

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



Simulación de tránsito del Parque Vehicular de la Ruta 160, tramo  
Arauco – Puerto San Vicente.

Michael Christopher Hernández Santis

Informe de Proyecto de Título para optar al Título de  
Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía: Dr. Jorge Beyer Barrientos

Profesor Informante: Dra. María Teresa Bull

Concepción, Agosto de 2016.

## I. Resumen

El estudio de la ingeniería logística, conlleva una serie de procesos que intentan disminuir los costos de las empresas en términos de transporte, evitando tiempos tardíos de entrega, pérdida o robo de productos, materiales e impactos ambientales en las rutas que utilizan para su distribución. Estos impactos se han visto reflejados actualmente en un sector crítico empresarial de la región del Biobío, específicamente en tramos de la ruta 160, que une la provincia de Arauco, Coronel y San Pedro de la Paz, donde se producen grandes tacos de hasta 10 km. Estas congestiones producen desconformidad a los habitantes de estas comunas, que deben lidiar a diario con estos problemas.

A consecuencia de esto, se realizó un estudio que logrará dimensionar el déficit de la infraestructura logística en este tramo específico de la región, con el fin de evaluar diferentes escenarios propuestos por el Ministerio de Obras Públicas, con un horizonte de tiempo hasta el año 2020. Este estudio se realizó durante los años 2015 y 2016 mediante una simulación de tránsito con un software computacional Flexsim, donde se utilizó datos reales entregados por el SECTRA, entidad que se dedica a la toma de tiempos de tránsito y aforos vehiculares en los distintos sectores de la región.

La simulación está basada en la metodología propuesta por Jerry Banks, quien creó un método para este tipo de estudios, donde incluía aspectos importantes como la ingeniería de tránsito.

La utilización de un software computacional nos ayudó a obtener una imagen real de la ruta que se estudió. Además, nos permite experimentar con distintos escenarios en tramos cortos de tiempo y en sectores específicos de la ruta.

Los resultados entregados por el simulador fueron de gran ayuda para entender cómo se comportaba actualmente la ruta, se logró encontrar los puntos críticos y como actuarán en el futuro los distintos escenarios

evaluados, debido al gran crecimiento del parque vehicular para los próximos años.

Los escenarios que fueron evaluados con el software indicaron distintas soluciones que lograrían descongestionar la ruta de aquí al año 2020, dando así facilidades de transporte a los usuarios que utilizan a diario estas rutas. Además, ayudaran al momento que se realicen trabajos en la actual ruta 160, dando posibilidades de rutas alternativas para el transporte de los productos.

Es de suma importancia tener claro el momento en que serán tomados los datos y que se actualicen cada año, así obtener un resultado lo más semejante al comportamiento real re la ruta.

## II. Abstract

The study of engineering logistic, involves a series of processes that attempt to decrease the cost for enterprises in terms of transport, avoiding times late delivery, loss or theft of products, materials, and environmental impacts of the routes they used for their distribution. These impacts have been seen reflected currently in a critical sector of business in the region of the Bio-Bio, specifically in sections of the route 160, which connects the province of Arauco, Coronel and San Pedro de la Paz, where they produce large slabs of up to 10 kilometers. These bottlenecks produce inconsistency to the inhabitants of these communes, which should be linked to daily with these problems.

As a result of this, a study was conducted which will identify the deficit of the logistics infrastructure in this specific segment of the region, in order to evaluate different scenarios proposed by the Ministry of the Public Works, whit the time horizon until the year 2020. This study was conducted during the years 2015 and 2016 through a simulation of transit with a computing software, where we used actual data delivered by SECTRA, an entity id dedicated to making transit times and capacities vehicle in the different sectors of the region.

The simulation is based on the methodology proposed by Jerry Banks, who created a method for this type of studies, which included important aspects such as traffic engineering.

The use of computers software helped us to get a real picture of the route that was studied. In addition, it allows us to experiment with different scenarios in short lengths of time and in specific sectors of the route.

The results delivery by the simulator were of great help to understand how it behaved currently the route, he managed to find the critical points and hoy they will act in the future, the different scenarios evaluated, due to the high growth of the vehicle fleet for the coming years.

The scenes that were evaluated by the software indicated different solutions that would manage to clear the route of here a year 2020, giving facilities like that of transport to the users who use daily these routes. In addition, they were helping to the moment that works should fulfil in the current route 160, giving possibilities of alternative routes for the transport of the products.

It performs supreme importance to have clear the moment in which the information will be taken and which they update every year, this way a result obtains the most similar thing to the royal behavior re the route.

## Índice

1	Capitulo 1	15
	1.1 Introducción	15
	1.2 Objetivo	18
	1.2.1 Objetivo General	18
	1.2.2 Objetivos específicos	18
	1.3 Justificación de la propuesta	19
	1.3.1 Delimitación del problema	21
2	Capítulo 2: Marco Metodológico	22
	2.1 Metodología	22
3	Capítulo 3: Antecedentes Industriales	25
	3.1 Industria forestal en Chile	25
	3.1.1 Celulosa Arauco y Constitución	26
	3.1.1.1 Forestal	27
	3.1.1.2 Celulosa	28
	3.1.1.3 Paneles	28
	3.1.1.4 Maderas	29
4	Capítulo 4: Revisión Bibliográfica	
	4.1 Definición del concepto Logística y su utilidad en la Industrias Forestales	31
	4.1.1 Concepto de Logística.	31
	4.1.2 Logística en la Industria Forestal	33
	4.2 Simulación	34
	4.2.1 ¿Por qué un modelo de simulación?	34
	4.2.2 Concepto	36
	4.2.3 Modelos de simulación discretos	38
	4.2.4 Modelos de simulación continuos	40
	4.3 Ingeniería de transito	46
	4.3.1 Modelos Lineales	47
	4.3.2 Modelos no Lineales	48

	4.3.2.1 Modelo Logarítmico	48
	4.3.2.2 Modelo Exponencial	49
	4.5 Simulador Flexsim	50
5	Capitulo 5: Oferta de Servicios Logísticos para satisfacer la demanda	51
	5.1 Demanda Actual y Futura	52
	5.2 Oferta de Servicios Logísticos	55
6	Capitulo 6	58
	6.1 Estructura vial de la ruta 160	58
	6.2 Objetivo de la simulación y plan estratégico	61
	6.3 Modelo Conceptual	61
	6.4 Recopilación de datos	63
	6.5 Modelo de traducción	70
	6.6 Validación	74
	6.7 Diseño experimental	78
	6.7.1 Escenarios	78
7.	Capítulo 7: Ejecuciones del Simulador	82
	7.1 Ejecución del Modelo Actual hasta el año 2020	82
	7.2 Ejecuciones del Modelo 1 “Puente Industrial“	83
	7.3 Ejecuciones del modelo 2: Ruta Pie de Monte	85
	7.4 Ejecuciones del modelo 3: Ruta Costera	88
	7.5 Documentación, resultados y presentación de informe	92
	7.5.1 Resumen de tiempos	93
8.	Conclusiones y recomendaciones.	96
	8.1 Conclusión	96
	8.2 Recomendaciones	98
9.	Bibliografía	100
	9.1 Linkografía	101

10. Anexos	102
Anexo A: Aforos Vehiculares	102
Anexo B: Crecimiento del parque vehicular según índice entregado por el INE.	110
Anexo C: Resultados Arrojadados por el Simulador.	113

## **I. Índice de Diagramas**

Diagrama N°1: Diagrama Lógico de Tránsito Vehicular.	71
--	----

## **II. Índice de Gráficos**

Grafico 1: Exportaciones de Chile por Sector Industrial.	15
--	----

Gráfico N°2: Total de exportaciones del sector forestal en millones US\$.	19
---	----

Gráfico N°3: Principales Mercados para los productos forestales en Chile.	25
---	----

Gráfico N°4: Ventas por mercado de paneles 2013 en % sobre US\$ 1.941 millones.	29
---	----

Gráfico N°5: Ventas por mercado de la madera en % sobre US\$830 millones.	30
---	----

Gráfico N° 6: Exportaciones forestales mensuales en millones de US\$ FOB.	52
---	----

Gráfico N°7: Distribución de flujos por tipo de vehículos.	59
--	----

Grafico N°8: Flujo vehicular por horario.	69
---	----

Grafico N°9: Flujo vehicular por horario.	69
---	----

Gráfico N°10: Comparación entre los distintos escenarios con el promedio entregado por el experto.	90
--	----

Gráfico N°11: Comparación entre los escenarios conjuntos Puente Industrial + Pie de Monte y Puente Industria + Ruta Costera con el promedio entregado por el experto.	91
---	----

### **III. Índice de Figuras.**

Figura N°1: Modelo de Simulación de Jerry Banks.	45
Figura N°2: Flujo de productos forestales en la industrial primaria de Pino Radiata.	54
Figura N°3: Flujo de productos forestales en la industrial primaria de Eucalipto.	55
Figura N°4: Tramos en estudio de la ruta 160, San Pedro y conexión a puertos.	59
Figura N°5: Modelo Conceptual en Flexsim.	62
Figura N°6: Aforos Vehiculares en los tramos simulados.	65
Figura N°7: Medida Distancia utilizada en Flexsim.	72
Figura N°8: Modelo situación actual San Pedro de la Paz, Pte. Juan pablo II.	80
Figura N°9: Modelo 2, Puente Industrial.	80
Figura N°10: Modelo 3, Ruta Pie de Monte.	81
Figura N°11: Modelo 4, Nueva Ruta Costera.	81

### **IV. Índice de Tablas.**

Tabla N°1: Capacidad de celulosa por planta en Adt.	28
Tabla N°2: Cantidad de exportaciones forestales según empresas de interés.	53
Tabla N°3: Numero de fletes por año.	56
Tabla N°4: Horarios de toma de tiempos.	64
Tabla N°5: Tipos de vehículos que transitan en la ruta 160.	64

Tabla N°6: Definición de tramos en la ruta 160.	66
Tabla N°7: Tramos subdivididos Coronel - Av. Pedro Aguirre Cerda.	66
Tabla N°8: Tramos con sus respectivas distancias y velocidades.	67
Tabla N°9: Intersecciones en la ruta 160, en tramo a estudiar.	68
Tabla N°10: Distancia de cada tramo en medida del Simulador.	73
Tabla N°11: Distribución por tramos y tipo de flujo.	74
Tabla N°12: Estadística descriptiva tramos Arauco-Costanera.	75
Tabla N°13: Validación de tiempos.	76
Tabla N°14: Comparación de tiempos del Modelo Real.	76
Tabla N°15: Estadística descriptiva de la muestra real y media estimada.	77
Tabla N°16: Tiempos Escenario Actual hasta el año 2020.	82
Tabla N°17: Tiempos modelo Puente Industrial para el año 2015.	83
Tabla N°18: Tiempos modelo Puente Industrial año 2018.	84
Tabla N°19: Tiempos Modelos Puente Industrial año 2020.	85
Tabla N°20: Tiempos Modelos 2: Pie de Monte, año 2016.	85
Tabla N°21: Tiempos Modelo Pie de Monte año 2018.	86
Tabla N°22: Tiempo Modelo Pie de Monte y Puente Industrial año 2018.	86
Tabla N°23: Tiempos Modelo Pie de monte y Puente Industrial año 2020.	87
Tabla N°24: Tiempos modelo Ruta Costera año 2016.	88
Tabla N°25: Tiempos Modelo Ruta costera año 2018.	88

Tabla N°26: Tiempos Modelo Ruta Costera + Puente Industrial año 2018.	89
Tabla N°27: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 1 Puente Industrial.	93
Tabla N°28: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 2 Ruta Pie de Monte.	93
Tabla N°29: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 1 y 2 Ruta Pie de Monte + Puente Industrial.	93
Tabla N°30: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 3 Ruta Costera 2 KM.	94
Tabla N°31: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 1 y 3 Ruta Costera + Puente Industrial.	94

## **V. Índice de Anexos.**

Anexos A: Aforos Vehiculares.	102
Tabla A1: Tramo Arauco-Lota-Coronel.	102
Tabla A2: ByPass.	102
Tabla A3: Av. Galvarino.	103
Tabla A4: Calle A.	103
Tabla A5: Av. Verdi.	103
Tabla A6: José Donoso.	103
Tabla A7: Jerusalén.	104
Tabla A8: Victoria.	104
Tabla A9: Manuel Rodríguez.	105
Tabla A10: Carlos Pezoa Veliz.	105

Tabla A11: Michaihue.	105
Tabla A12: Daniel Belmar.	106
Tabla A13: Laguna Grande.	106
Tabla A14: Av. Avellanos.	106
Tabla A15: San Pedro.	107
Tabla A16: Puente Juan Pablo II.	107
Tabla A17: Victoria.	107
Tabla A18: Luis Acevedo.	108
Tabla A19: Costanera Acceso Pte. JP II.	108
Tabla A20: Puente Llacolen.	108
Tabla A21: Costanera Oriente.	109
Tabla A22: Costanera Poniente.	109
Anexo B: Crecimiento del parque vehicular según índice entregado por el INE.	110
Tabla B1: Crecimiento Vehicular año 2016.	110
Tabla B2: Crecimiento vehicular año 2017 y 2018.	111
Tabla B3: Crecimiento Vehicular año 2019 y 2020.	112
Anexo C: Resultados Arrojadados por el Simulador.	113
Tabla C1: Replicas Modelo actual año 2015.	113
Tabla C2: Replicas Escenario Puente Industrial 2015 y 2016.	114
Tabla C3: Replicas Escenario Puente Industrial 2017 y 2018.	115
Tabla C4: Replicas Escenario Puente Industrial 2019 y 2020.	116

Tabla C5: Replicas Escenario Ruta Pie de monte año 2016 y 2017.	117
Tabla C6: Replicas escenario Pie de Monte año 2018, 2019 y 2020.	118
Tabla C7: Replicas escenario Ruta Costera 2016, 2017 y 2020.	119
Tabla C8: Replicas Escenario conjunto 1 y 2, Puente Industrial + Ruta Pie de Monte años 2018 y 2019.	120
Tabla C9: Replicas escenario conjunto 2 y 3, Puente industrial + ruta costera años 2018, 2019 y 2020.	121

## Capítulo 1

### 1.1 Introducción

Desde el año 2003 el sector forestal en Chile ha crecido notablemente y es una de las fuentes de exportaciones más importantes del país, aportando en un 7,4% del total exportado. Los principales mercados son China con un 19,2%, EE.UU con un 11,1%, Japón 9,6% y Holanda 6%.

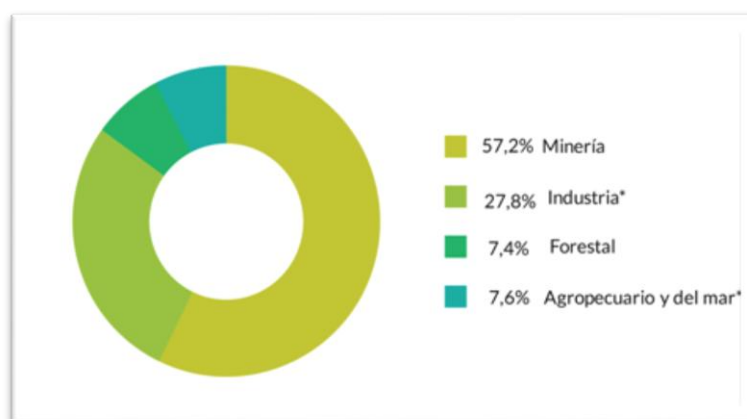


Gráfico 1: Exportaciones de Chile por Sector Industrial.

Fuente: Corporación Chilena de la Madera (CORMA).

La Región del Biobío es uno de los principales protagonistas del rubro forestal del país, liderando las exportaciones a nivel nacional. En el 2006 las exportaciones alcanzaron un 80% del total embarcado del país. Dicho sector forestal se divide en 2 grandes Industriales forestales: Arauco y Mininco (CMPC), las cuales, son las 2 grandes entidades que poseen más de la mitad de las plantaciones existentes en el país, además de las plantas de celulosa y papeles.

Actualmente existen varias actividades que generan valor a los productos forestales, como las tecnologías de producción que hacen los procesos más eficientes con el fin de entregar un producto de mayor calidad y sustentables con el medio ambiente. Otra de las actividades

que genera altos costos es el transporte, con un 42% aproximado de los costos totales de la planta, es por esto que es importante realizar una buena gestión de estos procesos y controlarlos de forma eficiente.

Además del elevado costo que genera el transporte de estos productos, este genera un alto impacto social a los habitantes cercanos a estas industrias, lo que produce externalidades negativas para el transporte cotidiano de las personas que utilizan las diferentes rutas que conectan las plantas con los puertos de la región.

Estas problemáticas se han visto reflejadas hasta el día de hoy en las rutas, especialmente en la ruta 160, que une la comuna de Arauco con Coronel y sectores aledaños.

Este impacto social se ha visto reflejado por manifestaciones de las comunidades que utilizan estos tramos para su vida cotidiana y por los mismo trabajadores que transportan productos del sector forestal, ya que se generan congestiones de más de 10 km, atrasando sus procesos de distribución y sus horas de trabajo.

Estas especificaciones fundamentan el intento de gestionar de forma más eficiente, la salida de productos desde las distintas plantas forestales que utilizan a diario esta ruta, para así descongestionar el tramo que une la comuna de Arauco con Coronel.

Para esto se dimensionará la oferta logística actual y futura que poseen estas plantas, con el fin, de identificar cuáles son los puntos críticos de las congestiones y con estos datos realizar una simulación del proceso, incorporando escenarios de posibles alternativas con la finalidad de encontrar una solución a las problemáticas mencionadas anteriormente.

Para realizar la simulación del proceso de transporte de los productos, se obtendrán los datos directamente de Servicios Logísticos Arauco que está a cargo de gestionar la salida de Productos forestales y SECTRA (Secretaría de Planificación de Transporte), que realiza estudios de flujos vehiculares en distintas rutas de la región y el país. Se utilizará el software Flexsim para simular de forma computacional estos procesos

de salida de los productos, desde la plantas hasta los 4 puertos emplazados en la región.

Se buscará analizar el flujo vehicular actual de la ruta, su comportamiento en el futuro de acuerdo al crecimiento de la población y la ampliación de las plantas. Para esto, se analizarán distintos escenarios y proyectos propuestos por el Ministerios de Obras Públicas de acuerdo al plan estratégico de la región del Biobío con un horizonte de tiempo hasta el año 2020.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

- Simular red de transporte e infraestructura Logística para atender la demanda futura de productos exportados, con el fin de ayudar a tomar decisiones para descongestionar la ruta 160.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar la oferta de los servicios logísticos actuales con respecto a la demanda actual y futura de las plantas de Arauco.
- Dimensionar el déficit de infraestructura logística de acuerdo al plan estratégico de la región del Biobío y el horizonte de planificación de las Plantas de Arauco, simulando con el Software Flexsim el modelo de la ruta 160.
- Evaluar alternativas de solución para mejorar el déficit de infraestructura logística, de acuerdo a la demanda proyectada de las plantas de Arauco, simulando los distintos escenarios del plan estratégico de la región del Biobío.

### 1.3 Justificación de la propuesta

Arauco posee plantas en todo el país donde se generan distintos productos que comercializa a nivel mundial, como la celulosa y la madera.

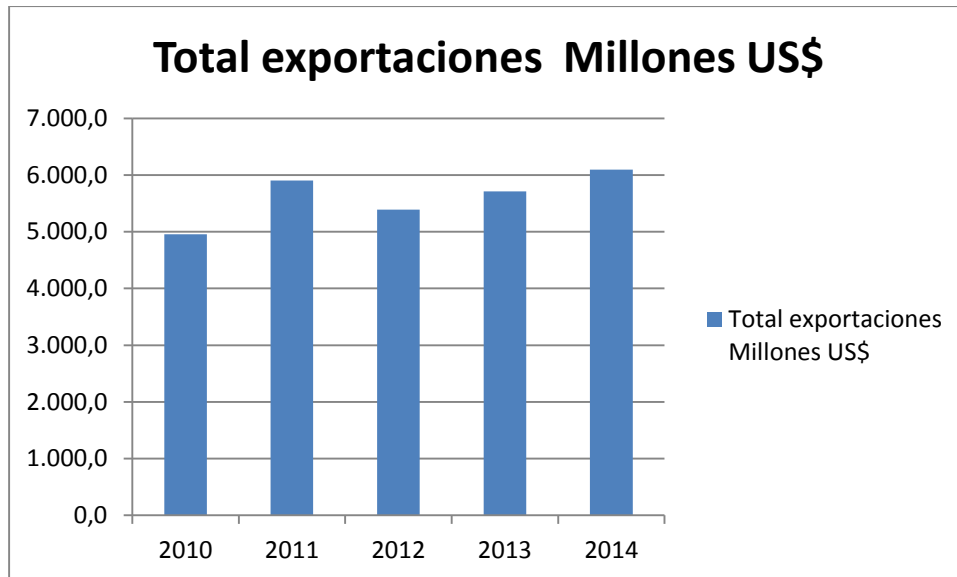


Gráfico N°2: Total de exportaciones del sector forestal en millones US\$.

Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Forestal.

Como se observa en el gráfico N°2, las exportaciones de los principales productos forestales han crecido durante los últimos 4 años, según el Instituto Forestal (INFOR), y este seguirá en aumento de acuerdo a las estadísticas que se han visto reflejadas en los meses de Enero y Febrero del año 2015 con respecto a los mismos meses en el año 2014.

Actualmente, Arauco posee un proyecto en marcha llamado Nuevo Horcones, el cual pretende mejorar e implementar nuevas líneas de producción, tanto para la generación de nuevos productos y mejoramiento en las temáticas ambientales que posee la empresa causando así un aumento en la actividad logística de la industria forestal.

La problemática que causara el aumento de la actividad logística, es la congestión vehicular de la ruta 160, que es la utilizada por esta industria para la distribución de sus productos hacia los distintos puertos de la región y que actualmente se ve sobrepasada en su capacidad.

Cabe señalar que esta problemática, posee historia hace varios años y genera externalidades negativas tanto a los usuarios y trabajadores que utilizan esta ruta para transportar sus productos, estas externalidades se ven reflejadas por colapsos y congestiones vehiculares de hasta 10 km en la carretera que conecta la comuna de Arauco y coronel.

Todas estas situaciones, se han visto reflejadas por manifestaciones de la comunidad y de los mismos funcionarios de las empresas de transporte, generando alteraciones en sus jornadas laborales, ya sean por retrasos o horas extras que deben cumplir por estas complicaciones, llevando a los trabajadores a manifestarse para apelar a que les den alguna solución a estos problemas. (Prensa Biobío Chile 2015).

Dimensionar la estructura logística, ayudará a conocer cómo se comportan todos los servicios de transporte existentes en la región, la que generará una mejor distribución mejorando la eficiencia de los trabajos. Si bien, existen varios servicios logísticos en la región, se debe dimensionar su capacidad estructural dada las altas demandas que se han generado en el último año y la que seguirá en aumento por lo menos dentro de los 15 años. (Instituto Forestal, INFOR, 2015).

### 1.3.1 Delimitación del problema

La problemática está asociada específicamente a la ruta 160, que une la provincia de Arauco con Coronel, por lo tanto, el estudio se basará en las empresas asociadas a Celulosa Arauco y que transportan sus productos por esta ruta.

Las empresas que utilizan esta ruta para exportar sus productos son:

- Aserradero el Colorado
- Aserradero Escuadrón
- Aserraderos Horcones I y II
- La Bodega de Productor terminados de Horcones
- Paneles Arauco
- Celulosa Arauco su planta principal.

Igualitariamente, los productos que salen de estas plantas para ser transportados, se exportan a través de cuatro puertos principales emplazados en la región del Biobío, estos son:

- Puerto Central San Vicente.
- Puerto Coronel.
- Puerto Lirquén.
- Puerto Talcahuano.

Cabe mencionar, además, que el análisis se realizará con la Industria Celulosa Arauco, ya que de aquí fueron obtenidos los datos para el estudio, a través del área a cargo de Servicios Logísticos Arauco. Estos datos fueron entregados de forma confidencial por privacidad de la información requerida.

## Capítulo 2

### 2.1 Marco Metodológico

En este capítulo se especificará la metodología utilizada para realizar el estudio, se indicarán cuáles fueron los métodos y procedimientos utilizados para llevar a cabo los objetivos. Se indicarán las fuentes de información y donde se obtuvieron los datos para su realización.

La principal actividad que se realizó fue la visita a la planta, tanto para conocer cuáles son sus procesos productivos, como se maneja el sector forestal, dimensionar su nivel productivo y los productos que fabrican. Conocer su nivel de exportaciones y los principales países a los cuales son vendidos los productos.

Una vez realizada la visita a la planta, se procedió a contactar al Subgerente de Transporte Terrestre de Celulosa Arauco, Servicio Logístico Arauco, Gonzalo Pelen Baldi, quien fue la persona que apoyo la investigación y derivó a la obtención de la información para el estudio.

