

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**Profesor Patrocinante: Patricio Álvarez Mendoza MSc.PhD**

**VARIACIÓN DEL NIVEL DE SERVICIO EN REDES DE  
TAMAÑO MEDIO, DEBIDO A EVENTOS  
CATASTRÓFICOS.**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
Título de Ingeniero Civil

**RAÚL FELIPE VÁSQUEZ PEDRERO**

Concepción, Enero 2017.

*Dedicada primeramente a mis padres, hermano, a mi polola, y amigos; quienes sin su ayuda no hubiese podido lograr esta meta.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Dar gracias primeramente a Dios, que me ha dado la fuerza e inteligencia para lograr este desafío, agradecer a mi familia, quienes nunca dudaron de que pudiese lograr esta meta y quienes me han apoyado incondicionalmente en todo el proceso.

Agradecer a mi polola María Francisca, que ha sido un apoyo fundamental en los últimos años, ayudándome y acompañándome como compañera, amiga y polola.

Agradecer además a los profesores y funcionarios del Departamento que de una u otra forma han sido parte importante de esta meta.

**INDICE**

DEDICATORIA..... ii

AGRADECIMIENTOS..... iii

RESUMEN ..... 4

ABSTRACT ..... 5

1. INTRODUCCIÓN..... 6

    1.1. Justificación ..... 7

    1.2. Objetivos ..... 7

        1.2.1. Objetivo General ..... 7

        1.2.2. Objetivos Específicos ..... 7

2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 8

    2.1 Ciudades Chilenas de Tamaño Medio (CCTM) ..... 8

    2.2. Aplicación del Daño ..... 9

        2.2.1. Modelo de Simulación de Montecarlo ..... 9

        2.2.2. Estrategia de Daño ..... 9

        2.2.3. Niveles de Daño ..... 9

        2.2.4. Escenarios de Daño ..... 9

    2.3. Modelo SATURN ..... 10

    2.4. Capacidad..... 10

    2.5. Factor de Aumento de la Demoras (FAD)..... 10

	2
3. METODOLOGÍA.....	11
3.1. Estudio de Antecedentes .....	11
3.2. Aplicación del Daño .....	11
3.3. Sensibilidad del nivel de servicio .....	12
3.4. Máxima demanda.....	12
4. RESULTADOS .....	13
4.1. Sensibilidad del Nivel de Servicio.....	13
4.1.1. Cambios en la desviación estándar y media .....	15
4.1.2. Aumentos de matrices.....	16
4.1.3. Comparación de promedios de FAD para las tres ciudades. ....	17
4.2. Máxima Demanda.....	18
5. APLICACIÓN .....	20
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	21
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	22
ANEXO A: SENSIBILIDAD NIVEL DE SERVICIO, TODOS LOS ESCENARIOS. ....	24
ANEXO B: CAMBIOS EN LA DESVIACIÓN ESTANDAR Y MEDIA.....	26
ANEXO C: SENSIBILIDAD NIVEL DE SERVICIO ANTE AUMENTOS DE DEMANDA ..	28
ANEXO D: SENSIBILIDAD NIVEL DE SERVICIO ANTE AUMENTOS DE DEMANDAS, PROMEDIO. ....	33
ANEXO E: MÁXIMA DEMANDA, PARA DISTINTOS NIVELES DE SERVICIOS. ....	35

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciudades Chilenas de Tamaño Medio .....	8
Figura 2: Ejemplo red sin daño .....	10
Figura 3: Ejemplo red con X% daño .....	10
Figura 4: Metodología de la investigación .....	11
Figura 5: Sensibilidad del nivel de servicio, para todos los escenarios, Chillán .....	13
Figura 6: Cisne Negro, Chillán.....	15
Figura 7: Cambio en la desviación estándar y media del FAD para todos los niveles de daño. Chillán .....	15
Figura 8: Sensibilidad nivel de servicio ante aumentos de matriz O-D, Chillán.....	16
Figura 9: Comparación sensibilidad del nivel de servicio para las tres ciudades en estudio .....	17
Figura 10: Máxima demanda para nivel de servicio establecido, Chillán.....	18
Figura 11: Máxima demanda, para nivel de daño 15%, tres ciudades en estudio .....	19
Figura 12: Factores de Aumento de Demoras para daños superiores al 25% .....	20

## **VARIACIÓN DEL NIVEL DE SERVICIO EN REDES DE TAMAÑO MEDIO, DEBIDO A EVENTOS CATASTRÓFICOS.**

**Raúl Felipe Vásquez Pedrero**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Bío – Bío

rauvasqu@alumnos.ubiobio.cl

**Patricio Álvarez Mendoza M. MSc. PhD.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Bío – Bío

palvarez@ubiobio.cl

### **RESUMEN**

Las catástrofes naturales no son un fenómeno ajeno en Chile, sino por el contrario, ya sea por la presencia de la Cordillera de los Andes, la larga costa que nos ofrece el Océano Pacífico, la Placa Sudamericana y Placa Nazca, los fenómenos de la naturaleza forman parte de nuestra cotidianeidad. Es por ello que es muy importante estudiar el impacto que estos fenómenos provocan sobre el nivel de servicio en las redes de transporte urbano en las Ciudades chilenas de tamaño medio, cambios que son estudiados a través de las demoras totales en el período punta mañana, medidas a través de veh-hr.

El estudio de distintos niveles de daños, refleja la disminución significativa de la capacidad de la red, sumado a los escenarios de daño, permite caracterizar el comportamiento de la red. Para ello, el uso de herramientas de simulación y modelación, es fundamental, para llevar a cabo el estudio de las variaciones del nivel de servicio en redes de transporte urbano, para distintos niveles de demanda.

Finalmente, al realizar un análisis de los datos obtenidos para los casos de estudio, es posible observar que, ante aumentos en el nivel de demanda, los niveles de servicio disminuyen, además que la máxima demanda para un nivel de servicio determinado, disminuye con el aumento en el nivel de daño de la red.

**PALABRAS CLAVES:** Nivel de servicio, Ciudades chilenas de tamaño medio, red de transporte urbano, disminución significativa de capacidad.

5.791 Palabras Texto + 12 Figuras/Tablas \* 250 + 0 Figuras/Tablas \* 500 = 8.791 Palabras Totales

## **VARIATION OF SERVICE LEVEL IN AVERAGE SIZE NETWORKS DUE TO CATASTROPHIC EVENTS**

**Raúl Felipe Vásquez Pedrero**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío – Bío.

rauvasqu@alumnos.ubiobio.cl

**Patricio Álvarez Mendoza M. MSc. PhD.**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío – Bío.

palvarez@ubiobio.cl

### **ABSTRACT**

Natural disasters are not a phenomenon in Chile, but on the contrary, to the sea by the presence of the Andes Mountains, the long coast that offers the Pacific Ocean, the South American Plate and the Nazca Plate, the phenomena of nature They are part of our daily lives. This is why it is very important to study the impact of these phenomena on the level of service in the urban transport networks in the Chilean Cities of Medium Size, the changes that students study through the total delays in the period of the Tomorrow, measured Via veh-hr.

The study of different levels of damage reflects the significant reduction of rock capacity, added to the damage scenarios, allows to characterize the behavior of the rock. For this, the use of simulation and modeling tools is fundamental to carry out the study of the variations of the level of service in urban transport networks, for the different levels of demand.

Finally, when analyzing the data obtained for the case studies, it is possible to observe that, given the increases in the level of demand, service levels decrease, in addition to the maximum demand for a given service level, it decreases with Increase in damage level of red.

**KEYWORDS:** Level of service, Chilean cities of medium size, urban transport network, significant decrease in capacity.



## 1. INTRODUCCIÓN

En Chile, las consecuencias de las distintas catástrofes naturales han demostrado lo sensible y vulnerable que es su sistema de transporte, dónde tanto rutas estratégicas, como redes de transporte urbano pueden verse fuertemente afectadas ante eventos de estas características. Es por ello que la pérdida de capacidad de los sistemas de transporte, es una de los efectos más importante a analizar, debido a que esta reducción en la capacidad, implica aumentos en los tiempos de demora de los usuarios, dentro de los que se encuentran los equipos de emergencias, quienes son un elemento primordial para reestablecer el normal funcionamiento del lugar afectado.

Además, cabe destacar que la reducción en la capacidad de los sistemas de transporte dependerá de la catástrofe natural que afecte al sector, además de la intensidad de la misma, un ejemplo de lo anterior fue lo ocurrido en el terremoto de Febrero del 2010, y esto implica la siguiente relación: mientras más afectada se vea la capacidad, mayores serán las consecuencias para la actividad económica local y mayores serán los incrementos en los tiempos de traslado de suministros y profesionales a las zonas afectadas.

La investigación que se presenta a continuación, se encuentra basada en trabajos anteriores, el Proyecto de Título del Ingeniero Civil Juan Silva Medina de Abril del 2016 y el Proyecto de Título de la Ingeniero Civil María Francisca Herrera Rojas. El primero de ellos, desarrolló una metodología que permite estimar el efecto que tienen los eventos catastróficos en el nivel de servicio de redes de transporte urbano. Para ello, se definió una red vial de prueba, en base a las características y patrones regulares de 16 Ciudades chilenas de tamaño medio, la cual fue dañada bajo 5 Niveles de Daño, y cada uno de estos analizado bajo 20 escenarios diferentes. Posteriormente María Francisca aplicó esta metodología para evaluar el comportamiento del nivel del servicio de la red vial de prueba, al ser enfrentada a diferentes niveles de demanda, además de estimar la máxima demanda que es capaz de soportar para distintos niveles de servicio.

Es así, que de acuerdo a los estudios anteriormente desarrollados, se plantea la inquietud de aplicar la metodología en redes de transporte de Ciudades chilenas de tamaño medio de nuestro país.

## **1.1. Justificación**

Las catástrofes naturales no son un fenómeno ajeno en Chile, por el contrario, ya sea por la presencia de la Cordillera de los Andes, la larga costa que nos ofrece el Océano Pacífico, la Placa Sudamericana y Placa Nazca, los fenómenos de la naturaleza no son algo ajeno a nuestra cotidianeidad. Además, estos fenómenos repercuten de manera directa a la economía y crecimiento de las ciudades afectadas y por ende a la del País. Es por ello que se tiene la necesidad de analizar el comportamiento de las ciudades chilenas de tamaño medio, para responder las inquietudes tales como: ¿Qué tan grave es un fenómeno catastrófico? y ¿Qué actividades es capaz de soportar la red ante la pérdida significativa de su capacidad?

## **1.2. Objetivos**

### *1.2.1. Objetivo General*

- Evaluar cambios en el nivel de servicio de redes de transporte urbano para ciudades chilenas de tamaño medio, debido a disminución significativa en su capacidad.

### *1.2.2. Objetivos Específicos*

- Aplicar una metodología que permita evaluar el cambio del nivel de servicio producto de disminuciones significativas en la capacidad de las redes de transporte urbano de CCTM.
- Estudiar la sensibilidad del nivel de servicio de redes de transporte urbano, para distintos niveles de daños.
- Identificar la máxima demanda que se pudiese satisfacer posterior a una disminución significativa en su capacidad.

## 2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se explicarán y detallarán algunas antecedentes y definiciones útiles para el desarrollo de esta investigación.

### 2.1 Ciudades Chilenas de Tamaño Medio (CCTM)

Las ciudades chilenas de tamaño medio, de acuerdo a la Metodología para el Análisis de Sistemas de Transporte en Grandes Ciudades y Ciudades de Tamaño Medio, MESPE, son todas aquellas que mantienen una población entre 70.000 y 500.000 habitantes, y presentan bajos niveles de congestión en la operación del sistema de transporte. En nuestro País encontramos 16 ciudades que cumplen esta condición.

Para esta investigación, las ciudades escogidas son Chillan, Los Ángeles y Punta Arenas, debido a que la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA) proporcionó la información necesaria, en conjunto con los archivos SATURN de la red y matriz correspondiente.



**Figura 1: Ciudades Chilenas de Tamaño Medio.**

Fuente: Elaboración propia

## **2.2. Aplicación del Daño**

La caracterización de los cambios en el nivel de servicio de una red de transporte urbano, debido a las catástrofes naturales, resulta muy costosa si se pretende evaluar todos los posibles casos de daño. Es por ello, que se vuelve necesario realizar una simulación de los cambios en el nivel de servicio estudiando sólo una muestra de  $n$  casos de daño, del universo total de  $N$  casos.

Entonces, para definir la muestra a estudiar se hace necesario aplicar el Modelo de Simulación de Montecarlo (MSM), donde las combinaciones de arcos dañados para cada nivel corresponden a una variable aleatoria.

### *2.2.1. Modelo de Simulación de Montecarlo*

Según a Law y Kelton (1991) el Modelo de Simulación de Montecarlo es un método no determinista o estadístico numérico, el cual es usado para aproximar complejas expresiones matemáticas y muy costosas para evaluar con certeza. Este método da soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas matemáticos posibilitando la realización de experimentos con muestreos de números aleatorios. Además, es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinista.

### *2.2.2. Estrategia de Daño*

Para este estudio se optó por una estrategia de daño aleatoria uniforme, es decir que todos los arcos (unión entre nodos) tienen la misma probabilidad de ser dañado, al dañar el arco se entiende que se restringe de manera total las combinaciones de movimientos.

### *2.2.3. Niveles de Daño*

El nivel de daño, corresponde al porcentaje de arcos que se ven restringidos e sus movimientos. En este caso se definieron 6 niveles de daño: 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de los arcos de la red. El caso del 0% de daño, corresponde a la red en su estado original, es decir sin restricción de movimientos.

### *2.2.4. Escenarios de Daño*

Un escenario de daño corresponde a una combinación aleatoria de arcos que son restringidos de todos sus movimientos. Cada nivel de daño, cuenta con 20 escenarios de daño.

### 2.3. Modelo SATURN

Para el estudio se utiliza un software de modelación, el cual permite determinar posibles estados del patrón de flujos al ir degradando la red. Para esta tarea se eligió un modelo macroscópico llamado SATURN, el cual en su funcionamiento interno presenta un *submodelo de asignación* para determinar las rutas de los vehículos a través de la red codificada. Este submodelo necesita de una red de modelación y una matriz de viajes para poder asignar los viajes a través de la red vial y además cuenta con el *submodelo de simulación* con el fin de calcular las demoras obtenidas para una cierta ruta especificada por el submodelo de asignación.

