material se usó en cada caso.

Sin embargo, intersectar las bases no es suficiente. Tal como se menciona en la sección 2.2, existe una gran cantidad de órdenes impresas sin un registro de material extraído de bodega. Esto genera que un 27 % de las órdenes no tengan un material asociado dentro de la base creada. Con el fin de solucionar este problema, se utiliza la información proporcionada por la columna "Medianame" la cual se encuentra dentro de la base de la máquina. Utilizar esta columna para reducir el 27 % de las órdenes basta para que todas las órdenes tengan un material, sin embargo, esto no es suficiente. La razón por la que no se utiliza esta columna en primer lugar y se decide realizar la intersección es porque los valores dentro de esta son ingresados por los operadores y presentan distintos nombres para los mismos materiales. Por ejemplo, cuando se trata de un adhesivo esta columna indica que el material es "adhesivo\_137\_1" , "adhesivo\_137\_2" , "adhesivo\_122\_1ok", entre muchas otras formas de

escritura que dificultan enormemente la caracterización del material utilizado. Con el fin de solucionar esta problemática, se genera una lista de los nombres más repetidos dentro de esta columna y que no tengan una orden asociada en bodega. Luego, se analiza caso a caso para transformar estas cadenas de texto en el material deseado, en el caso del ejemplo presentado anteriormente todas esas cadenas de texto fueron transformadas en material de adhesivos. Gracias a esta transformación de la columna se logra disminuir la cantidad de órdenes sin material a tan solo un 1 % y estos registros fueron eliminados de la base posteriormente.

Finalmente, tal como se muestra en la figura 8.16 las bases son filtradas para trabajar tan solo con las máquinas que trabajen rollos y materiales que sean procesados en este formato. Esto es relevante dado que las bases contienen información sobre todas las máquinas y materiales, y los modelos desarrollados solo se basan en materiales trabajados en rollos.

### 3.3.3. Modelo completo

El Modelo completo se representa computacionalmente como se observa en la figura 8.17. Se reciben como parámetros el conjunto de días sobre los cuales se simulará el modelo, el máximo de combinaciones permitidas por rollo, cuántos días de demanda serán agrupados, el largo de los rollos y la base de datos que contiene todas las órdenes con su material y dimensiones correspondientes. Al igual que el modelamiento matemático es necesario definir apropiadamente los conjuntos. Gran parte de los parámetros son recibidos por la función y los conjuntos deben crearse dentro de la misma.

En la línea 5 de la figura 8.17 se comienza a iterar sobre todos los días ingresados y luego se crean los conjuntos de datos para cada día. Cada conjunto se representa como un objeto del tipo diccionario dentro del lenguaje de programación Python. Esto es fundamental, dado que esta estructura de datos permite acceder de manera eficiente a los conjuntos. Luego, en la línea 15 se define el problema de minimización. Para crear las variables se utilizó la función "allcombinations" desde la librería Pulp, la cual crea todas las combinaciones posibles de órdenes dado un máximo de combinaciones permitidas.

Posteriormente, en la línea 19, se define la función objetivo como se muestra en la ecuación 3.4. Finalmente, se definen las restricciones del modelo entre las líneas 21 y 29. La implementación de las restricciones es tal y como se presenta en el modelo matemático gracias a que la librería Pulp permite representar fácilmente matemática en códigos computacionales.

El problema se resuelve para cada día y se almacena el valor de la función objetivo dentro de una lista de valores. Una vez que se calcula el modelo para todos los días, esta función retorna la lista final con todos los valores.

### 3.3.4. Modelo parcial

Al igual que el Modelo completo, el Modelo parcial recibe como parámetros iniciales el conjunto de días sobre los cuales se simulará el modelo, el máximo de combinaciones permitidas por rollo, cuántos días de demanda serán agrupados, el largo de los rollos y la base de datos que contiene todas las órdenes con su material y dimensiones correspondientes.

En la figura 8.18 se aprecia el modelamiento computacional de este modelo. Es importante



destacar que la iteración sobre el número de subproblemas se realiza en la línea 6 del código, lo cual es fundamental para que el resultado sea el deseado. Una de las diferencias principales con respecto al modelo completo son las variables, las cuales son creadas a partir de tan solo dos combinaciones en cada subproblema, lo que se observa en la línea 9. Por otro lado, la función objetivo del subproblema queda representada en la línea 11 como la sumatoria de todas las variables binarias creadas.

Las restricciones fueron adaptadas y simplificadas para variables de tan solo dos combinaciones, lo cual es computacionalmente más sencillo que en el caso del Modelo completo. Desde la línea 13 hasta la 20 del código se modelan estas restricciones y en la línea 21 se resuelve un subproblema.

Lo más importante de este modelo queda representado entre las líneas 23 y 33 del código. Esto se debe a que en esta sección se transforman los conjuntos luego de solucionar el subproblema. Se crean nuevas órdenes correspondientes a la unión entre las órdenes agrupadas y se eliminan sus registros individuales, se otorga el material al conjunto de órdenes agrupadas y se actualiza el largo de las mismas tal y como se plantea en el modelamiento matemático.

Finalmente, el resultado de la función objetivo en cada día simulado es retornado por la función como una lista de valores, la cual posteriormente es utilizada para realizar los análisis respectivos y comparar los modelos frente a distintos escenarios.

### **3.3.5. Heurística**

El Modelo Heurístico es modelado de manera distinta a los otros dos debido a que en esencia no constituye un problema de optimización. Se reciben como parámetros el conjunto de días, el máximo de combinaciones, los días agrupados, el largo de los rollos y la base de datos que contiene la información de cada orden en cada instante de tiempo. Todo el código queda representado en la figura 8.19.

El primer paso consiste en iterar sobre el conjunto de días que son entregados. Esto es relevante dado que cada uno de ellos se define para cada día en particular. La definición de estos se realiza de manera similar a los otros dos modelos, creando diccionarios para cada uno en cada instante temporal. Esto último se observa entre las líneas 5 y 14 del código. Dado que no es un problema de optimización no es necesario definir las variables, solo se necesita el conjunto de órdenes por día.

Para resolver los pasos definidos dentro del modelamiento matemático fue necesario crear una lista de valores correspondientes a las órdenes que ya fueron agrupadas. De esta forma no se agrupan las órdenes que pertenezcan a esta lista, la cual queda definida de manera inicial en la línea 17. Cada vez que se agrupa una orden esta es ingresada a esta lista para no ser considerada más adelante.

La parte principal del modelo queda definida entre las líneas 19 y 35 del código. Primero se toma una orden del conjunto y se verifica que no pertenezca a la lista de órdenes que ya fueron agrupadas. En el caso de que no esté agrupada, se procede a realizar intentos de agrupación de dicha orden con el resto de las órdenes disponibles, siempre y cuando se cumpla que el largo total no supere al largo del material, que se cumpla el máximo de combinaciones

por rollo y que los materiales sean compatibles.

Finalmente, se calcula la cantidad de agrupaciones realizadas para poder definir el valor de la función objetivo. Esto se realiza para cada día y lo que retorna finalmente el modelo es la lista con todos los valores de la función objetivo a lo largo del tiempo.

# Capítulo 4

## Análisis y resultados

### 4.1. Resultados

Para comparar los modelos se utiliza la historia simulando escenarios pasados. En particular se considera como mes de prueba el mes de abril del año 2019 para evaluar el comportamiento de los modelos. Se elige este mes dado que corresponde a un mes de demanda promedio.

En la tabla 4.1 se puede observar que las variaciones en el largo de los rollos no tienen un efecto significativo en los tiempos de ejecución pero sí en el número de agrupaciones promedio, las cuales aumentan a medida que crece el largo de los rollos. En particular, se obtuvo un aumento del 16.8% en las agrupaciones promedio del modelo completo, un 16.8% en el modelo parcial y un 21.7% en la heurística cuando se compara el comportamiento con rollos de 50 y 100 metros. El comportamiento de los modelos al variar el largo de los rollos se aprecia gráficamente en las figuras 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6 dentro del anexo.

Largo Rollos	Agrupaciones Promedio			Tiempos de Ejecución Promedio (s)		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
5000	2.96	2.96	2.62	1.23	1.89	0.05
6000	3.12	3.12	2.85	1.24	1.79	0.05
7000	3.12	3.12	2.85	1.24	3.89	0.05
8000	3.23	3.23	2.92	1.14	1.89	0.05
9000	3.31	3.31	3.08	1.18	1.90	0.05
10000	3.46	3.46	3.19	1.16	1.93	0.05

Tabla 4.1: Variaciones en el largo de rollos

En la tabla 4.2 se muestra que el agrupar más días de demanda permite agrupar más órdenes al día en promedio. En particular en los modelos completo y parcial se obtuvo un incremento de un 9.1% al aumentar los días agrupados de 1 a 5 mientras que en la heurística se obtuvo un aumento del 21.7%. Por otro lado, también se observa que los tiempos

de ejecución aumentan para los modelos completo y parcial mientras que la heurística se mantiene constante en este aspecto. El comportamiento de los modelos queda expresado gráficamente en las figuras 8.1, 8.9, 8.10, 8.11 y 8.12.

Días Agrupados	Agrupaciones Promedio			Tiempos de Ejecución Promedio (s)		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
1	2.96	2.96	2.62	1.20	1.94	0.05
2	3.08	3.08	3.00	1.40	2.39	0.04
3	3.12	3.12	3.04	1.54	2.55	0.03
4	3.19	3.19	3.15	1.52	2.85	0.03
5	3.23	3.23	3.19	1.87	3.51	0.03

Tabla 4.2: Variaciones en los días agrupados

Luego, en la tabla 4.3 se puede observar que al permitir que existan más agrupaciones se obtiene una mayor cantidad de agrupaciones promedio. Se obtuvo un incremento de las agrupaciones promedio en 36.4% , 36.4% y 49.6% para el modelo completo, parcial y heurística respectivamente al variar el máximo de agrupaciones de 2 a 5. Con respecto a los tiempos de ejecución se obtuvo un incremento de 70434%, 250% y 0% para los el modelo completo, parcial y heurística respectivamente. Los resultados obtenidos se pueden observar gráficamente en las figuras 8.1, 8.7 y 8.8 dentro del anexo.