El análisis se centra en la región del Biobío, específicamente en la ruta 160, por lo tanto, la información que se solicitó, fue específicamente de las plantas que utilizan esta ruta para el transporte de sus productos. Esta información se solicitó directamente con las personas a cargo de este rubro y luego de unas semanas se obtuvo satisfactoriamente esta información.

Estos datos fueron sintetizados y cuantificados a través de Excel, software utilizado para registrar la información y mantenerla en orden.

Una vez cuantificada la producción y demanda de productos para cada planta, se procedió a conocer la oferta logística para la distribución de estos productos.

Para conocer la capacidad de infraestructura que posee la ruta 160 se realizaron entrevistas al Ministerios de Obras Públicas, Viabilidad y

SECTRA (Secretaria de Planificación de Transporte), buscando además, conocer el comportamiento del flujo vehicular tanto para particulares, transporte público y de carga en la ruta 160, e identificar los puntos críticos donde se generan la congestiones vehiculares.

Uno de los puntos importantes que se debió investigar, son los proyectos que están en realización en la ruta 160 y los proyectos que están en la carta, para ser construidos en un horizonte de tiempo al año 2020, considerando proyecciones para realizar un estudio de simulación basado en estos nuevos proyectos y analizar la factibilidad de las nuevas soluciones para la descongestión vehicular de la ruta.

Con los datos obtenido en las entidades ya mencionadas, se procedió a analizar distintos escenarios de simulación para determinar cuál se adaptará mejor a estos objetivos, para ello, se utilizó la metodología propuesta por Jerry Banks (2005), quien fue el creador de uno de los métodos más conocidos para realizar simulaciones, donde incluye aspectos importantes en la Ingeniería de Transito y Estudio de Tiempos.

Para la realización de la simulación, se utilizó el software Flexsim, el cual nos representó de buena forma la realidad mediante un sistema computacional, donde el modelo conceptual propuesto en la metodología de Jerry Banks paso a ser uno de los pasos más importantes, ya que con este, se comprobó que los objetos utilizados en el simulador se comportaban adecuadamente para representar el flujo vehicular.

La información referente al estudio de tiempos para los horarios punta, fue entregada por SECTRA, organización especializada en este tipo de trabajos.

Ya construido el modelo, se procedió a identificar la zona donde se generan los “cuellos de botella”, mostrando que las mayores congestiones vehiculares, se producen en el tramo que comprende desde Coronel a San Pedro, con estancamientos de hasta 10 Km. Además del tramo en la Av. Pedro Aguirre Cerda y acceso a los puentes Llacolén y Juan Pablo II.

Una vez identificados estos puntos críticos en la red logística de la ruta, se procedió a identificar los proyectos que estarán en marcha o implementados al 2020, con el fin de descongestionar la ruta. Estos proyectos fueron evaluados con el simulador, para conocer si lograrán descongestionar la ruta, de acuerdo al aumento vehicular, con respecto al crecimiento en las exportaciones de la Planta Celulosa Arauco.

## Capítulo 3

### Antecedentes Industriales

#### 3.1 Industria Forestal en Chile

Durante el año 2010 las exportaciones forestales chilenas alcanzaron los US\$ 4.954,9 millones y han mostrado un gran aumento hasta el presente año. En el año 2015 para el mes de marzo totalizaron US\$ 1.357,7 millones alcanzando el mismo nivel que el mes de marzo para el año anterior pero los meses de enero y febrero presentaron un notable aumento con respecto a ese mismo año.

Los principales mercados de exportación para los productos forestales de Chile, en el año 2014 están representados en el gráfico N°3, estos son: China con un 26,6%, EE.UU con un 13,5% y Japón con un 7,8%. La categoría “otros”, representa a los países que participan con un valor menor al 4% de las exportaciones de cada uno.

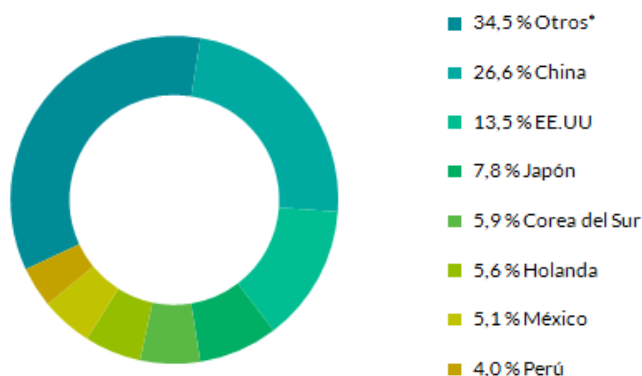


Gráfico N°3: Principales Mercados de explotación forestal en Chile.

Fuente: Instituto Forestal (INFOR).

### 3.1.1 Celulosa Arauco y Constitución

La industria de Arauco es una empresa chilena dedicada a la producción de Pulpa celulosa y derivados como la madera aserrada y a paneles, fue fundado en 1979 por la fusión entre Celulosa Arauco (S.A) y Celulosa Constitución S.A y está controlado por el grupo económico Anacleto Angelini. Esta posee cinco plantas celulosa en Chile y una en Argentina, además, tiene cuatro plantas de madera reconstituida, 2 en Argentina y 2 en Brasil, tiene 1,7 millones de hectáreas de patrimonio forestal en Chile, Argentina, Brasil y Uruguay. Arauco tiene como finalidad, ser un referente mundial en el desarrollo sustentable de sus productos forestales, focalizándose en sus operaciones, con el fin de equilibrar el valor generado por sus acciones y el valor generado para sus trabajadores.

Desde el año 2013, se han consolidado varios nuevos proyectos para contribuir con el crecimiento futuro de la industria forestal, implementando nuevas tecnologías de punta y particularmente modernizando las plantas ya existentes, como se ve reflejado en el proyecto “Mapa” que contempla la ampliación de la planta de Celulosa Arauco, incluyendo una nueva planta de generación de Bio-Energía.

Hoy en día, Arauco está presente en 71 países donde ofrece una variedad de productos forestales, calidad en la industria del papel, construcción, embalaje y mueblería. Se trabaja igualmente con apoyo de sistemas logísticos marítimos y terrestres para facilitar el abastecimiento hacia los centros de distribución y puntos de venta a través de 220 puertos repartidos en Europa, Asia Norteamérica, Oceanía y Latinoamérica.

En el 2012 Arauco utilizó una mejora continua, basada en S&OP (Sales & Operation Planning), con el fin de mejorar la planificación tanto en las áreas comerciales y productivas involucrando negocios de Paneles, Maderas, Distribución y Servicios logísticos.

En el año 2013 las ventas aumentaron en un 19% con respecto al año 2012, esto a causa del aumento en el volumen de Paneles, inicio de nuevas operaciones en la Planta del Teno y ayudado igualmente por el aumento de sus precios precios. Además, aumentó el volumen vendido de celulosa en un 5,2%, aumentó el precio en un 4,1% y finalmente generando un aumento del volumen de venta de madera aserrada en un 7,3%.

Los negocios de Arauco están divididos en cinco ámbitos estratégicos de gran importancia, estos son: Forestal, Celulosa, Paneles, Maderas y Energía.

### **3.1.1.1 Forestal**

A fines del 2013 el patrimonio forestal de Arauco era de 1.635.756 Hectáreas, de las cuales 1.051.286 hectáreas corresponden a plantaciones, 389.311 hectáreas son de bosque nativo y zonas de protección, 231.056 son hectáreas de suelo con otros usos y por plantar.

En el año 2013, se produjo 2,4 millones de metros cúbicos de astillas, se generó 2,2 millones de metros cúbicos de material combustible, de los cuales 30,5 millones de metros cúbicos fueron destinados a plantas de celulosa, paneles y aserraderos y 2,9 millones de metros cúbicos fueron vendidos a terceros.

### **3.1.1.2 Celulosa**

Arauco posee 5 plantas de celulosa en Chile y una en Argentina que produjeron 3.079.945 Adt (equivalente a una tonelada métrica de celulosa, con un máximo de 10% de humedad), lo que solo en el 2013 fue distribuida a más de 420 clientes en 40 países. Las ventas de celulosa alcanzaron el 42% de las ventas totales consolidadas por la compañía.

La compañía produce celulosa blanqueada y sin blanquear de fibra larga y fibra corta de eucalipto utilizada para los diversos tipos de papeles de impresión, escritura, embalaje, etc.

En la tabla N°1 se observa la cantidad de celulosa producida por cada planta, en toneladas métricas de celulosa (Adt).

<b>Capacidad de Celulosa por Planta</b>	
<b>Planta</b>	<b>Capacidad en Adt/año</b>
Arauco	790.000
Constitución	355.000
Licantel	150.000
Valdivia	550.000
nueva Aldea	1.027.000
Alto Paraná	350.000
<b>Total</b>	<b>3.222.000</b>

Tabla N°1: Capacidad de celulosa por planta en Adt.

Fuente: Memoria Anual Celulosa Arauco y Constitución 2013.

### **3.1.1.3 Paneles**

El área de paneles, trabaja la fabricación de productos de HardBoard, Medium Density Fiberboard, molduras de MDF y aglomerados, todos estos orientados a la construcción, mueblería, arquitectura y diseño que se comercializan bajo las marcas de Trupán, Cholguán, Flapac, Durolac y Melamina VESTO. Las ventas de paneles en el año 2013 alcanzaron un 38% de las ventas totales consolidados en Arauco.

Actualmente se han incorporado nuevas instalaciones, tanto en Brasil, Argentina, EE.UU y Canadá y se cuenta con 14 plantas con una producción total de 5,9 millones de metros cúbicos. En Chile la planta Nueva Aldea cuenta con una capacidad de producción de 350.000 metros cúbicos al año.

En el gráfico N°4 se observan las ventas de Paneles en los distintos mercados objetivos en el año 2013.

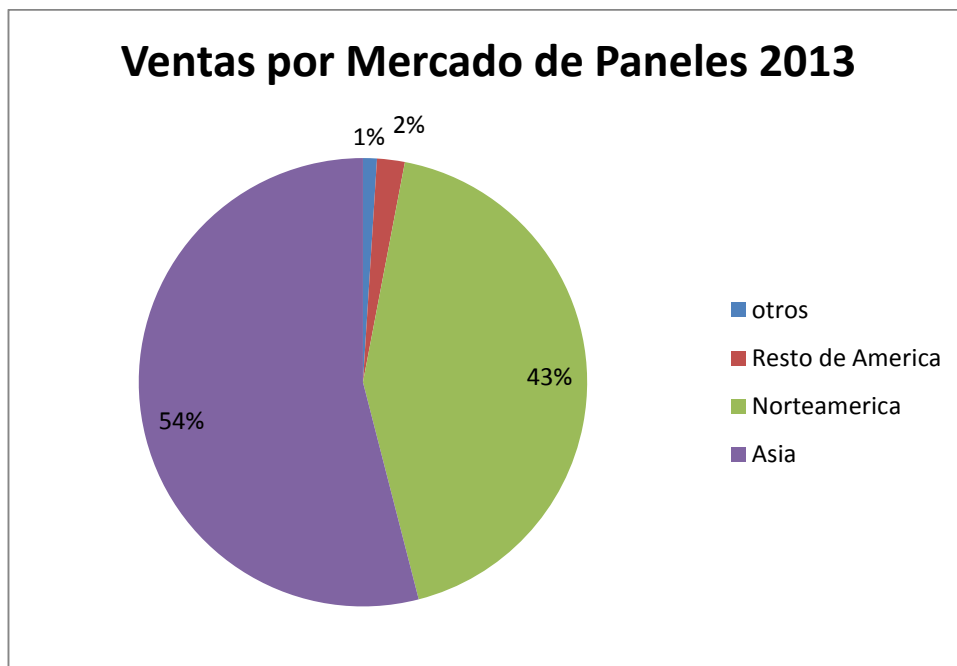


Gráfico N°4: Ventas por mercado de paneles 2013 en % sobre US\$ 1.941 millones.

Fuente: Memoria Anual Celulosa Arauco y Constitución 2013.

#### 3.1.1.4 Maderas

Las maderas cuentan con nueve aserraderos, seis plantas de re manufactura y dos plantas de terciado. El total de producción es de 2,9 millones de metros cúbicos de madera y 282.000 metros cúbicos de terciados, posicionando a Arauco como líder en producción de madera en el hemisferio Sur. Los ingresos representan un 16% de las ventas consolidadas en Arauco, los cuales se comercializan a 46 países destinados a la mueblería, construcción, embalaje, entre otros.

En el gráfico N°5 se observan las ventas de Madera en los distintos mercados objetivos en el año 2013.

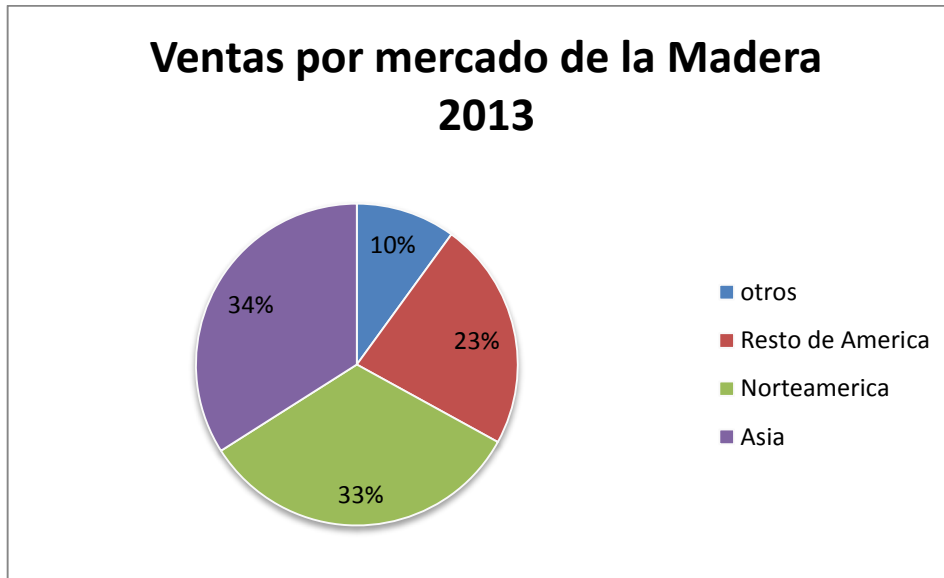


Gráfico N°5: Ventas por mercado de la madera en % sobre US\$830 millones.

Fuente: Memoria Anual Celulosa Arauco y Constitución 2013.

El transporte de productos desde sus plantas hacia los puertos, lo hace a cargo de Servicios Logísticos Arauco S.A, con el fin de servir como intermediario en las operaciones portuarias, dentro de las cuales están comprendida las labores de muellaje, lanchaje, movilización de carga y almacenaje. Servir de intermediario para la contratación del servicio de transporte, sea terrestre, marítimo aéreo y todo lo que conlleva a la prestación de servicios logísticos para la empresa.

## Capítulo 4

### Revisión bibliográfica

#### 4.1 Definición del concepto Logística y su utilidad en la Industria forestales.

##### 4.1.1 Concepto de Logística.

En la antigüedad se utilizaba el transporte de materiales en todos los procesos y actividades cotidianas de la vida, pero sin conocer el concepto o la definición de los procesos que se realizaba, en la actualidad se utiliza como una dirección coordinada de todas las actividades relacionadas al transporte como un todo y no por separado.

Ballou, (2004). Se refiere a la logística como un campo relativamente nuevo si los comparamos con los departamentos de finanzas, marketing y producción. Según la primera definición que apareció en los diccionarios de Western's New Encyclopedic Dictionary (1952, pág. 100) de logística, lo interpretó como la rama de la ciencia militar relacionada con procurar, mantener y transportar material, personal e instalaciones. Claramente esta definición está relacionada al tema militar y no tiene cabida en término de los negocios, pero si se acerca a los objetivos que principian en las empresas.

La definición de logística está ligada completamente a nivel de operación en la empresa, ya sea en la llegada de las materias primas, los procesos por los que pasan estos materiales hasta la llegada al cliente a través de rutas de transporte y distribución.

Según el Consejo de Dirección Logística (CLM, 1962), la logística es la parte de la cadena de suministros que controla, lleva a cabo y almacena eficiente y efectivamente los bienes y servicios. Además, de toda la información relacionada desde el punto de partida de la materia prima hasta el consumo de los productos, con el fin de satisfacer al cliente.

Esta definición nos entrega una gama amplia de actividades que se realizan dentro de este proceso, ya sea el transporte de las materias primas, los procesos productivos necesarios para convertir los bienes o servicios que los clientes necesitan, hasta la entrega al cliente.

Es por esto que todas estas actividades se entrelazan, con el fin de generar un nuevo concepto, “la administración de la cadena de suministro” que integra a todas estas actividades logísticas más las de producción, financiera y marketing con el fin de abarcar todas las actividades mencionadas anteriormente,

El presente análisis, estará enfocado específicamente en la demanda de productos terminados que son exportados, manejando la información, pasos por aduana y de acuerdo a la capacidad que tienen los puertos.

Según Mora. L (2010), para manejar una buena gestión de la logística empresarial, se tiene que los principales componentes a conocer son:

- Servicios al cliente, tomando en cuenta las necesidades que el cliente necesita para una mejor manejo de la información.
- Pronósticos de la demanda, conocer cuánto productos son los que debemos transportar en un margen de tiempo para manejar una buena administración.
- Comunicaciones de distribución, contactos entre los tipos de transportes, las rutas a seguir y los tiempos de distribución de pedidos.
- Control de inventario, debido a un eventual aumento de la demanda de los productos.
- Manejo de materiales, los tipos de transportes, el tipo de camiones que se utilizaran ya sea para la madera, envolturas de la celulosa, transportes de línea férrea, etc.
- Procesamiento de pedidos, cantidad de demanda, transmisión de la información y generar reglas y normas de acuerdo a los pedidos que el cliente requiera.

#### 4.1.2 Logística en la Industria Forestal.

El problema de gestionar el transporte radica en los altos costos de viaje que este genera, además su imposibilidad de experimentar las rutas de transporte en tiempos reales debido a su elevado costo, lo que dificulta a la empresa lograr realizar este tipo de experimentos.

Actualmente existen varios sistemas que buscan encontrar la solución más conveniente al problema de administrar eficiente, la salida y llegada del transporte de productos desde las plantas hacia los puertos. Para esto se manejan modelos heurísticos de procesos continuos mediante ecuaciones diferenciales complejas que intentan generar las mejores redes de comunicación entre las rutas de transporte y controlar de manera eficiente las entidades transportadoras. Igualmente existen sistemas de simulación que facilitan aún más la experimentación de estos procesos mediante sistemas computacionales, que logran generar un bosquejo de la realidad para encontrar soluciones mediante experimentaciones de más bajo costo y más fácil manipulación de los datos que se proporcionan.

Desde fines de las décadas de los 80`s las industrias forestales chilenas han intentado resolver esta problemática mediante modelos matemáticos con objeto de mejorar los procesos de la compañía, permitiendo tomar decisiones sobre el uso diario de camiones, horarios de transporte, tiempos de espera en colas, jornadas laborales de los trabajadores y baja coordinación de las operaciones.

Bosques Arauco, con la Universidad de Chile generaron un sistema computacional capaz de manejar y programar de forma eficiente estas rutas tanto para la entrega de productos y recepción de las materias primas. Este sistema fue puesto en marcha en el año 1989 por Bosques Arauco. El sistema fue muy eficiente durante algunos años generando ahorros de entre un 15% a un 35% en temas de transporte y generando mejoras en condiciones laborales de los trabajadores, eficiencia en el número de camiones y tiempos de transporte.

Uno de los modelos que se implementaron fue ASICAM que intenta resolver la problemática de la asignación de camiones tanto para el transporte y obtención de la materia prima, dando como resultado la mejor ruta para la asignación de los camiones. (Chile País Forestal, 2007. Ciclo Forestal. [www.chilepaisforestal.cl](http://www.chilepaisforestal.cl))

Luego de este modelo, se han intentado encontrar varios tipos de métodos heurísticos con la finalidad de mejorar el proceso, estos estudios se han realizado en distintas universidades, en distintos países, ya que no solo existen estas situaciones en el problema forestal, sino que también en toda asignación de entrega de productos en todo tipo de transporte, ya sea marítimo, aéreo, etc.

Servicios Logísticos Arauco S.A, asigna sus camiones y sus trenes, de acuerdo a la demanda que posee cada producto e intenta ofrecer el mejor servicio subcontratando los camiones que utilizan para transportar sus productos. (Anuario Celulosa Arauco, 2014).

## **4.2 Simulación.**

El campo de la logística hoy en día, es de suma importancia para este tipo de industrias, ya que genera altos costos asociados al transporte de los productos, desde la planta hacia los puertos, es por esto que un buen control nos ayuda a disminuir sus costos asociados. Para tener un mejor control sobre la situación planteada se ha decidido utilizar un modelo de simulación que permite dimensionar de mejor forma esta infraestructura, teniendo así una visión más amplia para poder tomar decisiones en el futuro.

### **4.2.1 ¿Por qué un modelo de simulación?**

En primer lugar, en el estudio se genera una gran cantidad de variables y datos que dificultan su fácil resolución, por lo tanto intentar resolverlo mediante un modelo matemático o analítico resulta muy complejo. Una simulación ayuda a entender de mejor forma el proceso que se utiliza en el transporte de estos productos y además a un muy bajo costo, ya

que, se puede experimentar de forma computacional todos los aspectos relevantes que el estudio necesite, además permite una experimentación ficticia de la situación real que resulta algo inviable de realizar y generaría un costo muy alto.

El uso de la simulación permite tener un control del tiempo en que se realizara y así analizar la sensibilidad a la que están expuestos estos transportes.

Un aspecto importante que resuelve la incógnita de por qué realizar un modelo de simulación, es la utilización de variables aleatorias, que no se logran descifrar mediante una distribución específica, por lo tanto el modelo de simulación nos permite experimentar con estos valores entregando resultados acordes a estos datos aleatorios.

Lo significativo de realizar un sistema de simulación respecto a los procesos que necesitamos analizar, son las ventajas que este método proporciona, estas son:

- Obtener una rápida experiencia de la situación a muy bajo costo.
- Analiza rápidamente el sistema completo y nos ayuda a demostrar cuales son los puntos donde se generan cuellos de botellas.
- Permite comprimir el espacio temporal, reduciendo años de experimentación en minutos de computación.
- No interrumpe las actividades que se realizan en un curso real.
- Ayuda a la obtención de una buena decisión.
- Aplicable a diseños actuales que requieren comparar distintas alternativas utilizando diversas tecnologías.

## 4.2.2 Concepto

Bolton (1971), se refiere a la simulación como una representación de la realidad mediante un sistema computacional para poder operar un modelo e interpretar de mejor forma un sistema que se desea estudiar, así poder manipular de forma más fácil y a más bajo costo las variables que están dentro de este sistema.

Para llevar a cabo un proceso de simulación se deben definir ciertos conceptos básicos empleados en el procedimiento.

Sistema: es un grupo de componentes que pueden funcionar recíprocamente para lograr un propósito común. (Spedding 1979).

El estado de un sistema, describe las condiciones de este en ciertos instantes de tiempo, en el inicio y final de la simulación, de acuerdo a las interacciones de las variables involucradas.

Un sistema posee varios elementos que lo constituyen, estos son:

Entidad: Los elementos dinámicos del sistema, son los que se mueven dentro del modelo, cambian de estado y afectan directamente a las otras entidades del sistema

Atributo: Son las características que poseen las entidades, son valores específicos y pueden variar de acuerdo a cada entidad.

Variables globales: Son variables que representan una característica del modelo en general, pueden ser variables de tiempo entre las entidades, cantidad o tiempos de proceso.

Recursos: son las unidades de capacidad que poseen las entidades o variables.

Los sistemas poseen 2 clasificaciones, discretos y continuos.

Sistemas discretos: Las variables solo cambian en un punto determinado de tiempo, como por ejemplo un evento cambia solo cuando un cliente entra o sale de un sistema.

Sistemas Continuos: Las variables ofrecen información en todos los instantes de tiempo, por ejemplo el aumento de temperatura en un experimento de cambios de estado del agua.

Para realizar la simulación es necesaria la confección de un modelo que interprete de la mejor forma posible el sistema que se desea estudiar.

Un modelo es una representación del objeto, sistema o idea de la realidad que se desea estudiar para entregar una fácil interpretación y una posible solución o explicación de la situación. (Aguilera 2000).

Para lograr interpretar esta realidad, existen varios modelos útiles que definen el sistema, estos son:

- Los Modelos Dinámicos son utilizados para representar los sistemas de estado que varían con el tiempo.
- Los Modelos Estáticos son utilizados para representar los sistemas de estado que no varía con el tiempo.
- Modelos Matemáticos que emplean fórmulas matemáticas para relacionar variables, parámetros y entidades para estudiar los comportamientos de sistemas más complejos y difíciles de observar.
- Modelos físicos son aquellos que representan la realidad con algo tangible (mapas, maquetas, etc.).
- Modelos Numéricos que permite encontrar las soluciones óptimas mediante cálculos numéricos.
- Modelos Determinísticos son aquellos cuyos datos de entrada y salida son únicos y no varían.
- Modelos Estocásticos que representan sistemas cuyos datos de entrada y salida ocurren de forma aleatoria.