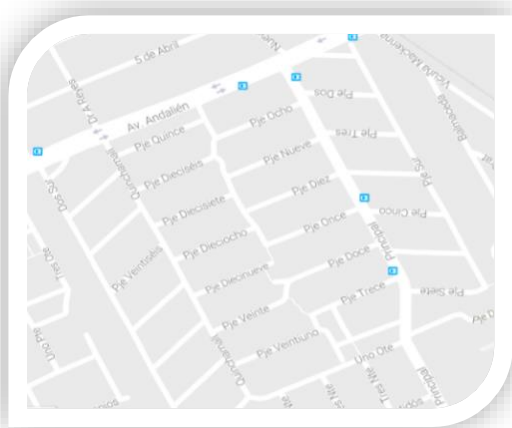
### 2.4. Capacidad

La capacidad de una vía para el tránsito de vehículos se define: Como el máximo número de vehículos que pueden pasar por un punto dado durante un periodo específico de tiempo y bajo condiciones prevalecientes de la vía, el tráfico y control.

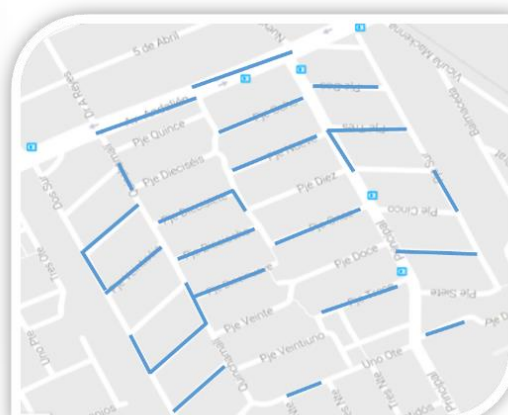
### 2.5. Factor de Aumento de la Demoras (FAD)

El factor de aumento de las demoras, es la medida del nivel de servicio, con la que se analizaran los casos de estudio y este relaciona a la red con un cierto porcentaje de daño dividido con la red sin daño o situación base.

$$FAD = \frac{\text{Demora en red con \% de daño}}{\text{Demora en red situación base}}$$

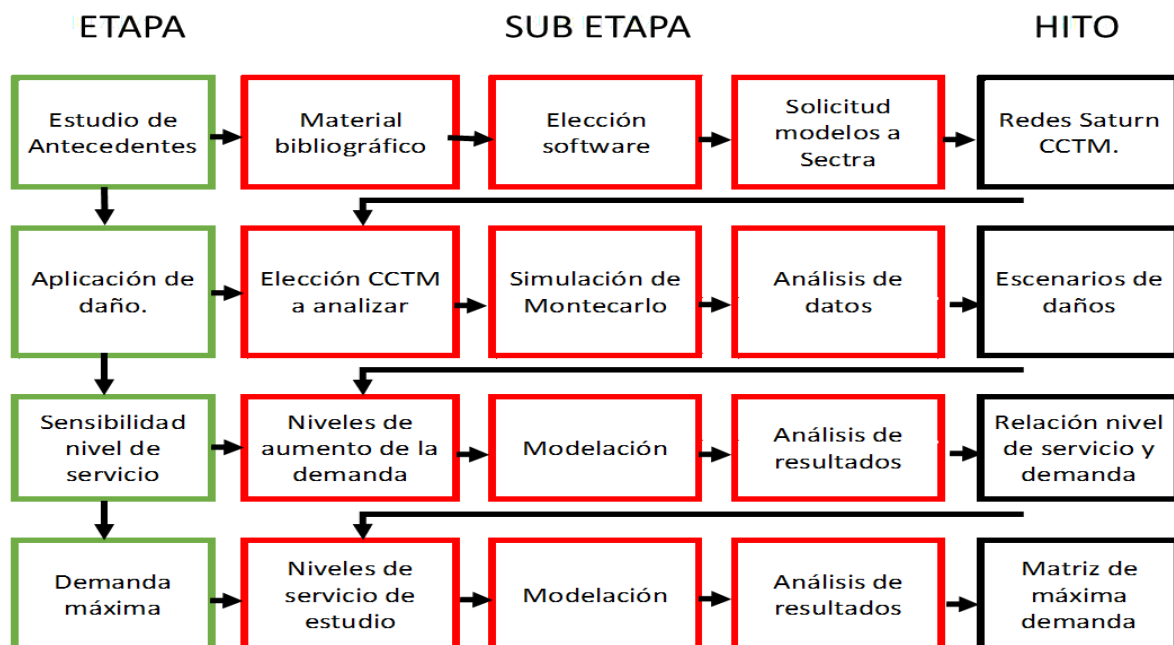


**Figura 2: Ejemplo red sin daño.**  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 3: Ejemplo red con X% daño.**  
Fuente: Elaboración Propia.

### 3. METODOLOGÍA



**Figura 4: Metodología de la investigación.**

Fuente: Elaboración Propia.

#### 3.1. Estudio de Antecedentes

El estudio de los antecedentes, se basó en investigar el material bibliográfico disponible, relacionado con estudios y/o investigaciones semejantes, además de realizar el catastro de todas las ciudades de tamaño medio en Chile, con el fin de obtener los modelos con sus respectivas redes y matrices de viajes ya codificadas en el software SATURN para la realización de los posteriores análisis. La elección de las ciudades fue en relación a la respuesta de la solicitud presentada a la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA).

#### 3.2. Aplicación del Daño

La aplicación del daño viene dada por la metodología propuesta en el estudio realizado por el Ingeniero Civil Juan Silva Medina, la cual ya fue explicada en el **capítulo 2.3** de la presente investigación.

### **3.3. Sensibilidad del nivel de servicio**

El análisis de la sensibilidad del nivel de servicio para las redes de Chillán, Los Ángeles y Punta Arenas, fue realizado en base a 4 niveles de demandas, es decir, que las matrices de origen – destino, fueron simuladas considerando que en primer lugar la matriz se mantiene en la condición base, posterior a ello se aplicaron aumentos de estas en 1.5, 2 y 2.5 veces, con esta definición de las matrices, éstas son enfrentadas con la red, la cual está dañada para distintos niveles de daño y que para cada uno de estos niveles encontramos 20 escenarios, con ello es posible determinar la medida del nivel de servicio.

### **3.4. Máxima demanda**

Para identificar la máxima demanda que pudiesen satisfacer las redes, para los diferentes niveles de servicio, con sus diferentes niveles de daño y sus respectivos 20 escenarios para cada uno de ellos. Es por ello, que fue necesario definir tres niveles de servicio a analizar, los cuales son factores de aumento de demoras en 2, 4 y 6 veces sobre el nivel base, con los cuales, de acuerdo a los resultados obtenidos en la modelación anterior, se obtuvo un rango de viajes que debiese contener el matriz origen – destino, de forma de cumplir con los tiempos de demora estimados. Con ello, se modelaron las matrices y redes en el software SATURN, hasta obtener el nivel de servicio esperado.

#### 4. RESULTADOS

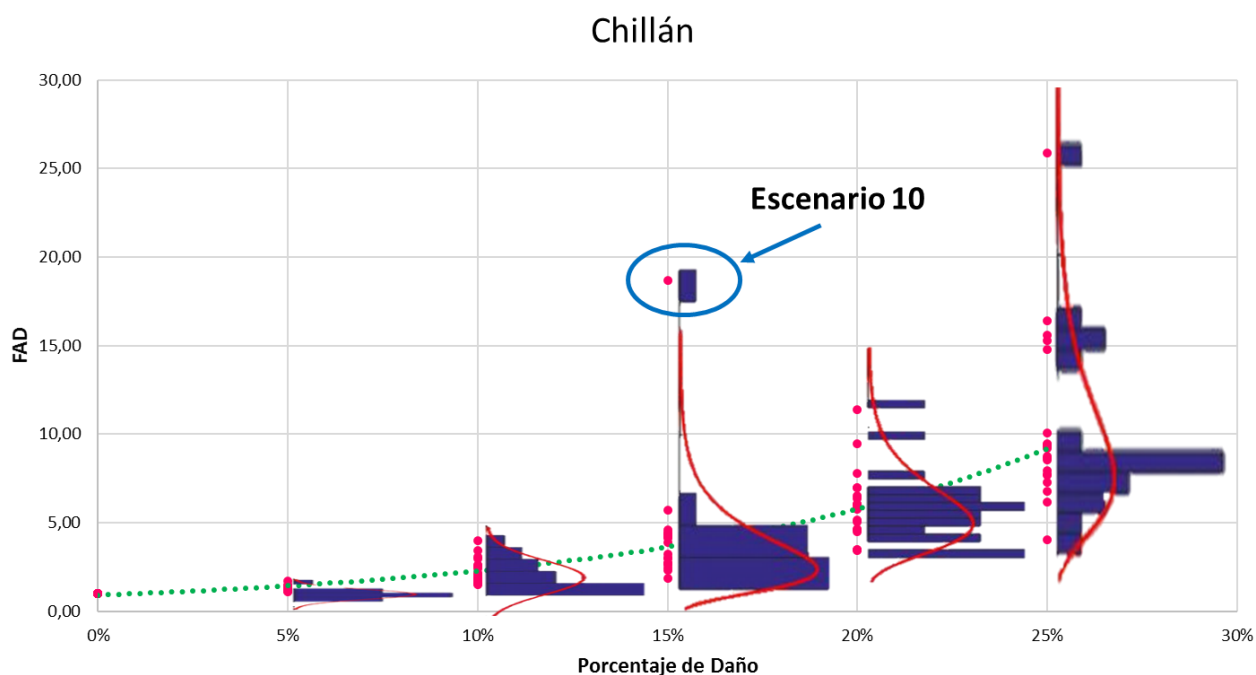
Los resultados obtenidos luego de la etapa de modelación permiten entender el comportamiento de la Red Vial de Prueba, luego de ser degradada gradualmente hasta la pérdida de capacidad del 25% de los arcos de la red. La medida del nivel de servicio analizada fue la demora total, medida en veh-hr en el periodo punta mañana, sin embargo, para facilitar el análisis, se expresa de forma adimensional a través del índice Factor de Aumento de Demoras (FAD), el cual queda definido según lo presentado en la **Ecuación 1**.

$$FAD = \frac{\text{Demora en red con \% de daño}}{\text{Demora en red situación base}} \quad \text{Ecuación 1}$$

##### 4.1. Sensibilidad del Nivel de Servicio

Para analizar la sensibilidad del nivel de servicio, de las tres ciudades analizadas, se consideró la matriz de viajes que incluía los archivos entregados por SECTRA, en conjunto con la degradación de la red, con sus cinco niveles de daño, y los 20 escenarios para cada caso.

En la **Figura 5**, es posible apreciar los resultados obtenidos en la ciudad de Chillán, el caso de Los Ángeles y Punta Arenas puede ser encontrado en el **Anexo A** del presente informe.



**Figura 5: Sensibilidad del nivel de servicio, para todos los escenarios, Chillán.**  
Fuente: Elaboración propia.



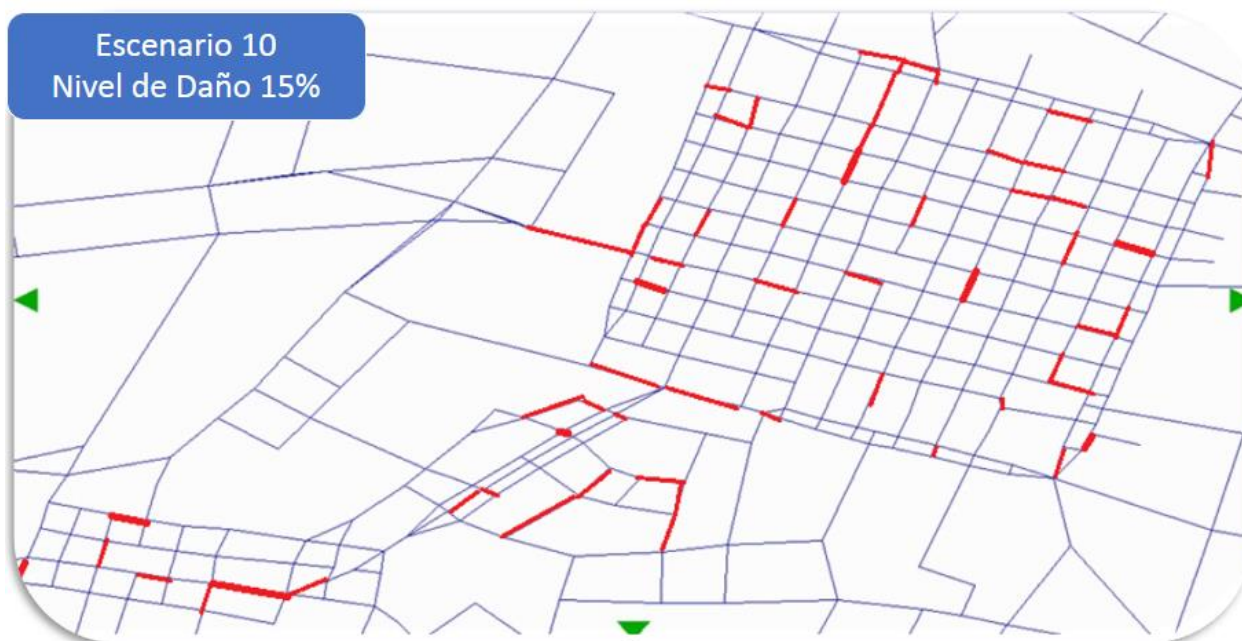
Según lo mostrado en la **Figura 5**, es posible apreciar que, frente a aumentos de daño en la red, los valores de factores de aumentos de demora, también se ven incrementado, todo esto en perjuicio del nivel de servicio entregado a los usuarios, el cual se ve disminuyendo.

Además, al ser analizados los FAD para cada uno de los escenarios de daño, estos muestran una línea de tendencia de tipo exponencial, que se ajustan bastante a los valores observados hasta el 15% de nivel de daño, mientras que desde un 20% de daño en adelante, los FAD comienzan a alejarse de la línea de tendencia, aumentando la variabilidad entre los escenarios, esto debido a la respuesta que tiene el sistema ante la disminución significativa de capacidad. Esta variabilidad se puede representar de manera práctica, en la **Figura 5**, en el nivel de daño 25%, en donde el escenario número 13 tiene un valor de FAD 25,86 veces mayor que en la situación base (red sin daño) y un 245% mayor que el promedio en el mismo nivel de daño.

