

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**

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



**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA  
REDUCCIÓN SIGNIFICATIVA DE  
CAPACIDAD EN REDES DE TRANSPORTE  
PRODUCTO DE CATÁSTROFES NATURALES**

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

**MARCO ANTONIO SEBASTIÁN SANDOVAL ZUÑIGA**

Concepción, Enero de 2017

## INDICE GENERAL

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA REDUCCIÓN SIGNIFICATIVA DE CAPACIDAD EN REDES DE TRANSPORTE PRODUCTO DE CATÁSTROFES NATURALES. ....	1
RESUMEN. ....	1
EVALUATION OF THE EFFECT OF SIGNIFICANT REDUCTION OF CAPACITY IN TRANSPORT NETWORKS CATASTROPHIES .....	2
ABSTRACT. ....	2
1 INTRODUCCIÓN. ....	3
1.1 Justificación .....	3
1.2 Alcances del proyecto. ....	4
1.3 Objetivos. ....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos. ....	4
2 ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 Vulnerabilidad.....	5
2.2 Resiliencia.....	7
2.3 Evento Catastrófico.....	9
3 MARCO TEÓRICO.....	12
3.1 Modelos de Transporte. ....	12
Modelos Microscópicos: .....	13
Modelos Mesoscópicos: .....	13
Modelos Macroscópicos:.....	13
3.2 Modelo SATURN. ....	13
3.2.1 Submodelo de Asignación. ....	13
3.2.2 Submodelo de Simulación. ....	14

3.3	Capacidad.....	14
3.4	Ciudades de Gran Tamaño.....	14
3.5	Grado de Saturación.....	15
3.6	Factor de Aumento de las Demoras (FAD). .....	15
3.7	Simulación de Monte Carlo .....	15
4	METODOLOGÍA. ....	17
4.1	Elección de un modelo de tráfico.....	17
4.2	Simulación .....	17
4.3	Aplicación de Daño.....	18
4.3.1	Estrategia de Daño. ....	18
4.3.2	Niveles de Daño.....	18
4.3.3	Escenarios de Daño.....	18
4.4	Simulación de las variaciones del Nivel de Servicio producto a la pérdida de Capacidad.....	18
4.5	Casos de Estudio. ....	19
	Caso 1.....	19
	Caso 2.....	19
	Caso 3.....	19
4.6	Calculo del FAD. ....	19
4.7	Demanda Máxima.....	19
4.8	Análisis del Nivel de Servicio.....	19
5	RESULTADOS.....	20
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
8	ANEXOS .....	31

ANEXO 1. Trayectorias de estudio.....	31
ANEXO 2. Trayectorias para determinar la demanda máxima.....	36
ANEXO 3. Estudio con “Remoción Aleatoria de Arcos” .....	38
ANEXO 4. Estudio con “Arcos Blindados” .....	39
ANEXO 5. Función de servicio de Concepción.....	41

**INDICE DE TABLAS.**

TABLA 2.1. Medidas del nivel se servicio del sistema de transporte..... 6

TABLA 2.2. Causas de perturbaciones en un sistema de transporte..... 7

## INDICE DE FIGURAS.

FIGURA 2.1. Ciclo de la Resiliencia .....	8
FIGURA 2.2. Estrategia de eliminación de nodos de la red ficticia. ....	8
FIGURA 3.1. Elección de modelos de tráfico.....	12
FIGURA 5.1. Trayectorias de daño.....	20
FIGURA 5.2. FAD vs Nivel de Daño. Caso 1.....	21
FIGURA 5.3. FAD vs Nivel de Daño. Caso 2.....	22
FIGURA 5.4. FAD vs Nivel de Daño. Comparación .....	23
FIGURA 5.5. Desviación Estándar. ....	24
FIGURA 5.6. F vs Nivel de Daño para un FAD máx. = 2. ....	25
FIGURA 5.7. F vs Nivel de Daño para un FAD máx. = 4. ....	26