Para lograr generar un modelo es necesario definir las variables a estudiar, por lo tanto es necesario definir los tipos de variables que se utilizan en un modelo, estos son:

- Variables Exógenas: son variables de entrada originadas por causas externas al sistema, independientes y no entregadas por el modelo, además estas aportan al sistema pero no son afectadas por este.
- Variables Endógenas: Se establecen dentro del sistema por causas internas, son dependientes de este y son generadas por las variables exógenas del sistema, siendo así las salidas del sistema.

### 4.2.3 Modelos de simulación discretos.

Estos modelos se caracterizan por identificar a los sistemas, donde los eventos cambian de estado en un momento específico de tiempo, a diferencia de los sistemas cuyo estado cambia continuamente en el tiempo. Estos modelos interpretan muchos fenómenos del área de administración de proceso productivos de una empresa y en la entrega de servicios.

Los primeros modelos discretos datan de la década de los 60, donde se simulaban proyectos de gran envergadura y a costos muy altos, luego en la década de los 70 aparecen nuevas herramientas con nuevos lenguajes de simulación (GPSS, SLAM, SIMAN), que a partir de la década de los 80 estos sistemas empezaron a ser elegidos por más empresas para interpretar de mejor forma sus procesos.

En la década de los 90 esta herramienta maduró y gracias a que los ordenadores eran más rápidos, comenzó a ser una herramienta utilizada tanto para las grandes y pequeñas empresas, con nuevas aplicaciones gráficas y animaciones que facilitaban su interpretación. (Berger, E., Gambini, L., Velasquez, C. 2000).

Actualmente y gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, la simulación ha sido una herramienta muy conveniente para las empresas, ya que ha logrado simular situaciones reales a cortos plazos e interpretar de forma sencilla los procesos dentro de la industria.

Al momento de ejecutar un evento en la simulación, esta genera cambios que provocan nuevos eventos en el futuro, en su debido tiempo y momento exacto. Los modelos de sistemas discretos mayormente utilizados son: el árbol de decisión y modelos de Markov.

Los árboles de decisión se caracterizan por un conjunto de ramas que representan distintas decisiones y las consecuencias que estas generan, las acciones de inicio se interpretan con nodos de acción, luego la decisión se ramifica para generar los nodos de acontecimiento o en los que desembocan los resultados finales, que son los nodos terminales. Estos sistemas son aplicables a procesos más agudos ya que no dependen tanto de las dimensiones temporales.

En tanto los modelos de Markov son una serie de experimentos en la que cada uno de estos tiene “m” posibles resultados y la probabilidad depende de los resultados de los eventos previos. Estos tipos de modelos se utilizan bastante hoy en día para los sistemas donde se generan colas de clientes y cada cliente demora cierta cantidad de tiempo mientras esta en procedimiento. (Banks, J., Carson, J., Nelson, B., & Nicol, D. 2005).

Las características principales que se deben tomar en cuenta al momento de realizar este tipo de simulaciones son las siguientes:

- Flujos de llegada de los clientes, donde la situación de la cola es estocástica, es decir el flujo de llegada de los clientes tiene una cierta aleatoriedad y se debe aproximar a una distribución de probabilidad entre las llegadas de los clientes. Se debe tomar en cuenta el tiempo máximo que esperarán los clientes en la cola antes de abandonar por demora del servidor.
- Tiempos de servicio de los servidores, al igual que el flujo de llegada el tiempo de servicio puede ser variable para cada cliente, por lo tanto igualmente se debe asociar una distribución de probabilidad o a algún patrón que exista en el servidor.

- Comportamiento de la cola, es decir cómo se distribuyen en la cola al momento de la llegada, como la disciplina habitual (FIFO) donde la forma de atención, es atender al que llegue primero o buscar otra forma de orden como atender a los clientes cuyo tiempo de servicio es más corto o los procesos demoran menos.
- Capacidad máxima del sistema, es decir la limitación máxima que se puede tener tanto en el sistema.
- Cantidad de accesos al sistema, ya que pueden existir colas paralelas para 2 o más servidores, o colas que trabajen de forma independiente y alimenten a solo un servidor.
- Etapas que deben cumplirse en el sistema, donde se puede encontrar que el cliente debe pasar por más de una etapa y existen ciclos que deben pasar para poder finalizar sus procesos.
- Demanda probable en el sistema, así poder conocer con anterioridad cual es la cantidad de clientes que se deberán atender y ver si existe la capacidad dentro del sistema para esta demanda.

Teniendo en cuenta todos estos puntos importantes se puede realizar un buen sistema de simulación para lograr experimentar todos los escenarios probables y realizar un servicio de calidad.

#### **4.2.4 Modelos de simulación continuos o de procesos.**

Un modelo de simulación continuo en contraparte al discreto, se especifica en los cambios constantes de tiempo en el comportamiento de las entidades que maneja el sistema, es decir mantienen un flujo dinámico pero no como una entidad independiente, sino un sistema

completo donde el comportamiento del sistema en general es más importante que el comportamiento específico.

El concepto de dinámico se orienta a un sistema como una organización y la interacción entre sus partes, este pensamiento sistemático nos hace ver las estructuras más complejas que pueden variar en tiempos de corto o largo plazo o también en partes específicas que varían en distintos sectores del sistema.

Es muy importante al momento de realizar el modelo, que no se puede ingresar la totalidad de la información, sino que solo se debe introducir lo que es significativamente relevante para el objetivo de la simulación.

Es pertinente, ver un modelo continuo si nuestro objetivo es conocer los valores de salida en todo instante de intervalos de tiempo, estos suelen basarse en ecuaciones diferenciales o por soluciones analíticas.

Ahora bien, se pueden formular modelos donde se combinen estas dos técnicas y que resulta ser útil al momento de tener procesos discretos que luego deben analizarse de forma continua para obtener ciertos datos de salida en ciertos intervalos de tiempo. Cabe mencionar, que las simulaciones implementadas en un ordenador deben ser necesariamente discretas y es más útil aproximar un modelo continuo de la realidad a situaciones discretas que lo puedan interpretar de igual manera.

Los pasos para realizar la simulación de este estudio fueron los impuestos por Jerry Banks quien propuso uno de los métodos más conocidos para realizar una simulación, este profesor e investigador perteneciente al Instituto Tecnológico de Georgia incluyó un conjunto de aspectos importantes de Ingeniería de tránsito y en especial énfasis en el estudio de tiempos.

Los pasos incluidos en la metodología de Simulación de Jerry Banks fueron: El modelo de Conceptualización y Recolección de datos.

La metodología de Simulación de Jerry Banks está compuesta por los siguientes pasos:

- 1) **Formulación del problema:** Se debe detectar de forma clara y concisa la problemática que se desea abordar, el analista debe tener extremo cuidado que el problema se entienda de forma clara.
- 2) **Fijación de objetivos y plan general del proyecto:** los objetivos deben ser claros y deben responder a la problemática del proyecto. El plan del proyecto debe especificar los pasos a realizar en el proyecto, los tiempos necesarios, software, datos, etc.
- 3) **Modelo de conceptualización:** Comprende el paso en el que se extrae el mundo real al conceptual, estableciendo relaciones lógicas entre la estructura y sus componentes.
- 4) **Recolección y análisis de datos,** deben estar bien definidas las variables, si son estocásticas o determinísticas, si son la primera de estas, conocer sus funciones de probabilidad. Estos datos deben estar justificados para el estudio.
- 5) **Modelo de traducción:** el modelo conceptual debe ser codificado a un computador para obtener el modelo operativo.
- 6) **Verificación:** Se debe corroborar que el modelo operativo funcione de forma correcta de acuerdo a las necesidades del estudio, esta revisión debe ser realizada de forma sistemática y no cuando el modelo este en su etapa de finalización.
- 7) **Validación del modelo,** se procede a verificar el modelo simulado y que sea validado con un alto grado de confiabilidad, de acuerdo a los datos que se tienen, deben representar de la forma más legítima la realidad. En el caso de que no existan datos concretos de la realidad, una opinión experta también puede ayudar.
- 8) **Diseño Experimental:** Aquí es donde se experimenta con el modelo de acuerdo a las hipótesis planteadas en el inicio, para

dar a conocer las propuestas existentes y ver los resultados del modelo. Estos resultados y decisiones deben ser tomadas de acuerdo al número de réplicas y duración del modelo. Además, el número de iteraciones del modelo para verificar si los datos satisfacen las necesidades del estudio.

- 9) Documentación y presentación de informes: Esta documentación debe realizarse para posibles utilidades de este modelo, o para posibles correcciones que pueden ser facilitadas si el modelo está documentado. Además, los resultados deben estar documentados de forma clara y concisa para todo posible análisis e implementación de este.

Actualmente la simulación se utiliza para varios tipos de proceso dentro de la empresa e industrias y es uno de los agentes mayormente utilizado para el desarrollo de actividades que al experimentar de forma real, producen costos muy altos de operación. Según Coss, R. (2003), los campos que se desarrollan en esas técnicas son:

- Sistemas de Producción, para lograr planificar los inventarios, las líneas de producción y la programación de actividades.
- Sistemas de servicio con operaciones en ventanillas, filas en hospitales, restaurantes, etc.
- Sistemas de Distribución en Almacén, redes de distribución, logística y centros de distribución.
- Sistemas Informáticos en Computadoras, software, redes de comunicación, etc.
- Sistemas Económicos y Financieros
- Situación de Catástrofe y Sistemas de Emergencia.

Para la Simulación de tránsito existen varios software, por ejemplo VISSIM, CORSIM/TSIS y otro tipo de simuladores de procesos como Arena. Pero en estudio de tránsito no existen registro de simulaciones con Flexsim. Según Brandon Peterson uno de los creadores de este software, este no está desarrollado para este tipo de trabajos de flujos vehiculares, pero no se descarta su utilidad para este tipo de estudios

de acuerdo a los objetos que posee este software. Es por esto, el proceso de Conceptualización del modelo es muy importante para analizar si los objetos del simulador se comportan de manera adecuada.

En la figura N°1, se observa la metodología propuesta por Jerry Banks, donde se especifican los pasos que se deben realizar para una simulación de tránsito. Aquí es importante destacar los pasos “Modelos de Conceptualización” para verificar los objetos del simulador y Validación, donde se aprueban los datos utilizado en el estudio.

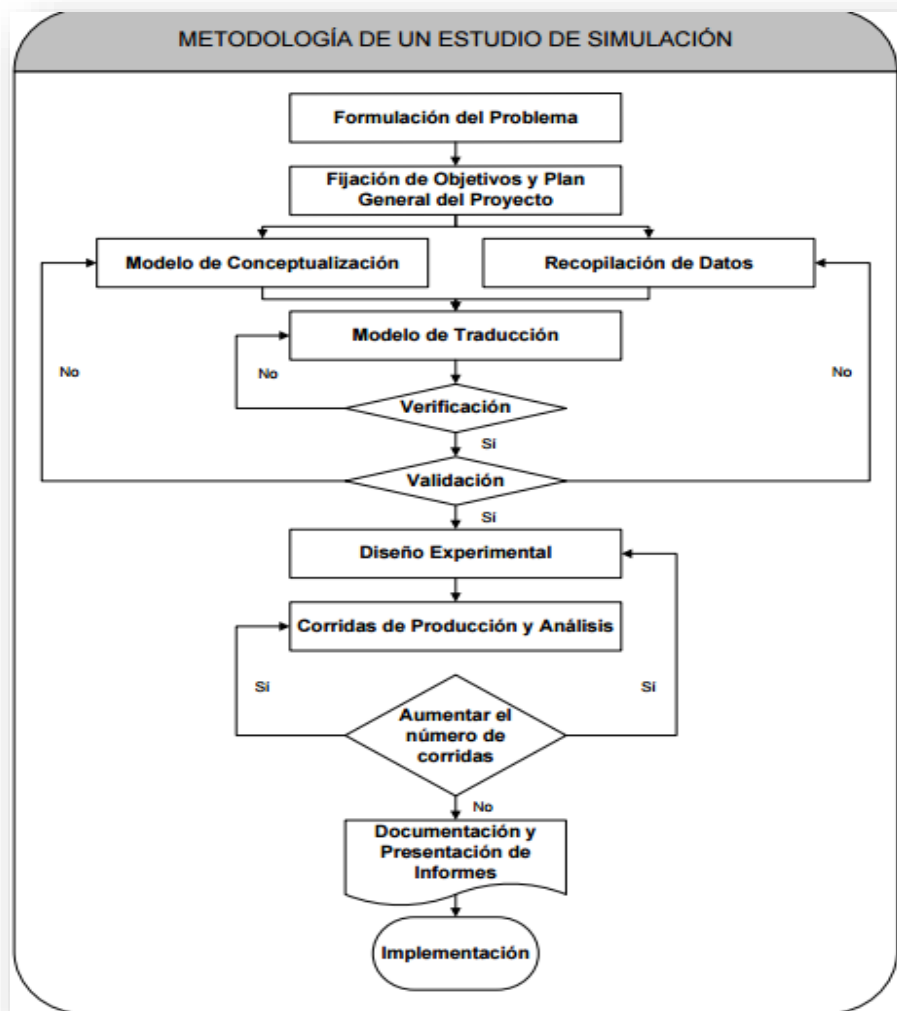


Figura N°1: Modelo de Simulación de Jerry Banks.

Fuente: Banks, J., Carson, J., Nelson, B., & Nicol, D. (2005). Discrete Event System Simulation.

### 4.3 Ingeniería de tránsito

El flujo vehicular o tráfico vehicular, es el fenómeno causado por el flujo de vehículos por una vía, calle o autopista, mediante este análisis se pueden conocer las características y el comportamiento del tráfico, con el fin de implementar proyectos en carreteras y obras dentro del sistema de transporte. Mediante cálculos y fórmulas matemáticas se puede identificar y describir la forma en que transitan los vehículos por las vías y así poder determinar la eficiencia de estas. (Reyes Espíndola y otros, 2007).

Uno de los estudios más útiles para el análisis del flujo vehicular, son los modelos microscópicos y macroscópicos, que relacionan diferentes variables como el volumen, la velocidad, la densidad y el espaciamiento. Estos modelos han sido base para el planeamiento y desarrollo del concepto Capacidad y Niveles de servicio en las vías.

El objetivo de estos análisis, es identificar estos flujos, sus distribuciones estadísticas y su comportamiento.

La base del estudio de tránsito se concentra en tres variables principales: Flujo ( $q$ ), Velocidad ( $v$ ) y Densidad ( $k$ ), relacionándolas con el fin de determinar el comportamiento de las corrientes de tránsito en las vías.

El punto de partida para el análisis de estos flujos, está basado en la relación que existe entre estas tres variables antes mencionadas, mediante la ecuación (1):

$$q = v * k \quad (1)$$

En la ecuación (1) existen varias combinaciones que permiten determinar distintos requerimientos, entre los cuales están: velocidad-flujo, velocidad-densidad y flujo-densidad.

Como se mencionó anteriormente los modelos de tránsito se subdividían en microscópicos y macroscópicos. Los modelos

microscópicos consideran las velocidades y espaciamentos individuales de los vehículos, en cambio los macroscópicos visualizan el flujo vehicular tomadas como variables promedio de una cierta densidad de vehículos en la ruta.

La relación que se ha logrado implementar para los distintos estudios de tránsito, donde sus principales variables son las ya mencionadas anteriormente ( $v$ ,  $k$ ,  $q$ ), se han basado en la toma de datos y ajuste de distribuciones de probabilidad mediante simples curvas y regresión. Estos como resultado, han arrojado diversos modelos que intentan explicar estos flujos mediante estas variables.

#### 4.3.1 Modelos lineales

Greenshields, (1935) realizó las primeras investigaciones sobre el comportamiento del flujo vehicular, relacionando las variables velocidad y densidad para distintos flujos de tránsito, llegando a la conclusión que este modelo caracterizaba de mejor forma el comportamiento de flujos congestionados. La relación que generó, está dada por la ecuación (2):

$$V_e = V_i - \left(\frac{V_i}{K_c}\right) * k \quad (2)$$

$V_e$  = velocidad media espacial (Km/h)

$K$  = densidad (vehículos/Km/carril)

$V_i$  = velocidad de flujo libre (Km/h)

$K_c$  = densidad de congestionamiento (vehículos/Km/carril).

En la ecuación de velocidad podemos notar que la velocidad disminuye al aumentar la densidad desde un valor máximo (flujo libre), hasta un valor mínimo de 0 donde la densidad alcanza su máximo o congestionamiento.

Para el flujo en este modelo, la fórmula se obtiene con la ecuación (3):

$$q = V_i * k - \left(\frac{V_i}{K_c}\right) * K \quad (3)$$

La ecuación (3), muestra al flujo como una función parabólica de la densidad  $k$ , finalmente se tiene que los flujos de tránsito no congestionado están limitados por la expresión (4):

$$\left. \begin{array}{l} 0 < q < q_m \\ V_m < V_e < V_i \\ 0 < k < k_m \end{array} \right\} \quad (4)$$

### 4.3.2 Modelos no lineales

Se han realizado otras investigaciones, donde la relación velocidad – flujo no siempre existe una buena correlación. Dado este caso, se logra el ajuste mediante otros modelos en donde se toman en cuenta la curvatura de los datos. A continuación se presentan estos modelos macroscópicos con sus respectivas relaciones flujo–velocidad–densidad.

#### 4.3.2.1 Modelo Logarítmico

$$V_e = V_m * \ln\left(\frac{K_c}{K}\right) \quad (5)$$

$$q = V_m * K * \ln\left(\frac{K_c}{K}\right)$$

Donde sus respectivas variables son:

$V_e$  = velocidad media espacial (Km/h)

$K$  = densidad (vehículos/Km/carril)

$V_m$  = velocidad máxima del flujo (Km/h)

$K_c$  = densidad de congestión (vehículos/Km/carril)

$q$  = flujo (vehículos/h/carril).

Este modelo posee buen ajuste para flujos congestionados y no funciona muy bien para densidades bajas, ya que cuando  $K$  tiende a 0 la velocidad se hace tan grande que tiende a ser infinita, siendo esta condición un flujo libre. Por lo tanto los parámetros del modelo son la velocidad a flujo máximo  $V_m$  y la densidad de congestionamiento  $K_c$ , los cuales deben ser especificados, ya que a partir de ellos se obtiene las características del flujo vehicular en estudio.

Dadas estas especificaciones tenemos que el flujo máximo, estaría dada por la ecuación (6):

$$q = V_m * K_c \quad (6)$$

#### 4.3.2.2 Modelo Exponencial

Underwood (1990), realizó estudios para el análisis de flujo libre y desarrolla el siguiente modelo para flujos no congestionados.

$$V_e = V_i e^{-K/K_m} \quad (7)$$

$$q = V_i * K e^{-K/K_m}$$

Como se observa en la ecuación (7), el modelo no representa velocidad igual a 0 para las altas densidades, que sería la condición de congestionamiento, por esta razón los parámetros para este modelo son: densidad a flujo máximo  $K_m$  y la velocidad a flujo libre  $V_i$ .

En conclusión se optó por ajustar las distribuciones de acuerdo a los estudios de tiempos realizados para la obtención de datos, dado estas condiciones se utilizará para los flujos congestionados, los modelos logarítmicos y para los flujos no congestionados, los modelos exponenciales.

## 4.4 Software Flexsim

Flexsim es un software de simulación que permite representar la realidad, tanto para procesos de manufactura, logística, manejo de materiales, etc., de manera rápida y sencilla, ayuda a evitar altos costos representando la realidad de forma computacional. Además, posee un formato que permite visualizar objetos en un ambiente tridimensional, que lo hace más elegante para el usuario.

Un punto muy importante del software es que no se necesita ser experto en programación para poder utilizarlo, posee facilidades de uso y modelamientos. Además, posee herramientas que permiten analizar los resultados de forma clara y sencilla al momento de interpretar resultados.

Permite simular varios escenarios y poder comparar distintos datos para tomar distintas decisiones de acuerdo a lo que se desea estudiar. Permite exportar figuras tridimensionales desde una librería incluida en el software.

## Capítulo 5

### Oferta de Servicios Logísticos para satisfacer la demanda.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, el estudio será realizado en la ruta 160, analizando el flujo vehicular de camiones, vehículos particulares y colectivos que transitan por este sector, el cual une las plantas Aserradero el Colorado, Aserradero Escuadrón, Aserradero Horcones I y II, el almacén de productos terminado de Horcones, Panales Arauco y la Planta de Celulosa Arauco con los puertos de San Vicente, Coronel, Lirquén y Talcahuano.

Para esto se procederá a identificar la demanda que poseen actualmente estas plantas para luego realizar un pronóstico de cómo se comportará en el futuro.

#### 5.1 Demanda de productos forestales actual y futura.

La industria forestal ha tenido altos y bajos en los últimos 5 años dado unos comportamientos constantes en las exportaciones. En junio del 2014 las exportaciones alcanzaron US\$ 450 millones manteniendo unos puntos más altos que el mes anterior. El primer semestre del 2015 terminó con US\$ 2712,2 millones, lo que reflejó un 9,3% menos que el mismo periodo en el 2014.

Como se puede apreciar en el gráfico N°6, la demanda en el primer semestre del año 2015, disminuyeron en promedio a la misma fecha del año anterior, en los mercados más importantes de este sector. Ahora a excepción de unos de los principales mercados Estados Unidos, registró un aumento de 8.4% en ese periodo en la compra de tableros contrachapados y paneles y Corea del Sur que anotó un aumento del 15,5% debido al crecimiento de la pulpa blanqueada de eucalipto y pino.

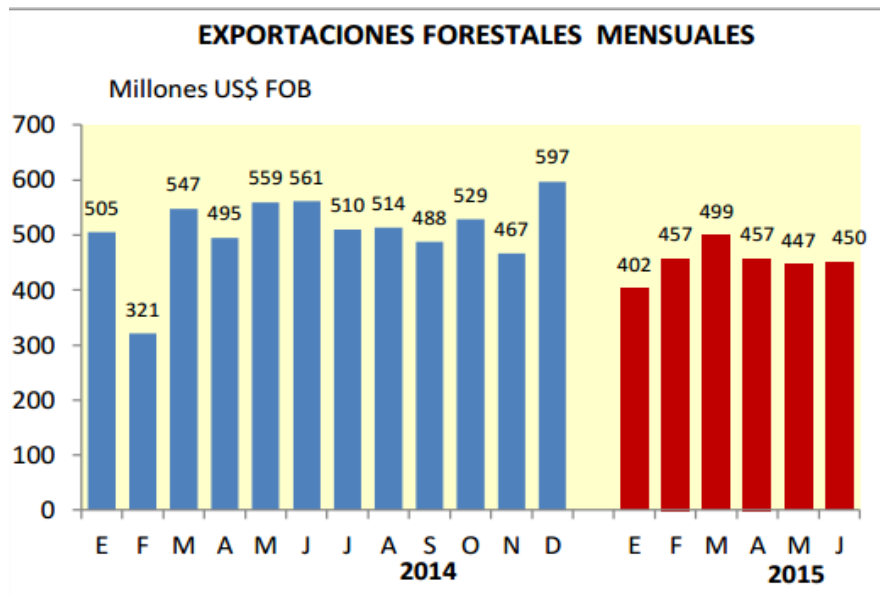


Gráfico N° 6: Exportaciones forestales mensuales en millones de US\$ FOB.

Fuente: INFOR 2015.

Con respecto a la cantidad de productos que se comercializan en el sector forestal, tenemos que cada porcentaje de exportación varía de acuerdo a cada producto y a la materia prima utilizada.

De los productos exportados, el principal rubro que participa con un 46,5% del total de las exportaciones es la pulpa de madera, pero en los últimos meses marco un 14,4% de disminución por la caída de la venta de la pulpa blanqueada de pino radiata y una disminución de 14,9% de disminución en la venta de la pulpa blanqueada de eucalipto.

Luego de la pulpa, se ubica la madera aserrada con una participación del 10,7% del total, pero con una caída del 14,1% con respecto a la fecha del 2014.

El rubro de tableros y chapas presento un aumento del 11,9% con una leve baja en el precio de 0,3% con respecto al semestre del año 2014.

Cabe mencionar, que la Planta Arauco y constitución posee un proyecto en marcha de ampliación, llamado Proyecto Nuevo Horcones, donde se implementará una nueva línea de producción (línea 3) con tecnología

de punta, además la modernización de la línea 2 de producción (pino) y la detención de la línea 1 que está en marcha desde la década de los 70. Este proyecto aumentará la producción de celulosa a 2.100.000 Adt/año, incrementando en un 63,3% la producción de la planta.