Por otra parte, es posible apreciar en el nivel de daño de 15%, específicamente el escenario número 10, un valor que se escapa considerablemente en relación al promedio, este fenómeno se le denomina “*Cisne Negro*”, debido a que es un caso extraño extremo pero que puede suceder, ante una combinación catastrófica de diversos factores. Este caso se explica debido a la configuración de la ciudad analizada, en este caso, Chillán, y a la topología, producto de que ciertas restricciones de movimientos, generan que ciertos sectores de la ciudad queden parcial o totalmente aislados, desencadenando que el acceso o salida de la zona sea muy difícil y que por ello los factores de aumento de demora se elevan considerablemente.

Esta situación anteriormente mencionada, se puede apreciar en la **Figura 6**, en donde es posible apreciar en líneas de color rojo, los arcos que se encontraban dañados en el escenario número 13, para un nivel de daño de un 10%, y en líneas de color rojo, los arcos que se agregan al mismo escenario, al dañar en un 15% la red. Frente a esta situación se puede apreciar que el ingreso y la salida del sector inferior de la red, es decir, la unión con Chillán Viejo, se ve obstaculizada en gran parte de sus nodos, por lo tanto, no permite la libre circulación de los vehículos que desean acceder o salir de ese sector.

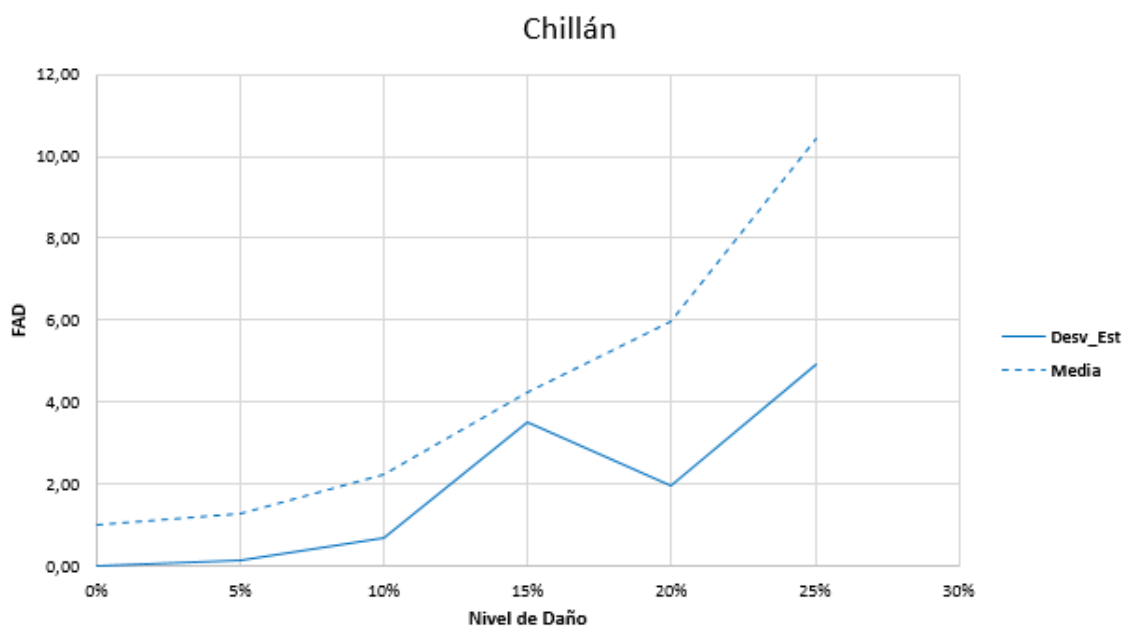
Gracias a estos casos, mencionados anteriormente, es posible identificar zonas conflictivas, que ante una buena gestión política se podrían aminorar los aumentos del factor de aumento de demoras, otorgando un mejor nivel de servicio a los usuarios, además que la sensación percibida por los usuarios no es altamente catastrófica.



**Figura 6: Cisne Negro, Chillán.**  
Fuente: Elaboración propia.

*4.1.1. Cambios en la desviación estándar y media*

Para complementar lo expresado anteriormente, la **Figura 7**, muestra el cambio de la media y la desviación estándar de las de demoras asociadas a cada nivel de daño, para el caso de estudio de la ciudad de Chillán. Mientras que los resultados de los casos de Los Ángeles y Punta Arenas, es posible apreciarlos en el **Anexo B**.



**Figura 7: Cambio en la desviación estándar y media del FAD para todos los niveles de daño. Chillán.**  
Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar de la **Figura 7**, que hasta un nivel de daño 10% se comporta de manera exponencial, sin embargo, se identifica en el nivel de daño 15%, que la desviación estándar se acerca notoriamente a la media, esto se explica por el efecto del escenario número 10, debido a que las restricciones de sus movimientos generan este valor extremo, que se aleja del promedio de los 20 escenarios.

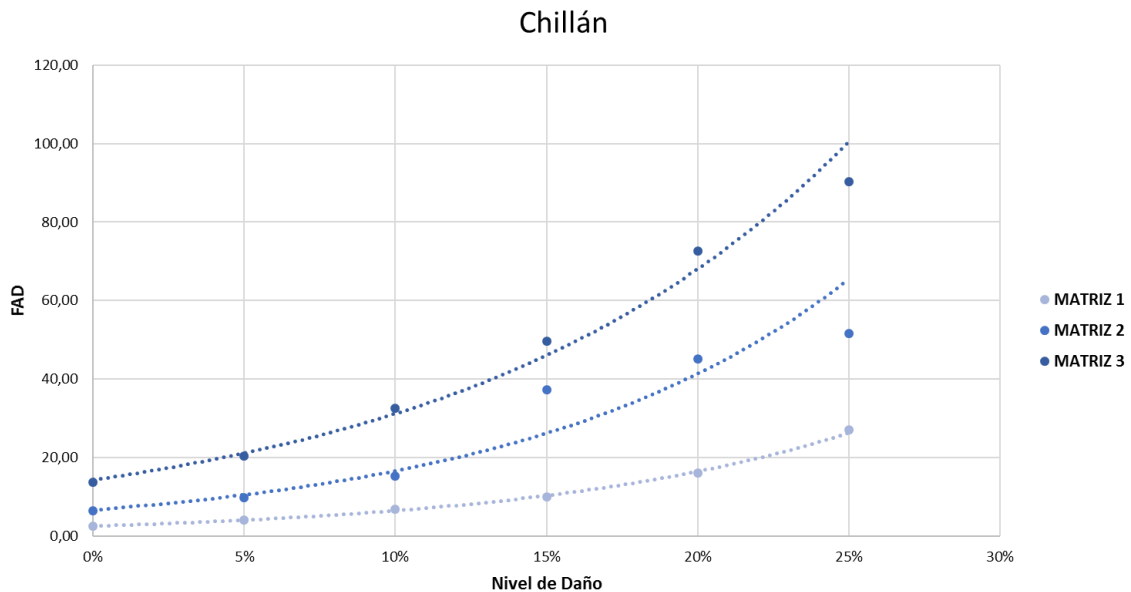
Además, se identifica que desde el nivel de daño 10% la desviación estándar y media crecen de manera acelerada. Así mismo se mantiene la tendencia de que a medida que aumenta el nivel de daño los valores de FAD se ven incrementados.

#### 4.1.2. Aumentos de matrices

Para analizar la sensibilidad del nivel de servicio, frente a aumentos de matriz, primero resulta necesario definir los niveles de demanda a los cuales serán sometidos las tres ciudades analizadas, datos expresados a continuación:

- a) Primer Nivel de Demanda: Aumento en 1,5 veces la matriz original de viajes.
- b) Segundo Nivel de Demanda: Aumento en 2 veces la matriz original de viajes.
- c) Tercer Nivel de Demanda: Aumento en 2,5 veces la matriz original de viajes.

Los resultados de todas las ciudades de estudio, pueden ser apreciados en el **Anexo C y D** del presente informe, mientras que en la **Figura 8**, es posible apreciar el comportamiento de la ciudad de Chillán, ante los tres niveles de aumento de demanda.



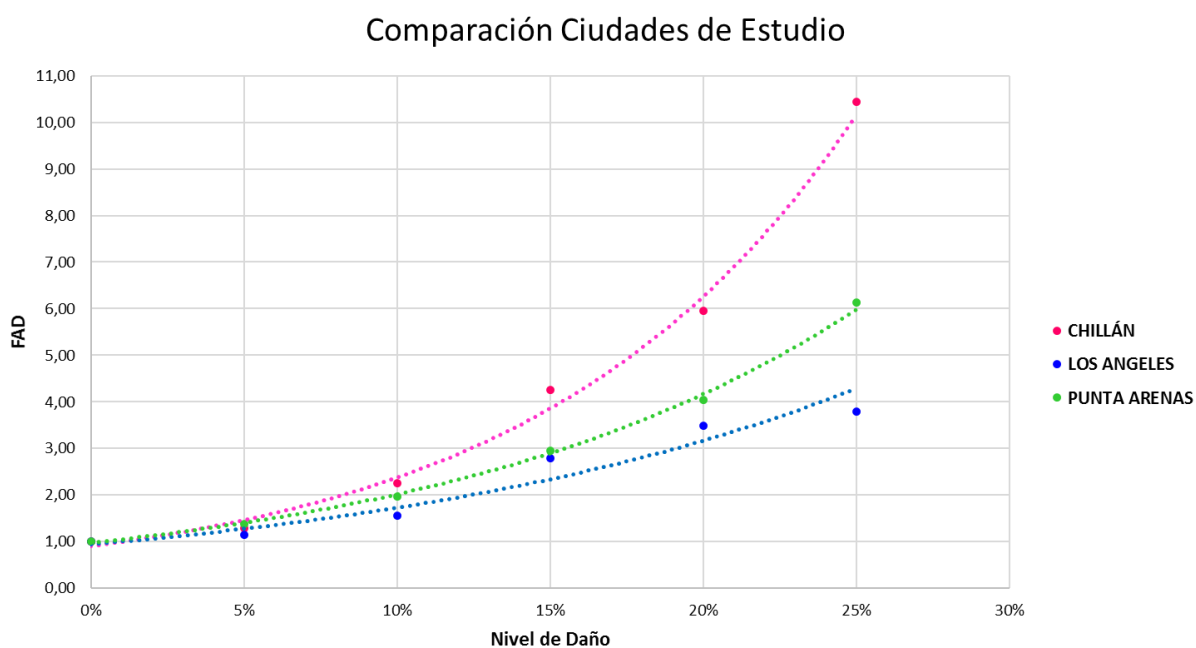
**Figura 8: Sensibilidad nivel de servicio ante aumentos de matriz O-D, Chillán.**

Fuente: Elaboración propia.

Es posible apreciar de la **Figura 8**, que a medida que aumentan la degradación de la red, los valores de FAD también se ven incrementados para los tres niveles de aumentos de la matriz origen-destino. Además, se puede apreciar que, para el nivel de aumento de 1,5 veces, los valores se ajustan correctamente a la línea de tendencia exponencial, a diferencia de los aumentos de 2 y 2,5 veces, en los cuales para ambos casos se ajustan correctamente hasta el nivel de daño 10%.

#### 4.1.3. Comparación de promedios de FAD para las tres ciudades.

Para este análisis, se utilizarán los promedios de los veinte escenarios para cada nivel de daño, datos reflejados en el **Figura 9**.



**Figura 9: Comparación sensibilidad del nivel de servicio para las tres ciudades en estudio.**  
Fuente: Elaboración propia.

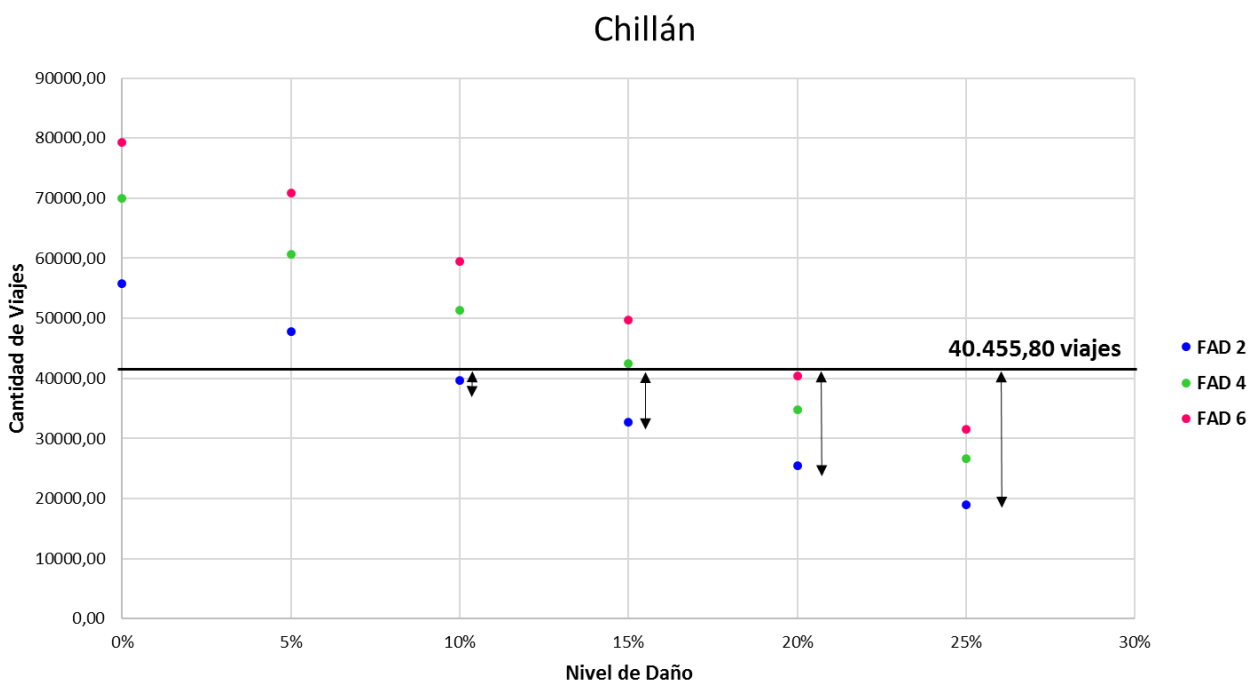
De la **Figura 9**, se aprecia claramente que la red de Chillán es la más sensible ante aumentos del nivel de daño, debido a que a medida que se va degradando la red esta presenta factores de aumento de demoras mayores que las otras ciudades analizadas. Por otra parte, se puede apreciar que Los Ángeles es la ciudad menos sensible al aumento del nivel de daño, tendencia que se puede corroborar en los niveles de daño 20% y 25%, en donde los promedios de los factores de aumento de demoras tienden a equilibrarse.