## **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA REDUCCIÓN SIGNIFICATIVA DE CAPACIDAD EN REDES DE TRANSPORTE PRODUCTO DE CATÁSTROFES NATURALES.**

**Marco Sandoval Zuñiga.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.  
msandovz@alumnos.ubiobio.cl

**Patricio Álvarez PhD. MSc.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.  
palvarez@ubiobio.cl

### **RESUMEN.**

Debido a la ubicación geográfica de Chile y a sus características físicas y demográficas, todo el territorio nacional está expuesto a algún tipo de amenaza natural. Estas producen pérdida parcial o total de la capacidad de los arcos de la red, lo que se traduce en una reducción del nivel de servicio desde el punto de vista de las demoras. La resiliencia de una red de transporte es la capacidad intrínseca de modificar su comportamiento cuando es dañada. Con el estudio de múltiples escenarios de daño se puede caracterizar cambios en el nivel de servicio de ciudades de gran tamaño cuando pierde capacidad producto de eventos catastróficos. El uso de herramientas de simulación es indispensable para la aplicación de la metodología propuesta. Finalmente, se puede calcular la máxima demanda que es capaz de soportar la red luego de haber ocurrido un evento catastrófico.

*Palabras = 5954 + 12 × 250 = 8954 Palabras Totales*

## **EVALUATION OF THE EFFECT OF SIGNIFICANT REDUCTION OF CAPACITY IN TRANSPORT NETWORKS CATASTROPHIES**

**Marco Sandoval Zuñiga.**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío.  
msandovz@alumnos.ubiobio.cl

**Patricio Álvarez M.MSc.PhD.**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío.  
palvarez@ubiobio.cl

### **ABSTRACT.**

Due to the geographical location of Chile and its physical and demographic characteristics, the whole national territory is exposed to some type of natural threat. These cause partial or total loss of the capacity of the arcs of the network, which results in a reduction in the level of service from the point of view of delays. The resilience of a transport network is the intrinsic ability to modify its behavior when it is damaged. With the study of multiple damage scenarios we can characterize changes in the service level of large cities when they lose capacity due to catastrophic events. The use of simulation tools is indispensable for the application of the proposed methodology. Finally, you can calculate the maximum demand that is able to support the network after a catastrophic event has occurred.

## **1 INTRODUCCIÓN.**

Debido a la ubicación geográfica de Chile y a sus características físicas y demográficas, todo el territorio nacional está expuesto a algún tipo de amenaza natural. Fenómenos naturales como terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas azotan al país con determinada frecuencia. Además, otras amenazas naturales como inundaciones, sequías y olas de calor ocurren cada vez más debido al calentamiento global.

Todo lo anterior hace que la infraestructura vial de Chile sea vulnerable ante daños de catástrofes naturales que la azoten, lo cual perjudica económica y socialmente a los habitantes de las zonas afectadas. Por ejemplo, el terremoto de 2010 que afectó a la octava región, generó gran impacto económico y social pues quedaron zonas aisladas, lo que dificultó la llegada de ayuda y suministros a los lugares más afectados durante las primeras horas. La investigación de Nicholson (2003) indica que luego de una catástrofe natural las redes de transporte se convierten en elementos críticos pues por ellas se movilizan suministros y ayuda a las zonas afectadas, además de los recursos necesarios para el restablecimiento de otros servicios como agua potable, electricidad, alcantarillado, etc.

Por lo tanto es necesario un estudio de vulnerabilidad de la red de transporte ante catástrofes naturales en la región de Bío-Bío, ya que posee más de dos millones de habitantes y es la segunda región que más aporta al producto interno bruto nacional. También la región del Bío-Bío es la que posee la mayor longitud de caminos nacionales, regionales y provinciales a nivel nacional y, además, se encuentra el puerto más importante del sur de Chile en Talcahuano. Finalmente, la conurbación del gran Concepción presenta la mayor concentración de habitantes de la región.