De la tabla N°2, podemos destacar que desde el año 2010 se presenta un aumento notable en la demanda de los productos desde el extranjero pero en los últimos meses hubo una pequeña disminución de acuerdo a los primeros meses del 2014, esta variación alcanzo un valor del 11,1%.

Se observa además, que Celulosa Arauco y Constitución S.A, es la industria que más aporta en las exportaciones forestales del país, seguido por CMPC Celulosa S.A. Luego nuevamente Aserraderos Arauco y Paneles Arauco, aportan la mayor cantidad de madera aserrada y paneles exportados del país.

EXPORTADOR	2010	2011	2012	2013	2014	ENERO-JUNIO		VAR (%)
						2014	2015	
TOTAL	4.954,9	5.906,0	5.389,3	5.714,0	6.094,3	2.989,3	2.712,2	-9,3
NRO. EXPORTADORES	903	891	869	901	819	615	652	6,0
CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCION S.A.	1.379,4	1.732,3	1.515,7	1.740,9	1.775,8	897,7	798,0	-11,1
CMPC CELULOSA S.A.	1.022,3	1.177,2	1.038,4	1.091,1	1.161,4	581,9	481,8	-17,2
ASERRADEROS ARAUCO S.A.	379,2	457,1	489,8	570,3	682,1	321,7	286,1	-11,1
PANELES ARAUCO S.A.	372,9	447,1	318,7	363,3	393,2	178,0	190,0	6,8
CMPC MADERAS S.A.	230,6	273,2	275,0	288,3	331,1	153,9	150,1	-2,5
CARTULINAS CMPC S.A.	301,6	343,6	347,2	329,0	354,1	177,1	146,9	-17,0
MASISA S.A.	130,6	171,4	199,0	197,1	215,0	99,7	94,7	-5,1
WOODGRAIN CHILE LTDA.	33,9	45,1	45,6	51,7	61,3	33,8	32,1	-5,2
FORESTAL DEL SUR S.A.	48,7	56,6	66,4	59,1	44,3	32,9	29,4	-10,7
CONSORCIO MADERERO S.A.	67,1	80,6	65,2	58,1	68,1	32,1	28,3	-11,7
ASTILLAS EXPORTACIONES LTDA.	57,3	70,2	81,9	66,3	50,9	21,7	28,3	30,5
COMACO S.A.	0,0	85,3	69,5	60,5	71,9	40,4	26,7	-33,9
EAGON LAUTARO S.A.	25,6	28,2	23,7	28,4	34,6	15,4	23,4	51,8
MASONITE CHILE S.A.	20,4	22,2	25,3	24,4	44,1	20,5	22,5	10,1
PAPELES CORDILLERA S.A.	28,1	35,8	26,2	39,0	40,5	16,5	21,9	32,9
FORESTAL TROMEN S.A.	8,8	16,6	30,2	37,4	37,6	18,0	20,1	11,6
OTROS	848,5	863,4	771,5	709,1	728,3	347,9	331,9	-4,6

Tabla N°2: Cantidad de exportaciones forestales según empresas de interés.

Fuente: INFOR 2014.

Según este aumento en la demanda de la industria forestal, se dimensionará la cantidad de servicios logístico existentes para la distribución de estos productos que puede apreciarse en el siguiente

capítulo, además el impacto social que generará en el tráfico de la ruta 160 actual y conocer cómo se comportara el flujo vehicular en el futuro.

En la figura N°2 y N°3, se observa para la pulpa de pino radiata, que el nivel de exportación es de un 87% siendo el más alto para los productos forestales de este tipo. Para los productos pertenecientes del Eucalipto tenemos que, la pulpa posee una exportación del 93% también siendo el más alto para este tipo de productos.

En la figura N°2, encontramos el flujo de la industria forestal primaria para el Pino Radiata y los productos que quedan para sus distintos usos dentro del país. Además el consumo de trosas en m³ utilizado para la producción de la distinta cartera de productos que Celulosa Arauco comercializa.

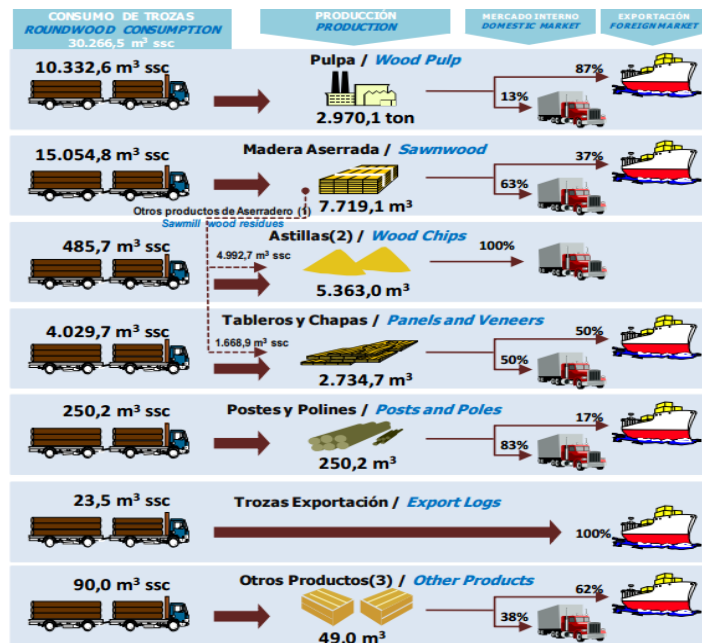


Figura N°2: Flujo de productos forestales en la industrial primaria de Pino Radiata.

Fuente: Anuario Forestal Infor 2014.

En la figura N°3, encontramos el flujo de la industria forestal primaria para el Eucalipto, donde se especifica la cantidad de trozas utilizadas para los distintos productos que comercializa Celulosa Arauco para el consumo interno o para ser exportados.

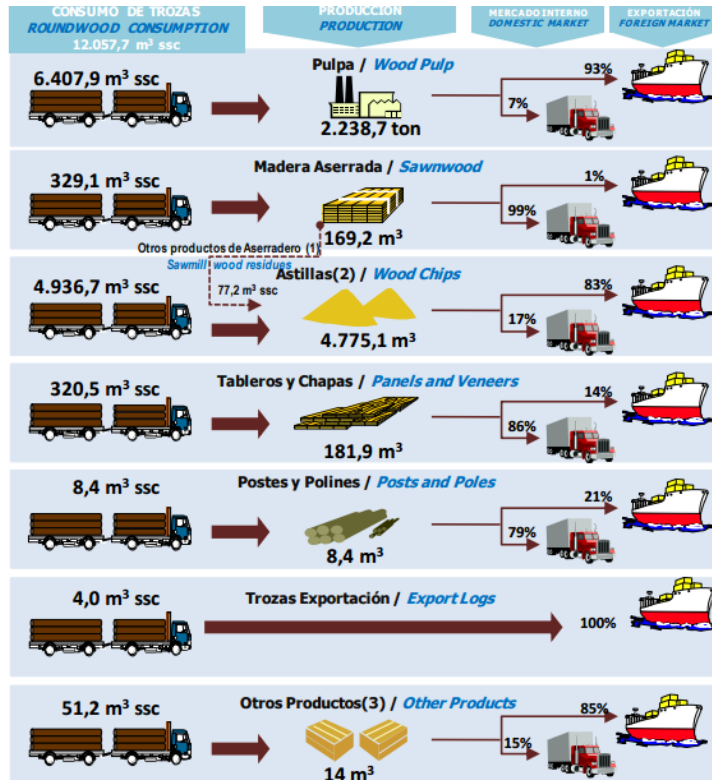


Figura N°3: Flujo de productos forestales en la industrial primaria de Eucalipto.

Fuente: Anuario Forestal Infor 2014.

## 5.2 Oferta de Servicios Logísticos

Como se pudo apreciar en el capítulo 4.1, las exportaciones aumentarán de acuerdo al crecimiento de las planta y por lo tanto aumentará el flujo de camiones que transitara por la ruta.

Según la información entregada por Servicios Logísticos Arauco, para satisfacer la demanda de estas exportaciones, la cantidad de camiones y trenes que salen anualmente hacia los puertos están expresados en la tabla N°3.

Tipo Transporte	Destinos	2013	2014	Total general
Camión	Centro San Vicente	7.002	6.875	13.877
	Pto. Coronel	10.022	11.543	21.565
	Pto. Lirquén	5.548	6.032	11.580
<b>Total Camión</b>		<b>22.572</b>	<b>24.450</b>	<b>47.022</b>
Tren	Centro San Vicente	3.658	1.068	4.726
	Pto. Coronel	11.779	14.492	26.271
	Pto. Lirquén	5.067	3.593	8.660
<b>Total Tren</b>		<b>20.504</b>	<b>19.153</b>	<b>39.657</b>
<b>Total general</b>		<b>43.076</b>	<b>43.603</b>	86.679

Tabla N°3: Numero de fletes por año.

Fuente: Fuente: Servicios Logísticos Arauco.

Como se puede apreciar en la tabla N°3 en los años 2013 y 2014, existió un aumento de la cantidad de fletes en el sistema rodo viario de un 7,6%, en contraparte se puede apreciar que el flujo de trenes que salen hacia los puertos, disminuyo en un 7% en el año 2014 con respecto al año 2013, siendo este un dato muy importante, ya que un aumento en el transporte de carga de forma ferroviaria podría ser una solución para disminuir la carga rodo viaria y así descongestionar de alguna manera la ruta 160. Como la demanda de las exportaciones aumentará en los siguientes años, se asume que la carga total anual tanto para trenes y camiones aumentará de igual manera, siendo aquí la prueba para aceptar la hipótesis de que las congestiones vehiculares para los siguientes años serán aún mayores. Por lo tanto, aquí se formula la problemática, de qué manera se puede descongestionar esta ruta para no producir externalidades tanto para los usuarios que viven en la zona y las empresas que exportan sus productos y son transportados por esta ruta.

Un dato importante a considerar en la problemática que se forma por las congestiones vehiculares en la ruta, son la cantidad de accidentes que se generan por las altas velocidades y gran flujo de vehículos por

esta ruta. Según la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito, CONASET, la ruta 160 lideró las estadísticas de accidentes vehiculares con más de 365 colisiones y 26 fallecidos durante el año 2015. Estos accidentes son causa de las altas velocidades que los vehículos y camiones transitan por la ruta y además siendo esta la alternativa única para unir estas comunas.

Es por esto que se realizara una simulación de esta ruta, tanto para vehículos particulares, transporte público y de carga (dándole mayor énfasis a este último), para conocer cómo será su comportamiento de acuerdo a estas alzas en el flujo vehicular, analizando y comparando esta información con el plan estratégico de la región del Biobío.

## Capítulo 6

En este capítulo se procederá a identificar los tramos de la ruta que serán estudiados. Además de los objetivos para realizar la simulación. Se identificarán como fueron recolectados los datos y se procederá a realizar el sistema de simulación que se adaptará de acuerdo a los objetivos que se plantearon.

### 6.1 Estructura vial de la ruta 160

La ruta 160 es un tramo vial de la región del Biobío que une Concepción y Lebu, esta carretera cuenta con triple vía de aproximadamente 88 Km. Es una de las principales rutas para el transporte de carga forestal de la región, dado que es la conexión entre la Planta Celulosa Arauco y los puertos de Coronel, San Vicente, Lirquén y Talcahuano.

Para el objetivo en estudio, el análisis se realizará en los tramos especificados en la figura N°4, donde se observa la salida desde la planta Celulosa Arauco y los puertos mencionados anteriormente. Una vez inmerso en el estudio veremos enlaces donde ingresarán flujos desde los aserraderos en distintos tramos de la ruta que serán objetivos de estudio importantes para el análisis.

En la actualidad la ruta 160 está excedida en el flujo vehicular a más del 50% de su capacidad, está construida para un flujo de 2000 vehículos por hora y en el horario punta, ya son más de 3000 vehículos por hora que transitan en la ruta. (Ministerios de Obras Públicas, 2014).

Para los tramos de estudio desde Arauco, accesos a Coronel y San Pedro, existe un aumento en el flujo vehicular de un 6,3% con respecto a los años de 2013 y 2014, este crecimiento se ha mantenido durante los 2 últimos años y se estima que seguirá en aumento. El flujo vehicular que se presentó en la ruta, en el mes de mayo fue de 338.602 vehículos, estos repartidos en un 70% para vehículos livianos y un 30% de vehículos pesados. Estas categorías están sub-divididas tanto para

vehículos particulares, de transporte público y carga, distribuidos sus flujos según lo mostrados en el gráfico N°7.

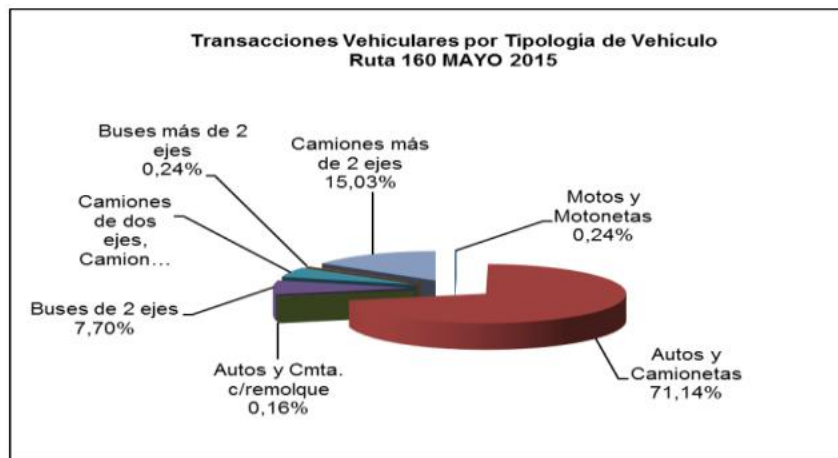


Gráfico N°7: Distribución de flujos por tipo de vehículos.

Fuente: Informe Anual, MOP, 2015.

En la figura N°4 se observa el tramo que será analizado y modelado con el Software Flexsim, experimentando con los distintos escenarios que se especificaran en los capítulos siguientes.

Como se puede apreciar en el gráfico N°7, tenemos que el mayor flujo vehicular lo tienen los vehículos particulares con un 71,14% siendo así el flujo más importante para el estudio. Ahora, como el objetivo del análisis son los camiones de carga que transportan los productos forestales, tenemos que el flujo de camiones de más de 2 ejes es de 15,03%, siendo el segundo flujo más alto que transita por la ruta.

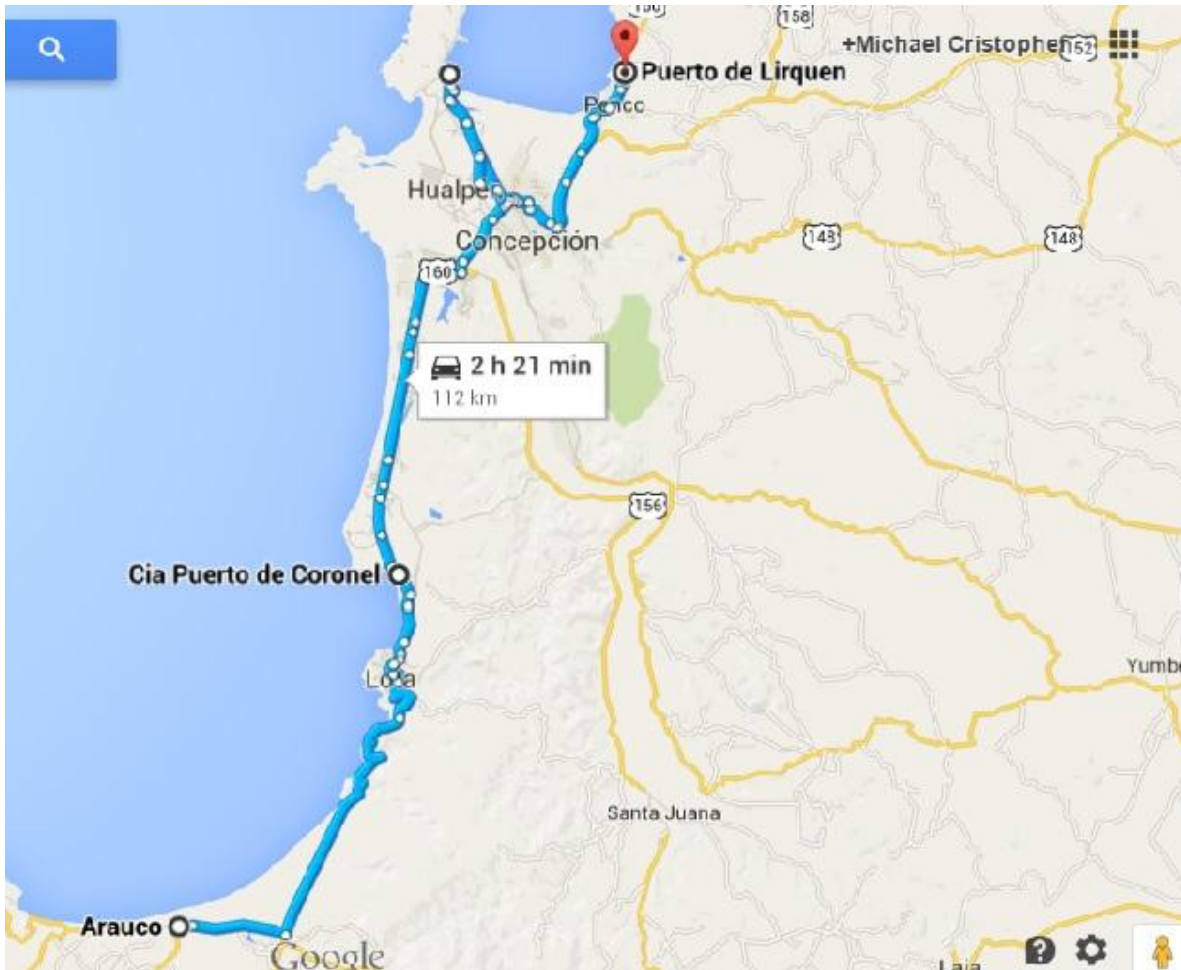


Figura N°4: Tramos en estudio de la ruta 160, San Pedro y conexión a puertos.

Fuente: Google Maps.

Para el estudio de simulación se analizarán los tramos comprendidos de la ruta 160 desde el enlace de Arauco, hasta la salida de los puentes Juan pablo II y Puente Llacolén, observando aquí tramos importantes donde se producen las congestiones. Algunos de estos tramos son Enlace Coronel, Av. Pedro Aguirre Cerda, San Pedro de la Paz, enlace Puente Llacolén, Enlace Puente Juan Pablo II.

Ya especificadas los tramos de interés y la ruta, se procederá a seguir con la metodología de Jerry Banks, donde el primer paso (Formulación del problema) fue especificado en el capítulo anterior.

## **6.2 Objetivo de la simulación y plan estratégico.**

Como se definió en los capítulos anteriores, la problemática existe en la congestión vehicular de la ruta 160, específicamente en tramos donde se generan congestiones, por lo tanto el objetivo de la simulación es modelar mediante un programa computacional la realidad que existe en la ruta, así analizar distintos escenarios y proyectos del plan estratégico de la región del Biobío, hasta el año 2020.

Para la realización estos objetivos, se utilizó el software computacional Flexsim, donde se modelará la ruta 160. La finalidad de esta simulación es conocer el comportamiento del flujo vehicular de la ruta hasta el año 2020 y analizar de forma clara, si los proyectos que se esperan realizar a futuro serán capaces de soportar la infraestructura logística de la zona y el aumento del flujo vehicular.

## **6.3 Modelo Conceptual.**

De acuerdo a la metodología base del estudio, se definió el modelo que mejor represente la realidad, de acuerdo a los tramos y enlaces de la ruta.

El modelo conceptual, se encargó de verificar si los objetos utilizados en el software representan de buena forma la realidad a estudiar, para esto se utilizó un tramo específico, con el fin de comprobar el comportamiento de los objetos.

En la figura N<sup>o</sup>5, se observa el modelo conceptual, donde se especifican los objetos utilizados por el simulador, en el tramo Coronel – San Pedro, intersección Av. Pedro Aguirre Cerda, con el fin de comprobar que los objetos se comportaban de acuerdo a las necesidades del estudio.

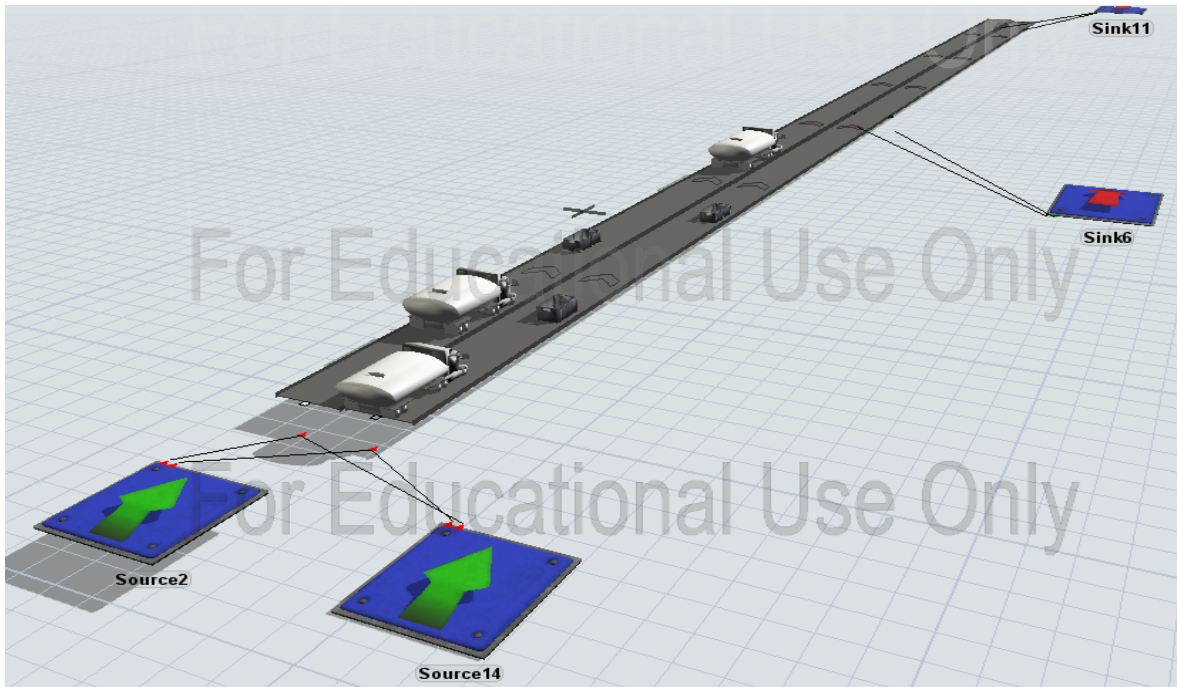


Figura N°5: Modelo Conceptual del simulador Flexsim.

Fuente: Elaboración propia.

Las especificaciones de los objetos utilizados en el simulador son las siguientes:

**Source (Fuente):** Este objeto es el encargado de crear a los ítems que fluyen dentro del modelo, es decir en nuestro caso, los camiones, taxis colectivos, buses y automóviles. En este objeto se ingresan los tiempos entre llegadas para los vehículos que recorren la ruta. Para ingresar los datos, se ajustan a una distribución de probabilidad, de acuerdo al tipo de flujo que el tramo represente, es decir flujo no congestionado o flujo congestionado.

**Flowitems (objetos de flujo):** Estos objetos son las entidades que fluyen dentro de los sistemas, para el estudio son los camiones y vehículos.

**Conveyor (Banda transportadora):** Por esta banda se mueven las entidades (flowitems) dentro del sistema y poseen una velocidad promedio específica para cada tramo. Además del ingreso de velocidades, permite ingresar la capacidad máxima que tendrá cada

tramo de la ruta y su respectiva distancia. Este objeto nos entrega el tiempo máximo, promedio y mínimo que tardaron los flowitems en salir del sistema.

Sink (salida): El propósito de este objeto, es entregar la cantidad de vehículos que salieron del sistema, en un respectivo margen de tiempo.

Como se observó en el modelo conceptual, los objetos utilizados en el simulador, se comportan de forma correcta, de acuerdo a las necesidades del estudio, ya que cumplen con la especificaciones para el ingreso de los datos y entregan los resultados que esperados para cumplir con los objetivos, por lo tanto se valida el modelo conceptual y se procede a generar el modelo de simulación final.

#### **5.4 Recopilación de datos.**

Los datos utilizados para la entrada de camiones al sistema fueron facilitados por Servicios Logísticos Arauco. La información del flujo vehicular fue obtenida de SECTRA, quienes realizan encuestas vehiculares en distintos puntos del país para evaluar el comportamiento de las rutas, con el fin de tomar medidas de contingencia ante un eventual aumento en la actividad vehicular. Cabe mencionar que Sectra se especializa en este tipo de estudios, por lo tanto los datos fueron tomados por personal capacitado.

17 fueron los puntos en donde fueron tomados estos aforos vehiculares en la ruta estudiada como se muestra en la figura N°6.