## 4.2. Máxima Demanda

En cuanto a la máxima demanda que son capaz de soportar las tres ciudades analizadas, se definieron 3 niveles de servicios para ser estudiados, para los cuales se definió la demora total que ello representaba de acuerdo al caso de estudio base de cada ciudad, es decir, utilizando una matriz de origen – destino para el caso de 0% de daño. Los niveles analizados son los siguientes:

- a) FAD = 2.
- b) FAD = 4.
- c) FAD = 6.

De acuerdo a lo definido anteriormente, la máxima demanda que capaz de soportar la Red de Chillán y sus cinco niveles de daño, para los tres niveles de servicio estudiados, quedan expresados en la **Figura 10**. Y los casos de Los Ángeles y Punta Arenas, se encuentran en el **Anexo E**.



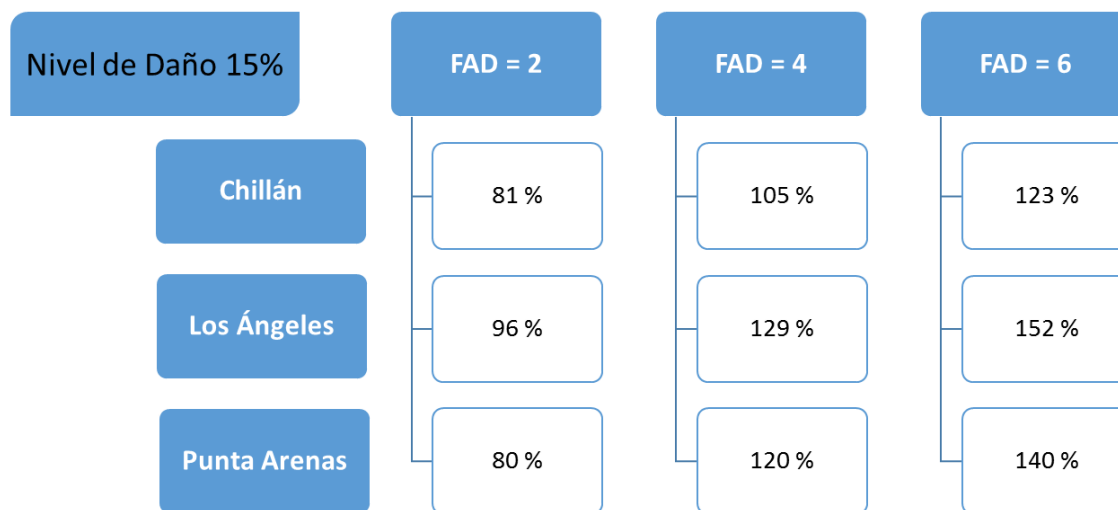
**Figura 10: Máxima demanda para nivel de servicio establecido, Chillán.**

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostrados en la **Figura 10**, indican que la cantidad de viajes actual en la red de chillan es de 40.455,80, se puede establecer que a medida que el nivel de daño aumenta, para un mismo nivel de servicio, es posible apreciar como la máxima demanda soportada por la red disminuye.

Al analizar el caso de nivel de daño 10% es posible apreciar que para demorarse a lo más el doble, es decir,  $FAD = 2$ , la cantidad de viajes se necesita reducir son 455,80, por otra parte, para tener una demora de 6 veces mayor que la situación base, existe una holgura, es decir la cantidad de viajes pueden ser aumentadas en aproximadamente 19.000 viajes, sin embargo, para este caso el nivel de servicio entregado a los usuarios es perjudicial.

Para el nivel de daño 20%, se aprecia claramente que para cualquier nivel de servicio establecido es necesario una reducción de la cantidad de viajes, en comparación a la situación base.



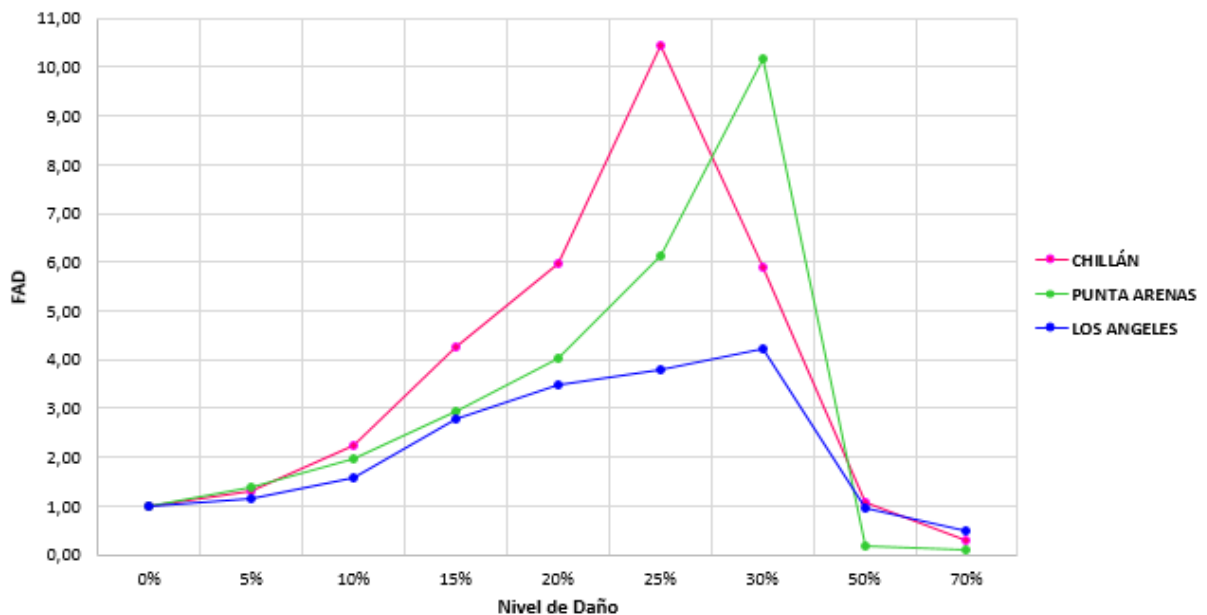
**Figura 11: Máxima demanda, para nivel de daño 15%, tres ciudades en estudio.**  
 Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la **Figura 11**, para un nivel de daño 15% para las tres ciudades en estudio, se interpreta lo siguiente, que para  $FAD$  igual a 2, las tres ciudades deben ver reducidas sus matrices de origen-destinos, en un 19%, 4% y 20% según el orden mostrado en la imagen, sin embargo, para un  $FAD$  de 4 sucede lo contrario, es decir, la red tiene capacidad para soportar mayor cantidad de viajes, en un 5%, 29% y 20% respectivamente. Para una demora de 6 veces mayor ocurre una situación similar, en donde existe capacidad para aumentar la cantidad de viajes (holgura) en un 23%, 52% y 40%.

Sin embargo ¿Qué actividad es capaz de soportar la red?, esta pregunta tiene más bien un carácter político, porque es la autoridad de turno la que debe tomar la decisión, sin embargo, de acuerdo a los resultados de encuestas el 80% de los viajes en punta mañana corresponden a actividades relacionadas al estudio y trabajo, y el 20% restante a otras actividades, entonces según estos antecedentes es posible determinar qué actividad es necesaria restringir para mantener un factor de aumentos de la demora equivalente al doble.

## 5. APLICACIÓN

De acuerdo a los resultados mostrados en la presente investigación, nacen las siguientes preguntas: ¿Qué pasará si aumentan los niveles de daño?, ¿Se acentuarán las curvas?, ¿Cambiará la forma de la curva? Para intentar dar respuesta a ello, se plantea evaluar las mismas redes, es decir, Chillán, Los Ángeles y Punta Arenas, pero esta vez degradando las redes en un 30%, 50% y 70%. Los resultados para este caso de estudio, se encuentran expresados en la **Figura 12**.



**Figura 12: Factores de Aumento de Demoras para daños superiores al 25%.**

Fuente: Elaboración propia.

Para este caso al tener mayores aumentos del nivel de daño, es decir, 30%, 50% y 70% de degradación en la red, se identifica y valida lo ya descrito, que Chillán es la ciudad más sensible al daño. Además, para un nivel de daño 30% la red de Chillan presenta descensos en los valores de FAD, a diferencia de las otras que todavía tienen capacidad para soportar degradación en sus redes, sin embargo, esta tendencia cambia para el nivel de daño 50%, las tres ciudades presentan valores de FAD decrecientes, ¿Por qué estos valores decrecen?... si por teoría lo que se espera es que a medida que el daño aumente los FAD también aumenten, esto se explica de la siguiente manera, las ciudades topológicamente no son capaces de procesar ni soportar tal cantidad de viajes, producto a que las redes están tan dañadas que se provoca que cierta cantidad de viajes no sean factibles de realizar, es por esto que al llegar a un nivel de daño de un 70% los valores de FAD sean menores a 1.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las catástrofes naturales que se presentan en las ciudades de tamaño medio en Chile, muestran la gran vulnerabilidad a la que están enfrentadas las redes de transporte urbano, demostrando que es muy importante analizar los potenciales riesgos de una ciudad para que, ante un evento de este tipo, se puedan aminorar las variaciones en el nivel de servicio del usuario.

De acuerdo a lo anterior, y al estudio bibliográfico realizado, concluye que los costos directos o sociales frente a un daño en las redes de transporte pueden ser bastantes severos, dependiendo del tipo de catástrofe natural y la magnitud de esta. Además, si una Ciudad es afectada por dos eventos consecutivos, esto puede traer consigo magnitudes de daño superiores a que si estos eventos se desarrollaran en periodos de tiempo diferentes.

La sensibilidad del nivel de servicio es importante destacar, a medida que el nivel de daño va en aumento, los FAD también sufren aumentos, por lo tanto, se puede apreciar una disminución notable del Nivel de Servicio entregado a los usuarios. Además, es posible apreciar una línea de tendencia de tipo exponencial, la cual se ajusta correctamente en los primeros niveles de daño; mientras que desde un 15% de daño en adelante es posible apreciar que los FAD comienzan a alejarse de esta curva. En relación al comportamiento del nivel de servicio, ante los diferentes escenarios de daño, es posible apreciar que frente a niveles de daño entre un 5% y 10%, estos se distribuyen de forma normal; mientras que desde un 15% de daño, se distribuye de forma log-normal.

Al generar aumentos en la matriz origen-destino, se puede apreciar que se mantiene la tendencia de aumento en los FAD, disminuyendo en Nivel de Servicio.

Por otra parte conocer la máxima demanda que soporta la red de transporte urbano al verse enfrentado a catástrofes naturales, permite fortalecer la buena toma de decisiones para los equipos de emergencia, antecedente que no debe olvidar el nivel de servicio que se le desea entregar a los usuarios.

Por otra parte, se recomienda aplicar esta metodología a otras Ciudades Chilenas de Tamaño Medio para así tener un análisis completo de nuestro país. Y además analizar con mayor detalle el efecto al aumentar los niveles de daño por sobre el 30%.