El trabajo que se presenta a continuación evalúa el efecto de la reducción de capacidad de las redes de transporte urbano de Concepción producto de catástrofes naturales.

### **1.1 Justificación**

En Chile es necesario un estudio que investigue el daño en redes de transporte producto de pérdidas considerables de capacidad (catástrofes naturales) ya que no hay estudios sobre el tema. También se justifica debido al impacto sobre el nivel de servicio que generan los eventos naturales y los costos que conllevan desde el punto de vista del aumento de las demoras.

## **1.2 Alcances del proyecto.**

Tanto la red codificada como su matriz de viaje fueron proporcionadas por la Secretaría de Transportes de la región (SECTRA). Esta tesis solo se limita a redes de transporte de grandes ciudades ya codificadas a las que no se le varió ninguna característica para obtener resultados lo más representativos posible.

## **1.3 Objetivos.**

### **1.3.1 Objetivo General.**

Evaluar el efecto de la reducción significativa de capacidad en redes de transporte producto de pérdidas significativas de capacidad.

### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Construir un modelo de tráfico para algún sistema de actividades relevante de una ciudad de Chile.
- Evaluar la sensibilidad de una red de transporte frente a la variación en la capacidad y la demanda.
- Modelar eventos focales para analizar su impacto sobre los niveles de servicio de un sistema de transporte.
- Determinar la vulnerabilidad de la infraestructura en función de sus probabilidades de daño.

## **2 ESTADO DEL ARTE.**

A continuación se muestra un resumen de la revisión bibliográfica para el desarrollo de esta memoria.

### **2.1 Vulnerabilidad.**

La vulnerabilidad de un sistema de transporte es la susceptibilidad a que los incidentes puedan resultar en reducciones considerables en la capacidad de servicio de la red de carreteras (Berdica, 2002). En esta investigación la autora sentó las bases del estudio acerca la vulnerabilidad de las carreteras, además propuso el primer método para medirla.

También Katja Berdica habla de la confiabilidad como complemento de la vulnerabilidad. La confiabilidad corresponde a la probabilidad de que un dispositivo vial realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo cuando opera en el entorno para el que se diseñó. La investigadora explica tres tipos de confiabilidad: confiabilidad de la conectividad, del tiempo de viaje y de la capacidad.

La confiabilidad de la conectividad corresponde a la probabilidad de alcanzar el destino elegido. La confiabilidad del tiempo de viaje es la probabilidad de llegar a destino dentro de un periodo de tiempo dado. Por último, la confiabilidad de capacidad es la probabilidad de que la red vial pueda servir cierta capacidad de tráfico. Adicionalmente, Berdica agrega la noción de “Capacidad de servicio aceptable o no aceptable”. Es decir, que la confiabilidad y, en particular la vulnerabilidad, son una medida del rendimiento o funcionamiento de las carreteras.

Luego, la autora propone un método para medir el nivel de servicio de un sistema de transporte.

Tabla 2.1. Medidas del nivel de servicio del sistema de transporte.

<b>Medida</b>	<b>Calculado por</b>
Tiempo de viaje, $tt$	
Precio del viaje, $tr$	$\frac{tt}{\text{largo del segmento}} = \text{velocidad}^{-1} - 1$
Precio de la demora, $dr$	$(atr - dtr) = \frac{att - dtt}{\text{largo}}$
Demoras totales	$dr * \text{personas} * \text{largo} = (att - dtt) * \text{personas}$
Precio relativo de la demora	$\frac{dr}{dtr} = \frac{atr}{dtr} - 1$
Razón de demora	$\frac{dr}{atr} = 1 - \frac{dtr}{atr}$
Velocidad de persona en movimiento, $spm$	$\text{personas} * \text{velocidad de viaje}$
Índice de movilidad de corredor	$\frac{spm}{\text{valor estandar}}$
Accesibilidad	<i>Promedio del <math>tt</math> que toma llegar a cierto lugar o porcentaje de los que llegan al lugar dentro de un tiempo especificado</i>
Viaje en congestión	$\sum \text{segmento con congestión} * \text{personas}$

Fuente: Adaptado de Berdica (2002)

Finalmente, Berdica concluye que la principal característica de un sistema de transporte es que puede servir usuarios a pesar de haber sido dañado de forma significativa.