Máximo Agrupaciones	Agrupaciones Promedio			Tiempos de Ejecución Promedio (s)		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
2	2.96	2.96	2.62	1.15	1.99	0.05
3	3.65	3.35	3.54	7.15	3.16	0.06
4	3.96	3.88	3.88	63.79	4.02	0.05
5	4.04	3.96	3.92	810.67	5.02	0.05

Tabla 4.3: Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas

En la tabla 8.1 en el anexo se encuentra el ahorro en  $m^2$  por material al variar el máximo de agrupaciones. Los materiales que se ven más afectados ante estas variaciones son las telas y textil, los cuales aumentan cerca de un 50% su ahorro anual en  $m^2$  al aumentar de 2 a 5 el máximo de agrupaciones permitidas por rollo. Esto significa aumentar en la misma proporción el ahorro monetario por material, lo cual está expuesto en la tabla 8.2 en el anexo. A nivel agregado, se tiene un ahorro 36% mayor en metros cuadrados y 37% en dinero al realizar las mismas variaciones, esto está detallado en las tablas 4.4 y 4.5 respectivamente.

En la tabla 8.3 en el anexo se encuentra el ahorro en  $m^2$  por material al variar el número de días agrupados. Los materiales más afectados ante estas variaciones son los adhesivos, los cuales aumentan cerca de un 15% su ahorro anual en  $m^2$  al aumentar de 1 a 5 los días agrupados. Esto significa aumentar en la misma proporción el ahorro monetario por material, lo cual está expuesto en la tabla 8.4 en el anexo. A nivel agregado, se tiene un ahorro 9%

Máximo Agrupaciones	Ahorro en $m^2$		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
2	11655	11655	10293
3	14380	13168	13925
4	15590	15288	15287
5	15893	15590	15438

Tabla 4.4: Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en  $m^2$  agregado

Máximo Agrupaciones	Ahorro en MM CLP		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
2	7.68	7.68	6.93
3	9.52	8.66	9.29
4	10.17	10.03	10.01
5	10.55	10.40	10.32

Tabla 4.5: Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en MM CLP agregado

mayor en metros cuadrados y 8% en dinero al realizar las mismas variaciones, esto está detallado en las tablas 4.6 y 4.7 respectivamente.

Días Agrupados	Ahorro en $m^2$		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
1	11655	11655	10293
2	12108	12108	11806
3	12260	12260	11958
4	12563	12563	12411
5	12714	12714	12562

Tabla 4.6: Variaciones en los días agrupados, ahorro en  $m^2$  agregado

En la tabla 8.5 en el anexo se encuentra el ahorro en  $m^2$  por material al variar el largo de los rollos utilizados. Los materiales que se ven más afectados ante estas variaciones son adhesivos, los cuales aumentan cerca de un 30% su ahorro anual en  $m^2$  al aumentar de 50 a 100 metros el largo de los rollos. Esto significa aumentar en la misma proporción el ahorro monetario por material, lo cual está expuesto en la tabla 8.6 en el anexo. A nivel agregado, se tiene un ahorro 17% mayor en metros cuadrados y 15% en dinero al realizar las mismas variaciones, lo cual está detallado en las tablas 4.8 y 4.9 respectivamente.

Días Agrupados	Ahorro en MM CLP		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
1	7.68	7.68	6.93
2	7.96	7.96	7.80
3	8.07	8.07	7.90
4	8.22	8.22	8.15
5	8.30	8.30	8.23

Tabla 4.7: Variaciones en los días agrupados, ahorro en MM CLP agregado

Largo Rollos	Ahorro en $m^2$		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
5000	11655	11655	10293
6000	12260	12260	11201
7000	12260	12260	11201
8000	12714	12714	11504
9000	13017	13017	12108
10000	13622	13622	12562

Tabla 4.8: Variaciones en el largo de rollos, ahorro en  $m^2$  agregado

Largo Rollos	Ahorro en MM CLP		
	Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
5000	7.68	7.68	6.93
6000	8.06	8.06	7.51
7000	8.06	8.06	7.51
8000	8.35	8.35	7.71
9000	8.51	8.51	8.06
10000	8.85	8.85	8.33

Tabla 4.9: Variaciones en el largo de rollos, ahorro en MM CLP agregado

## 4.2. Elección del modelo

Debido a lo expuesto en la sección 4.1 se decide implementar el modelo heurístico. Las razones son las siguientes:

1. Los resultados obtenidos por el modelo heurístico son tan solo 2% a 3% peores que los obtenidos en el modelo completo. Cabe destacar que lo mismo ocurre para el modelo parcial.
2. Los tiempos de ejecución no aumentan a medida que se permiten más agrupaciones por rollo, es decir, este modelo puede ser implementado sin límite de agrupaciones. Esto

no es posible para los modelos completo y parcial. En particular el modelo completo aumenta sus tiempos de ejecución de manera factorial a medida que aumentan las agrupaciones promedio permitidas y se estima que un computador de escritorio demoraría 101 días completos en ejecutar el código con 8 agrupaciones como máximo, mientras que el modelo heurístico lograría hacerlo en tan solo 0.01 segundos. El modelo parcial por otro lado aumenta de manera lineal el tiempo de ejecución a medida que aumentan las agrupaciones permitidas, lo que no permite liberar al modelo de esta restricción.

En resumen, tanto el modelo heurístico como el parcial logran alcanzar resultados similares al modelo completo, sin embargo, el modelo heurístico lo logra en menos tiempo. Esto último es fundamental para que la implementación sea posible y que no se dependa de un parámetro que limita las agrupaciones.

### 4.3. Restricción adicional

Para el entregable final es necesario agregar una restricción nueva al modelo heurístico. Esta corresponde a una restricción temporal, la cual representa si un pedido debe ser impreso con urgencia lo antes posible. Para implementar esto dentro del modelo se debe crear un nuevo conjunto  $\mathbb{U}$  que contiene las órdenes clasificadas como urgentes y otro conjunto  $\mathbb{K}$  con las órdenes no urgentes. Posteriormente, se permiten uniones solo entre órdenes que pertenezcan al mismo conjunto. De esta forma, cuando se cree la planificación, las órdenes urgentes serán agrupadas y luego impresas al comienzo del día. El motivo por el cual no se incluye esta restricción desde un comienzo es porque no se cuenta con la información sobre si una orden es urgente o no.

Por otro lado, para evaluar qué sucede en el modelo heurístico se realizaron 4000 simulaciones, generando números aleatorios entre 0 y 1 con distintas probabilidades para generar de manera sintética estos dos conjuntos descritos anteriormente. De esta forma, se construye una curva de las agrupaciones promedio en 1 mes que entrega el modelo con distintos porcentajes de pedidos urgentes. Esto queda representado en la figura 4.1 en donde se muestra que cuando todas las órdenes son urgentes o todas son no urgentes se obtienen las mismas agrupaciones por mes, lo que es lógico puesto que al pertenecer todas al mismo grupo significa que todas pueden ser agrupadas y la restricción no tendría efecto. Por otro lado, el caso más crítico es cuando la mitad de las órdenes son urgentes, esto genera que las agrupaciones promedio disminuyan en un 11 %, lo que significaría una pérdida total de 1.6 millones de pesos anuales.

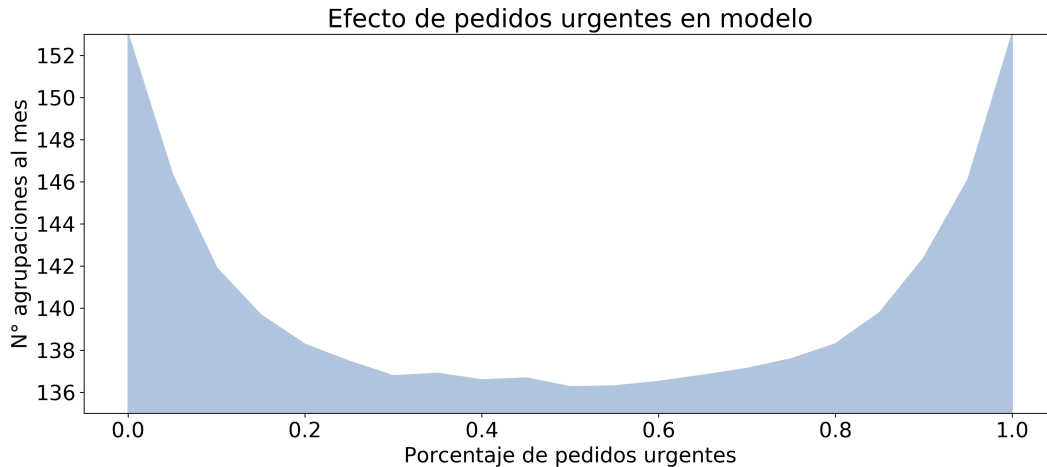


Figura 4.1: Efecto de urgencia en el modelo heurístico

## 4.4. Recomendaciones

### 4.4.1. Situación actual

Actualmente Inser Impresores imprime las órdenes priorizando la fecha de entrega, incluso si eso significa realizar una gran cantidad de cambios de rollo. Además, la empresa cuenta con una amplia gama de materiales de diferentes proveedores, calidades y tamaños. Los largos de los rollos varían dependiendo del material a utilizar pero por lo general se utilizan rollos de entre 50 y 100 metros de largo. Es importante destacar que, para cada material, existen distintas ofertas en términos de largo y ancho. Por otro lado, en general no se agrupa demanda entre días, si no que, como se mencionó anteriormente, las órdenes son impresas en función de su fecha de entrega.