Los datos que entrego SECTRA, fueron tomados en el mes de Agosto del 2015 y en 4 horarios distintos del día, especificados en la tabla N°4, con el fin de encontrar el momento donde se producen las mayores congestiones en la ruta 160.

Horario		Hora inicio	Hora Termino
Punta Mañana	PM	7.20	8.30
Fuera de Punta	FP	10.30	11.40
Punta Mediodía	PMD	12.10	13.20
Punta Tarde	PT	17.40	19.10

Tabla N°4: Horarios de toma de tiempos.

Fuente: SECTRA, 2015.

Los tipos de vehículos que fueron cuantificados, están representados en la tabla N°5.

<b>Vehículos Livianos</b>	VL
<b>Taxi Básico</b>	TAX
<b>Taxi colectivos</b>	TXC
<b>Bus y Microbús</b>	BUS
<b>Taxi bus</b>	TXB
<b>Bus Rural</b>	BR
<b>Bus Interurbano</b>	BIN
<b>Camiones de 2 ejes</b>	C2E
<b>Camiones más de 2 ejes</b>	C+2E
<b>Bicicletas</b>	BIC
<b>Motos</b>	MOT
<b>Transporte Escolar</b>	TES

Tabla N°5: Tipos de vehículos que transitan en la ruta 160.

Fuente: SECTRA, 2015.

En la figura N°6, se observan los puntos donde fueron medidos los flujos vehiculares a lo largo de la ruta 160, para el tramo en estudio.

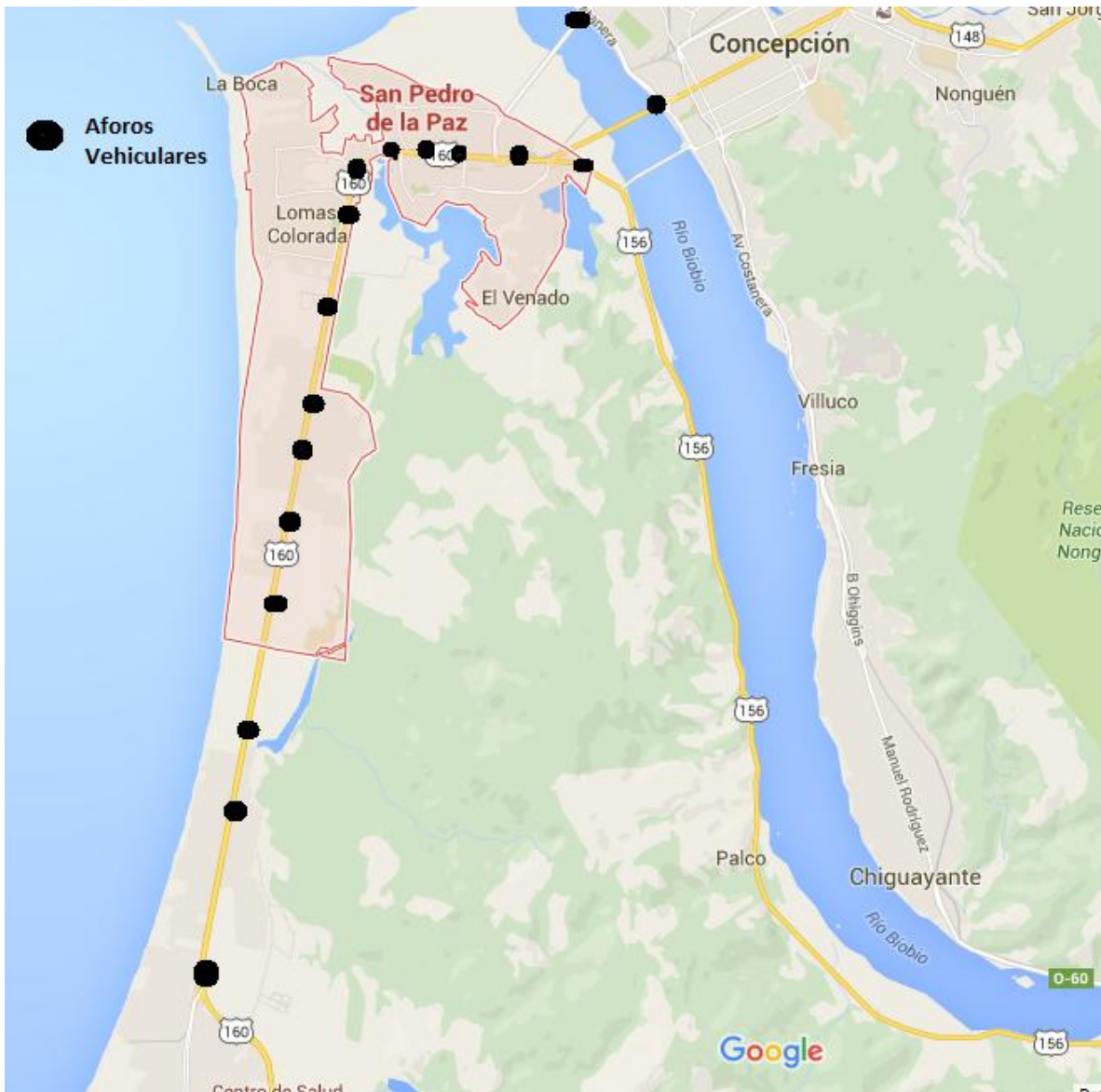


Figura N°6: Aforos Vehiculares en los tramos simulados.

Fuente: Elaboración propia, Google Maps.

Ya identificados los horarios y los vehículos que transitan en la ruta, se procedieron a identificar los tramos e intersecciones, donde fueron medidos los datos para realizar el estudio, mostrados en la tabla N°6.

PC	EJE	DEFINICIÓN DEL TRAMO	
		DESDE	HASTA
1	Ruta 160	Inicio Eje Proyecto (cerca Av. Diagonal Biobío)	Fin Eje Proyecto (cerca San Francisco en Coronel)
2	Av. Pedro Aguirre Cerda	Av. Diagonal Biobío	Puente Chacabuco
3	Cerro San Francisco	Camino a Coronel	Golfo de Arauco
	Golfo de Arauco	Cerro San Francisco	Parque Industrial Escuadrón I
	Parque Industrial Escuadrón I	Central	Ruta 160
4	Puente Llacolén	Av. Pedro Aguirre Cerda	Nueva Costanera
5	Puente Juan Pablo II	Av. Pedro Aguirre Cerda	Nueva Costanera
6	Nueva Costanera	Esmeralda	Av. Gran Bretaña
7	Av. Los Parques – Victoria	Av. Costanera	Progreso
8	Puente Chacabuco	Av. Pedro Aguirre Cerda	Nueva Costanera

Tabla N°6: Definición de tramos en la ruta 160.

Fuente: SECTRA, 2015.

Además, en el tramo desde Coronel hasta Av. Pedro Aguirre Cerda (Eje Ruta 160), se subdivide en 4, donde se asignaron aforos vehiculares.

PC	Circuito	Eje	Desde	Hasta	SENTIDO	TRAMO
1	5	Ruta 160	Cerro San Francisco	Edgardo Garrido	S	tramo1
1	6	Ruta 160	Edgardo Garrido	Calle Uno	S	tramo2
1	7	Ruta 160	Calle Uno	Av. Michaihue	S	tramo3
1	8	Ruta 160	Av. Michaihue	Av. Diagonal Biobío	S	tramo4

Tabla N°7: Tramos subdivididos Coronel - Av. Pedro Aguirre Cerda.

Fuente: SECTRA, 2015.

Este tramo fue subdividido, ya que existen bastantes intersecciones de entrada y salida de vehículos a la ruta, por lo tanto el flujo vehicular varía de un tramo a otro.

Cada tramo tiene una distancia y velocidad asociada. Al momento de analizar las velocidades para los vehículos, se calculó la velocidad promedio del conjunto que transitaba a una hora específica, ya que el objeto utilizado en el simulador (conveyor), solo permitía ingresar de esta forma las velocidades. Como el comportamiento de los vehículos, cuando existe congestión, es en fila y se asemejan a un comportamiento de entrada FIFO (el primero en entrar al sistema es el primer en salir), las velocidades igualmente son semejantes, por lo tanto no existió problema en utilizar estas velocidades promedio.

En la tabla N°8 se encuentran los tramos estudiados, donde se especifican sus distancias y velocidades promedio de acuerdo a los horario mencionados anteriormente (PM, FP, PMD, PT).

PC	SENTIDO	TRAMO	PM			FP			PMD			PT		
			DISTANCIA (m)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD (km/h)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD (km/h)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD (km/h)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD (km/h)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD (km/h)	
1	S	TRAMO1	1.520	2,5	36	2,1	44	1,7	55	1,9	47			
1	S	TRAMO2	2.721	3,1	53	2,3	71	2,2	75	2,1	77			
1	S	TRAMO3	2.256	3,1	43	2,9	46	2,0	69	2,7	50			
1	S	TRAMO4	10.123	8,3	73	8,4	72	7,8	77	7,9	77			
2		P	3.852	7,1	32	6,8	34	6,7	34	7,3	32			
3	N	TRAMO1	2.557	4,4	35	4,6	33	4,9	31	5,2	29			
3	O	TRAMO2	506	0,7	45	0,7	41	0,8	40	0,7	41			
3	O	TRAMO3	863	1,9	28	1,2	42	1,5	36	1,6	32			
3	P	TRAMO3	863	2,1	25	1,3	39	1,7	31	1,5	35			
4		SP	2.198	1,6	82	1,7	77	1,8	72	1,9	70			
5		SP	3.063	2,4	75	2,1	87	2,6	72	2,2	84			
6		NP	5.469	5,6	58	5,0	66	5,1	64	4,7	69			

Tabla N°8: Tramos con sus respectivas distancias y velocidades promedio para cada horario.

Fuente: SECTRA, 2015.

Una vez especificadas las respectivas distancias y velocidades para cada tramo, se identifican las intersecciones donde se producen entradas y salidas al sistema. En la tabla N°9, se observan todas las intersecciones que producen variación en el flujo vehicular de la ruta 160.

Nombre	Ruta
AraucoLotaCoronel	ARLoCor
Bypass	ByPass
Galvarino	R160-35
Calle A	R160-34
Av. Verdi	R160-33
José Donoso	R160-31
Jerusalén	R160-29
Victoria	R160-26
Manuel Rodríguez	R160-25
Carloz Pezoa Veliz	R160-24
Av. Michaihue	R160-23
Daniel Belmar	R160-20
Laguna Grande	R160-19
Av. Avellanos	R160-17
Av. San Pedro	R160-15
Pte. Juan Pablo II	R160-13
Victoria	R160-11
Luis Acevedo	R160-10
Costanera desde JP II	R160-7
Pte. Llacolén	R160-6
Costanera Oriente	R160-4
Costanera Poniente	R160-1

Tabla N°9: Intersecciones en la ruta 160, en tramo a estudiar.

Fuente: SECTRA, 2015.

En cuanto a los aforos vehiculares, se realizó un análisis en cada horario, con el fin de conocer cómo se comportaba el flujo vehicular en los distintos tramos de la ruta. Como se observa en el gráfico N°8, tenemos que en el tramo; salida del Puente Juan Pablo II, hacia la Av. Nueva Costanera, se aprecia claramente que el horario Punta Mañana es el que posee el mayor flujo vehicular.

Lo mismo se realizó para el tramo Av. Costanera Oriente, desde ramal del puente Juan Pablo II (grafico N°9), donde igualitariamente el mayor flujo se presentó en el horario punta mañana. Este análisis se realizó para todos los tramos y todos los horarios que se están estudiando.

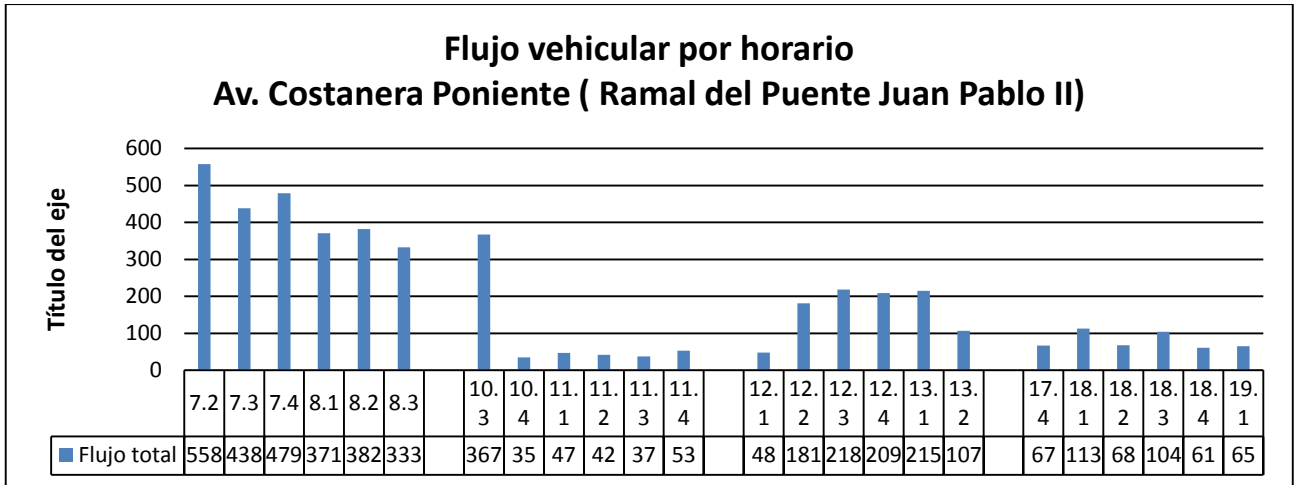


Grafico N°8: Flujo vehicular por horario.

Fuente: Elaboración propia.

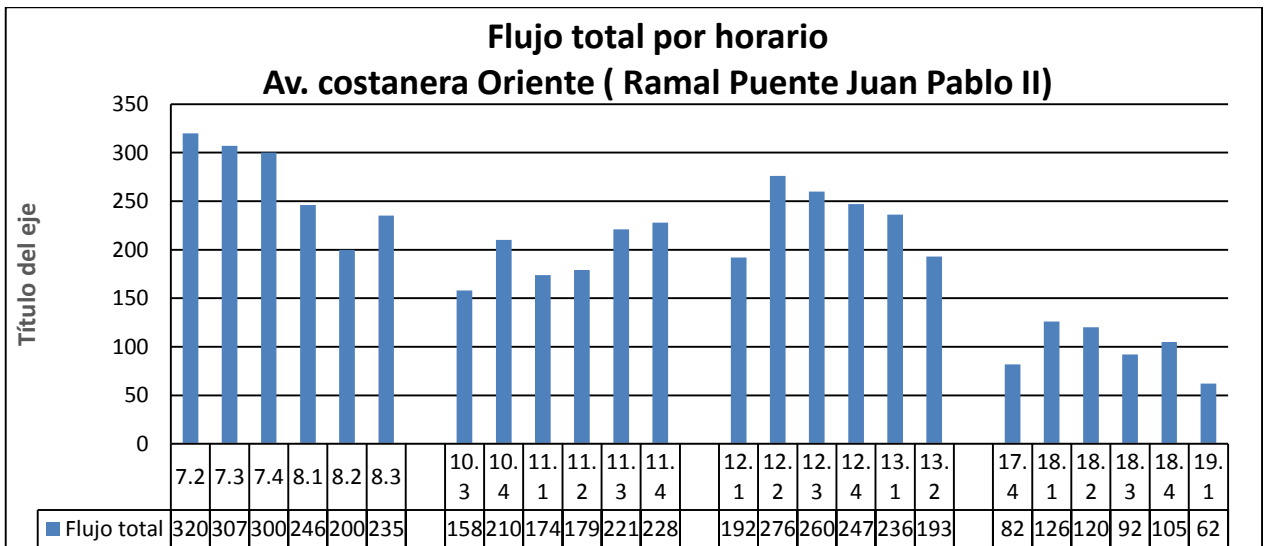


Grafico N°9: Flujo tota por horario.

Fuente: Elaboración propia.

En algunos casos, se presentó que el horario con mayor flujo vehicular se encontraba en Punta Tarde, pero se decidió realizar el análisis para

el horario Punta Mañana, que presentaba en la mayoría de los tramos, el mayor flujo vehicular en ese horario. Además se trabajó con los flujos máximos, para representar de mejor forma la congestión vehicular.

En el análisis que se realizó en los horarios Fuera de punta y punta Medio día, se encontró que no era necesario realizar una simulación, ya que el objetivo del análisis, es identificar los puntos de congestión y evaluar una solución para la descongestión de esos puntos, habiendo en estos horarios un flujo más libre, no siendo necesaria la evaluación de las alternativas.

## **6.5 Modelo de Traducción**

Siguiendo con la Metodología propuesta por Jerry Banks y para entender de forma clara las entradas y salidas de vehículos en el sistema, se confeccionó un Diagrama Lógico de Simulación de Tránsito, donde se especifican estas entradas y salidas al sistema, además las direcciones que toman los vehículos y los camiones.

Como se observa en el Diagrama N°1, el punto 1, se refiere a todas las intersecciones que fueron identificadas en la tabla N°10 y el punto 2, representa las desviaciones hacia los puentes Juan Pablo II, Llacolén y Chacabuco.

Para que los resultados esperados en la simulación sean los necesarios para los objetivos propuestos, se debe elaborar el modelo lo más semejante a la realidad, al igual que las distancias y las velocidades para cada tramo. Para esto se ajustó la distancia del Software Flexsim a escala de los cuadros que este ofrece. Esto quiere decir que la distancia que existe en un cuadro de la vista del Software equivale a 10 metros en la realidad, como se puede observar en la figura N°7.

En el diagrama Lógico de Simulación de tránsito, se observan las entradas de vehículos al sistema. El flujo vehicular perteneciente desde Arauco-Lota-Coronel y el By-Pass, que hacen conexión con la ruta 160. Se observa la división en los puentes y la salida de los vehículos hacia Concepción y los Puertos.

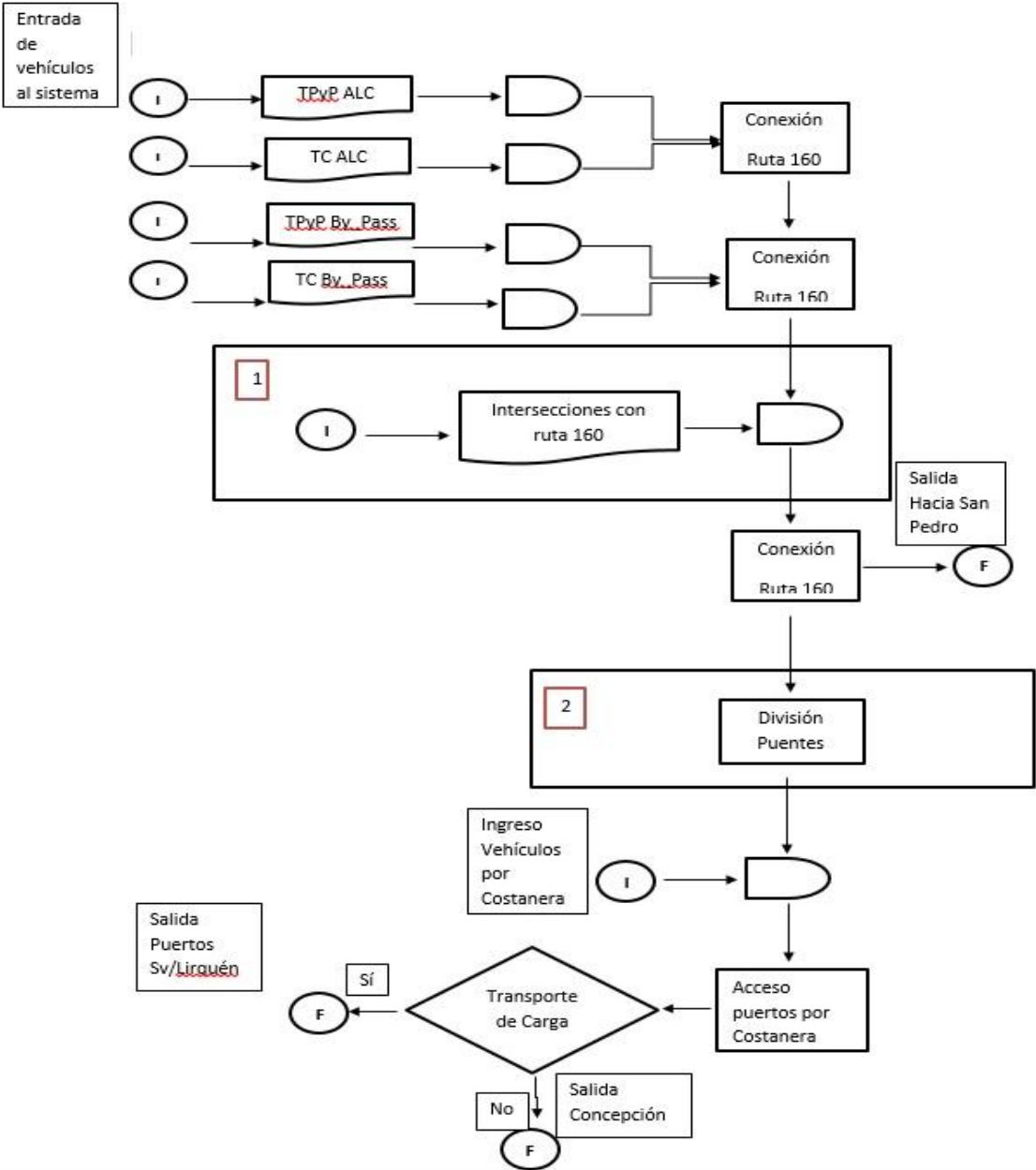


Diagrama N°1: Diagrama Lógico de Tránsito Vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

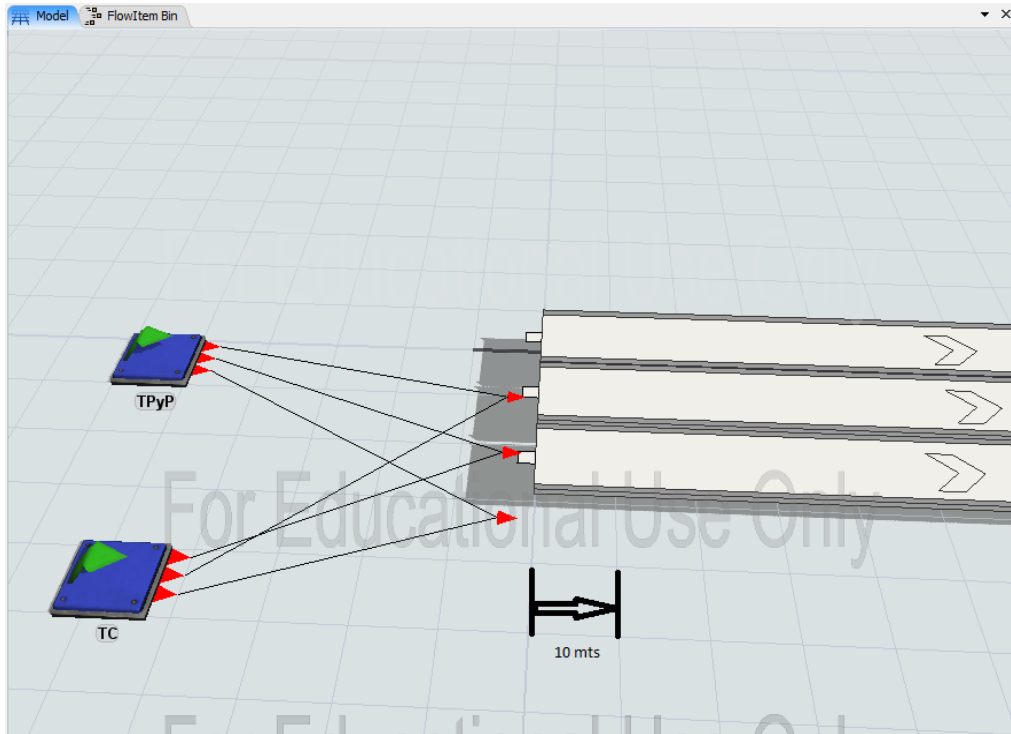


Figura N°7: Medida Distancia utilizada en Flexsim.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez construido en su totalidad el modelo se procedió a ingresar los tiempos entre llegadas y sus respectivas distribuciones de acuerdo a la información obtenida por SECTRA. Para ingresar estos datos se ajustaron las distribuciones de acuerdo a los modelos ya mencionados anteriormente, es decir para los flujos congestionados, se ajustó a modelos Logarítmicos y para flujos no congestionados, se utilizó el modelo Exponencial.

Dadas las características del simulador, tenemos que, las respectivas distancias por tramos están representadas en la tabla N°10.