Referente a la vulnerabilidad, Mattsson y Jenelius (2015) explica las causas de las interrupciones en una red vial urbana. Dichas alteraciones afectan el sistema de transporte y es importante saberlas para actuar con anticipación y prevenirlas, y si ocurren, mitigarlas y restaurar el normal funcionamiento de forma eficiente. Las perturbaciones sobre la red vial se producen por causas externas o internas y por acontecimientos accidentales o intencionales, tal como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Causas de perturbaciones en un sistema de transporte

Causa	Accidental	Intencional
Interna	Fallas técnicas, descuidos	
Externa	Condiciones climáticas adversas, desastres naturales	Bombas, ataques terroristas

Fuente: Adaptado de Mattsson y Jenelius (2015)

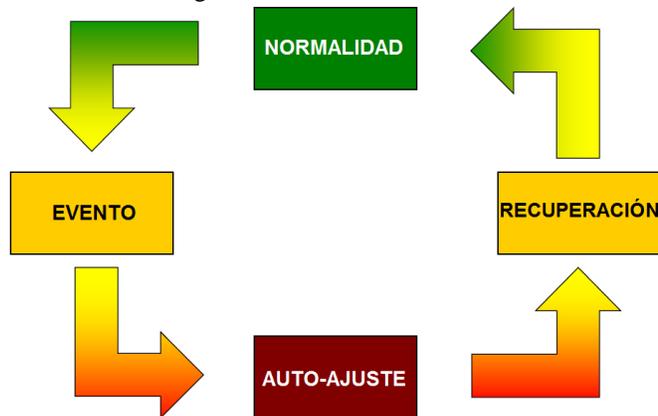
Luego los autores hablan de los impactos que producen estas perturbaciones sobre el sistema de transporte. Las consecuencias son accidentes, infraestructura colapsada y los ataques terroristas producen lesiones y muertes directa o indirectamente. También existen interrupciones que ocurren cotidianamente que tienen impacto menos grave, por ejemplo, enlace de carretera bloqueado, algunos trenes tienen que parar o vuelos que se cancelan. Este tipo de eventos aumenta el tiempo de viaje y los tiempos de entrega de bienes y provisiones. Es decir, que las interrupciones un sistema de transporte aumenta los costos económicos directos y sociales.

Finalmente, se citará el trabajo de David Wang (2016). El autor propone una formulación para identificar la combinación más crítica de enlaces vulnerables de una red de transporte, es decir, los arcos que maximizan los costos por viaje. Los resultados de las pruebas numéricas demuestran que la función tiempo de viaje y el nivel de demanda afectarán significativamente la vulnerabilidad de los enlaces de la red. También es interesante observar que los resultados más desfavorables, cuando los costos son máximos, no es necesariamente cuando se unen los enlaces más vulnerables. Además, los arcos más vulnerables no están necesariamente próximos unos de otros.

## 2.2 Resiliencia.

La habilidad del sistema de transporte para mantener determinado nivel de servicio o para restaurar por sí mismo dicho nivel del servicio en un periodo de tiempo se denomina resiliencia (Heaslip et al., 2009). El concepto de resiliencia lo estudia Urena (2010). El autor comienza exponiendo definiciones de resiliencia de distintos investigadores, inmediatamente explica el cálculo del índice de resiliencia y posteriormente los distintos métodos para calcularla de forma cuantitativa. Luego Urena explica el Ciclo de Resiliencia, el cual tiene cabida cuando ocurren perturbaciones en el funcionamiento del sistema de transporte terrestre y consta de cuatro etapas: normalidad, evento (ocurrencia), auto-ajuste y recuperación. Luego de que el sistema de transporte se recupera vuelve a la normalidad. La siguiente figura muestra el ciclo de resiliencia.