### 4.4.2. Beneficios de agrupar demanda

Tal como se expuso en la sección 4.1 mientras más días de demanda se incluyan dentro de la planificación, mayor será el ahorro que otorgará el modelo matemático. Al implementar el modelo heurístico sujeto a rollos de largo 100 metros y sin un máximo de agrupaciones promedio por rollo, se obtiene un beneficio anual de CLP\$ 13.1 millones agrupando 1 día de demanda. Por otro lado, si se agrupan 5 días de demanda el ahorro anual esperado aumenta a CLP\$ 15.26 millones, lo que es un 16.4% mayor. Sin embargo, agrupando 3 días se alcanza un beneficio equivalente a CLP\$ 15.1 millones, lo que es bastante similar a lo obtenido con 5 días. Es por esto que se recomienda agrupar a lo menos 3 días de demanda al implementar este modelo.

El costo de implementar esta recomendación es el aumento de los tiempos de entrega para los clientes. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el modelo permite que en el caso de necesitarlo, la orden puede ser catalogada como urgente y ser impresa de manera inmediata, lo que mitiga el impacto sobre el cliente que necesita el producto lo antes posible.



### 4.4.3. Beneficios de contar con rollos de mayor longitud

Considerando una posible implementación del modelo seleccionado sin restricciones de máximo de agrupaciones, rollos de largo 50 metros y 3 días de demanda agrupados se obtiene un beneficio anual igual a CLP\$ 12.4 millones, mientras que si se utilizan rollos de 100 metros de largo el beneficio aumenta en un 21.7 %, alcanzando la suma total de CLP\$ 15.1 millones. Por lo tanto, al implementar este modelo se recomienda comprar rollos de 100 metros de largo.

El costo de implementar esta recomendación es el aumento del costo de compra por rollo, dado que estos serán de mayor longitud. Sin embargo, a pesar que el precio unitario por rollo sea mayor, el costo por metro cuadrado tiende a mantenerse igual o a incluso disminuir.

### 4.4.4. Ahorro total esperado

Tal como se mencionó en las secciones 4.4.2 y 4.4.3 si se siguen las recomendaciones y se implementa el modelo heurístico se lograría alcanzar un ahorro de CLP\$ 15.1 millones anuales. Esto corresponde a un 11.3 % de los 133 millones de pérdida generados por mermas y un 14.3 % de las pérdidas generadas en materiales trabajados en rollos. Específicamente se espera un ahorro de 8326, 4087, 9083 y 1665  $m^2$  anuales en adhesivos, papeles, telas y textil respectivamente. Esto significa un ahorro de CLP\$ 5.5, 2.1 , 4.1 y 3.4 millones en adhesivos, papeles, telas y textil respectivamente. Cabe destacar que este ahorro significa un aumento del 4.1 % en la rentabilidad del área y 2.5 % en el total de la empresa, lo que implica que se cumple el objetivo general del proyecto.

Gracias a la simulación de escenarios pasados, es posible calcular qué porcentaje de órdenes logran ser agrupadas con respecto al total. En promedio, se agrupa el 54 % de las órdenes totales lo que indica que se resuelve en el mismo porcentaje el problema total generado específicamente por el cambio de rollos. De esta forma, se puede estimar la pérdida total generada por esta hipótesis, concluyendo que 27.7 millones de pesos se pierden al año por la carga y descarga de rollos. Esto corresponde al 20 % del total de pérdidas y 26 % de las pérdidas generadas específicamente por rollos. Es importante destacar que dada la variedad de materiales, largos limitados de rollos y la incapacidad de agrupar todos los días de demanda de un año en solo una impresión, es imposible disminuir estos costos en un 100 %.

# Capítulo 5

## Desarrollo y uso de software

### 5.1. Descripción del programa

A partir del modelo escogido y la restricción adicional de urgencia, se desarrolla un programa computacional capaz de implementar el modelo en la práctica. El primer paso consiste en el desarrollo del código computacional en el lenguaje de programación Python, que permita al usuario realizar la planificación de impresión a partir de las órdenes que tenga en ese momento. Estos datos serán proporcionados en un archivo Excel con toda la información necesaria para implementar el modelo heurístico. Es por esto que es fundamental que el usuario complete adecuadamente la planilla proporcionada previamente a la ejecución del código.

Para facilitar el uso de este programa, se decide transformar el archivo escrito en Python a una aplicación ejecutable, de manera tal que solo sea necesario abrir la aplicación para ejecutar el código. Para que esto último funcione adecuadamente se compilan todas las librerías utilizadas en el código dentro de la misma carpeta del programa. De esta forma, el usuario no debe descargar nada adicional y el software puede ser usado sin conexión a internet.

En resumen, desde el punto de vista del usuario, se recibirá una carpeta con 2 elementos a utilizar. Primero, una plantilla de Excel en la cual se debe ingresar toda la información sobre las órdenes que se desean agrupar. Segundo, una aplicación, la cual debe ser abierta para ingresar la planilla. Finalmente, en la misma carpeta en donde se encuentre la planilla, se genera un nuevo archivo, el cual contiene toda la planificación de impresión.

### 5.2. Desarrollo del programa

El primer paso para desarrollar el programa consiste en desarrollar la plantilla Excel con un formato estándar. Esta tiene dos pestañas, la primera contiene la información de las órdenes como el material usado, largo, número de orden y si la orden es urgente. Esto último se distribuye en 4 columnas, las cuales deben ser llenadas por el usuario. En la segunda pestaña, se encuentra la información de los materiales usados, en particular, se tienen dos columnas, una con el nombre del material y otra con el largo del material.

Con respecto al código computacional que permite implementar el modelo, este se muestra en las figuras 8.20 y 8.21. Lo primero es importar las librerías utilizadas y cabe destacar que se utiliza una librería adicional a los códigos anteriores, llamada tkinter. Esta permite crear ventanas de interacción con el usuario con el fin de que él pueda seleccionar el archivo.

El resto del modelamiento es similar al que se expone en el modelamiento computacional del modelo heurístico y la única diferencia es que se agrega la restricción de urgencia. En la línea 22 de la figura 8.20 se crean los conjuntos de urgencia y en la línea 34 se evalúa si se cumple la condición. Luego, entre las líneas 9 y 21 de la figura 8.21 se crea la tabla de planificación en función de las órdenes que fueron agrupadas priorizando las urgentes.

Finalmente, se abre la ventana que solicita el archivo al usuario, en donde se debe seleccionar la planilla. Luego esta planilla es procesada y se ejecuta el modelo con los datos ingresados. En la línea 34 de la figura 8.21 se guarda como un archivo Excel el resultado del modelo.

### 5.3. Manual de uso

Para facilitar una posible implementación del software por parte de la gerencia de operaciones, se desarrolla un manual de uso. Este manual es un archivo en formato PDF que contiene todas las instrucciones necesarias para usar el modelo matemático en la práctica. Este se divide en tres partes, creación de plantilla, ejecución del programa computacional y lectura del archivo nuevo generado.

En la primera parte, creación de planilla, se detallan todos los pasos a seguir que se deben tener en consideración para el desarrollo de la misma. Primero se indica qué debe ser completado en cada hoja del archivo y en cada columna con su formato respectivo. Por ejemplo, se destaca que los largos deben ser ingresados en centímetros y no en metros. También se indica que los materiales deben ser ingresados en un formato estándar para describir cada material, por ejemplo, si se desea ingresar un adhesivo, este debe ser ingresado de la misma forma para todas órdenes del mismo material, dado que una diferencia de una mayúscula podría generar que el programa lea que son dos materiales diferentes.

Luego, en la ejecución del programa se indica cómo se debe ejecutar el software. En particular, se detalla qué archivo debe ser abierto y cómo seleccionar la plantilla creada desde el programa. Esta etapa es relevante dado que dentro de la carpeta del programa existen múltiples archivos que complementan al uso del software y que no deben ser abiertos.

Finalmente, se indica cómo se debe leer el archivo final que se crea luego de ejecutar correctamente el programa con la plantilla respectiva. Se detalla qué representa cada columna y cómo traspasar el resultado a la operación. En particular, se muestra que la columna "agrupación" representa a qué conjunto de órdenes agrupadas pertenece cada orden. De esta manera, el usuario es capaz de comprender cuáles son las órdenes que se agrupan y de qué forma se realizan estas agrupaciones.

## 5.4. Integración dentro del proceso productivo

Implementar este modelo matemático afecta la forma en se desarrolla la planificación de impresión actualmente. Tal como se muestra en la sección 1.2.4, dentro de la etapa de pre impresión existe un planificador, quien se encarga de gestionar el orden en que serán impresas las órdenes. En particular, el planificador es el usuario final de este modelo, y lo utilizará para crear la planificación de todos los productos que sean impresos en formato rollo. Esto último es fundamental, dado que el modelo no está programado para trabajar con materiales procesados en planas. El resto de las áreas y procesos continuarán operando de la misma manera que lo hoy en día. En base a esto, se considera que la implementación del software no constituye a una modificación significativa del proceso productivo, dado que se integra en una parte específica de la cadena productiva sin afectar el flujo natural de las órdenes. En este sentido, se estima que los costos de implementación son nulos para la empresa, dado que puede ser ejecutado en cualquier tipo de computador que posee actualmente Inset Impresores.

# Capítulo 6

## Conclusión

La industria de la impresión gráfica está altamente concentrada geográficamente y no presenta aumentos en sus niveles de ventas desde el año 2005. A esto se suma el hecho de que los productos que se transan en este mercado son difícilmente diferenciables, por lo que existe un alto nivel de competitividad. Esto genera que empresas como Inser Impresores tengan dificultades a la hora de generar rentabilidades, por lo que la eficiencia operacional juega un rol importante en la empresa en el corto y largo plazo.

Se analizan 9 posibles causas que explican la ineficiencia productiva de la empresa y se decide trabajar con las pérdidas generadas por el anclaje de rollos. Esta se elige dado que la evidencia numérica indica que el problema está concentrado en los productos trabajados en rollos y la principal diferencia operacional con otros productos se basa en el anclaje de estos materiales.