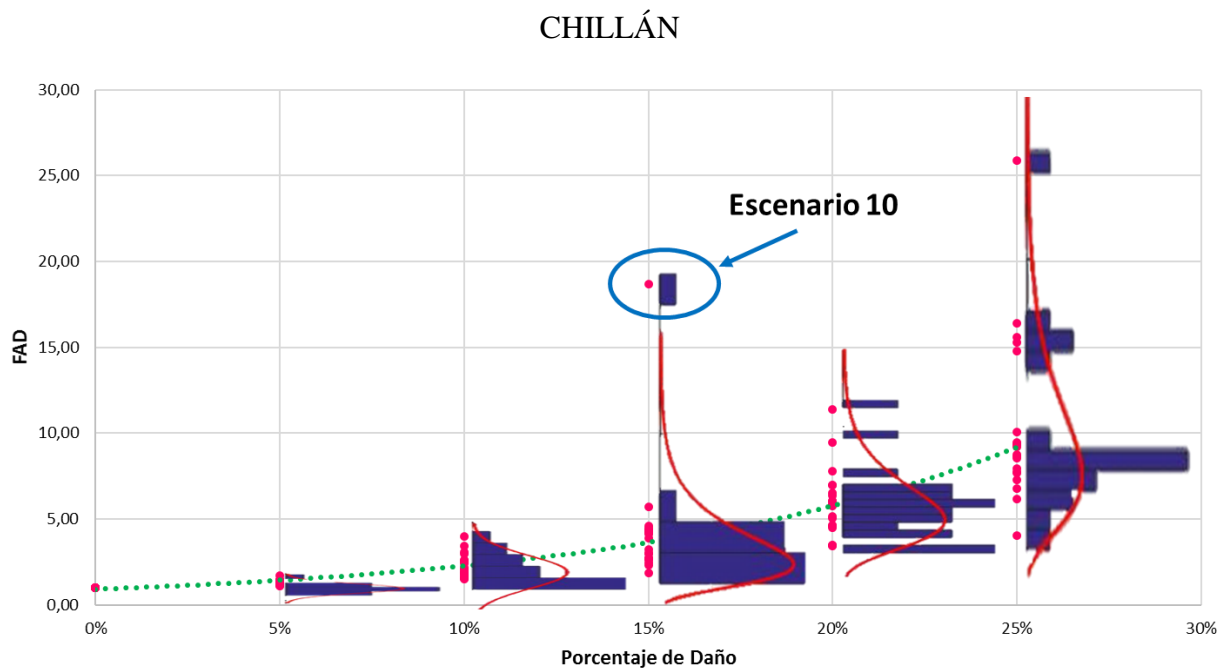


## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

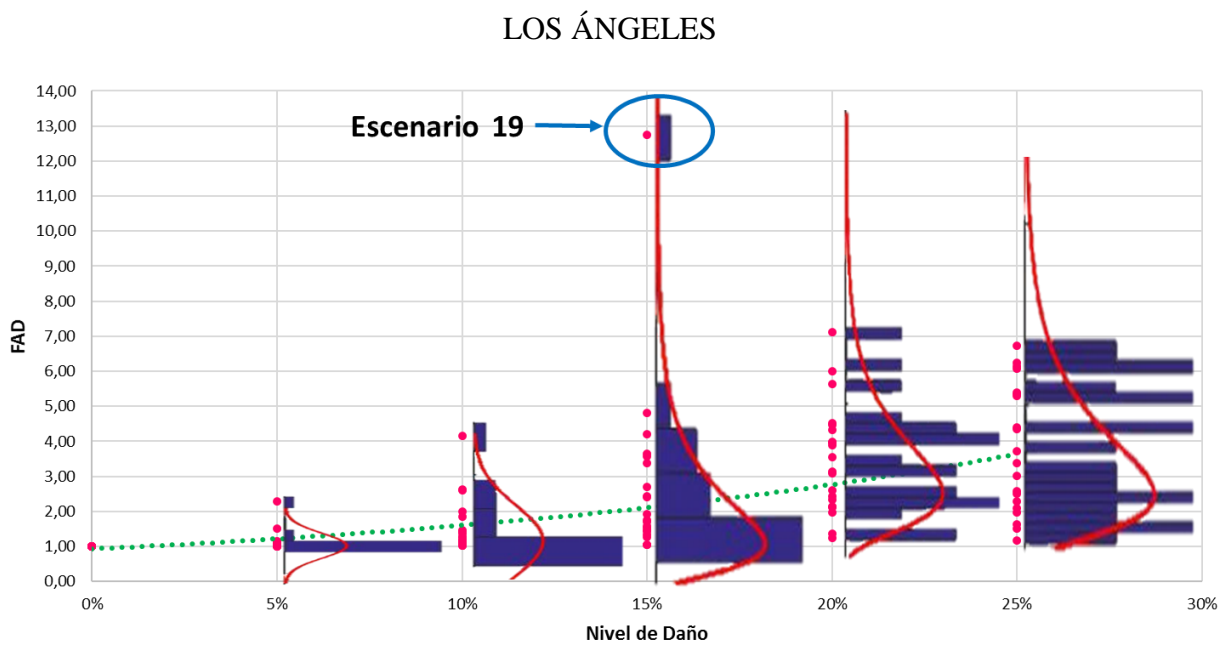
- Carmen Gloria Madrid Ruiz, V. A. J. H. (2016, abril 22). Catástrofes Naturales, estado de excepción constitucional y otras medidas de excepción. Recuperado 22 de abril de 2016, a partir de [http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/bordas\\_a/html/index-frames.html](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/bordas_a/html/index-frames.html)
- Centro Sismológico Nacional: “Cada 8 años ocurre un terremoto destructivo en algún lugar de Chile”. (2016, mayo 5). Recuperado a partir de <http://www.radioagricultura.cl/2015/02/20/centro-sismologico-nacional-cada-8-anos-ocurre-un-terremoto-destructivo-en-algun-lugar-de-chile/>
- Chile fue el país de la región con mayores pérdidas económicas por desastres naturales este año. (s. f.). Recuperado a partir de [http://www.curriculumlineamineduc.cl/605/articles-26777\\_recurso\\_pdf.pdf](http://www.curriculumlineamineduc.cl/605/articles-26777_recurso_pdf.pdf)
- CONICYT. (2010, Diciembre). Investigación en Transporte en Chile: Áreas de investigación y capacidades. Informe de estado del arte.
- Ingeniería DICTUC. (s. f.). Modelo SATURN Curso Capacitación. Recuperado a partir de <https://es.scribd.com/doc/315806908/Manual>
- Juan Andrés Silva Medina. (2016, Abril). Caracterización de los cambios en el Nivel de Servicio de Redes de Transporte Urbano, producto de eventos catastróficos. Universidad del Bío - Bío, Concepción.
- María Francisca Herrera Rojas (2016, Octubre). Efecto de las variaciones del nivel de servicio en redes de transporte urbano, producto de eventos catastróficos. Universidad del Bío-Bío, Concepción.

- Juan de Dios Ortúzar, Luis G. Willumsen, traducción de Á. I. P., Luigi Dell'Olio. (2008). Modelos de transporte. España: Ed. Universidad de Cantabria.
- Ortigoza, J., & Menendez, M. (2014). Traffic performance on quasi-grid urban structures. *Cities*, 36, 18-27.
- Ortuzar, J., & Willumsem, L. (2008). Modelos de Transporte (pp. 259-263). Santander: Universidad de Cantabria.
- Taylor, M. (2013). Travel through time: the story of research on travel time reliability. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 1(3), 174-194.
- Urena, N. (2010). Transportation Network Resiliency: A Fuzzy Systems Approach (All Graduate Theses and Dissertations). Utah State University.
- Yee, A., Leung, S., & Wesemann, L. (1996). The 1994 Northridge earthquake: a transportation impact overview. *Transport Research, Circular 462*, 7-19.

**ANEXO A: SENSIBILIDAD NIVEL DE SERVICIO, TODOS LOS ESCENARIOS**

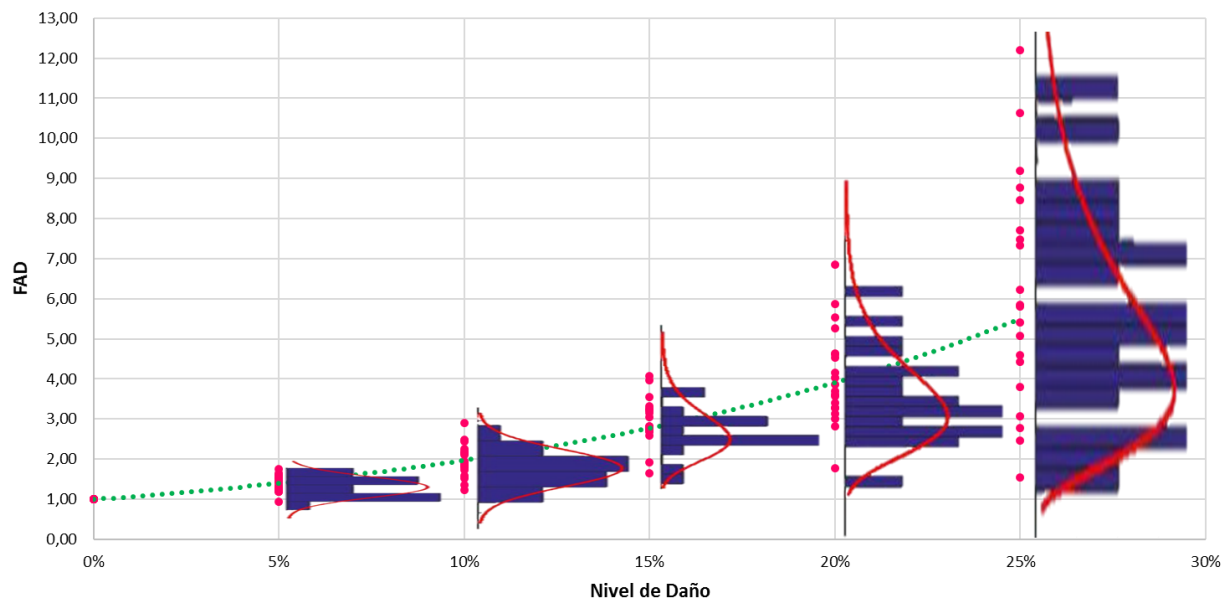


**Figura A-1: Sensibilidad nivel de servicio, para todos los escenarios, Chillán.**  
Fuente: Elaboración propia.



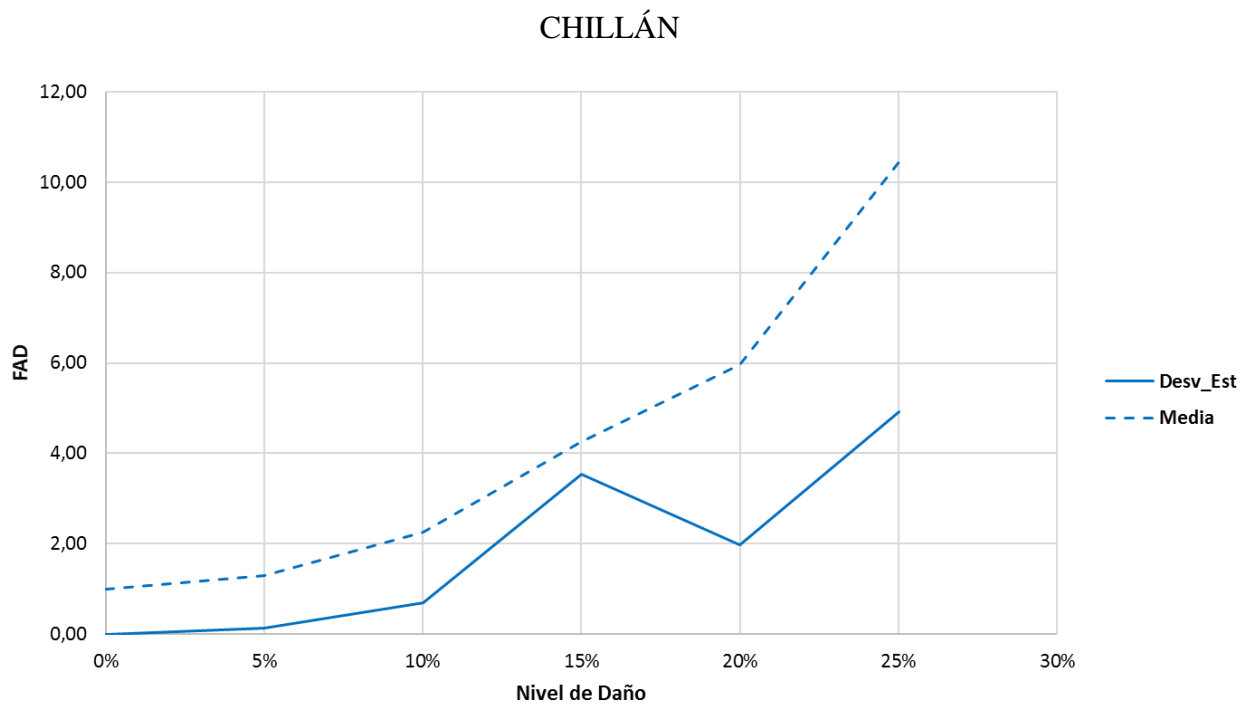
**Figura A-2: Sensibilidad nivel de servicio, para todos los escenarios, Los Ángeles.**  
Fuente: Elaboración propia.

### PUNTA ARENAS



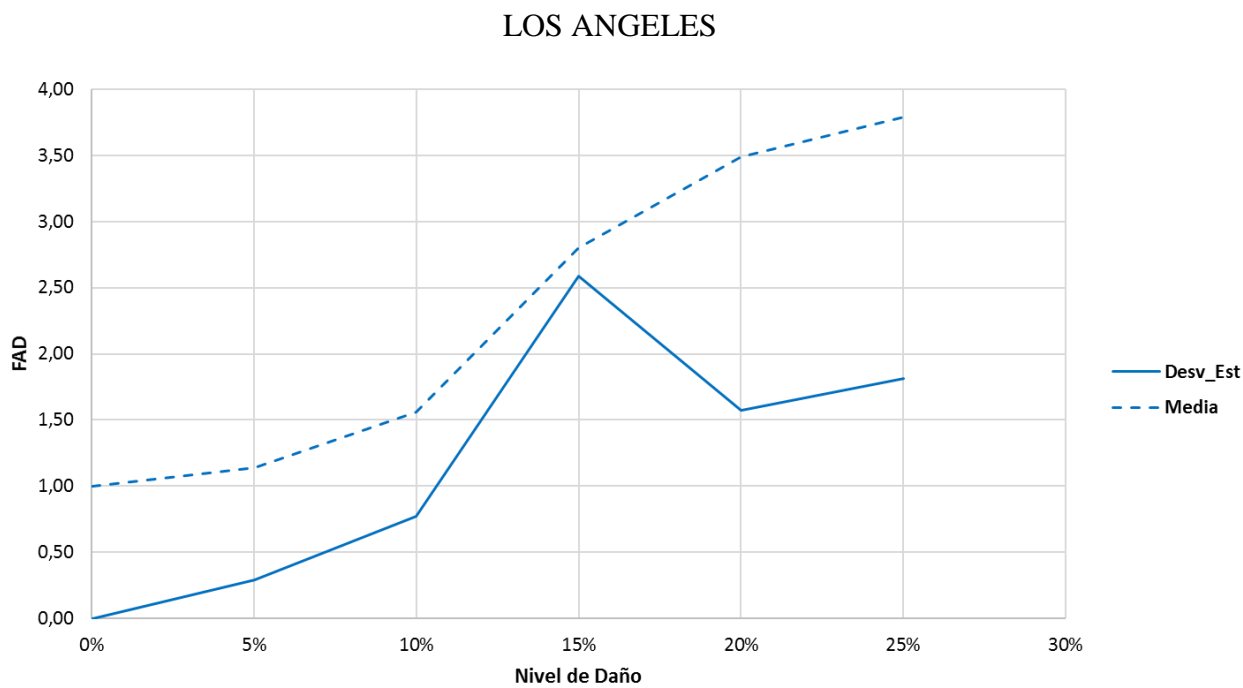
**Figura A-3: Sensibilidad nivel de servicio, para todos los escenarios, Punta Arenas.**  
Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO B: CAMBIOS EN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y MEDIA



**Figura B-1: Cambios en desviación estándar y media, Chillán.**

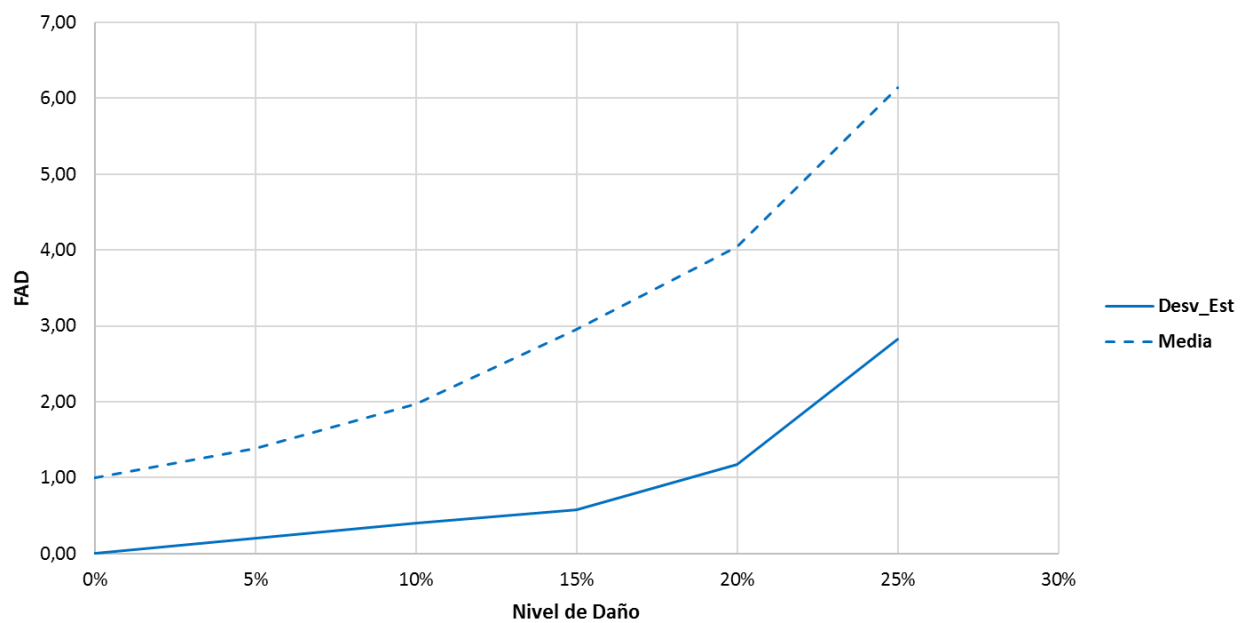
Fuente: Elaboración propia.