Figura 2.1. Ciclo de resiliencia

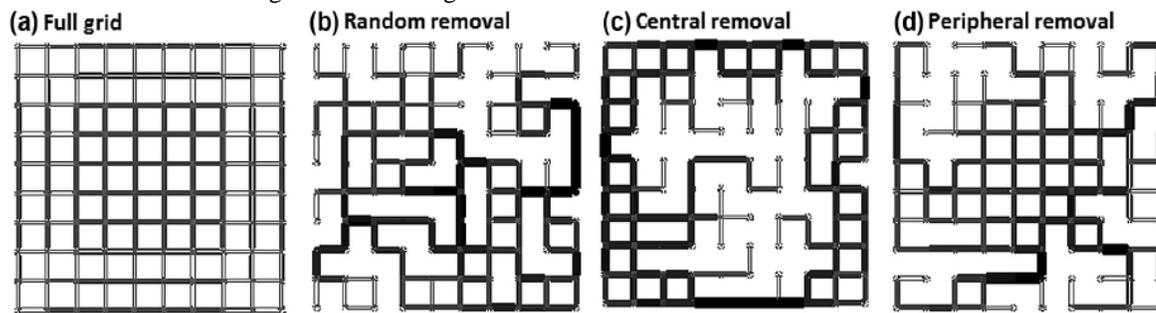


Fuente: Adaptada de Urena (2010)

Para ejemplificar el concepto anterior, se citará la investigación de Ortigosa y Menendez (2014) en donde se aprecian las variaciones del nivel de servicio producto de perturbaciones en la infraestructura vial del sistema de transporte.

El estudio de Ortigosa y Menendez (2014) tiene por objetivo comprender mejor la eliminación de espacios en el área urbana y evaluar cómo afecta esta eliminación a los conductores y al sistema. Para tal fin, se elaboró una red rectangular ficticia compuesta por 100 nodos los cuales se unen con arcos bidireccionales. Luego se fueron eliminando nodos de tres maneras diferentes: al azar, del centro de la grilla y de la periferia de la grilla. Se realizaron 60 iteraciones utilizando cada estrategia hasta eliminar un 30% de los nodos del total de la red ficticia y se midió el nivel de servicio para cada iteración.

Figura 2.2. Estrategia de eliminación de nodos de la red ficticia



Fuente: Ortigosa y Menendes (2014)

Dicha investigación arrojó las siguientes conclusiones:

- La manera en que se eliminaron nodos influye sobre los resultados. La eliminación de un 25% de los nodos del centro de la red elevó el tiempo de viaje 15 veces, mientras que eliminando el 25% de los nodos periféricos el tiempo de viaje apenas se ve alterado.
- Las intersecciones son puntos críticos de la red, ya que sobresaturándolas se generaron atrasos que afectaron de manera significativa a la grilla.
- Mientras más rutas alternativas hayan disponibles, menor será el impacto sobre el nivel de servicio de la red de transporte urbano.

Mattsson y Jenelius (2015) estudian profundamente el concepto de resiliencia y vulnerabilidad del sistema de transporte. Reggiani (2013) estudia la relación metodológica entre la resiliencia de la red y la seguridad del transporte y subraya la conexión entre la estructura topológica de una red y su capacidad de recuperación. La capacidad de recuperación de una red de transporte urbano comienza a estudiar Holling (1973). Rose (2007) agrega el concepto de Resiliencia Ecológica, que corresponde a la capacidad de un sistema de mantener su funcionamiento. J. Wang (2014), a la definición anterior, añade “una capacidad para predecir y evaluar el daño de las posibles interrupciones”. Por último, Pimm (1984) se refiere a la rapidez con la que el sistema vuelve al equilibrio después de un choque.