Al implementar computacionalmente los tres modelos matemáticos y utilizando la demanda histórica para evaluar el comportamiento de los mismos, se obtiene que tanto el modelo heurístico como el modelo parcial logran generar ahorros 2 % menores que los entregados por el modelo completo. Por otro lado, el modelo heurístico es capaz de ser implementado sin la restricción que limita el máximo de órdenes en un plano, lo cual es fundamental para la escalabilidad del proyecto en el largo plazo, dado que se estará preparado para escenarios de mayor demanda. Por otro lado, el modelo heurístico es capaz de resolver el problema en un intervalo de tiempo que hace factible su implementación, a diferencia de los otros dos modelos. Es por esto que se decide escoger este modelo sobre los otros dos.

Se concluye que utilizar rollos más largos, agrupar más días de demanda y permitir un mayor número de agrupaciones de órdenes sobre un plano, aumenta el ahorro esperado de la implementación de este modelo. Dentro de estos factores el que tiene más impacto es el máximo número de agrupaciones sobre un plano, el cual incrementa en un 34 % el ahorro al variar de 2 a 5 el máximo de agrupaciones. Por otro lado, el efecto de la urgencia de impresión de órdenes tiene un impacto negativo de un máximo de 11 % sobre el ahorro total esperado.

Las pérdidas generadas por el anclaje en la carga de rollos representan el 20 % del problema completo y el modelo heurístico logra resolver el 54 % de estas pérdidas. Debido a que no es

posible agrupar toda la demanda de un año sobre un mismo plano, es infactible resolver en su totalidad las pérdidas generadas por esta causa. Por lo tanto, debido al diseño de la máquina de impresión en conjunto con las limitaciones operacionales del negocio se debe considerar una pérdida base de 12 millones de pesos anuales por el anclaje de rollos, los cuales no pueden ser disminuidos con este modelo.

La implementación del software desarrollado en conjunto con las recomendaciones propuestas significarían un ahorro esperado anual de 15.1 millones de pesos, lo que genera un aumento en la rentabilidad de la empresa de un 2.5 %. Esto último se logra a través de una mejora en el uso de los recursos materiales. Adicionalmente, se tiene un ahorro esperado de 23.000  $m^2$  de material, lo que disminuye la huella medio ambiental de Inser Impresores.

Se concluye que el objetivo general de este trabajo de memoria se cumple y da el primer paso para comenzar a generar una empresa más eficiente y rentable, lo cual le va a permitir a Inser Impresores mantenerse dentro de un mercado altamente competitivo. Por otro lado, se cumplen en totalidad los 4 objetivos específicos planteados, así como también los 4 resultados esperados del proyecto.

Como trabajo futuro se propone investigar en detalle sobre el resto de las causas y continuar implementando mejoras que permitan a la empresa ser más eficiente en su operación, y por ende, ser más rentable.

# Capítulo 7

## Bibliografía

- [1] Asociación de Agencias de Medios AAM. Inversión publicitaria en medios, 2019.
- [2] ASIMPRES. Asociación gremial de industriales gráficos de Chile, indicadores. <https://www.asimpres.cl/indicadores/>. Fecha de último acceso: 07/12/2019.
- [3] Mokhtar S Bazaraa, John J Jarvis, and Hanif D Sherali. *Linear programming and network flows*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] Christodoulos A Floudas and Xiaoxia Lin. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers & Chemical Engineering*, 28(11):2109–2129, 2004.
- [5] Kevin C Furman, Zhenya Jia, and Marianthi G Ierapetritou. A robust event-based continuous time formulation for tank transfer scheduling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(26):9126–9136, 2007.
- [6] MG Ierapetritou and CA Floudas. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling. 1. multipurpose batch processes. *Industrial & engineering chemistry research*, 37(11):4341–4359, 1998.
- [7] Tohru Ishihara and Hiroto Yasuura. Voltage scheduling problem for dynamically variable voltage processors. In *Proceedings of the 1998 international symposium on Low power electronics and design*, pages 197–202. ACM, 1998.
- [8] Zhenya Jia, Marianthi Ierapetritou, and Jeffrey D Kelly. Refinery short-term scheduling using continuous time formulation: Crude-oil operations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(13):3085–3097, 2003.

# Capítulo 8

## Anexos

### 8.1. Tablas de ahorro por material

Máximo Agrupaciones	Sustrato	Ahorro en $m^2$		
		Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
2	Ahesivos	3936	3936	3330
2	Papeles	2119	2119	1968
2	Telas	4692	4692	4087
2	Textil	908	908	908
3	Ahesivos	4390	4087	4238
3	Papeles	2573	2422	2573
3	Telas	6206	5600	5903
3	Textil	1211	1059	1211
4	Ahesivos	4844	4844	4692
4	Papeles	2724	2573	2724
4	Telas	6811	6660	6660
4	Textil	1211	1211	1211
5	Ahesivos	4844	4844	4692
5	Papeles	2724	2573	2724
5	Telas	6963	6811	6660
5	Textil	1362	1362	1362

Tabla 8.1: Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en  $m^2$  por material



Máximo Agrupaciones	Sustrato	Ahorro en MM CLP		
		Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
2	Adhesivos	2.60	2.60	2.20
2	Papeles	1.13	1.13	1.05
2	Telas	2.10	2.10	1.83
2	Textil	1.86	1.86	1.86
3	Adhesivos	2.90	2.70	2.80
3	Papeles	1.37	1.29	1.37
3	Telas	2.77	2.50	2.64
3	Textil	2.48	2.17	2.48
4	Adhesivos	3.20	3.20	3.10
4	Papeles	1.45	1.37	1.45
4	Telas	3.04	2.98	2.98
4	Textil	2.48	2.48	2.48
5	Adhesivos	3.20	3.20	3.10
5	Papeles	1.45	1.37	1.45
5	Telas	3.11	3.04	2.98
5	Textil	2.79	2.79	2.79

Tabla 8.2: Variaciones en el máximo número de agrupaciones permitidas, ahorro en MM CLP por material

Días Agrupados	Sustrato	Ahorro en $m^2$		
		Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
1	Ahesivos	3936	3936	3330
1	Papeles	2119	2119	1968
1	Telas	4692	4692	4087
1	Textil	908	908	908
2	Ahesivos	4238	4238	4087
2	Papeles	2270	2270	2270
2	Telas	4692	4692	4541
2	Textil	908	908	908
3	Ahesivos	4541	4541	4390
3	Papeles	1968	1968	1968
3	Telas	4843	4843	4692
3	Textil	908	908	908
4	Ahesivos	4541	4541	4541
4	Papeles	2119	2119	2119
4	Telas	4995	4995	4843
4	Textil	908	908	908
5	Ahesivos	4541	4541	4541
5	Papeles	2270	2270	2270
5	Telas	4995	4995	4843
5	Textil	908	908	908

Tabla 8.3: Variaciones en los días agrupados, ahorro en  $m^2$  por material

Días Agrupados	Sustrato	Ahorro en MM CLP		
		Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
1	Adhesivos	2.60	2.60	2.20
1	Papeles	1.13	1.13	1.05
1	Telas	2.10	2.10	1.83
1	Textil	1.86	1.86	1.86
2	Adhesivos	2.80	2.80	2.70
2	Papeles	1.21	1.21	1.21
2	Telas	2.10	2.10	2.03
2	Textil	1.86	1.86	1.86
3	Adhesivos	3.00	3.00	2.90
3	Papeles	1.05	1.05	1.05
3	Telas	2.16	2.16	2.10
3	Textil	1.86	1.86	1.86
4	Adhesivos	3.00	3.00	3.00
4	Papeles	1.13	1.13	1.13
4	Telas	2.23	2.23	2.16
4	Textil	1.86	1.86	1.86
5	Adhesivos	3.00	3.00	3.00
5	Papeles	1.21	1.21	1.21
5	Telas	2.23	2.23	2.16
5	Textil	1.86	1.86	1.86

Tabla 8.4: Variaciones en los días agrupados, ahorro en MM CLP por material

Largo Rollos	Sustrato	Ahorro en $m^2$		
		Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
5000	Ahesivos	3936	3936	3330
5000	Papeles	2119	2119	1968
5000	Telas	4692	4692	4087
5000	Textil	908	908	908
6000	Ahesivos	4390	4390	4087
6000	Papeles	2270	2270	2119
6000	Telas	4692	4692	4087
6000	Textil	908	908	908
7000	Ahesivos	4390	4390	4087
7000	Papeles	2270	2270	2119
7000	Telas	4692	4692	4087
7000	Textil	908	908	908
8000	Ahesivos	4692	4692	4390
8000	Papeles	2422	2422	2119
8000	Telas	4692	4692	4087
8000	Textil	908	908	908
9000	Ahesivos	4844	4844	4692
9000	Papeles	2422	2422	2270
9000	Telas	4843	4843	4238
9000	Textil	908	908	908
10000	Ahesivos	5147	5147	4995
10000	Papeles	2422	2422	2270
10000	Telas	5145	5145	4389
10000	Textil	908	908	908

Tabla 8.5: Variaciones en el largo de rollos, ahorro en  $m^2$  por material

Largo Rollos	Sustrato	Ahorro en MM CLP		
		Modelo Completo	Modelo Parcial	Heurística
5000	Adhesivos	2.60	2.60	2.20
5000	Papeles	1.13	1.13	1.05
5000	Telas	2.10	2.10	1.83
5000	Textil	1.86	1.86	1.86
6000	Adhesivos	2.90	2.90	2.70
6000	Papeles	1.21	1.21	1.13
6000	Telas	2.10	2.10	1.83
6000	Textil	1.86	1.86	1.86
7000	Adhesivos	2.90	2.90	2.70
7000	Papeles	1.21	1.21	1.13
7000	Telas	2.10	2.10	1.83
7000	Textil	1.86	1.86	1.86
8000	Adhesivos	3.10	3.10	2.90
8000	Papeles	1.29	1.29	1.13
8000	Telas	2.10	2.10	1.83
8000	Textil	1.86	1.86	1.86
9000	Adhesivos	3.20	3.20	3.10
9000	Papeles	1.29	1.29	1.21
9000	Telas	2.16	2.16	1.89
9000	Textil	1.86	1.86	1.86
10000	Adhesivos	3.40	3.40	3.30
10000	Papeles	1.29	1.29	1.21
10000	Telas	2.30	2.30	1.96
10000	Textil	1.86	1.86	1.86