Tramo	metros	Flexsim
AraucoLotaCoronel- Galvarino	1330	133
Galvarino-Calle A	1160	116
Calle A-Av. Verdi	3730	373
Av. Verdi-José Donoso	1640	164
José Donoso-Jerusalén	1090	109
Jerusalén-Victoria	502	50,2
Victoria- Manuel Rodríguez	352	35,2
Manuel Rodríguez- Carloz Pezoa Veliz	2540	254
Carloz Pezoa Veliz- Av. Michaihue	1400	140
Av. Michaihue- Daniel Belmar	533	53,3
Daniel Belmar- Laguna Grande	1020	102
Laguna Grande-Av. Avellanos	400	40
Av. Avellanos - Av. San Pedro	733	73,3
Av. San Pedro- Puente Juan Pablo II	678	67,8
Puente Juan Pablo II – Costanera	3068	306,8
Ingreso puente JP II – Victoria	474	47,4
Victoria - Luis Acevedo	484	48,4
Puente Llacolen – Costanera	2198	219,8

Tabla N°10: Distancia de cada tramo en medida del Simulador.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla N°11 podemos ver los tramos y su respectiva distribución, además del indicador que debe tener cada distribución.

Como se observa en la tabla N°11, se identificaron ciertos tramos como congestionados, dado los estudios realizados y sus respectivos flujos vehiculares. En particular la Av. Pedro Aguirre Cerda, es un tramo donde se genera cuello de botella, por la reducción de 3 calles a 2 y además, a causa de los semáforos que existen en esa avenida. Estos flujos congestionados se aproximaron a una distribución logarítmica que según los estudios de transito anteriormente mencionados es el mejor ajuste para este tipo de flujo vehicular.

		Distribución	
Nombre	Ruta	Veh Col y Part	Veh Carga
AraucoLotaCoronel	ARLoCor	Exponential (0;2,27;0)	Exponential (0;45,65;0)
Bypass	ByPass	Exponential (0;3,25;0)	Exponential (0;27,63;0)
Galvarino	R160-35	Exponential (0;2,06;0)	Exponential (0;24,29;0)
Calle A	R160-34	Exponential (0;2,05;0)	Exponential (0;28,38;0)
Av. Verdi	R160-33	Exponential (0;1,83;0)	Exponential (0;15,56;0)
José Donoso	R160-31	Exponential (0;1,82;0)	Exponential (0;12,65;0)
Jerusalén	R160-29	Exponential (0;2,18;0)	Exponential (0;24,42;0)
Victoria	R160-26	Exponential (0;2,55;0)	Exponential (0;116,67;0)
Manuel Rodríguez	R160-25	Exponential (0;2,40;0)	Exponential (0;67,74;0)
Carlos Pezoa Veliz	R160-24	Exponential (0;2,90;0)	Exponential (0;40,38;0)
Av. Michaihue	R160-23	Exponential (0;2,51;0)	exponential(0;35,00)
Daniel Belmar	R160-20	Lognormal (0;2,15;0,01 ;0)	Lognormal (0;31,58;0,01 ;0)
Laguna Grande	R160-19	Lognormal (0;1,73;0,01 ;0)	Lognormal (0;37,01;0,01 ;0)
Av. Avellanos	R160-17	Lognormal (0;1,66;0,01 ;0)	Lognormal (0;44,21;0,01 ;0)
Av. San Pedro	R160-15	Lognomal (0;1,95;0,01 ;0)	Lognormal (0;16,28;0,01 ;0)
Pte. Juan Pablo II	R160-13	Exponential (0;4,03;0)	exponential (0;15,50;0)
Victoria	R160-11	Exponential (0;3,86;0)	Exponential (0;21,88;0)
Luis Acevedo	R160-10	Exponential (0;4,06;0)	Exponential (0;31,34;0)
Costanera desde JPII	R160-7	Exponential (0;1,76;0)	Exponential (0;47,73;0)
Pte. Llacolen	R160-6	Exponential (0;2,86;0)	Exponential (0;14,29;0)
Costanera Oriente	R160-4	Exponential (0;2,72;0)	Exponential (0;85,71;0)
Costanera Poniente	R160-1	Exponential (0;1,68;0)	Exponential (0;91,30;0)

Tabla N°11: Distribución por tramos y tipo de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

## 6.6 Verificación

El proceso de validación es de suma importancia, ya que indica, si los datos utilizados en la recopilación, representa de mejor forma la realidad, con el fin de tomar buenas decisiones con el modelo propuesto. Para esto, se calculó el número de réplicas del modelo, dando un valor inicial arbitrario para calcular la estadística descriptiva, que permitirá encontrar el número de réplicas necesarias para validar el modelo.

El número de réplicas inicial utilizado fue de 7 repeticiones, buscando validar el modelo de acuerdo a la opinión experta de camioneros que utilizan esta ruta. Según expertos cuando el flujo es congestionado en los horarios puntas, se tardan aproximadamente 2 horas 6 minutos, es decir 7560 segundos, en realizar el recorrido.

Una vez realizadas las 7 repeticiones, los datos estadísticos entregados por el simulador son los siguientes:

<b>Media</b>	6786,7
<b>Error típico</b>	67,867
<b>Desviación estándar</b>	60,8878477

Tabla N°12: Estadística descriptiva tramos Arauco-Costanera.

Fuente: Elaboración propia.

Ya obtenidos estos valores, se calcula el número necesario de réplicas para validar el modelo, mediante la ecuación (8):

$$N = \left(\frac{SK}{E}\right)^2 \quad (8)$$

Donde:

N= Número mínimo de réplicas.

S= Desviación estándar estimada de las réplicas iniciales.

K= Constante t-student, correspondiente al nivel de confianza deseado (99% equivalente a 4,604).

E= Error permitido en el tiempo estimado.

Evaluados los valores de la tabla N°12, en la ecuación (8), tenemos que, el número de réplicas es 17.

Obtenido el número de réplicas, se comparan los tiempos entregados por el simulador, con los tiempos entregados por los expertos.

En la tabla N°13, se observan los tiempos de transporte entregados por el simulador para las 17 réplicas.

Replicas	Tiempo Total
1	6804,4
2	6720,5
<b>3</b>	6731,9
4	6849,1
5	6878,5
6	6782,8
7	6739,7
8	6800,9
9	6806,5
<b>10</b>	6720,9
11	6644,4
12	6640,4
13	6743,5
<b>14</b>	6741,3
15	6682,8
16	6714,3
17	6714,8

Tabla N°13: Validación de tiempos.

Fuente: Elaboración propia.

Calculando el promedio de los tiempos de la tabla N°13, tenemos que la variación entre el promedio arrojado por el modelo real y el valor dado por un experto es de tan solo un 11%. Dado este porcentaje menor a un 15%, podemos decir que el modelo si es válido.

Tramo	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	Variación
Arauco-Pto. San Vicente	6748,0	7560	11%

Tabla N°14: Comparación de tiempos del Modelo Real.

Fuente: Elaboración propia.

Para justificar aún más el uso de la simulación, se decidió realizar una prueba de hipótesis para las medias muestrales, así verificar si el tiempo promedio arrojado por el simulador es correcto y los datos son validados.

En la tabla N°15, se muestran los valores de los datos reales del sistema a simular, donde se especifica la media, desviación estándar y número de la muestra. Además, el estimador de la media entregado por el software.

<b>N</b>	142,000
<b>X</b>	6804,000
<b>S</b>	60,88784772
<b>μ</b>	6786,700

Tabla N°15: Estadística descriptiva de la muestra real y media estimada.

Fuente: Elaboración propia.

Para la prueba de hipótesis tenemos que:

$h_0$  = Existe diferencia significativa entre el promedio entregado por el software y el promedio de la muestra real.

$h_1$  = el promedio indicado por el software no posee diferencia significativa con respecto del promedio real de la muestra.

Calculamos el valor de Z con la ecuación (9), con un nivel de significación de un 1%.

$$Z = \frac{X - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (9)$$

Reemplazamos los valores de la tabla N°16 en la ecuación (9), tenemos que:

$$Z = 3,385$$

Como se tiene que nuestro nivel de confianza  $\alpha = 0,01$ , tenemos que la región de rechazo de  $h_0$  está representado en la ecuación (10):

$$Z > 2,33 \text{ o } Z < - 2,33 \quad (10)$$

Dado nuestro valor de  $Z = 3,385$ , tenemos que está dentro del intervalo (10), por lo tanto existe evidencia significativa para rechazar la hipótesis  $h_0$ , es decir la media arrojada por el modelo de simulación no posee diferencia significativa con respecto al promedio de la muestra real, así validando los datos utilizados por el modelo.

## **6.7            Diseño experimental**

Validado el número de réplicas necesarias, para la ejecución del modelo, se procede a realizar los experimentos que nos permitirán identificar cuáles son los puntos, donde se genera la mayor congestión y los retardos en los tiempos de viaje, así considerar propuestas y escenarios de solución.

Claramente se identificaron los puntos de congestión, en la entrada a San Pedro de la Paz hasta el acceso a los puentes, en los horarios punta mañana, ya que se reduce la pista y además se produce un atochamiento de vehículos de carga. Estos puntos críticos son los considerados a descongestionar en las propuestas que se mencionan más adelante.

### **6.7.1        Escenarios**

Dadas las especificaciones mencionadas anteriormente, se propondrán distintos escenarios que serán implementados en el modelo de simulación, con el fin de lograr esa descongestión y disminución en los tiempos de traslado en la ruta 160.

Una de las propuestas más importantes, que entregó el Ministerio de Obras Públicas (MOP), es la construcción de un nuevo puente, que será utilizado únicamente para el transporte de carga, para así evitar el paso de camiones por el sector centro de San Pedro de la Paz.

Otra propuesta estudiada por el MOP, es la construcción de una pista única para el transporte público, liberando así, la congestión entre el transporte público y de carga. Comenzar trabajos en la ruta 160, específicamente en los tramos Coronel-San Pedro, producirá aún más externalidades, aumentando los tiempos de traslado para los usuarios de esta ruta, por lo tanto esta alternativa solo podrá ser realizada, si existiera otra ruta que uniera estas 2 comunas. Es por esto, que paralelamente se estudia una nueva alternativa. Esta nueva alternativa consiste en la construcción de un camino costero, que servirá como ayuda, para el traslado únicamente de vehículos livianos, dejando así libre una pista para realizar trabajos en la ruta 160 sin generar mayores atochamientos.

Finalmente, la última alternativa que se estudiará, es una nueva ruta que una las 2 comunas. Este proyecto, aproximadamente de unos 20 kilómetros, pasaría por el borde de los cerros y al oriente de la ruta 160, conectando al norte con la concesión vial Puente industrial y por el sur, conectada con la concesión ruta 160, tramo Coronel-Tres pinos.

Cabe mencionar, que estos escenarios están evaluados en un horizonte de tiempo hasta el año 2020. Además el aumento del parque vehicular de la región del Biobío, se obtuvo de acuerdo a los datos entregados por el INE, con un valor del 7,9% anual. Ver Tabla de crecimiento vehicular en el anexo B.

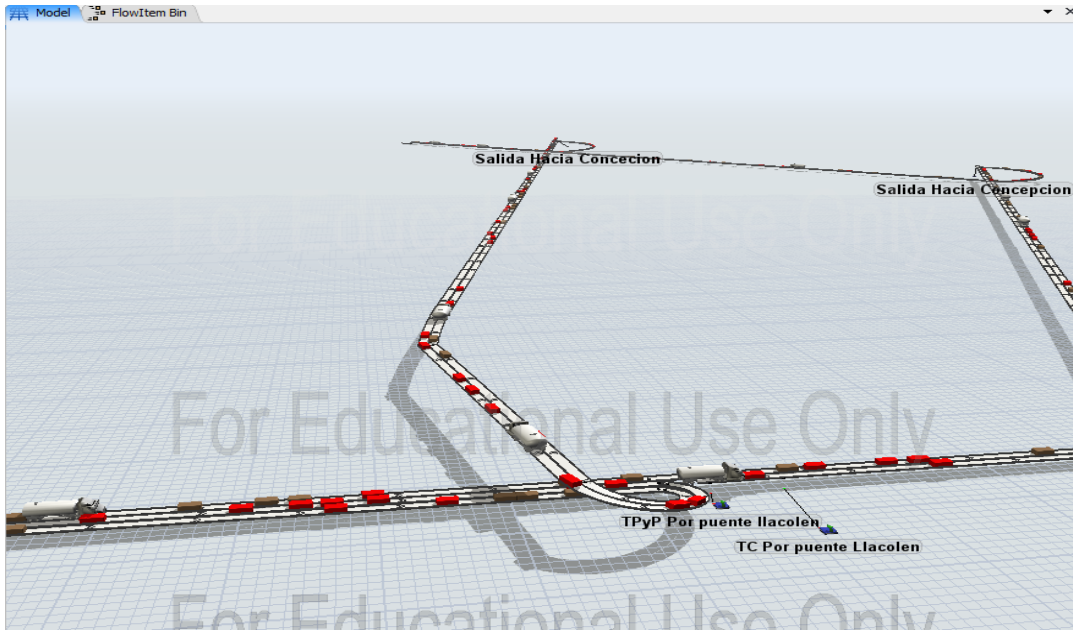


Figura N°8: Modelo situación actual San Pedro de la Paz, Pte. Juan Pablo II.

Fuente: Elaboración propia.

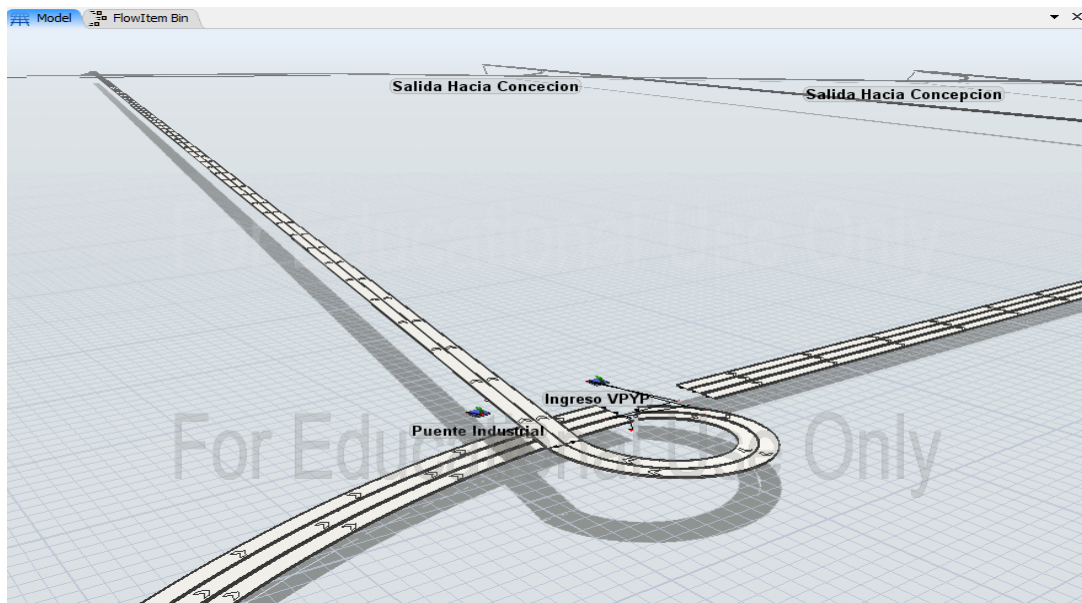


Figura N°9: Modelo 2, Puente Industrial.

Fuente: Elaboración propia.

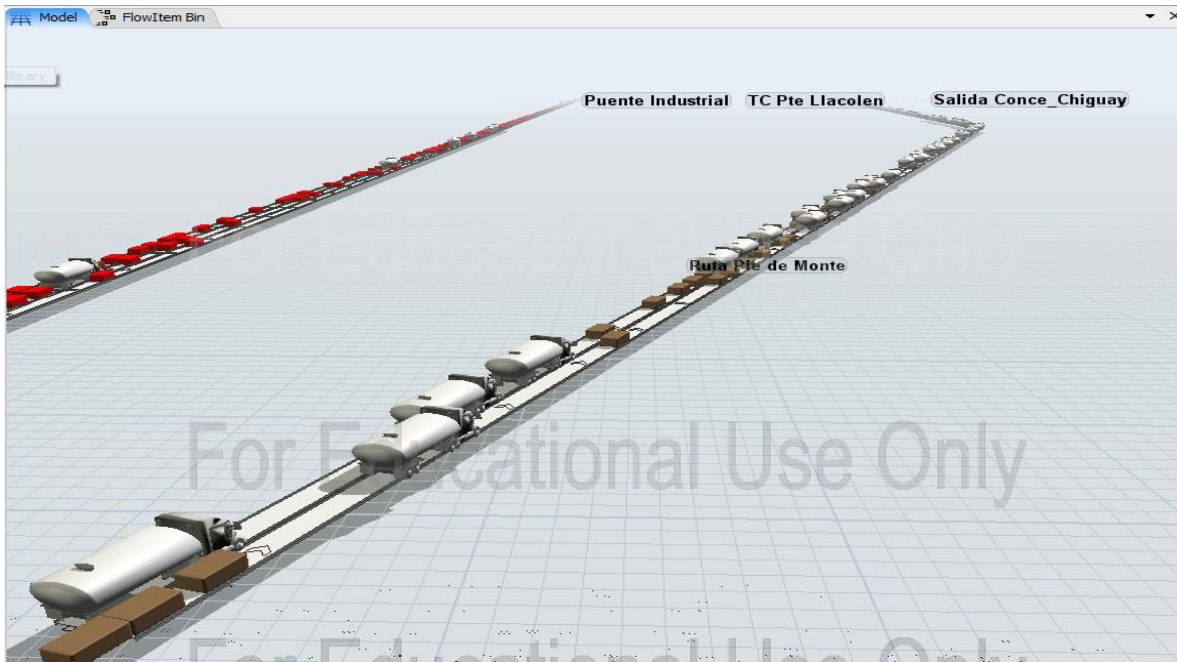


Figura N°10: Modelo 3, ruta Pie de Monte.

Fuente: Elaboración propia.

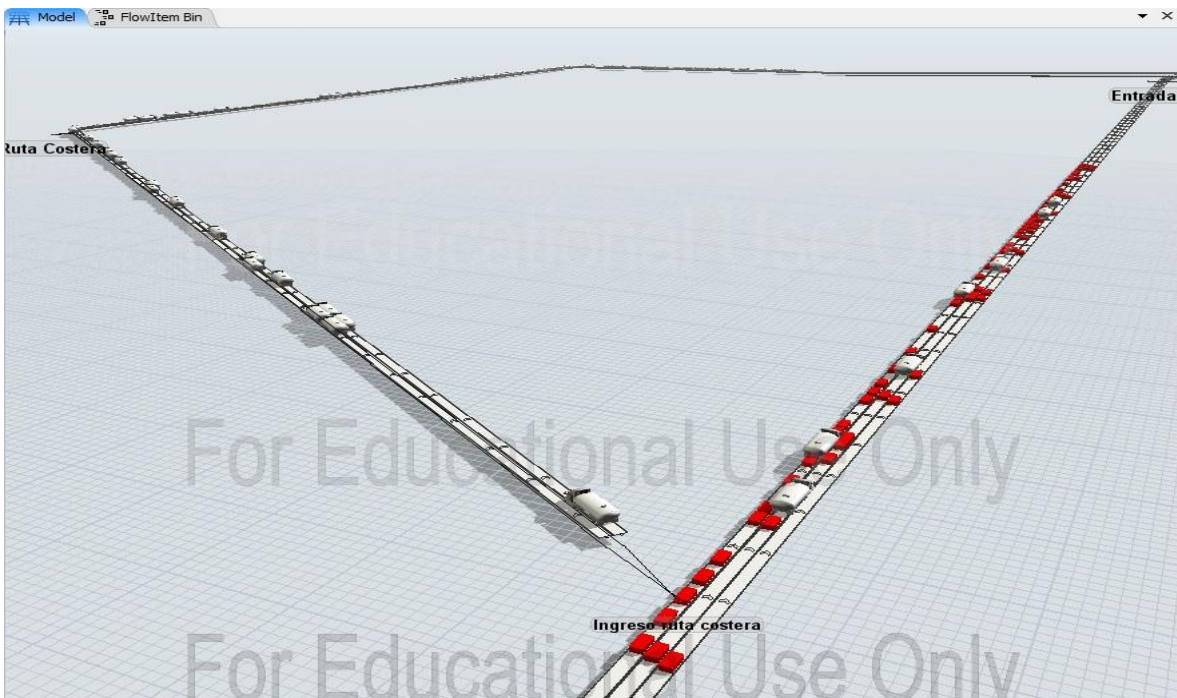


Figura N°11: Modelo 4, nueva ruta Costera.

Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 7

### 7. Ejecuciones del Simulador.

Encontrado el número de réplicas necesarias, se realizaron las ejecuciones para los distintos escenarios propuestos anteriormente, con el fin de comparar los tiempos de viajes en cada alternativa.

#### 7.1 Ejecución del Modelo Actual hasta el año 2020.

Dadas las especificaciones mencionadas anteriormente, se realizó la ejecución del modelo actual hasta el año 2020, donde claramente se apreció que este aumento de flujo vehicular en la ruta 160, se verá enfrentada a una alta congestión para el año 2017, donde el aumento en los tiempos de viaje de los camiones, posee una variación del 4%, es decir 2 horas y 11 minutos aproximadamente.

En la tabla N°16, se observan los tiempos que demoran los camiones en llegar a su destino, estos valores se calcularon para comparar los escenarios propuestos, en sus respectivos años de implementación.

Año	Tiempo M. Actual	Variación Tiempo (s)	Variación Tiempo (m)	Variación %
2015	6748,0	811,96	13,53	11%
2016	7280,0	280,01	4,67	4%
<b>2017</b>	<b>7853,9</b>	<b>-293,93</b>	<b>-4,90</b>	<b>-4%</b>
2018	8473,2	-913,16	-15,22	-12%
2019	9141,3	-1581,26	-26,35	-21%
2020	9862,1	-2302,11	-38,37	-30%

Tabla N°16: Tiempos Escenario Actual, hasta el año 2020.

Fuente: Elaboración propia.

## 7.2 Ejecuciones del Modelo 1: “Puente Industrial”.

El proyecto Puente Industrial, consta con la implementación de un cuarto puente a través del río Biobío, que será exclusivo para el transporte de carga. Este proyecto será implementado a la altura del Estero Los Batros, conectándose con la Nueva Costanera y logrará descongestionar la Avenida Pedro Aguirre Cerda, conexión principal con el Centro de San Pedro, liberando notablemente el flujo de vehículos Particulares y de Transporte Público que circulan por este sector. El proyecto estará finalizado el año 2018, por lo tanto se compararon los tiempos con el escenario actual para ese año, donde se observa una alta congestión vehicular en la ruta y tiempos de traslado bastante altos.

Para evaluar, cómo se comportará el flujo vehicular con este nuevo escenario, se supuso que: todos los vehículos de carga se trasladan exclusivamente por ese puente, dejando los trazados de la Av. Pedro Aguirre Cerda, los puentes Juan Pablo II y Llacolén, solo para el flujo de vehículos particulares y de transporte público.

Se realizaron las réplicas del modelo Puente Industrial, con los datos del escenario actual, con el fin de tener una idea, sobre cómo disminuirían los tiempos de transporte para los vehículos que transitan por la ruta y compararlo con el promedio de tiempo entregado por el experto.

Tramo	Modelo Puente Industrial Escenario 2015		Variación
	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	
Arauco-Pto. San Vicente	6165,5	7560	18%

Tabla N°17: Tiempos modelo Puente Industrial para el año 2015.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla N°17, si el puente industrial estaría ya construido, la disminución de tiempos de viaje sería de un 18%, es decir

23 minutos, siendo un escenario muy favorable para la comunidad que vive en esa zona, ya que según mencionó el experto, en promedio demoraban 2 hora y 6 minutos en llegar a su destino y ahora realizarían el mismo recorrido en 1 hora y 42 minutos aproximadamente. Como el proyecto Puente Industrial estaría terminado para el año 2018, tenemos que evaluar este escenario, para el flujo vehicular que existirá en ese momento.

Una vez simulado este modelo pero para su correspondiente año, tenemos que los resultados arrojados por el simulador son:

Tramo	Modelo Puente Industrial 2018		Variación
	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	
Arauco-Pto San Vicente	7525,6	7560	0,45%

Tabla N°18: Tiempos modelo Puente Industrial año 2018.

Fuente: Elaboración propia.

En promedio, para el flujo vehicular existente en ese año, el tiempo que tardarían los camiones en trasladarse, disminuiría solo un 0,45% con respecto al tiempo promedio entregado por el experto, es decir, tardarían 2 horas y 5 minutos en llegar a su destino, 1 minutos menos que el promedio para el año 2015. Por lo tanto, para el año 2018 se mantendrá casi idéntico el tiempo de traslado de los camiones, pero sí, se lograra descongestionar los tramos Av. Pedro Aguirre Cerda, Puente Juan Pablo II y Puente Llacolén, ya que los camiones no transitarán por ese sector.