**Figura B-2: Cambios en desviación estándar y media, Los Ángeles.**

Fuente: Elaboración propia.

### PUNTA ARENAS

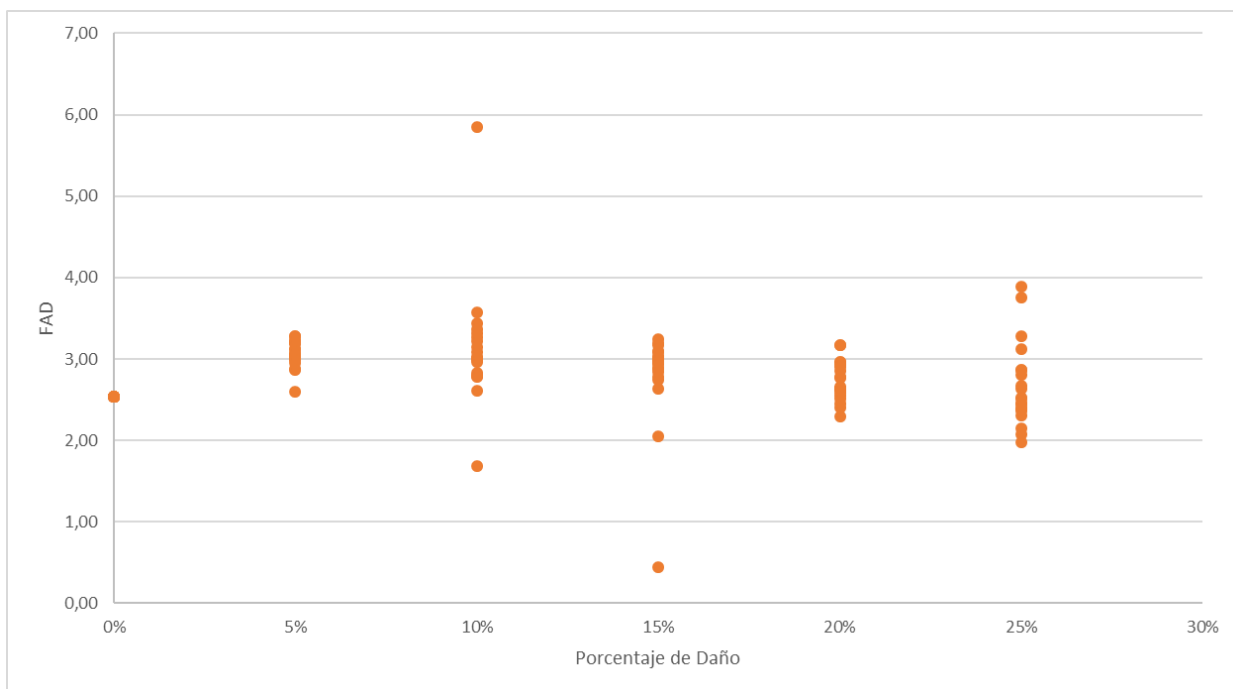


**Figura B-3: Cambios en desviación estándar y media, Punta Arenas.**

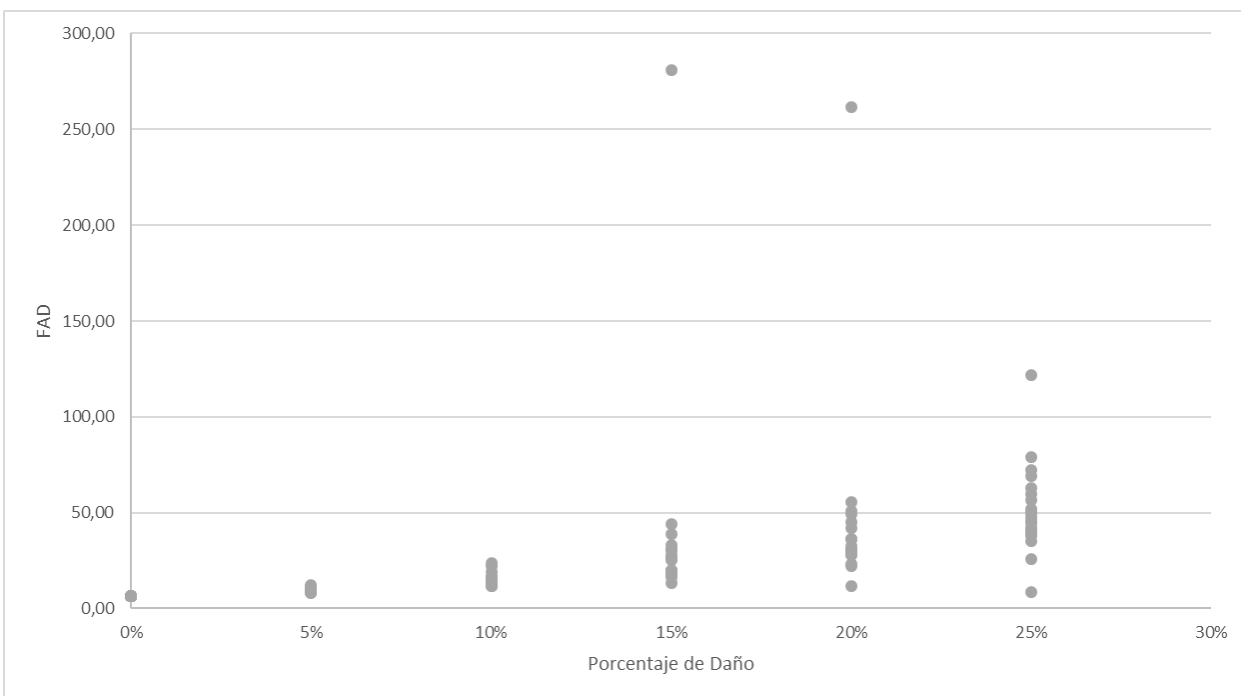
Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO C: SENSIBILIDAD NIVEL DE SERVICIO ANTE AUMENTOS DE DEMANDA**

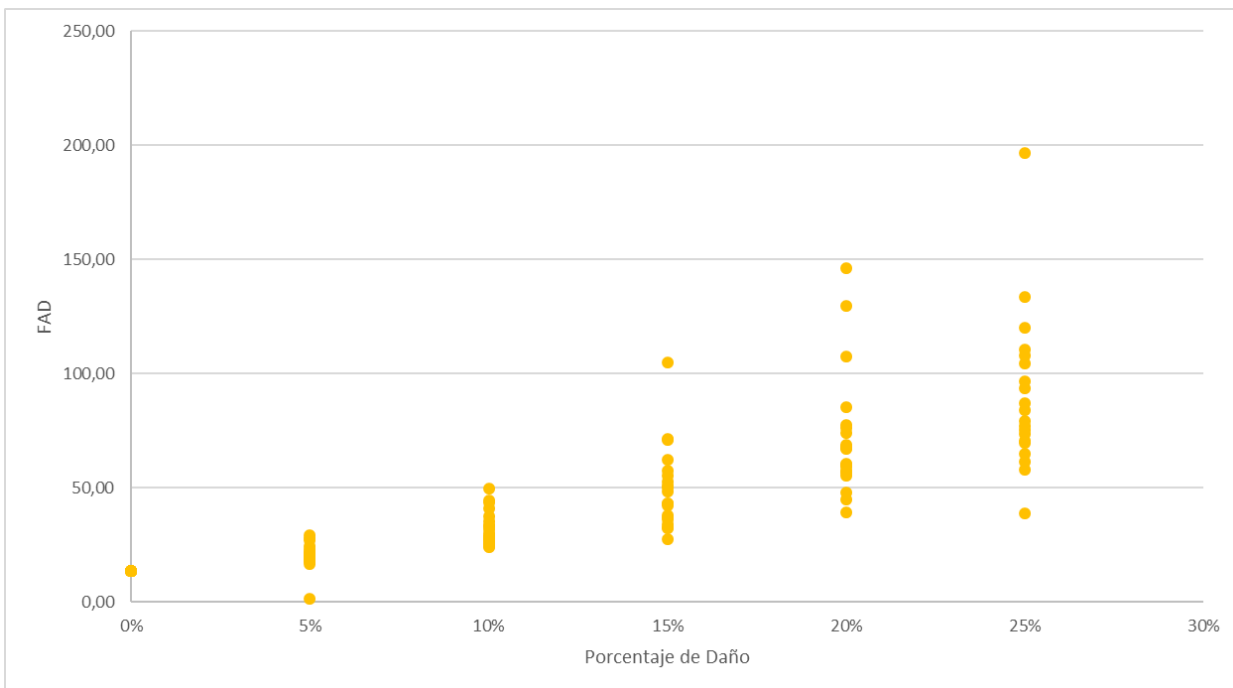
**CHILLÁN**



**Figura C-1: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 1.**  
Fuente: Elaboración propia.

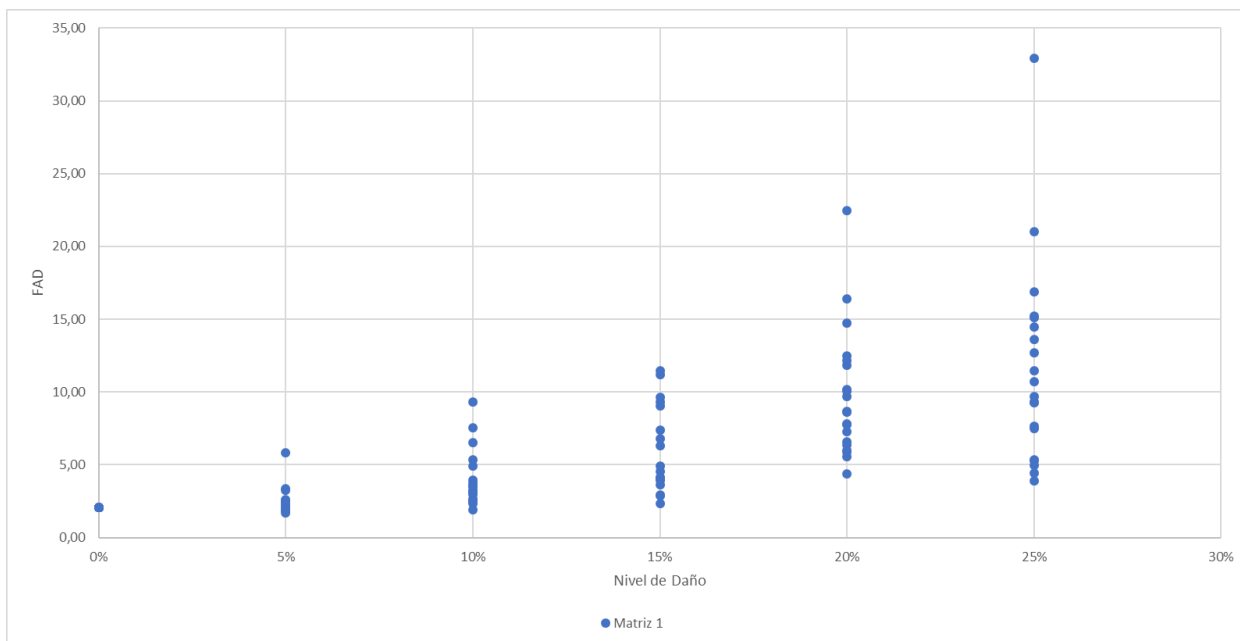


**Figura C-2: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 2.**  
Fuente: Elaboración propia.



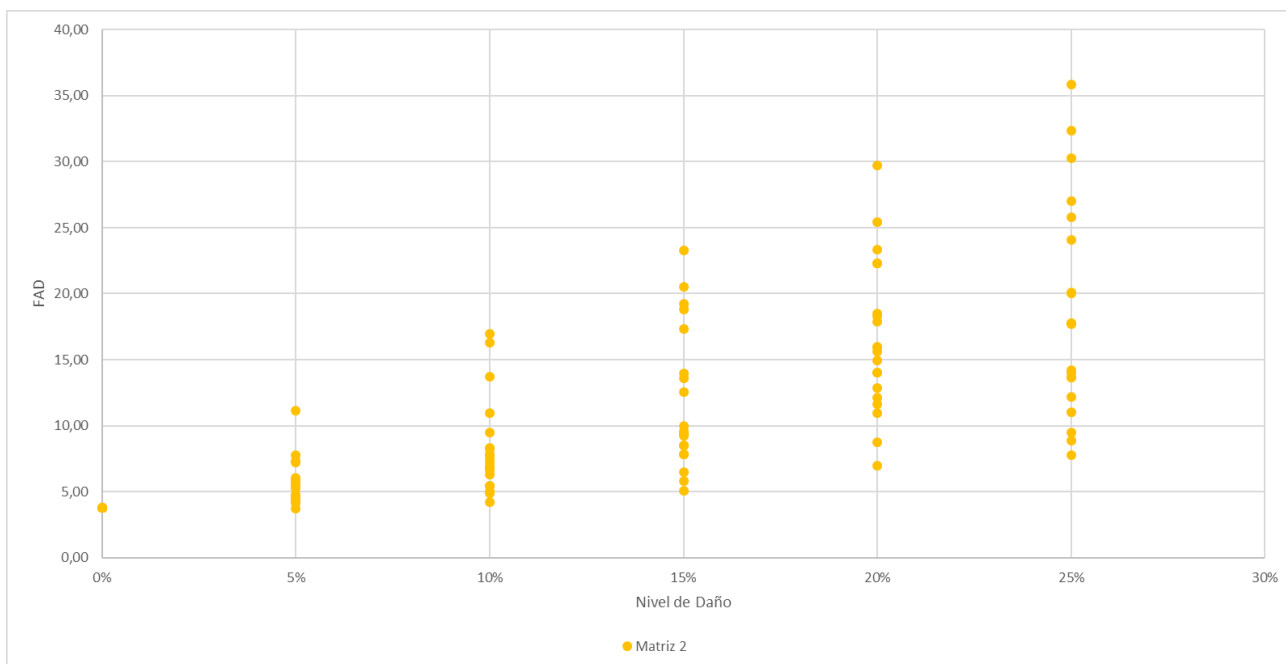
**Figura C-3: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 3.**  
Fuente: Elaboración propia.