Tabla 8.6: Variaciones en el largo de rollos, ahorro en MM CLP por material

## 8.2. Gráficos de agrupaciones promedio por modelo

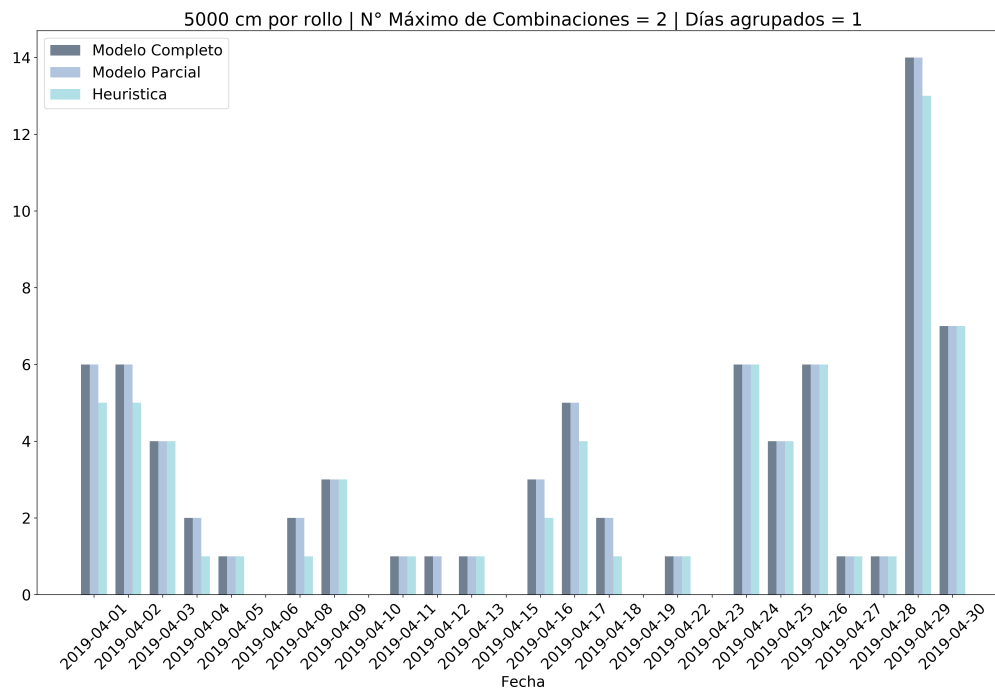


Figura 8.1: Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado

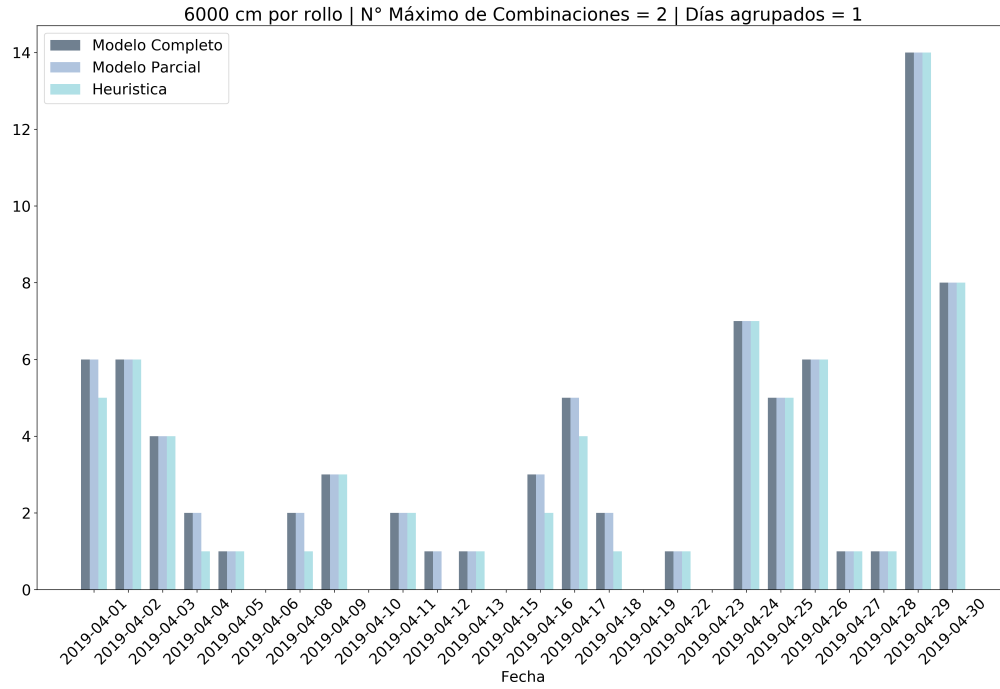


Figura 8.2: Comparativa 3 modelos; 60m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado

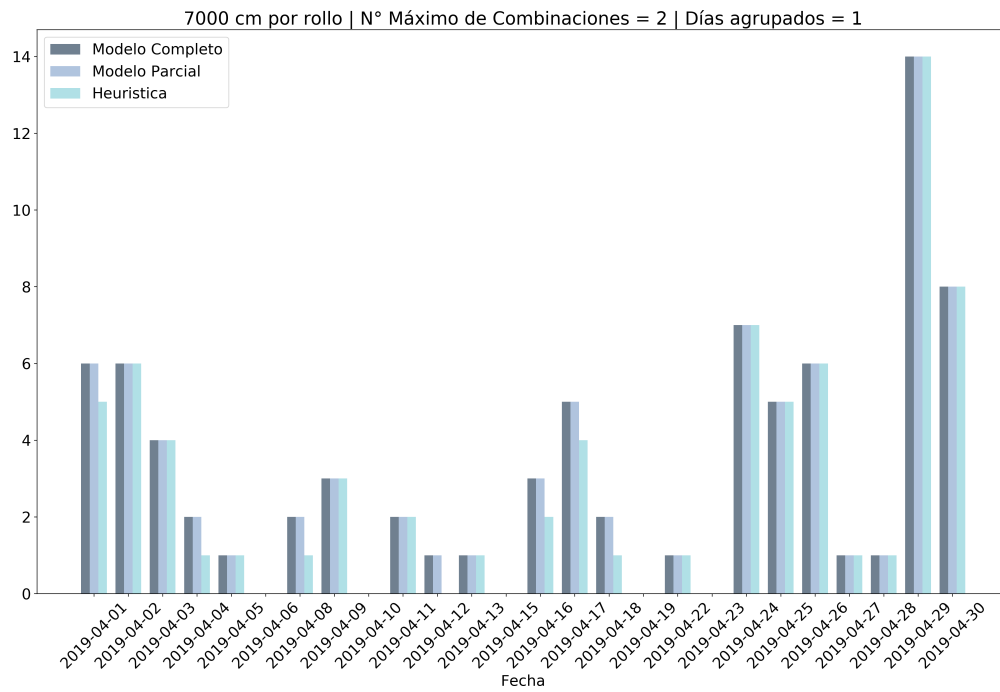


Figura 8.3: Comparativa 3 modelos; 70m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado

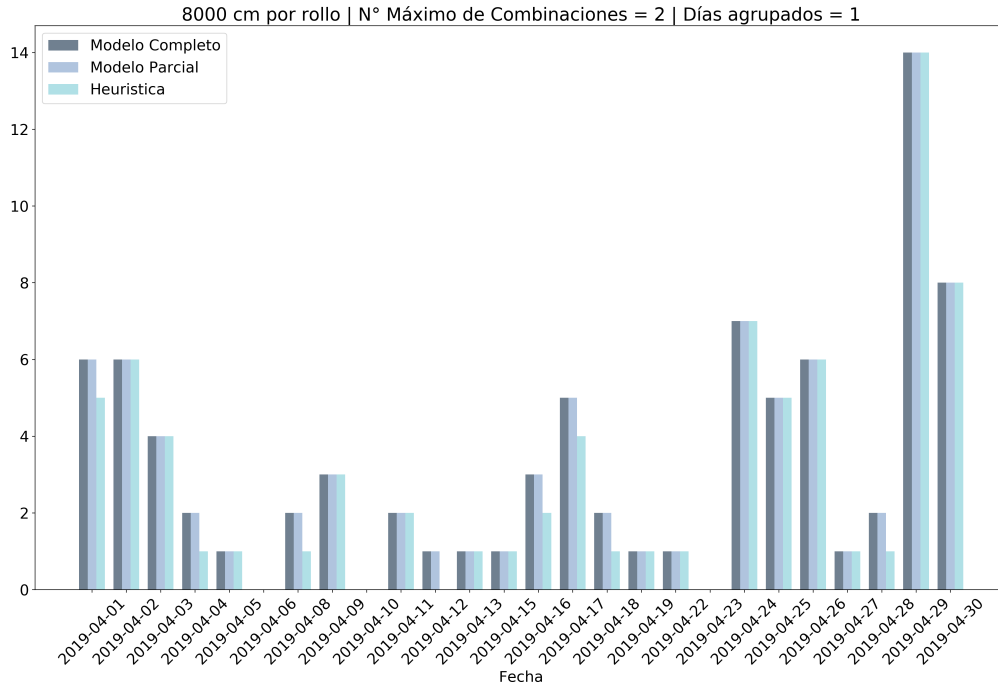


Figura 8.4: Comparativa 3 modelos; 80m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado

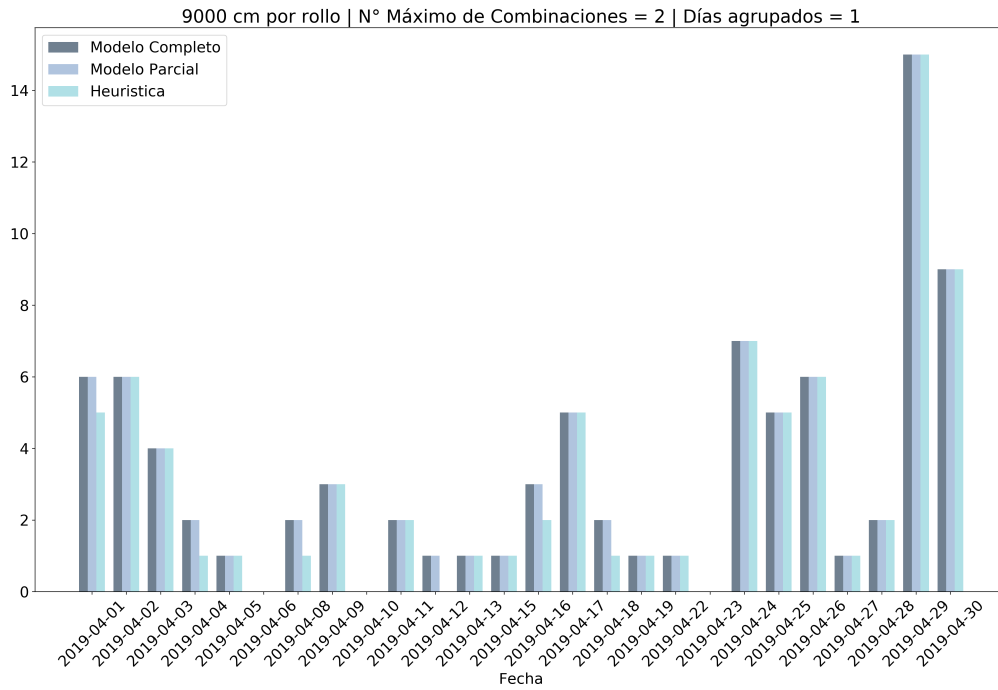


Figura 8.5: Comparativa 3 modelos; 90m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado



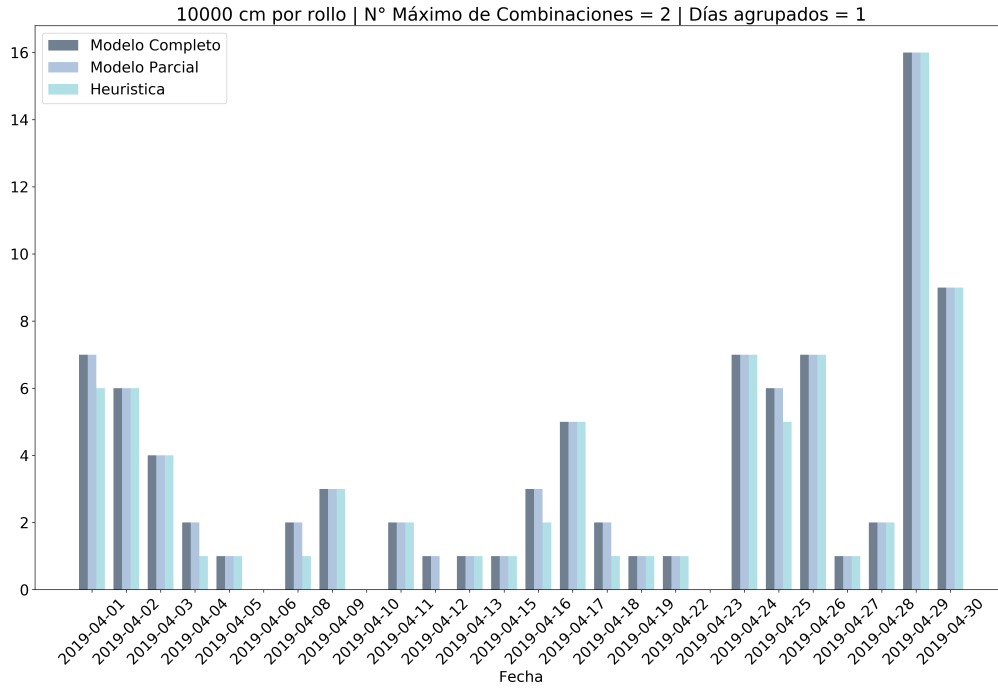


Figura 8.6: Comparativa 3 modelos; 100m por rollo, 2 combinaciones, 1 día agrupado

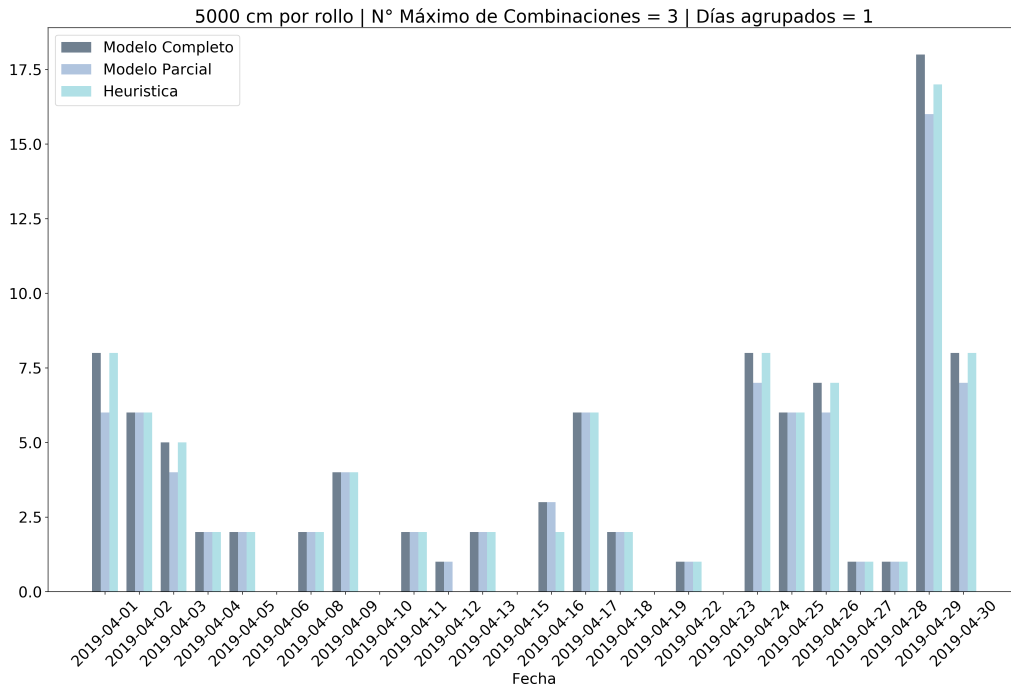


Figura 8.7: Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 3 combinaciones, 1 día agrupado

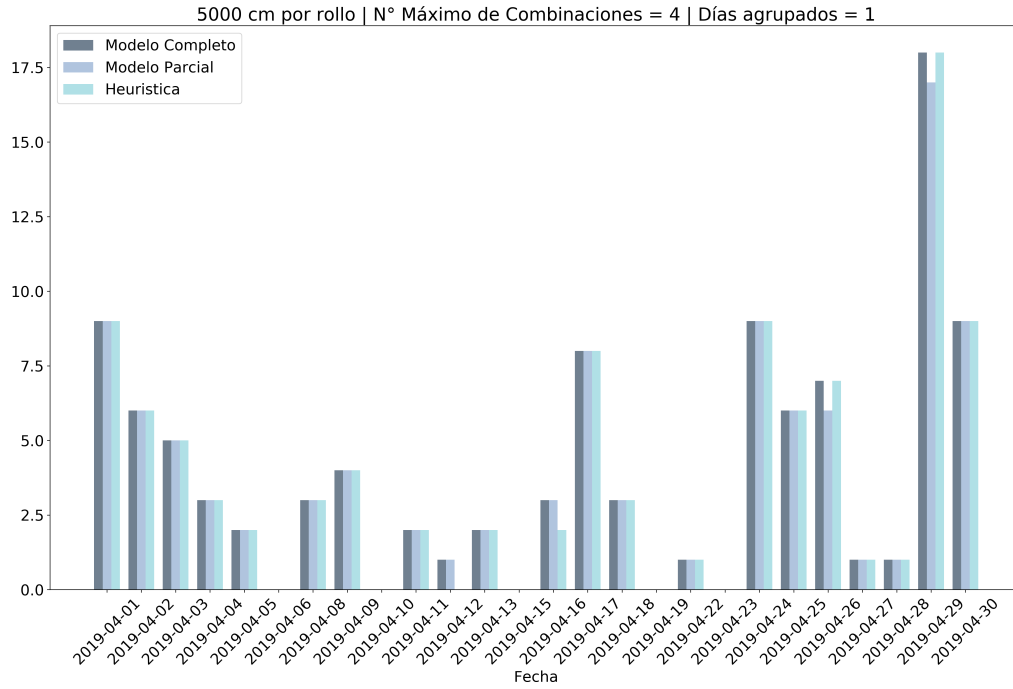


Figura 8.8: Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 4 combinaciones, 1 día agrupado