De acuerdo a las estimaciones, el parque vehicular para los años 2019 y 2020 seguirá en aumento, por lo tanto aumentarán los tiempos de transporte de carga, siendo nuevamente una problemática para las empresas que utilizan esta ruta para transportar sus productos.

Como se observa en la tabla N°19, el tiempo de viaje para los camiones en el año 2020, posee una variación de un 9,37%, es decir, 2 horas y 17 minutos, aumentando en 11 minutos los tiempos de traslado.

<b>Modelo Puente Industrial 2020</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Promedio Modelo Real</b>	<b>Promedio Experto</b>	<b>Variación</b>
<b>Arauco-Pto. San Vicente</b>	<b>8268,3</b>	<b>7560</b>	<b>-9,37%</b>

Tabla N°19: Tiempo modelo Puente Industrial, año 2020.

Fuente: Elaboración propia.

### **7.3 Ejecuciones del modelo 2: ruta Pie de Monte.**

La ruta Pie de Monte es un tramo vial, paralelo a la ruta 160 entre Coronel y San Pedro, esta ruta conectará el By Pass Coronel con el puente industrial Los batros, con el fin de tener una alternativa para descongestionar ese tramo en particular, además evitar una gran cantidad de accidentes que aquí se generan. Un punto importante que se debe tomar en cuenta, es que una vez terminado este tramo, se abre la posibilidad de comenzar trabajos en la ruta 160 actual, utilizando como alternativa de traslado solo el tramo Pie de Monte.

Para esta ruta no existe un futuro claro aún, no se conoce exactamente cuándo se comenzará a construir, ni cuándo estará terminado, por lo tanto se evaluara como supuesto para el año 2016 y 2018 como alternativa única y 2018, 2019 y 2020, junto al puente industrial.

Realizadas las 17 réplicas del modelo, para el año 2016, tenemos que siguientes resultados:

<b>Promedio Modelo Pie de Monte 2016</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Promedio Modelo Real</b>	<b>Promedio Experto</b>	<b>Variación</b>
<b>Arauco-Pto San Vicente</b>	<b>7369,0</b>	<b>7560</b>	<b>3%</b>

Tabla N°20: Tiempos Modelos 2: Pie de Monte, año 2016.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla N°19, el proyecto Pie de Monte posee una variación de tiempo de un 3%, con respecto al promedio entregado por

el experto, esto quiere decir que en el año 2016 el tiempo de viaje será de 2 horas y 2 minutos, con un ahorro de 4 minutos.

Ahora veremos cómo se comportara para el año 2018 sin la implementación del puente industrial, donde se apreciará claramente los altos tiempos de traslado para ese año.

<b>Promedio Modelo Pie de Monte 2018</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Promedio Modelo Real</b>	<b>Promedio Experto</b>	<b>Variación</b>
<b>Arauco-Pto San Vicente</b>	<b>8402,5</b>	<b>7560</b>	<b>-11%</b>

Tabla N°21: Tiempos Modelo Pie de Monte año 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Los tiempos de viaje obtenidos para el modelo Pie de Monte, en el año 2018, arrojan que existe un aumento de un 11%, es decir, 2 horas y 20 minutos, 14 minutos más que el promedio entregado por el experto, concluyendo que este modelo no nos entrega una solución para el 2018. Este tiempo aumenta notablemente, ya que se produce un cuello de botella en la Av. Pedro Aguirre Cerda, a causa de la conexión de las 3 pistas de la ruta 160 y las 2 pistas de la ruta Pie de Monte.

Por lo tanto, se analizará la alternativa Pie de Monte, con la alternativa Puente Industrial para el año 2018, con el fin conocer el comportamiento de estos 2 escenarios conjuntos.

Para analizar estas 2 alternativas se utilizaran los mismo supuestos que se implementaron en el modelo 1 Puente industrial, pero con la implementación de esta nueva ruta Pie de Monte.

<b>Promedio Modelo Pie de Monte + Pte. Industrial 2018</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Promedio Modelo Real</b>	<b>Promedio Experto</b>	<b>Variación</b>
<b>Arauco-Pto San Vicente</b>	<b>7058,9</b>	<b>7560</b>	<b>7%</b>

Tabla N°22: Tiempo Modelo Pie de Monte y Puente Industrial año 2018.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo observado en la tabla N°22, el tiempo de transporte disminuye en un 7% de acuerdo al promedio entregado por el experto, esto quiere decir que para el 2018, este escenario sigue siendo factible y no arroja congestión en la ruta 160, además descongestiona el tramo Av. Pedro Aguirre Cerda, sin generar externalidades.

El escenario Pie de Monte, es factible para el tramo Coronel-Los Batros, ya que mantendrá un flujo constante en estas dos rutas paralelas y además disminuirá notablemente los accidentes que ocurren a diario en la ruta 160.

Ahora se analizará el escenario Pie de monte más Puente industrial, para el año 2020, con el fin de conocer si aún existirá congestión vehicular para ese año.

Tramo	Promedio Modelo Pie de Monte + Pte. Industrial 2020		Variación
	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	
Arauco-Pto San Vicente	7558,0	7560	0,026%

Tabla N°23: Tiempos Modelo Pie de monte y Puente Industrial año 2020.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la tabla N°23, tenemos que, el tiempo para los flujos vehiculares en el año 2020, tiene una disminución baja, de tan solo un 0,026%. Esto quiere decir , que para ese año los camiones tardaran 2 horas y 5 minutos aproximadamente en recorrer el tramo Arauco-Puertos SV y Talcahuano, 1 minuto menos que el promedio entregado por el experto para el año 2015.

Si analizamos esta alternativa, se concluye, que si sería una solución para la congestión vehicular de la ruta, observando una disminución en los tiempos de viaje y una gran descongestión en el tramo Av. Pedro Aguirre Cerda.

## 7.4 Ejecuciones del modelo 3: Ruta Costera.

La Ruta Costera, es un tramo vial de aproximadamente 2 kilómetros, que une la Villa Sprin Hill con Lomas coloradas por la costa, sirviendo como alternativa para el Puente Industrial e incluyendo un acceso paralelo a Los Batros, que es utilizado por las familias de horticultores que explotan los humedales. Este tramo pretende estar terminado a mediados del 2016 y ayudara a descongestionar un poco este sector de la ruta 160 para el transporte público y particular.

Tramo	Promedio Modelo Ruta Costera 2016		Variación
	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	
Arauco-Pto San Vicente	6907,1	7560	9%

Tabla N°24: Tiempos modelo Ruta Costera año 2016.

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos ver en el tabla N°24, los tiempos del modelo Ruta Costera para el año 2016 disminuyen en un 9%, con respecto al promedio entregado por el experto, esto quiere decir que esta nueva alternativa logra disminuir el tiempo de viaje en unos 11 minutos, siendo una alternativa factible para solucionar el problema para el año 2016.

Ahora bien, se analizará cómo se comporta esta solución para el año 2018, sin la alternativa Puente Industrial y si resiste al aumento del parque vehicular.

Tramo	Promedio Modelo Ruta Costera 2018		Variación
	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	
Arauco-Pto San Vicente	8089,1	7560	-7%

Tabla N°25: Tiempos Modelo Ruta costera año 2018.

Fuente: Elaboración propia

Analizando la tabla N°25, para el modelo Ruta Costera en el año 2018, tenemos que los tiempos de viajes, poseen un aumento de un 7%, esto quiere decir, que los tiempos incrementan en 9 minutos de acuerdo al promedio entregado por el experto, observando nuevamente una alta congestión en el tramo Av. Pedro Aguirre Cerda. Por lo tanto este tramo se evaluara en el 2018 conjunto al proyecto Puente Industrial y así verificar si aún mantiene descongestionada la ruta con estos 2 escenarios.

Promedio Modelo Ruta Costera + Pte. Industria 2018.			
Tramo	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	Variación
Arauco-Pto San Vicente	7363,3	7560	3%

Tabla N°26: Tiempos Modelo Ruta Costera más Puente Industrial año 2018.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N°26, se observar que aún existe una disminución en los tiempos de transporte, una variación de un 3%, con respecto al promedio entregado por el experto, es decir, existe un ahorro de 4 minutos aproximadamente en el tiempo de traslado por estas rutas.

Si bien, esta alternativa no es muy grande y no influye directamente en el flujo vehicular de la Av. Pedro Aguirre Cerda, si logra descongestionar los tramos que contemplan la ruta 160 con el sector Lomar Coloradas.

Finalizadas ya las distintas ejecuciones para los 3 modelos mencionados anteriormente y para el horizonte de tiempo hasta el año 2020, se concluye, que existe alternativas de solución, que logra una gran descongestión de la ruta, amortiguan el gran aumento del parque vehicular que se espera para la zona en ese año.

Para ayudar a la visibilidad de los resultados arrojados por los modelos, se confeccionó un gráfico donde se evalúan las 3 alternativas en sus respectivos años. Además, se observan los escenarios conjuntos para los años 2018, 2019 y 2020, con el fin de comprender cómo estos

escenarios mejoran a las otras alternativas evaluadas en términos independientes.

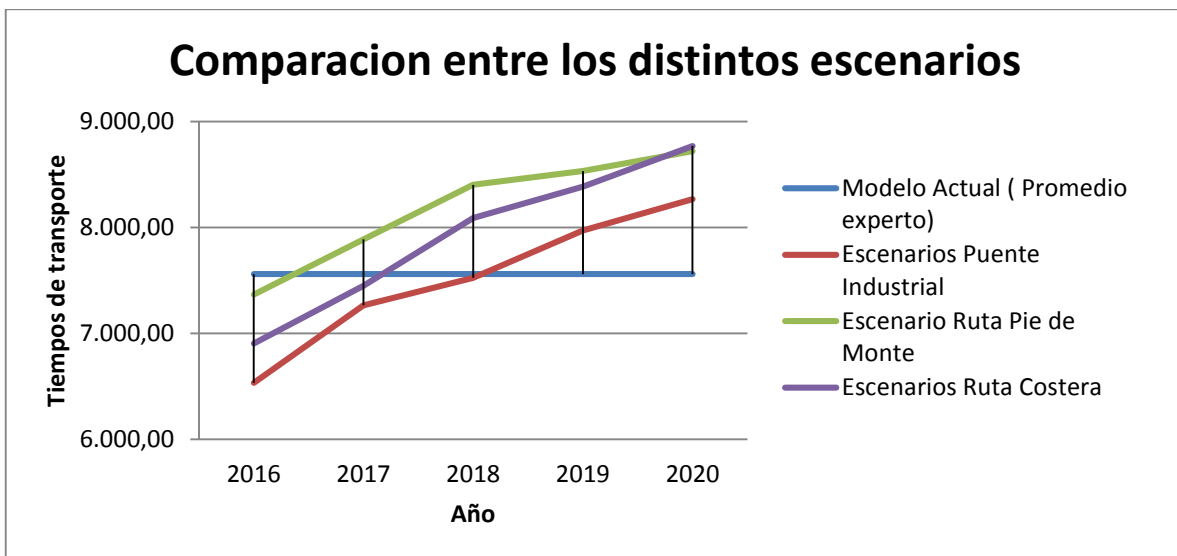


Gráfico N°10: Comparación entre los distintos escenarios, con el promedio entregado por el experto.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico N°10, se observan los tiempos de transporte para los distintos escenarios, aquí se obtiene, que el mejor escenario es el numero 1 (Puente Industrial), ya que mantiene los tiempos de transporte más bajos hasta el año 2018, donde se comienza a observar nuevamente congestión y tiempos de retraso mayores a los entregados por el experto, debido al gran impacto por el incremento del parque vehicular del sector. Si analizamos las otras alternativas en los años 2016 y 2017, ya existirá congestión, por lo tanto no solucionan la problemática.

Un punto importante a observar en el grafico N°10, es la ruta Costera, ya que es la primera que se podría implementar a corto plazo, ayudando a disminuir esta congestión hasta el año 2017, donde nuevamente vuelven a incrementar los tiempos de traslado.

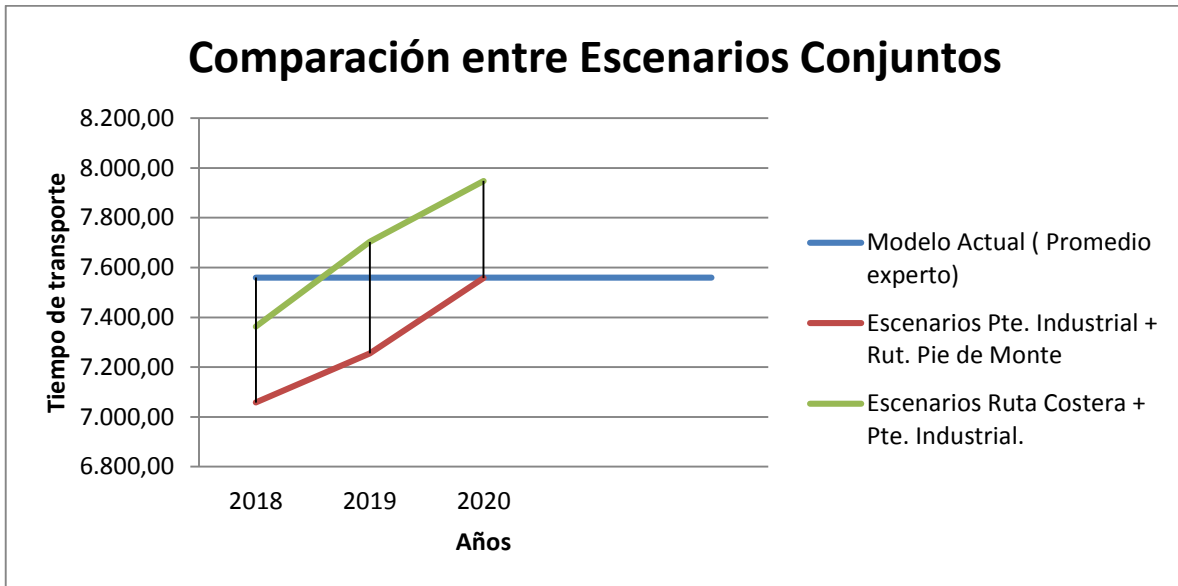


Gráfico N°11: Comparación entre los escenarios conjuntos: Puente Industrial más Pie de Monte y Puente Industrial más Ruta Costera con el promedio entregado por el experto.

Fuente: Elaboración propia.

Dados los resultados entregados por el simulador, se observa en el gráfico N°11, que la mejor alternativa de aquí al año 2020, son los proyectos Puente Industria y Pie de Monte para el año 2018 en adelante, dado que mantiene tiempos de transporte menor, en relación al promedio entregado por el experto. Además, logra descongestionar el tramo Av. Pedro Aguirre Cerda para el transporte Público y Particular. En cambio, el escenario Ruta Costera y Puente Industrial, solo mantendrían una descongestión hasta mediados del año 2018, donde nuevamente se aprecia un gran incremento en los tiempos de transporte.

## 7.5 Documentación, resultados y presentación de informe.

Según la metodología utilizada en el informe, basada en el estudio Jerry Banks, en esta sección se presentará un resumen de los resultados entregados por la simulación, donde se podrán analizar de mejor manera las alternativas y concluir a través de ellas.

Un punto importante, es la presentación de este tipo de informes para ser implementados posteriormente por alguna entidad encargada en este tipo de análisis, entidades que apoyaron el estudio, como el SECTRA o el Ministerios de Obras Públicas, para facilitar la toma de decisiones de los proyectos.

Dadas las especificaciones mencionadas anteriormente, los pasos de validación y verificación del modelo, fueron los más importantes al momento de realizar el estudio, ya que es aquí donde se comprueba que los objetos utilizados en el simulador, satisfacen la utilización de este para representar la realidad de la ruta. Satisfactoriamente, el proceso de validación, nos corrobora que el modelo cumplía con los objetivos planteados y además entregaba la información de forma correcta para poder interpretarla.

Los resultados entregados por el simulador, mostraron como se comportaría el flujo vehicular y los distintos escenarios planteados por el MOP, con respecto al crecimiento estimado.

En la tabla Nª27, 28, 29, 30 y 31 se observa un resumen de ahorros de tiempo que posee cada escenario, con respecto al promedio entregado por el experto, además se realizó comparaciones entre estos escenarios, otorgando soluciones para la implementación de estos proyectos.

## 7.5.1 Resumen de tiempos.

Año	Modelo Actual ( Promedio experto)	Escenarios Puente Industrial	Ahorro (seg)	Ahorro (min)
2016	7.560,00	6.534,10	1.025,90	17,10
2017	7.560,00	7.265,70	294,30	4,91
2018	7.560,00	7.525,00	35,00	0,58
2019	7.560,00	7.973,00	-413,00	-6,88
2020	7.560,00	8.268,00	-708,00	-11,80

Tabla N°27: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 1 Puente Industrial.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Modelo Actual ( Promedio experto)	Escenario Ruta Pie de Monte	Ahorro (seg)	Ahorro (min)
2016	7.560,00	7.369,00	191,00	3,18
2017	7.560,00	7.887,50	-327,50	-5,46
2018	7.560,00	8.402,50	-842,50	-14,04
2019	7.560,00	8.532,70	-972,70	-16,21
2020	7.560,00	8.720,10	-1.160,10	-19,34

Tabla N°28: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 2 Ruta Pie de Monte.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Modelo Actual ( Promedio experto)	Escenarios Pte. Industrial + Rut. Pie de Monte	Ahorro (s)	Ahorro (m)
2018	7.560,00	7.058,00	502,00	8,37
2019	7.560,00	7.254,90	305,10	5,09
2020	7.560,00	7.558,00	2,00	0,03

Tabla N°29: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 1 y 2 Ruta Pie de Monte + Puente Industrial.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Modelo Actual ( Promedio experto)	Escenarios Ruta Costera 2K	Ahorro (s)	Ahorro (m)
2016	7.560,00	6.907,00	653,00	10,88
2017	7.560,00	7.450,40	109,60	1,83
2018	7.560,00	8.089,10	-529,10	-8,82
2019	7.560,00	8.384,30	-824,30	-13,74
2020	7.560,00	8.769,80	-1.209,80	-20,16

Tabla N°30: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 3 Ruta Costera 2 KM.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Modelo Actual ( Promedio experto)	Escenarios Ruta Costera + Pte. Industrial.	Ahorro (s)	Ahorro (m)
2018	7.560,00	7.363,30	196,70	3,28
2019	7.560,00	7.703,00	-143,00	-2,38
2020	7.560,00	7.947,90	-387,90	-6,46

Tabla N°31: Tabla resumen ahorros de tiempo: Modelo Actual vs Escenario 1 y 3 Ruta Costera + Puente Industrial.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en las comparaciones entre los ahorros de tiempo, el escenario más favorable es la construcción del Puente Industrial, que logra la descongestión de la ruta Av. Pedro Aguirre Cerda y disminuye bastante los tiempos de traslado.

La combinación entre las los escenarios 1 y 2 resulta más factible hasta los años 2020, ya que disminuye bastante los tiempos de traslado y además para ese año, mantendría el nivel de congestión que existe en el año 2015.

Como se mencionó anteriormente, la ruta Pie de Monte nos da la alternativa para realizar trabajos en la actual ruta 160 y así mejorar aún más el flujo vehicular luego del año 2020.

Es muy importante mencionar, que para realizar este tipo de estudios de simulación, se necesitan los aforos vehiculares actualizados para cada año, ya que en los años siguientes se utilizaron proyecciones entregadas por el INE, siendo estos valores no exactos, pero si semejantes a la realidad.

Para los objetivos planteados al principio de este informe, se observó que se cumplieron con las metas planteadas al inicio, es decir se logró identificar como se comportaba actualmente el flujo vehicular por esta ruta y cómo se comportará en el futuro, de acuerdo al horizonte de tiempo hasta el año 2020. Si bien es cierto, el modelo se asemeja lo más posible a la realidad, estos experimentos nos arrojan valores promedios y además se utilizaron flujos máximos para que se apreciara de mejor forma la congestión vehicular.

La finalidad de evaluar los distintos escenarios fue exitosa, se logró identificar el comportamiento de los distintos proyectos. Además, se encontró una solución factible para realizar trabajos en la ruta 160, luego de ser implementada la ruta Pie de Monte.

Los supuestos utilizados para estas simulaciones pueden ser modificados de acuerdo a las necesidades del estudio, es por esto que es importante tener claro cuáles son objetivos de nuestra simulación y que es lo que esperamos obtener en cada experimento.

## 8. Conclusiones y recomendaciones.

### 8.1 Conclusión

El modelo de simulación, ayuda de forma rápida y menos costosa, a evaluar distintos escenarios que se podrían implementar para la descongestión de una ruta en particular, siendo una herramienta eficiente que arroja un resultado conciso y confiable. Es muy importante el proceso de recolección de datos para que la simulación cumpla con los requerimientos del problema, si estos datos no logran validar el modelo, se requerirá más tiempo para obtener nuevamente estos datos, por esto, este paso debe ser tomado con mayor detalle para la simulación.

La demanda de los productos exportados de Celulosa Arauco, está en notable crecimiento, por lo tanto la oferta de servicios logísticos aumentara de acuerdo al aumento de producción de sus plantas. A consecuencia de esto, la capacidad de infraestructura de la actual ruta 160, no lograra soportar este aumento en la actividad logística de estas plantas y continuaran las congestiones en los tramos estudiados.

Dado el aumento en la actividad logística, se evaluaron los proyectos del plan estratégico del Ministerio de Obras Públicas, donde se encontraron distintos proyectos que fueron evaluados con el software de simulación, para conocer cómo será su comportamiento debido al gran crecimiento del parque vehicular.

Para evaluar de forma clara la problemática y los escenarios propuestos en el informe, se utilizó el Software Flexsim, quien entregó una visión clara, para detectar el problema que se desea resolver. Los objetos utilizados, lograron comportarse de la manera adecuada para acercarse lo más posible a la realidad. Además, nos permiten ingresar los tiempos en las unidades que se desee, facilitando así el uso de este. Al ingresar de forma rápida y eficiente los aforos vehiculares en sus respectivas distribuciones, nos mejora el resultado final que se espera.

La simulación entregó la posibilidad de satisfacer los objetivos específicos que el informe esperaba obtener, ya que se logró comparar el escenario actual que existe en la ruta 160, donde se encontraron los puntos críticos de congestión y evaluar distintos escenarios para solucionar la problemática.

En cuanto a los escenarios estudiados en la simulación, se recalca la capacidad de infraestructura de la ruta 160, que se ve sobrepasada en su límite, siendo aquí el clímax de esta tesis, donde se evaluó distintas alternativas que satisficieran los objetivos.

Como se observó en los resultados, el Puente Industrial lograría una gran descongestión en la Av. Pedro Aguirre Cerda, siendo esta la más congestionada de la ruta 160, debido a que se reduce la cantidad de pistas y existe una gran cantidad de población en ese sector. Con el gran aumento del parque vehicular en la región, este escenario después de unos años, se ve nuevamente sobrepasado en su capacidad y se necesitara la implementación de una nueva alternativa que apoye este incremento. A causa de esto, se evaluó en conjunto con la Ruta Costera y la nueva Ruta Pie de Monte, ya que con ayuda de estas nuevas rutas se logrará descongestionar para los años 2018, 2019 y 2020, donde el incremento es muy alto y se necesitará de nuevas alternativas para realizar trabajos en la actual ruta 160.

Es muy importante mantener los aforos vehiculares actualizados cada 1 o 2 años para realizar este tipo de estudio, ya que puede existir un cambio notable en el parque vehicular. Además, así se logra mantener un modelo lo más semejante a la realidad.

Finalmente, es importante evaluar no solo la carga vehicular y rodoviario que existe en la región, sino que igualmente es importante el flujo ferroviario que puede aumentar notablemente su potencial de infraestructura en los próximos años.

## 8.2 Recomendaciones.

Aumentar el número de réplicas en el simulador, podría arrojar un número más preciso y semejante a la realidad.

El horizonte de tiempo se evaluó hasta el año 2020, ya que después de eso el índice de crecimiento puede variar notablemente. No se debe descartar la posibilidad de evaluar más años con el mismo índice y así evaluar más alternativas que el Ministerio de Obras Públicas tendrá en estrategia de aquí a los próximos años.

El estudio de tiempos para una ruta específica posee datos muy variables, que hacen su comprensión más difícil de entender. Un ejemplo claro que se debe tomar en cuenta al momento de evaluar la variabilidad de los datos, son los accidentes de tránsito que se ocasionan en la ruta, ya que a causa de esto se forman congestiones aún mayores y tiempos de transporte más largos para los usuarios, siendo esta variable que se podría incluir en el estudio.

En la evaluación de la alternativa Pie de Monte, se debe experimentar por sí sola, sin la ruta 160, con el fin de observar cómo se comportará cuando la actual ruta 160 comience sus trabajos de ampliación.

La utilización de la metodología de Jerry Banks podría variar de acuerdo a las necesidades de cada estudio, en los métodos de recolección de datos o validación del modelo, así diferenciando algunos resultados.