### **2.3 Evento Catastrófico.**

Recientes eventos sísmicos han afectado la octava región y el resto del mundo. Estos movimientos tectónicos dañan la red de transporte reduciendo su capacidad vial, afectando la respuesta ante emergencias, provocando aislamiento de algunas zonas y demora en la llegada de suministros y ayuda a los lugares mencionados.

Nicholson (2003) estudia impacto físico en las redes de transporte de L´Aquila, Italia producto de un terremoto. El autor analiza y discute distintos modelos para evaluar el impacto de los eventos sísmicos en las redes de transporte y así mejorar la gestión de emergencias, respuesta y recuperación después de un evento sísmico. También se identifican dos tipos de impactos sobre la red de transporte durante terremotos, directos e indirectos. Los impactos directos son los que afectan las autopistas, carreteras y accesos, en cambio los impactos indirectos son causados por escombros de edificios y estructuras siniestradas adyacentes a la red vial urbana. Finalmente se llega a la conclusión que una buena gestión de emergencia, traslado de ayuda y personal a las zonas dañadas post terremoto depende de la pronta restauración del sistema de transporte.

En esta memoria se mostrará solo el Modelo de Demanda de Tráfico de Cuatro Pasos pues Nicholson (2003) asegura que es el mejor método que representa el comportamiento de las personas y la variación de la demanda del sistema de transporte post terremoto. Dicho modelo se presentó en el trabajo de Ortuzar y Willumsen (1994) con el objetivo de predecir cambios en el hábito de transporte de los usuarios luego de haber ocurrido un movimiento tectónico. El modelo de cuatro pasos estudia: 1) la generación de viajes; 2) la distribución espacial y temporal de viajes; 3) la elección del modo de transporte; 4) la elección de la ruta.

En cuanto a la generación de viajes después de un terremoto, estos pueden aumentar o disminuir en determinadas zonas. Con relación a la distribución espacial y temporal de viajes estos se pueden realizar desde/hacia nuevos orígenes/destinos, o en distintos momentos del día, debido a:

1. Daño en edificios, viviendas o servicios públicos (escuelas, hospitales, etc.).
2. Evacuación de personas a albergues o alojamientos temporales. Reencuentro de familiares.
3. Aumento de viajes por la necesidad de acceder a servicios de emergencia como hospitales o centros médicos.
4. Necesidad de transportar recursos físicos y humanos hacia las zonas afectadas por parte del personal de rescate.
5. El deseo de la gente de abandonar la zona de riesgo.

En cuanto a la elección de modo de transporte, es necesario considerar cómo se efectuarán los viajes post catástrofe. Los autores señalan que en estas situaciones se debería potenciar el uso de transporte público por sobre el vehículo particular y así disminuir la demanda. Por ejemplo, tras el terremoto de L'Aquila el transporte público era gratuito en la ciudad.

Existen cambios en la elección de la ruta de viaje en una catástrofe, pues se elegirán los caminos que no padezcan destrozos y permitan llegar a destino. Posterior a un terremoto de gran magnitud, se espera que el objetivo principal de los usuarios sea la comunicación con familiares y amigos, además de los viajes de emergencia y por ayuda.

Bell e Iida (1997) sostienen que la confiabilidad se mide como el grado de estabilidad de la calidad del servicio del sistema de transporte. Cuando ocurre un evento inesperado como un terremoto, la calidad de servicio prestado debe ser juzgada con respecto a la capacidad de gestionar eficazmente viajes de emergencia. La red vial debe ser capaz de funcionar durante estos periodos de emergencia y permitir el acceso a las zonas afectada.

Sanchez-Silva (2001) estudia la conectividad y la confiabilidad del tiempo de viaje cuando ocurren eventos catastróficos. El autor define la conectividad como la probabilidad de que los nodos de la red permanezcan conectados. En cambio, la confiabilidad del tiempo de viaje es la probabilidad de llegar a destino en un tiempo inferior a un valor umbral.