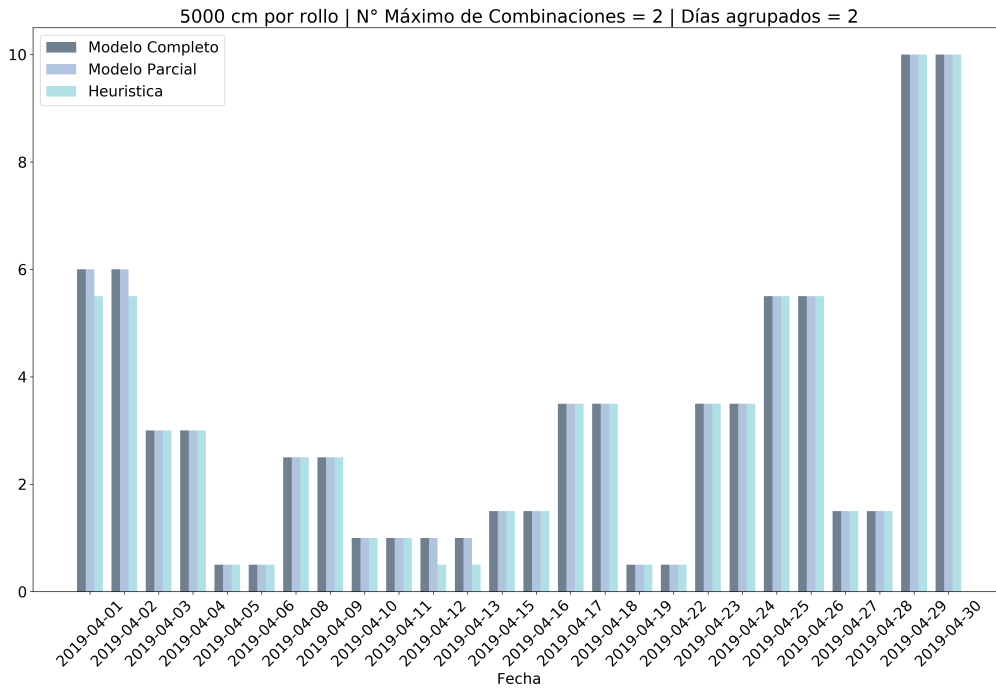


Figura 8.9: Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 2 días agrupados

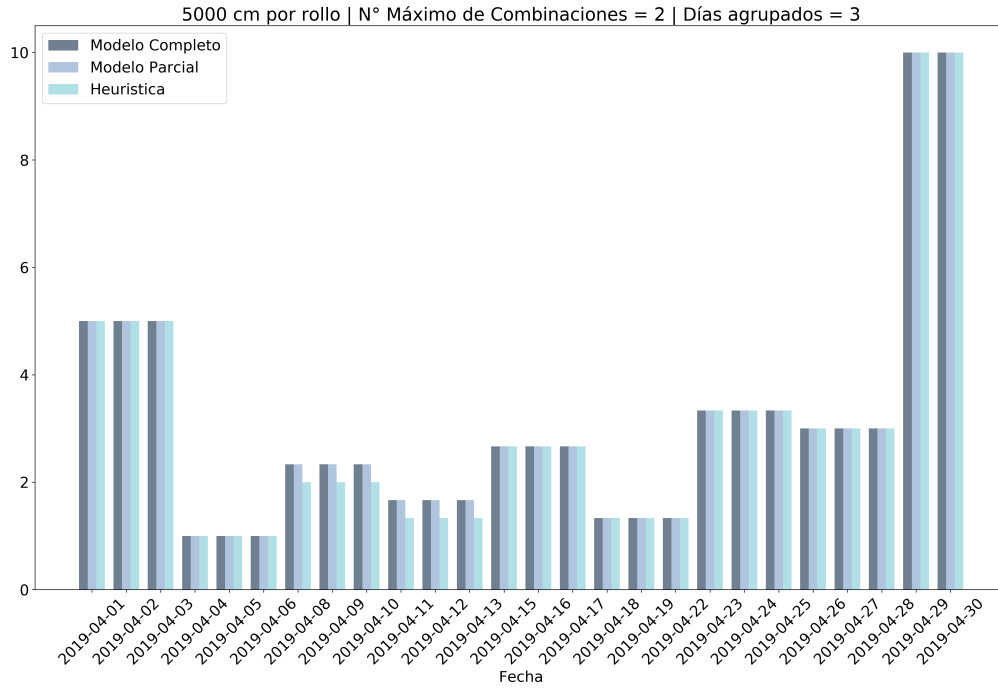


Figura 8.10: Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 3 días agrupados

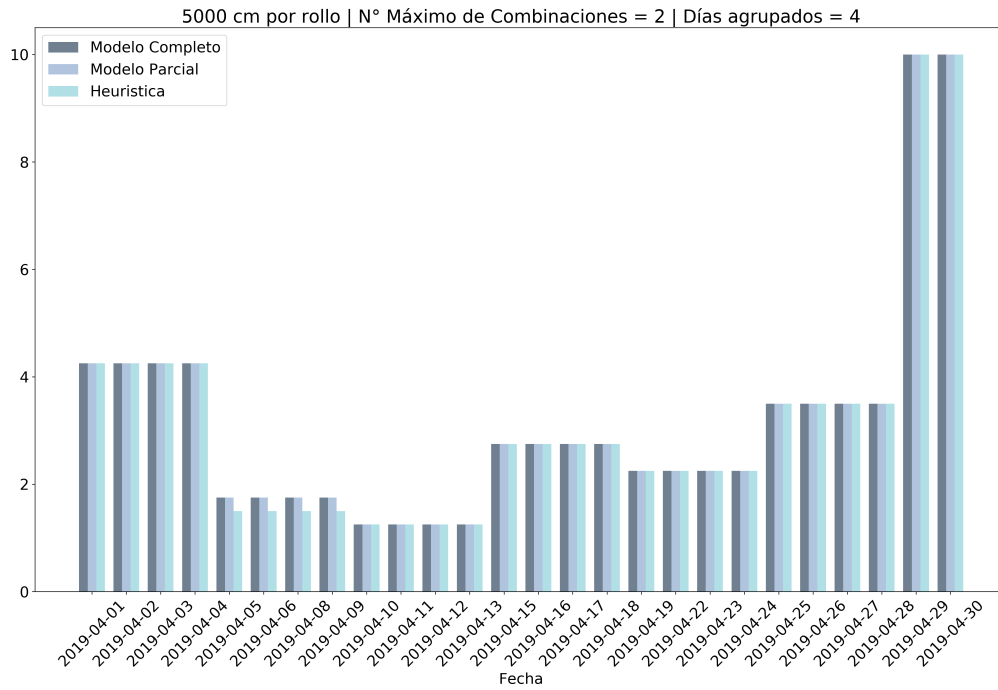


Figura 8.11: Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 4 días agrupados

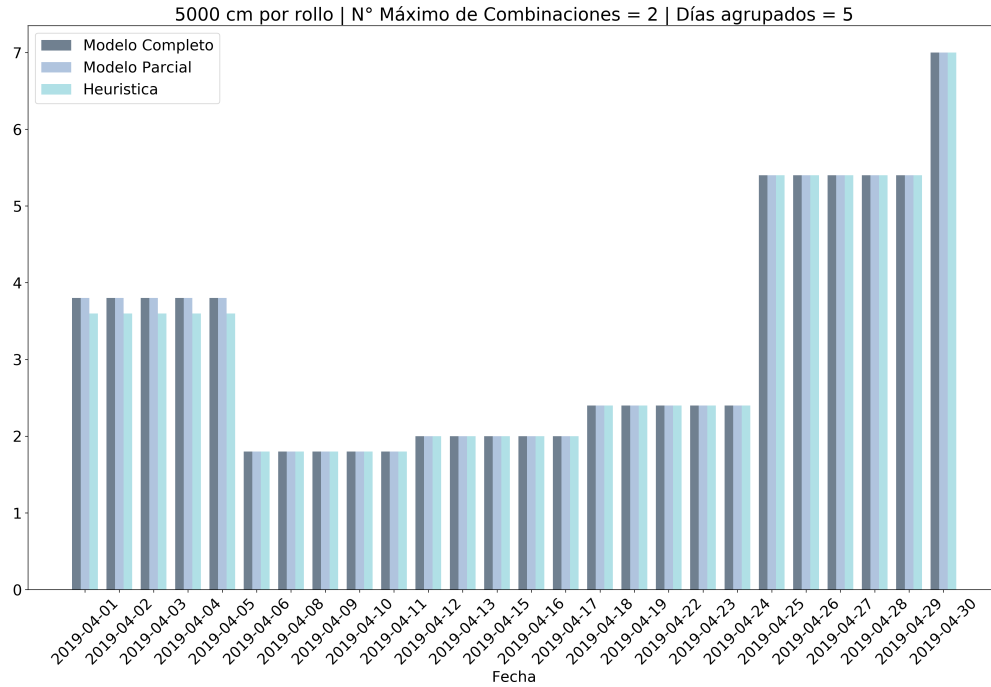


Figura 8.12: Comparativa 3 modelos; 50m por rollo, 2 combinaciones, 5 días agrupados

### 8.3. Códigos computacionales

```

1 df0= pd.read_csv("Consumo y produccion.csv", sep=";")
2 df01=pd.read_csv("OPs.csv", sep=";")
3 df1= pd.read_csv("Log Maquina.csv", sep=";")
4 df2= pd.read_csv("1-3 al 14-4.csv", sep=";")
5 df3= pd.read_csv("15-4 al 31-5.csv", sep=";")
6 df4= pd.read_csv("Junio a Fecha.csv", sep=";")
7 df5= pd.concat([df2,df3,df4], ignore_index=True)

```

Figura 8.13: Importación y concatenación

```

1 df5['op']= df5['Job'].apply(separaGuion)
2 df5['op']= df5['op'].apply(separaGuionAlto)
3 df5['op']=df5['op'].apply(aInt)
4 df5['Starttime'] = df5['Starttime'].apply(straFecha)
5 df5['Width']=df5['Width'].apply(menosDoschar)
6 df5['Width']=df5['Width'].apply(comayfloat)
7 df5['Length']=df5['Length'].apply(menosDoschar)
8 df5['Length']=df5['Length'].apply(comayfloat)
9 df5['Mediawidth']=df5['Mediawidth'].apply(menosDoschar)
10 df5['Mediawidth']=df5['Mediawidth'].apply(comayfloat)

```

Figura 8.14: Transformación de datos

```

1 def intersectaBases(x):
2     try:
3         return union[x]
4     except:
5         return union2[x]
6
7 union=dict(zip(df0['NOP'],df0['FAMILIA']))
8 union2= dict(zip(df5['op'],df5['Medianame']))
9 df5['MAT2'] = df5['op'].apply(intersectaBases)