La ruta Costera, hasta el momento solo posee 2 kilómetros que se construirán. Evaluar esta misma alternativa con una distancia mayor, podría igualmente ayudar a la descongestión de la ruta, por eso que el plan estratégico de la región del Biobío es de suma importancia para este análisis, además, la implementación de este tramo igualmente podría ayudar como alternativa mientras se repara ciertos tramos de la ruta 160 actual.

Comenzar trabajos en la ruta 160, sin implementar algunos de estos escenarios, generará aún más altos tiempos de traslado para los

usuarios de esta ruta, por esto que se recomienda primero terminar y habilitar estas alternativas, para luego comenzar los trabajos en la actual ruta.

Para finalizar, se espera que este estudio pueda ser utilizado para futuras investigaciones de tránsito en la región, la metodología utilizada esta detallada paso a paso y arroja valores claros para la comparación de distintos escenarios que se puedan evaluar, de forma rápida y a bajo costo.

## 9. Bibliografía.

- 1.- Banks, J., Carson, J., Nelson, B., & Nicol, D. (2005). Discrete Event System Simulation.
- 2.- Berger, E., Gambini, I., Velasquez, C. (2000). Simulación de Sistemas.
- 3.- Cal, R., Reyes, M., & Cárdenas, J. (2013). Ingeniería de Transito: Fundamentos y aplicaciones.
- 4.- Coss, R. (2003). Simulación: Un enfoque Práctico.
- 5.- Flexsim Software Products, INC. (2005). User Guide Flexsim Simulation Software.
- 6.- Garber, N ., Hoel, L. (2004). Ingeniería de tránsito y Carreteras.
- 7.- Greenshield, B. (1935). Foundations of Traffic Flow Theory.
- 8.- Memoria Anual (2014). Celulosa Arauco y Constitución.
- 9.- Mora, L. (2010). Gestión logística: Las mejores prácticas en la cadena de suministros.
- 10.- Ronald H. Balloud. (2004). Logística: administración de la cadena de suministros.
- 11.- Underwood , R. (1990). Traffic Management An Introduction.

## 9.1 Linkografía.

[http://www.sectra.gob.cl/datos\\_informacion\\_espacial/biobio/granconcepcion01.htm](http://www.sectra.gob.cl/datos_informacion_espacial/biobio/granconcepcion01.htm)

<http://sintia.sectra.cl/>

<http://estadisticatransporte.mtt.cl/indicadores-logisticos-observatorio-logistico.html>

<http://estadisticatransporte.mtt.cl/transporte-carretero-observatorio-logistico.html>

<http://estadisticatransporte.mtt.cl/transporte-ferroviario-observatorio-logistico.html>

<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/manualdecarreteras/Paginas/Volumenes.aspx>

<http://www.mapas.mop.cl/cartas-camineras.html>

[http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/familias/demograficas\\_vitales.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php)

[http://www.inebiobio.cl/contenido.aspx?id\\_contenido=66](http://www.inebiobio.cl/contenido.aspx?id_contenido=66)

<https://www.google.cl/maps/place/San+Pedro+de+la+Paz,+Regi%C3%B3n+del+B%C3%ADo+B%C3%ADo/@-36.8704428,-73.1885173,12z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x9669c8305a6a641d:0xfd64c34d211b06d!8m2!3d-36.8305354!4d-73.116736>

## 10. Anexos.

Anexos A: Aforos Vehiculares.

Tabla A1: Tramo Arauco-Lota-Coronel.

Ingreso	Veh. Col y particular	Veh. Carga
ArLoCo	55	7
ArLoCo	46	4
ArLoCo	38	4
ArLoCo	27	5
ArLoCo	29	1
ArLoCo	33	3
ArLoCo	122	2
ArLoCo	131	7
ArLoCo	118	2
ArLoCo	139	3
ArLoCo	134	9
ArLoCo	111	2
ArLoCo	151	9
ArLoCo	108	2
ArLoCo	173	15
ArLoCo	139	6
ArLoCo	160	6
ArLoCo	134	5
<b>Total</b>	<b>1848</b>	<b>92</b>

Tabla A2: ByPass.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
ByPass	224	37
ByPass	206	26
ByPass	231	20
ByPass	225	20
ByPass	202	23
ByPass	204	26
<b>Total</b>	<b>1292</b>	<b>152</b>

Tabla A3: Av. Galvarino.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Av. Galvarino	338	28
Av. Galvarino	384	30
Av. Galvarino	353	24
Av. Galvarino	340	19
Av. Galvarino	332	34
Av. Galvarino	289	28
<b>Total</b>	<b>2036</b>	<b>163</b>

Tabla A4: Calle A.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Calle A	370	22
Calle A	344	24
Calle A	330	20
Calle A	316	30
Calle A	363	29
Calle A	329	23
<b>Total</b>	<b>2052</b>	<b>148</b>

Tabla A5: Av. Verdi.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Av. Verdi	349	45
Av. Verdi	399	39
Av. Verdi	381	40
Av. Verdi	445	48
Av. Verdi	348	45
Av. Verdi	371	53
<b>Total</b>	<b>2293</b>	<b>270</b>

Tabla A6: José Donoso.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
José Donoso	333	59
José Donoso	412	50
José Donoso	414	42
José Donoso	451	68
José Donoso	335	57
José Donoso	362	56
<b>Total</b>	<b>2307</b>	<b>332</b>

Tabla A7: Jerusalén.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Jerusalén	294	26
Jerusalén	333	38
Jerusalén	340	29
Jerusalén	318	22
Jerusalén	312	27
Jerusalén	328	30
<b>Total</b>	<b>1925</b>	<b>172</b>

Tabla A8: Victoria.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Victoria	238	4
Victoria	292	4
Victoria	292	4
Victoria	301	4
Victoria	265	4
Victoria	257	16
<b>Total</b>	<b>1645</b>	<b>36</b>

Tabla A9: Manuel Rodríguez.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Manuel Rodríguez	246	9
Manuel Rodríguez	292	3
Manuel Rodríguez	361	6
Manuel Rodríguez	305	12
Manuel Rodríguez	275	10
Manuel Rodríguez	273	22
<b>Total</b>	<b>1752</b>	<b>62</b>

Tabla A10: Carlos Pezoa Veliz.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Carlos P. Veliz	300	22
Carlos P. Veliz	251	11
Carlos P. Veliz	269	19
Carlos P. Veliz	238	21
Carlos P. Veliz	238	10
Carlos P. Veliz	150	21
<b>Total</b>	<b>1446</b>	<b>104</b>

Tabla A11: Michaihue.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Michaihue	259	21
Michaihue	241	18
Michaihue	251	19
Michaihue	269	20
Michaihue	319	19
Michaihue	331	23
<b>Total</b>	<b>1670</b>	<b>120</b>

Tabla A12: Daniel Belmar.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Daniel Belmar	278	25
Daniel Belmar	391	16
Daniel Belmar	399	25
Daniel Belmar	318	28
Daniel Belmar	339	16
Daniel Belmar	231	23
<b>Total</b>	<b>1956</b>	<b>133</b>

Tabla A13: Laguna Grande.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Laguna Grande	280	16
Laguna Grande	411	15
Laguna Grande	435	23
Laguna Grande	449	20
Laguna Grande	430	16
Laguna Grande	425	17
<b>Total</b>	<b>2430</b>	<b>107</b>

Tabla A14: Av. Avellanos.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Av. Avellanos	433	18
Av. Avellanos	433	7
Av. Avellanos	421	21
Av. Avellanos	432	17
Av. Avellanos	451	18
Av. Avellanos	366	14
<b>Total</b>	<b>2536</b>	<b>95</b>

Tabla A15: San Pedro.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
San Pedro	380	2
San Pedro	346	28
San Pedro	322	16
San Pedro	321	12
San Pedro	402	90
San Pedro	387	110
<b>Total</b>	<b>2158</b>	<b>258</b>

Tabla A16: Puente Juan Pablo II.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Pte. JP II	171	37
Pte. JP II	195	39
Pte. JP II	167	37
Pte. JP II	153	54
Pte. JP II	171	55
Pte. JP II	184	49
<b>Total</b>	<b>1041</b>	<b>271</b>

Tabla A17: Victoria.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Victoria	145	40
Victoria	191	42
Victoria	230	38
Victoria	171	51
Victoria	175	14
Victoria	177	7
<b>Total</b>	<b>1089</b>	<b>192</b>

Tabla A18: Luis Acevedo.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Luis Acevedo	102	7
Luis Acevedo	108	9
Luis Acevedo	213	31
Luis Acevedo	221	38
Luis Acevedo	196	22
Luis Acevedo	195	27
<b>Total</b>	<b>1035</b>	<b>134</b>

Tabla A19: Costanera Acceso Pte. JP II.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Costanera	105	16
Costanera	564	16
Costanera	489	10
Costanera	507	14
Costanera	540	17
Costanera	180	15
<b>Total</b>	<b>2385</b>	<b>88</b>

Tabla A20: Puente Llacolén.

Ingreso	Veh Col y particular	Veh Carga
Pte. Llacolén	139	44
Pte. Llacolén	294	41
Pte. Llacolén	283	45
Pte. Llacolén	244	64
Pte. Llacolén	285	50
Pte. Llacolén	226	50
<b>Total</b>	<b>1471</b>	<b>294</b>

Tabla A21: Costanera Oriente.

Ingreso	Veh. Col y particular	Veh. Carga
Costanera Or.	304	9
Costanera Or.	296	8
Costanera Or.	291	8
Costanera Or.	240	6
Costanera Or.	190	9
Costanera Or.	225	9
<b>Total</b>	<b>1546</b>	<b>49</b>

Tabla A22: Costanera Poniente.

Ingreso	Veh. Col y particular	Veh. Carga
Costanera Po	549	5
Costanera Po	432	2
Costanera Po	471	6
Costanera Po	353	14
Costanera Po	373	7
Costanera Po	321	12
<b>Total</b>	<b>2499</b>	<b>46</b>

Anexo B: Crecimiento del parque vehicular según índice entregado por el INE.

Tabla B1: Crecimiento Vehicular año 2016.

Nombre	Ruta	Total 2015		Crecimiento Vehicular 2016	
		Veh Col y Part	Veh Carga	Veh Col y Part	Veh Carga
AraucoLotaCoronel	ARLoCor	1.848	92	1.994	99
Bypass	ByPass	1.292	152	1.394	164
Galvarino	R160-35	2.036	163	2.197	176
Calle A	R160-34	2.052	148	2.214	160
Av. Verdi	R160-33	2.293	270	2.474	291
Jose Donoso	R160-31	2.307	332	2.489	358
Jerusalen	R160-29	1.925	172	2.077	186
Victoria	R160-26	1.645	36	1.775	39
Manuel Rodriguez	R160-25	1.752	62	1.890	67
Carloz Pezoa Veliz	R160-24	1.446	104	1.560	112
Av. Michaihue	R160-23	1.670	120	1.802	129
Daniel Belmar	R160-20	1.956	133	2.111	144
Laguna Grande	R160-19	2.430	107	2.622	115
Av. Avellanos	R160-17	2.536	95	2.736	103
Av. San Pedro	R160-15	2.158	258	2.328	278
Pte Juan Pablo II	R160-13	1.041	271	1.123	292
Victoria	R160-11	1.089	192	1.175	207
Luis Acevedo	R160-10	1.035	134	1.117	145
Costanera desde JPII	R160-7	2.385	88	2.573	95
Pte Llacolen	R160-6	1.471	294	1.587	317
Costanera Oriente	R160-4	1.546	49	1.668	53
Costanera Poniente	R160-1	2.499	46	2.696	50

Tabla B2: Crecimiento vehicular año 2017 y 2018

Ruta	Crecimiento Vehicular 2017		Crecimiento Vehicular 2018	
	Veh Col y Part	Veh Carga	Veh Col y Part	Veh Carga
<b>ARLoCor</b>	2.151,5	107,1	2.321,5	115,6
<b>ByPass</b>	1.504,2	177,0	1.623,0	190,9
<b>R160-35</b>	2.370,4	189,8	2.557,7	204,8
<b>R160-34</b>	2.389,0	172,3	2.577,8	185,9
<b>R160-33</b>	2.669,6	314,3	2.880,5	339,2
<b>R160-31</b>	2.685,9	386,5	2.898,1	417,1
<b>R160-29</b>	2.241,2	200,2	2.418,2	216,1
<b>R160-26</b>	1.915,2	41,9	2.066,5	45,2
<b>R160-25</b>	2.039,8	72,2	2.200,9	77,9
<b>R160-24</b>	1.683,5	121,1	1.816,5	130,6
<b>R160-23</b>	1.944,3	139,7	2.097,9	150,7
<b>R160-20</b>	2.277,3	154,8	2.457,2	167,1
<b>R160-19</b>	2.829,1	124,6	3.052,6	134,4
<b>R160-17</b>	2.952,5	110,6	3.185,8	119,3
<b>R160-15</b>	2.512,4	300,4	2.710,9	324,1
<b>R160-13</b>	1.212,0	315,5	1.307,7	340,4
<b>R160-11</b>	1.267,9	223,5	1.368,0	241,2
<b>R160-10</b>	1.205,0	156,0	1.300,2	168,3
<b>R160-7</b>	2.776,7	102,5	2.996,1	110,5
<b>R160-6</b>	1.712,6	342,3	1.847,9	369,3
<b>R160-4</b>	1.799,9	57,0	1.942,1	61,6
<b>R160-1</b>	2.909,4	53,6	3.139,3	57,8

Tabla B3: Crecimiento Vehicular año 2019 y 2020.

Ruta	Crecimiento Vehicular 2019		Crecimiento Vehicular 2020	
	Veh Col y Part	Veh Carga	Veh Col y Part	Veh Carga
ARLoCor	2.504,9	124,7	2.702,8	134,6
ByPass	1.751,3	206,0	1.889,6	222,3
R160-35	2.759,7	220,9	2.977,7	238,4
R160-34	2.781,4	200,6	3.001,1	216,5
R160-33	3.108,1	366,0	3.353,6	394,9
R160-31	3.127,0	450,0	3.374,1	485,6
R160-29	2.609,3	233,1	2.815,4	251,6
R160-26	2.229,7	48,8	2.405,9	52,7
R160-25	2.374,8	84,0	2.562,4	90,7
R160-24	1.960,0	141,0	2.114,8	152,1
R160-23	2.263,6	162,7	2.442,4	175,5
R160-20	2.651,3	180,3	2.860,7	194,5
R160-19	3.293,8	145,0	3.554,0	156,5
R160-17	3.437,4	128,8	3.709,0	138,9
R160-15	2.925,1	349,7	3.156,2	377,3
R160-13	1.411,0	367,3	1.522,5	396,3
R160-11	1.476,1	260,2	1.592,7	280,8
R160-10	1.402,9	181,6	1.513,7	196,0
R160-7	3.232,8	119,3	3.488,2	128,7
R160-6	1.993,9	398,5	2.151,4	430,0
R160-4	2.095,5	66,4	2.261,1	71,7
R160-1	3.387,3	62,4	3.654,9	67,3

Anexo C: Resultados Arrojados por el Simulador.

Tabla C1: Replicas Modelo actual año 2015.

replica	Tiempo Total
1	6804,4
2	6720,5
<b>3</b>	6731,9
4	6849,1
5	6878,5
6	6782,8
7	6739,7
8	6800,9
9	6806,5
<b>10</b>	6720,9
11	6644,4
12	6640,4
13	6743,5
<b>14</b>	6741,3
15	6682,8
16	6714,3
17	6714,8
<b>Promedio</b>	<b>6748,0</b>

Tabla C2: Replicas Escenario Puente Industrial 2015 y 2016.

replica	Tiempo Total
1	6.203,0
2	6.130,0
<b>3</b>	6.166,0
4	6.203,9
5	6.319,8
6	6.193,1
7	6.129,8
8	6.266,2
9	6.257,7
<b>10</b>	6.044,5
11	6.076,9
12	6.044,5
13	6.201,8
<b>14</b>	6.123,1
15	6.106,8
16	6.082,3
17	6.241,0
<b>Promedio</b>	<b>6.164,2</b>

replica	Tiempo Total
1	6.364,0
2	6.364,0
<b>3</b>	6.364,0
4	6.450,4
5	6.450,4
6	6.364,0
7	6.450,4
8	7.428,6
9	6.450,4
<b>10</b>	6.450,4
11	7.499,9
12	6.450,4
13	6.450,4
<b>14</b>	6.364,0
15	6.364,0
16	6.450,4
17	6.364,0
<b>Promedio</b>	<b>6.534,1</b>

Tabla C3: Replicas Escenario Puente Industrial 2017 y 2018.

replica	Tiempo Total
1	7.209,2
2	7.209,2
<b>3</b>	7.209,2
4	7.265,4
5	7.265,4
6	7.209,2
7	7.265,4
8	7.694,6
9	7.265,4
<b>10</b>	7.265,4
11	7.735,6
12	7.265,4
13	7.265,4
<b>14</b>	7.209,2
15	7.209,2
16	7.265,4
17	6.708,2
<b>Promedio</b>	<b>7.265,7</b>

replica	Tiempo Total
1	7.515,4
2	7.515,4
<b>3</b>	7.515,4
4	7.632,1
5	7.498,2
6	7.515,4
7	7.766,0
8	7.417,5
9	7.498,2
<b>10</b>	7.498,2
11	7.498,2
12	7.498,2
13	7.498,2
<b>14</b>	7.515,4
15	7.515,4
16	7.498,2
17	7.515,4
<b>Promedio</b>	<b>7.524,2</b>

Tabla C4: Replicas Escenario Puente Industrial 2019 y 2020.

replica	Tiempo Total
1	8.005,0
2	8.005,0
<b>3</b>	8.005,0
4	7.944,5
5	7.944,5
6	8.005,0
7	7.944,5
8	8.005,0
9	7.944,5
<b>10</b>	7.944,5
11	7.944,5
12	7.944,5
13	7.944,5
<b>14</b>	8.005,0
15	8.005,0
16	7.944,5
17	8.005,0
<b>Promedio</b>	<b>7.973,0</b>

replica	Tiempo Total
1	8.558,2
2	8.298,7
<b>3</b>	8.298,7
4	8.212,3
5	8.212,3
6	8.298,7
7	8.212,3
8	8.298,7
9	8.212,3
<b>10</b>	8.212,3
11	8.212,3
12	8.212,3
13	8.212,3
<b>14</b>	8.298,7
15	8.298,7
16	8.212,3
17	8.298,7
<b>Promedio</b>	<b>8.268,3</b>

Tabla C5: Replicas Escenario Ruta Pie de monte año 2016 y 2017.

replica	Tiempo Total
1	7.472,9
2	7.356,6
<b>3</b>	7.365,5
4	7.495,5
5	7.431,1
6	7.337,3
7	7.357,6
8	7.404,6
9	7.327,5
<b>10</b>	7.392,6
11	7.237,9
12	7.269,8
13	7.443,5
<b>14</b>	7.325,0
15	7.280,1
16	7.353,4
17	7.421,7
<b>Promedio</b>	<b>7.369,0</b>

replica	Tiempo Total
1	8.044,1
2	7.795,6
<b>3</b>	7.848,6
4	8.011,1
5	7.966,2
6	7.867,1
7	7.910,9
8	7.904,6
9	7.894,7
<b>10</b>	7.924,0
11	7.744,7
12	7.739,6
13	7.910,5
<b>14</b>	7.921,8
15	7.836,7
16	7.882,9
17	7.882,2
<b>Promedio</b>	<b>7.887,4</b>

Tabla C6: Replicas escenario Pie de Monte año 2018, 2019 y 2020.

replica	Tiempo Total
1	8.391,7
2	8.295,1
<b>3</b>	8.344,9
4	8.520,8
5	8.469,3
6	8.403,3
7	8.469,4
8	8.495,6
9	8.406,3
<b>10</b>	8.411,8
11	8.278,5
12	8.297,3
13	8.445,2
<b>14</b>	8.452,6
15	8.360,6
16	8.385,0
17	8.415,7
<b>Promedio</b>	<b>8.402,5</b>

replica	Tiempo Total
1	8.716,7
2	8.432,8
<b>3</b>	8.488,4
4	8.671,5
5	8.630,3
6	8.514,8
7	8.551,8
8	8.554,5
9	8.545,4
<b>10</b>	8.564,5
11	8.374,2
12	8.367,8
13	8.553,7
<b>14</b>	8.564,8
15	8.472,6
16	8.522,7
17	8.520,2
<b>Promedio</b>	<b>8.532,1</b>

replica	Tiempo Total
1	8.918,0
2	8.613,3
<b>3</b>	8.673,5
4	8.863,5
5	8.815,1
6	8.697,4
7	8.742,6
8	8.739,4
9	8.728,8
<b>10</b>	8.758,5
11	8.556,5
12	8.549,9
13	8.744,3
<b>14</b>	8.756,7
15	8.661,1
16	8.713,1
17	8.710,3
<b>Promedio</b>	<b>8.720,1</b>

Tabla C7: Replicas escenario Ruta Costera 2016, 2017 y 2020

replica	Tiempo Total
1	7.193,0
2	6.873,5
<b>3</b>	6.883,0
4	7.005,4
5	7.010,7
6	6.925,6
7	6.882,9
8	6.949,5
9	6.945,6
<b>10</b>	6.885,8
11	6.771,9
12	6.762,6
13	6.884,6
<b>14</b>	6.889,3
15	6.828,1
16	6.861,1
17	6.867,4
<b>Promedio</b>	<b>6.907,1</b>

replica	Tiempo Total
1	7.525,4
2	7.416,8
<b>3</b>	7.436,6
4	7.564,1
5	7.551,3
6	7.469,6
7	7.452,8
8	7.498,9
9	7.491,7
<b>10</b>	7.458,8
11	7.319,5
12	7.311,7
13	7.450,4
<b>14</b>	7.458,3
15	7.387,6
16	7.425,5
17	7.434,3
<b>Promedio</b>	<b>7.450,2</b>

replica	Tiempo Total
1	8.728,6
2	8.704,3
<b>3</b>	8.751,6
4	8.888,9
5	8.844,5
6	8.764,9
7	8.814,0
8	8.804,4
9	8.794,7
<b>10</b>	8.814,5
11	8.633,8
12	8.632,6
13	8.802,6
<b>14</b>	8.814,1
15	8.720,8
16	8.770,5
17	8.782,3
<b>Promedio</b>	<b>8.768,7</b>

Tabla C8: Replicas Escenario conjunto 1 y 2, Puente Industrial + Ruta Pie de Monte años 2018 y 2019.

replica	Tiempo Total
1	7.362,3
2	7.192,6
<b>3</b>	7.227,0
4	7.365,5
5	7.351,8
6	7.257,8
7	7.265,5
8	7.286,4
9	7.283,1
<b>10</b>	7.265,0
11	7.132,5
12	7.128,1
13	7.266,5
<b>14</b>	7.272,0
15	7.199,9
16	7.238,9
17	7.239,2
<b>Promedio</b>	<b>7.254,9</b>

replica	Tiempo Total
1	7.608,9
2	7.563,6
<b>3</b>	7.555,0
4	7.723,1
5	7.656,3
6	7.561,6
7	7.602,6
8	7.577,6
9	7.584,1
<b>10</b>	7.593,1
11	7.433,5
12	7.409,0
13	7.524,6
<b>14</b>	7.502,8
15	7.495,2
16	7.534,7
17	7.560,9
<b>Promedio</b>	<b>7.558,0</b>

Tabla C9: Replicas escenario conjunto 2 y 3, Puente industrial + ruta costera  
 Año 2018, 2019 y 2020.

replica	Tiempo Total
1	7.400,2
2	7.356,2
<b>3</b>	7.360,8
4	7.485,7
5	7.477,8
6	7.400,1
7	7.349,0
8	7.426,8
9	7.416,4
<b>10</b>	7.368,3
11	7.232,8
12	7.218,9
13	7.350,4
<b>14</b>	7.359,7
15	7.299,4
16	7.332,0
17	7.342,0
<b>Promedio</b>	<b>7.363,3</b>

replica	Tiempo Total
1	7.743,8
2	7.688,7
<b>3</b>	7.699,3
4	7.827,5
5	7.807,4
6	7.732,3
7	7.696,8
8	7.762,6
9	7.749,7
<b>10</b>	7.719,1
11	7.566,4
12	7.553,0
13	7.695,6
<b>14</b>	7.707,1
15	7.641,1
16	7.676,7
17	7.688,6
<b>Promedio</b>	<b>7.703,3</b>

replica	Tiempo Total
1	7.915,7
2	7.932,5
<b>3</b>	7.947,6
4	8.078,3
5	8.049,2
6	7.976,0
7	7.951,8
8	8.008,9
9	7.994,1
<b>10</b>	7.976,4
11	7.811,0
12	7.798,0
13	7.948,7
<b>14</b>	7.962,0
15	7.891,6
16	7.929,5
17	7.942,7
<b>Promedio</b>	<b>7.947,9</b>