### LOS ÁNGELES

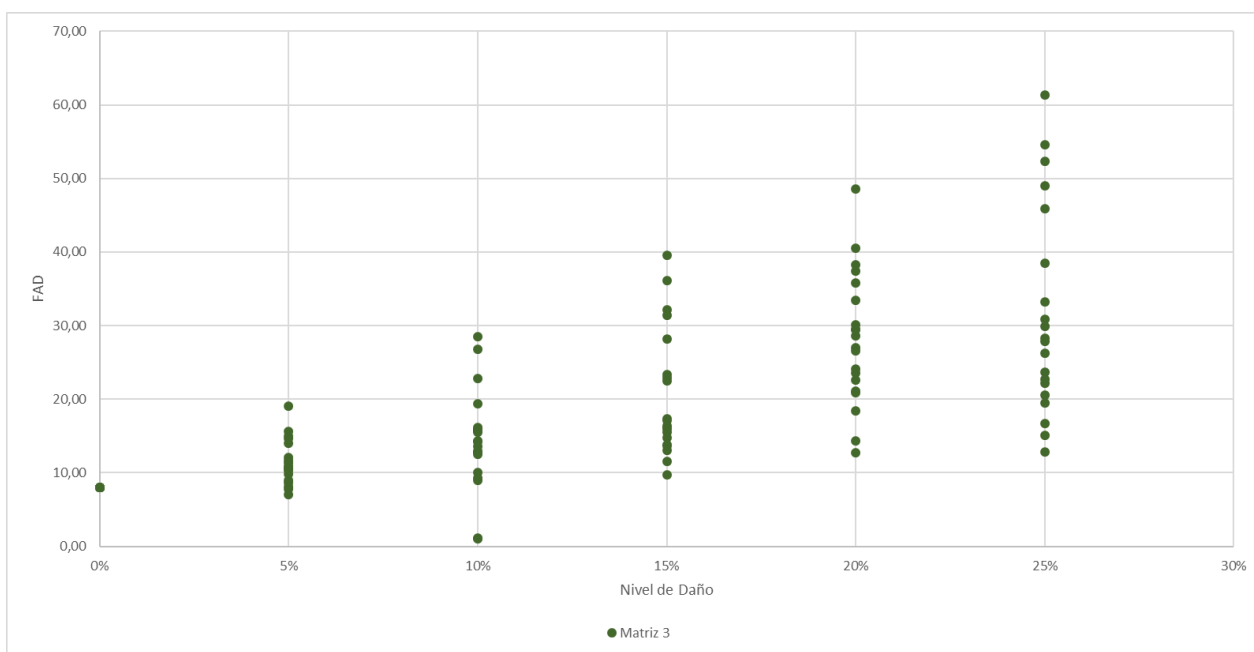


**Figura C-4: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 1**  
Fuente: Elaboración propia.



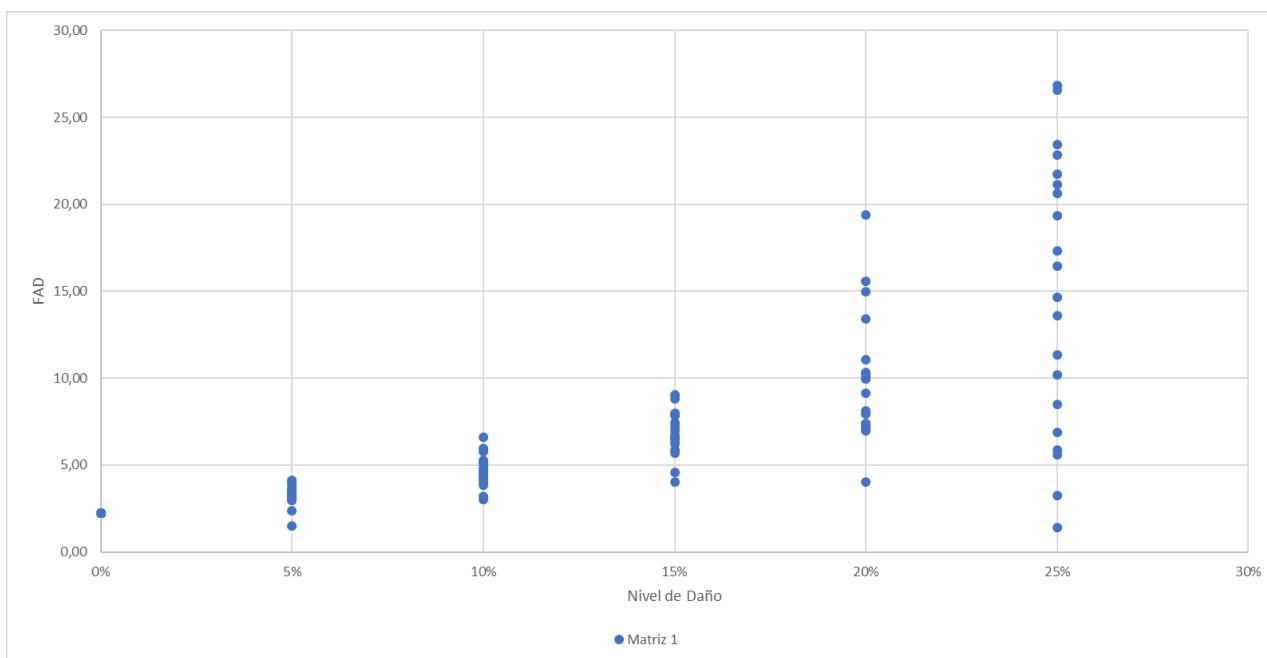


**Figura C-5: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 2.**  
Fuente: Elaboración propia.

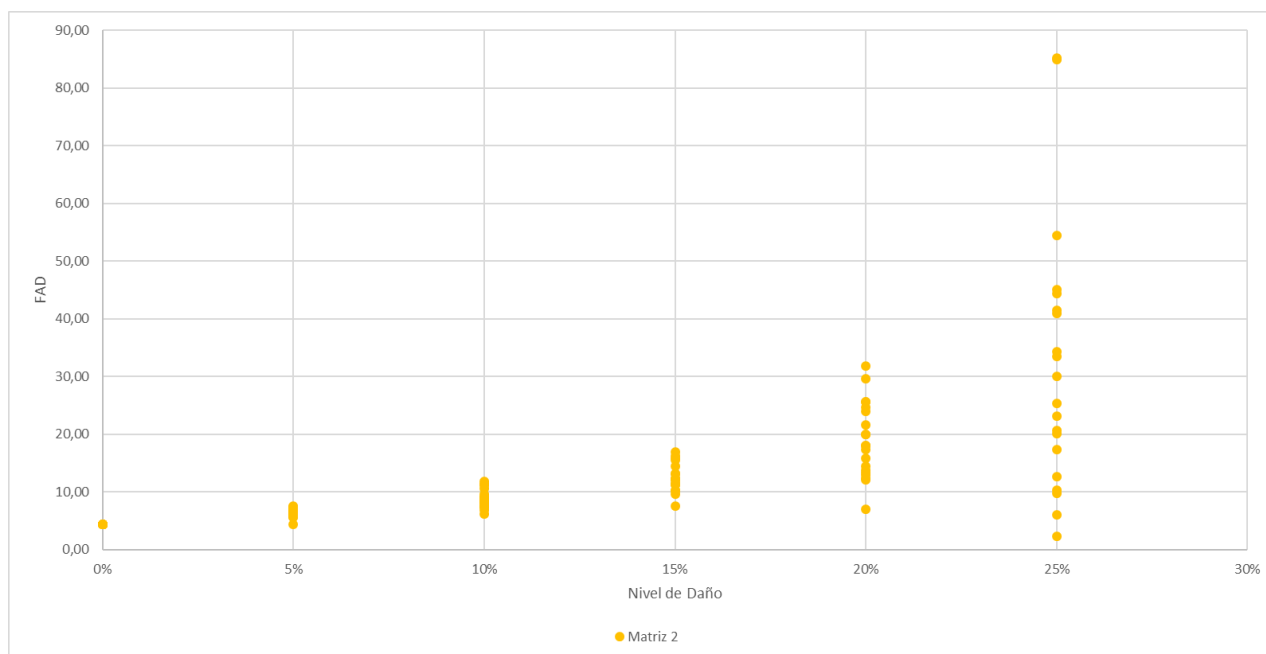


**Figura C-6: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 3**  
Fuente: Elaboración propia.

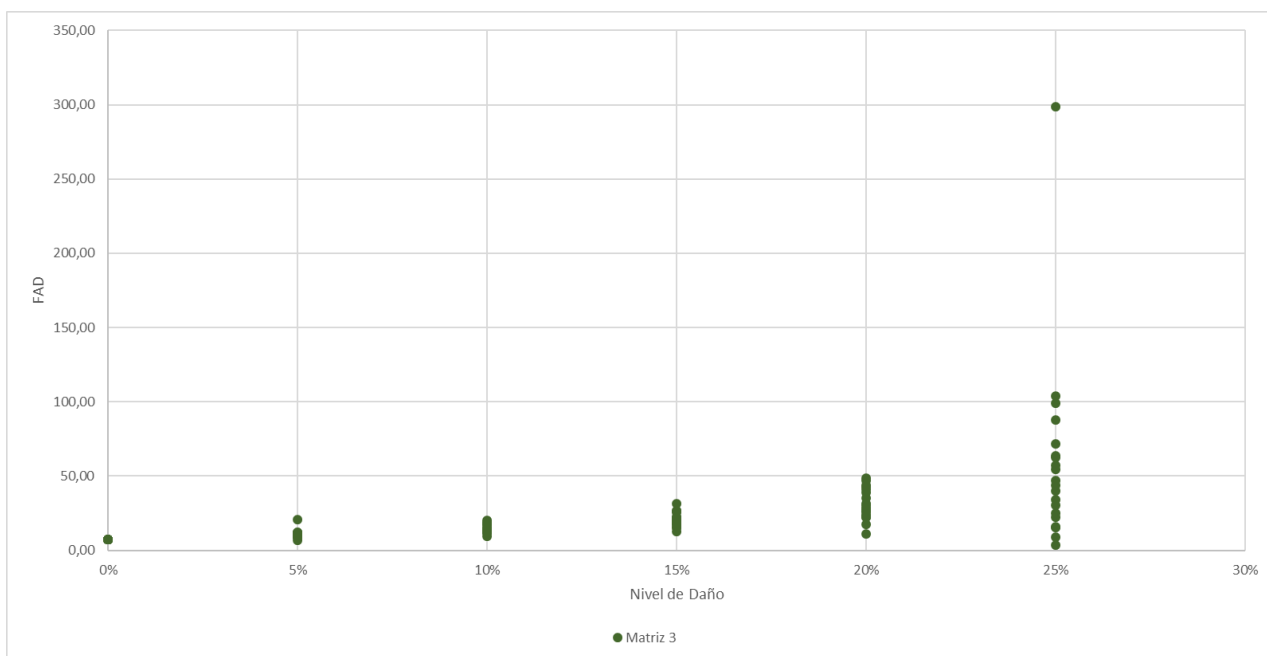
### PUNTA ARENAS



**Figura C-7: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 1.**  
Fuente: Elaboración propia.

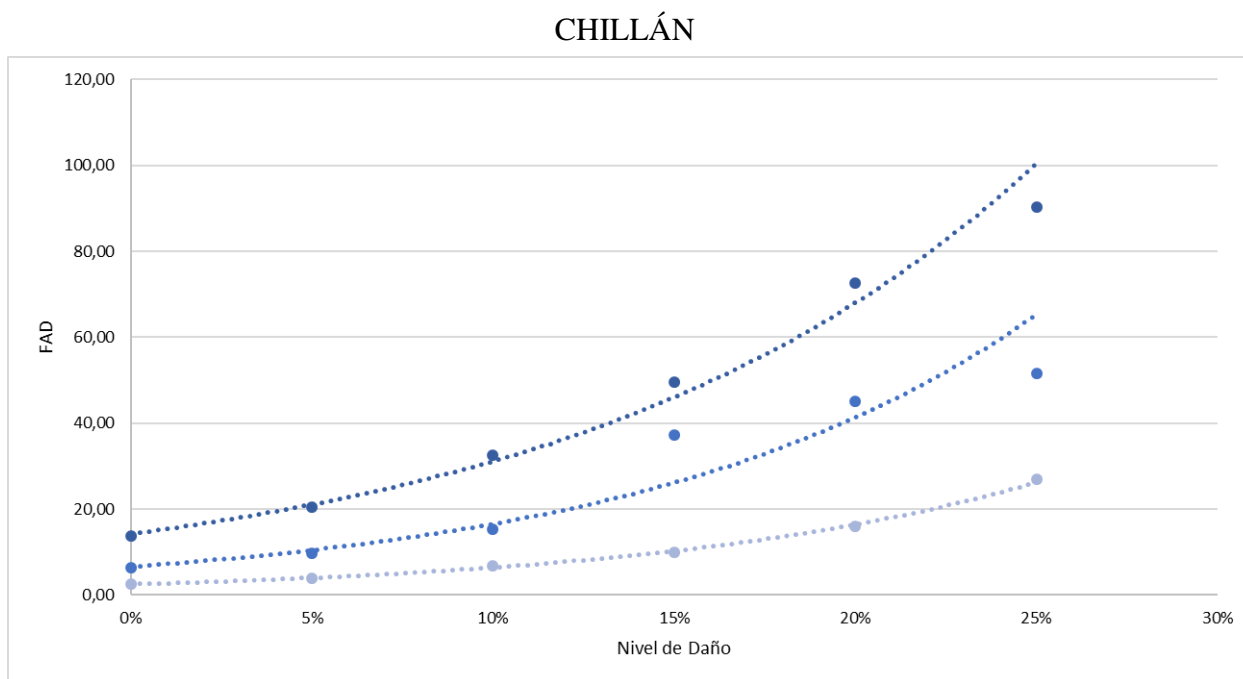


**Figura C-8: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 2.**  
Fuente: Elaboración propia.

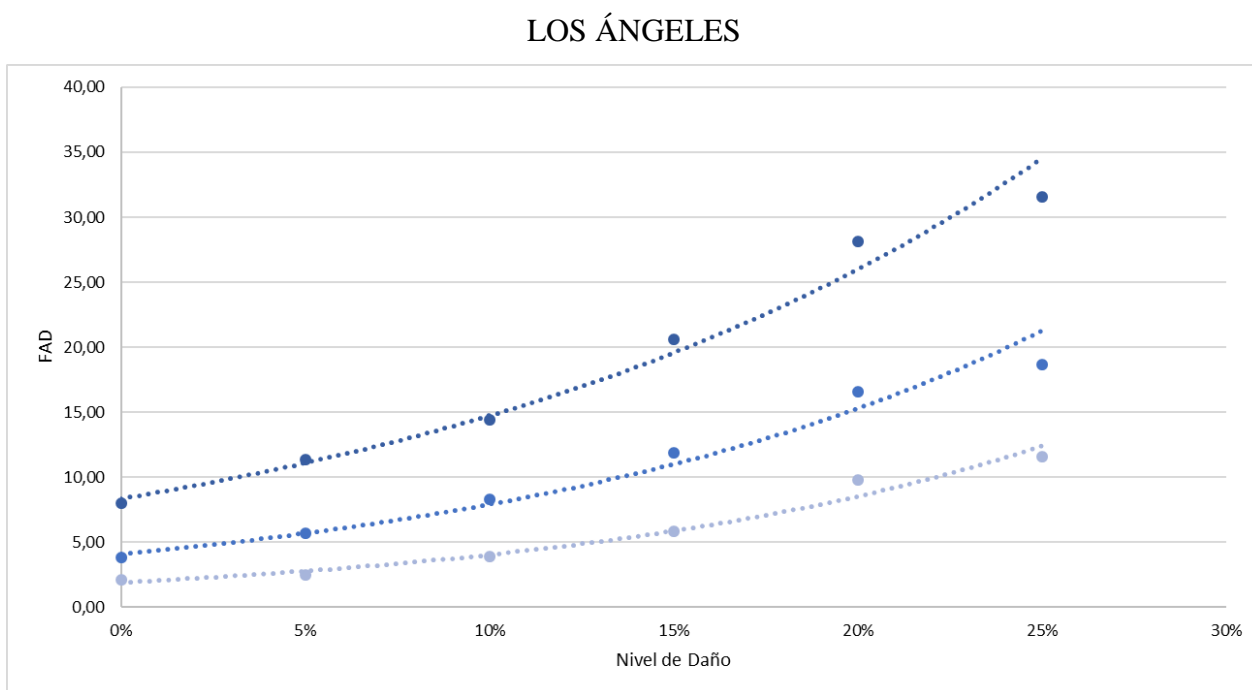


**Figura C-9: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda. Aumento Matriz 3**  
Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO D: SENSIBILIDAD NIVEL DE SERVICIO ANTE AUMENTOS DE DEMANDAS, PROMEDIO**