```

Figura 8.15: Intersección de bases

```

1 df5=df5[( (df5['MAT2'] != 'CARTON') & (df5['MAT2'] != 'CARTULINAS')
2 &
3 (df5['MAT2'] != 'FOMECOR') & (df5['MAT2'] != 'PAI') & (df5['MAT2']
4 != 'TROVICEL'))]
5
6 df5=df5[( (df5['MAT2'] == 'ADHESIVOS') | (df5['MAT2'] == 'PAPEL') |
7 (
8 df5['MAT2'] == 'TELAS') |(df5['MAT2'] == 'TELA PVC') |(df5['MAT2']
9 == 'TELA BACKLIGHT') |(df5['MAT2'] == 'TEXTIL'))]

```

Figura 8.16: Filtro de bases

```

1 def modeloCompleto(dias,maximoDeCombinaciones,DiasAgrupados,
  LargoDeRollos,Df):
2     jj=0
3     objetivo=[None]*len(np.arange(0,len(dias),DiasAgrupados))
4
5     for ii in np.arange(0,len(dias),DiasAgrupados):
6         #Filtra dia
7         df6=agrupayFiltraDias(ii,dias,DiasAgrupados,Df)
8         OPs=df6['op'].unique()
9         MaterialCol=df6['MAT2']
10        Largo=dict(zip(df6['op'],df6['Length']))
11        Material=dict(zip(df6['op'],MaterialCol))
12        LargoMateriales=dict(zip(MaterialCol.unique(),np.repeat(
            LargoDeRollos,len(MaterialCol.unique()))))
13        MaterialesIndices = dict(zip(MaterialCol.unique(), np.arange(
            len(MaterialCol.unique())) ))
14        #Definir problema
15        prob = LpProblem('MinRollos',LpMaximize)
16        #Variables
17        x = LpVariable.dicts('x',allcombinaciones(OPs,
            maximoDeCombinaciones), lowBound = 0 , upBound = 1 , cat=
            LpBinary)
18        #FO
19        prob += lpSum(x[j]*(largode1(j)-1) for j in allcombinaciones(
            OPs,maximoDeCombinaciones))
20        #Restricciones
21        for i in allcombinaciones(OPs,maximoDeCombinaciones):
22            if largode1(i)!=1:
23                prob+= x[i]*(400+lpSum(Largo[y] for y in i )) <=
                    LargoMateriales[Material[i[1]]]
24
25                for k in np.arange(len(i)-1):
26                    prob += x[i]*MaterialesIndices[Material[i[k]]]
                    == x[i]*MaterialesIndices[Material[i[k+1]]]
27
28        for jj1 in OPs:
29            prob += lpSum(x[j] for j in combinacionesconval(jj1,
                    allcombinaciones(OPs,maximoDeCombinaciones))) <= 1
30        prob.solve()
31        objetivo[jj]=value(prob.objective)
32        jj=jj+1
33
34    return objetivo

```

Figura 8.17: Modelamiento computacional Modelo completo

```

1 def modeloParcial(dias,maximoDeCombinaciones,DiasAgrupados,
  LargoDeRollos,Df):
2     jj=0
3     objetivo=[None]*len(np.arange(0,len(dias),DiasAgrupados))
4     for ii in np.arange(0,len(dias),DiasAgrupados):
5         OBJ=0
6         for it in np.arange(maximoDeCombinaciones-1):
7             prob = LpProblem('MinRollos',LpMaximize)
8             #Variables
9             x = LpVariable.dicts('x',((i,j) for i in OPs for j in
              OPs), lowBound = 0 , upBound = 1 , cat= LpBinary)
10            #FO
11            prob += lpSum(x[(i,j)] for i in OPs for j in OPs)
12            #Restricciones
13            for i in OPs:for j in OPs:
14                prob+= x[(i,j)]*(Largo[i]+Largo[j]+400) <=
                  LargoMateriales[Material[i]]
15            for i in OPs:
16                prob += lpSum(x[(i,j)] + x[(j,i)]for j in OPs) <= 1
17            for i in OPs:for j in OPs:
18                prob += x[(i,j)]*MaterialesIndices[Material[i]]
                  == x[(i,j)]*MaterialesIndices[Material[j]]
19            for i in OPs:for j in OPs:
20                prob += x[(i,j)]*(CuentaDeAgrupaciones[i]+
                  CuentaDeAgrupaciones[j])<= x[(i,j)]*
                  maximoDeCombinaciones
21            prob.solve()
22
23            OBJ=value(prob.objective)+OBJ
24            OPs2=OPs
25            for i in OPs2:for j in OPs2:
26                if (x[(i,j)].value() == 1):
27                    k=str(i)+str(" ")+str(j)
28                    OPs = np.append(OPs,k)
29                    Largo[k]=Largo[i]+Largo[j]
30                    Material[k]=Material[i]
31                    CuentaDeAgrupaciones[k]=CuentaDeAgrupaciones
                      [i]+CuentaDeAgrupaciones[j]
32                    OPs = np.delete(OPs,list(OPs).index(i))
33                    OPs = np.delete(OPs,list(OPs).index(j))
34            objetivo[jj]=OBJ
35            jj=jj+1
36            return objetivo

```

Figura 8.18: Modelamiento computacional modelo parcial

```

1 def modeloHeuristica(dias,maximocDeCombinaciones,agrupacionDeDias,
  metrosRollo,df5):
2
3     FOheuristica=[]
4     for ii in np.arange(0,len(dias),agrupacionDeDias):
5         #Filtra dia
6         df6= agrupayFiltraDias(ii,dias,agrupacionDeDias,df5)
7
8         OPs=df6['op'].unique()
9         MaterialCol=df6['MAT2']
10
11        Largo=dict(zip(df6['op'],df6['Length']))
12        Material=dict(zip(df6['op'],MaterialCol))
13        LargoMateriales=dict(zip(MaterialCol.unique(),np.repeat(
14            metrosRollo,len(MaterialCol.unique()))))
15        MaterialesIndice = dict(zip(MaterialCol.unique(), np.arange(
16            len(MaterialCol.unique()) ))
17
18        agt=[]
19        listaEvitar=[]
20        for i in np.arange(len(OPs)-2):
21            if OPs[i] not in listaEvitar:
22                ag=[OPs[i]]
23            else:
24                ag=[]
25
26            m=400 + Largo[OPs[i]]
27            for j in np.arange(i+1,len(OPs)):
28                if Material[OPs[i]]==Material[ OPs[j]]:
29                    if m+ Largo[OPs[j]]<=metrosRollo:
30                        if (OPs[j] not in listaEvitar) and (OPs[
31                            i] not in listaEvitar ):
32                            if len(ag) < maximocDeCombinaciones:
33                                ag.append(OPs[j])
34                                m = m + Largo[OPs[j]]
35                                listaEvitar.append(OPs[j])
36
37            listaEvitar.append(OPs[i])
38            agt.append(ag)
39
40        agt = limpiaVector(agt)
41        FOheuristica.append(funcionObj(agt))
42
43    return FOheuristica

```

Figura 8.19: Modelamiento computacional modelo heurístico



```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import tkinter as tk
4 from tkinter import filedialog
5 root=tk.Tk()
6
7 def limpiaVector(x):
8     y=[]
9     for i in x:
10         if len(i) > 0:
11             y.append(i)
12     return y
13
14 def modeloHeuristicaF(DF,DFM,maximocDeCombinaciones=10000,
15 agrupacionDeDias=3,metrosRollos=100000):
16     FOheuristica=[]
17     OPs=DF['ORDEN']
18     MaterialCol=DFM['MATERIALES']
19     Largo=dict(zip(DF['ORDEN'], DF['LARGO']))
20     Material=dict(zip(DF['ORDEN'], DF['MATERIAL']))
21     LargoMateriales=dict(zip(MaterialCol, DFM['LARGO']))
22     MaterialesIndices = dict(zip(MaterialCol, np.arange(len(
23         MaterialCol))))
24     Urgencia= dict(zip(DF['ORDEN'], DF['URGENTE']))
25     agt=[]
26     listaEvitar=[]
27
28     for i in np.arange(len(OPs)-2):
29         if OPs[i] not in listaEvitar:
30             ag=[OPs[i]]
31         else:
32             ag=[]
33
34         m=400 + Largo[OPs[i]]
35         for j in np.arange(i+1,len(OPs)):
36             if Urgencia[OPs[i]]==Urgencia[OPs[j]]:
37                 if Material[OPs[i]]==Material[ OPs[j]]:
38                     if m+ Largo[OPs[j]]<=metrosRollos:
39                         if (OPs[j] not in listaEvitar) and (OPs[
40                             i] not in listaEvitar ):
41                             if len(ag) < maximocDeCombinaciones:
42                                 ag.append(OPs[j])
43                                 m = m + Largo[OPs[j]]
44                                 listaEvitar.append(OPs[j])

```

Figura 8.20: Código del programa, primera parte

```

1      listaEvitar.append(OPs[i])
2      agt.append(ag)
3
4      agt=limpiaVector(agt)
5      hagt=np.hstack(agt)
6      DF["AGRUPACIN"]=np.repeat(-1,len(OPs))
7
8
9      for j in OPs:
10         if j not in hagt:
11             agt.append([j])
12
13         for ind1,i in enumerate(agt):
14             for j in i:
15                 indice= np.where(OPs == j)[0][0]
16                 DF.loc[indice,"AGRUPACIN"]=ind1+1
17
18         DF=DF.sort_values(["URGENTE","AGRUPACIN"],ascending=[False,True
19                             ])
20         DF.reset_index(inplace = True)
21         DF=DF.iloc[:, -5: ]
22         return DF
23
24 path_input = filedialog.askopenfilename(title="Selecciona el archivo
25         input")
26 p=""
27 for ind,i in enumerate(path_input.split("/")[:-1]):
28     p=p+"/"+i
29 p=p[1:]
30 path_out= p+"/"+"OUTPUT.xlsx"
31
32 DF=pd.read_excel(path_input,sheet_name=0)
33 DF_Materiales=pd.read_excel(path_input,sheet_name=1)
34
35 out = modeloHeuristicaF(DF,DF_Materiales)
36 out.to_excel(path_out)
37
38 root.destroy()

```

Figura 8.21: Código del programa, segunda parte