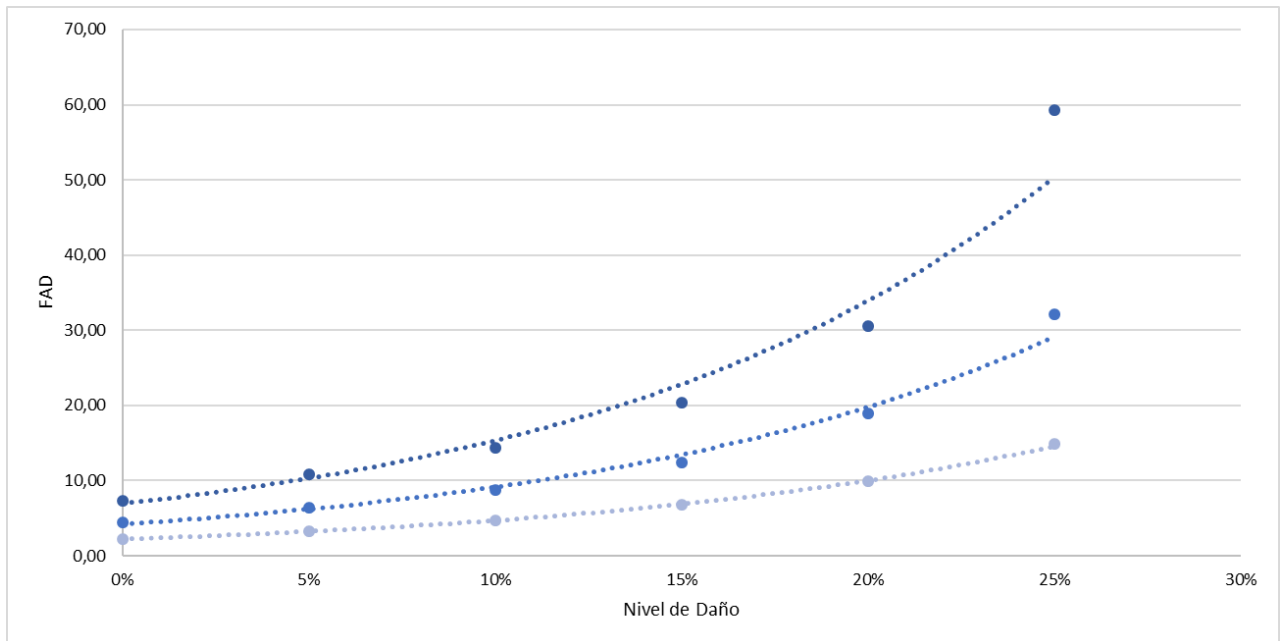


**Figura D-1: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda, promedio.**  
Fuente: Elaboración propia.



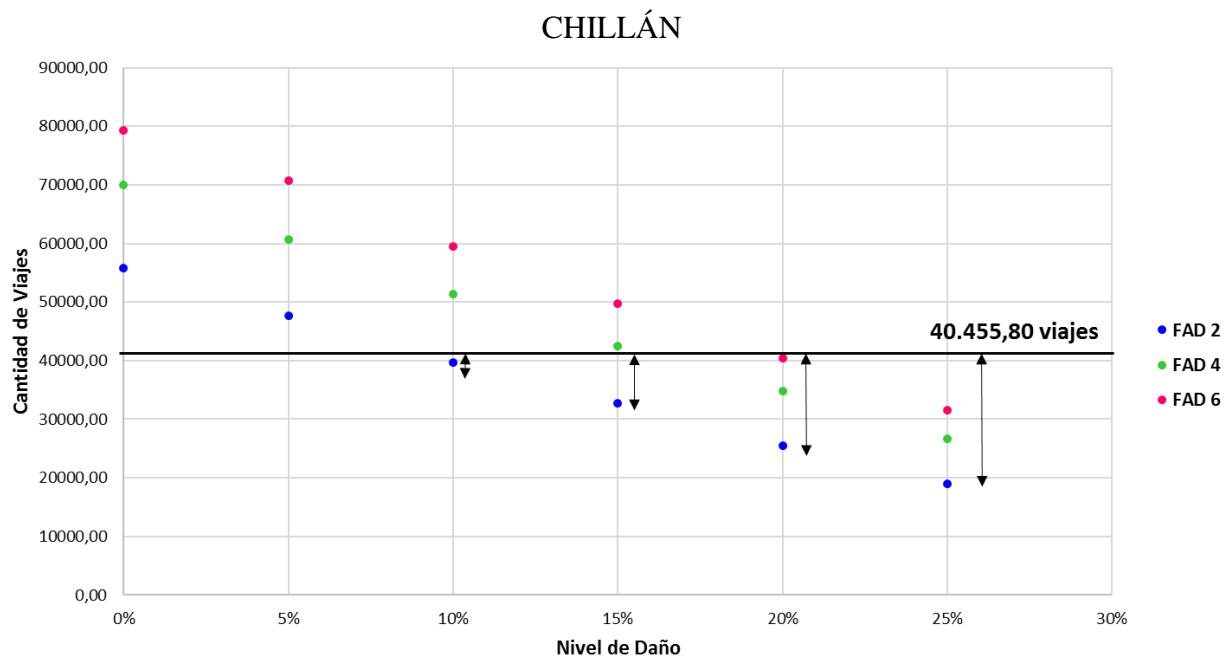
**Figura D-2: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda, promedio.**  
Fuente: Elaboración propia.

PUNTA ARENAS

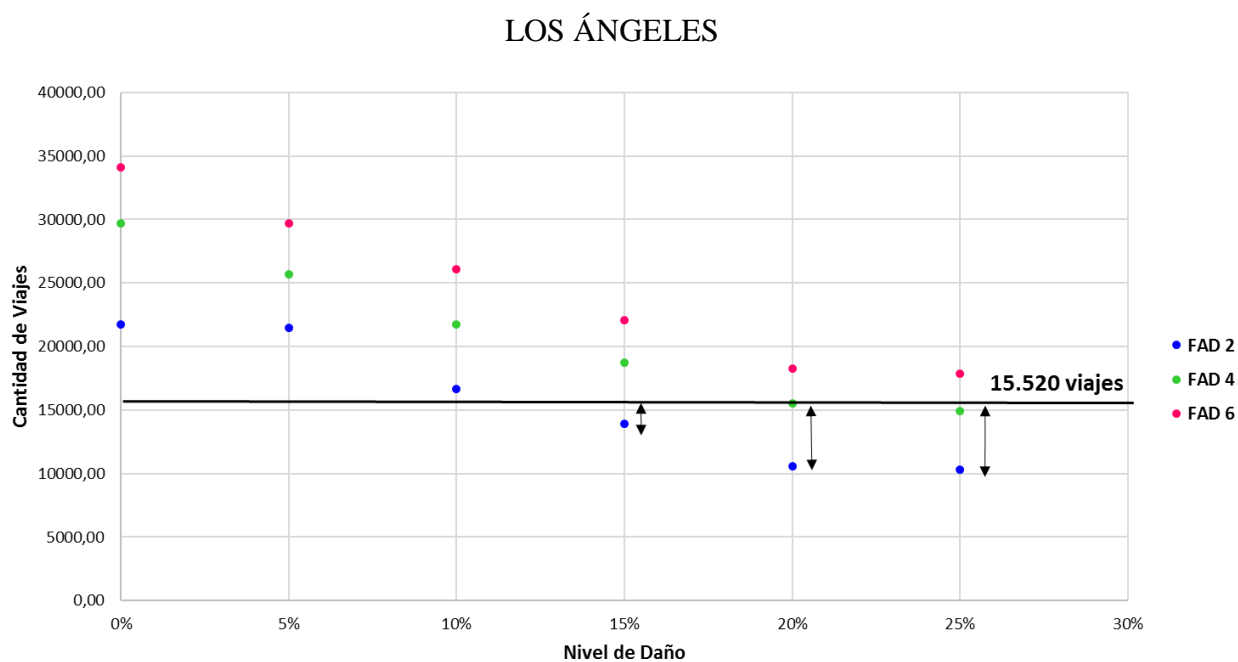


**Figura D-3: Sensibilidad nivel de servicio, ante aumentos de demanda, promedio.**  
 Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO E: MÁXIMA DEMANDA, PARA DISTINTOS NIVELES DE SERVICIOS**

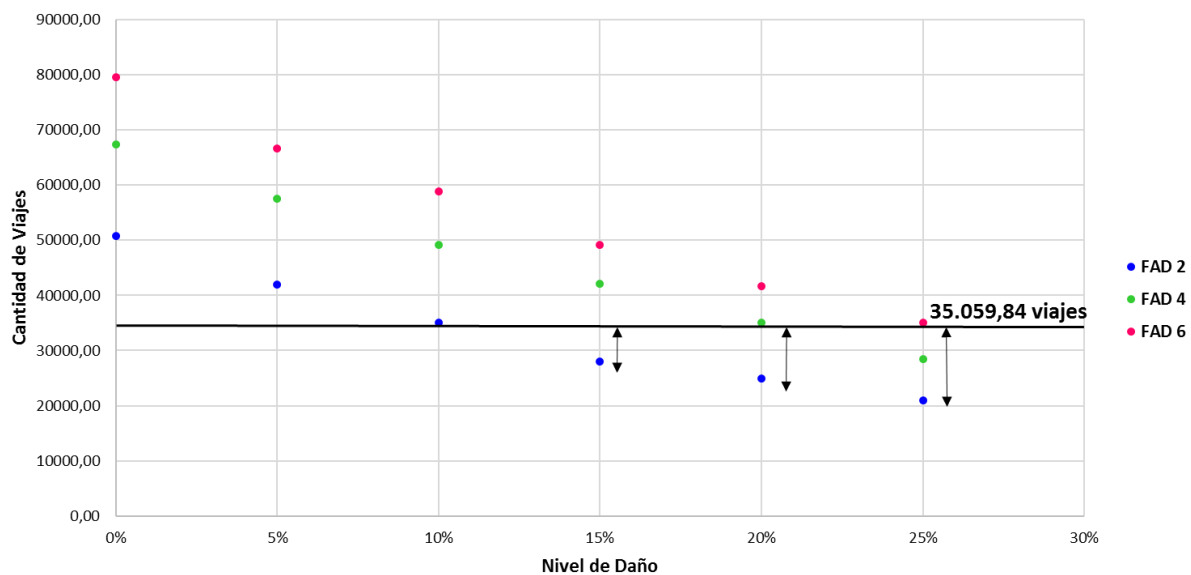


**Figura E-1: Máxima demanda, para distintos niveles de servicios.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura E-2: Máxima demanda, para distintos niveles de servicios.**  
 Fuente: Elaboración propia.

### PUNTA ARENAS



**Figura E-3: Máxima demanda, para distintos niveles de servicios.**  
 Fuente: Elaboración propia.