Finalmente se mostrará el trabajo de Omer (2011) pues investigó un tipo de evento catastrófico que se tratará de reproducir en la etapa metodológica de la presente memoria. El autor estudió cómo afectan las nevazones e inundaciones la red vial urbana de Manhattan, las que produjeron disminución en el nivel de servicio del sistema de transporte.

### 3 MARCO TEÓRICO.

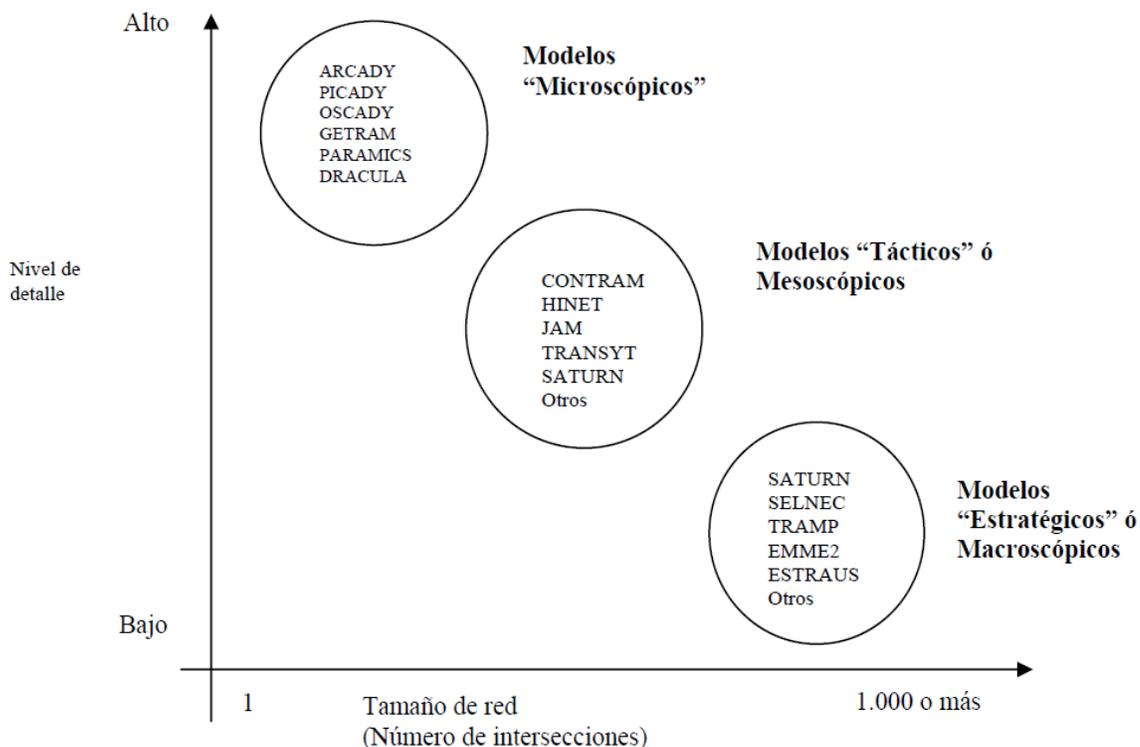
A continuación se definen algunos conceptos importantes para entender la memoria.

#### 3.1 Modelos de Transporte.

Los modelos de transporte han sido desarrollados para determinar los cambios en el sistema de transporte producto de variaciones en la oferta y/o demanda, evitando que las decisiones sean tomadas de manera intuitiva. También, los simuladores de redes viales son programas útiles para realizar predicciones del comportamiento operacional de las calles ante distintos escenarios o situaciones y permiten visualizar problemas complejos de la red vial y buscar soluciones con rapidez y eficacia.

Los modelos de transporte se clasifican en Microscópicos, Mesoscópicos y Macroscópicos, tal como se muestra en la Figura 3.1. La elección de uno de ellos depende de la magnitud de la red a modelar, del número de intersecciones y del nivel de detalle de la modelación.

Figura 3.1. Elección de modelos de tráfico



Fuente: Manual de Saturn

**Modelos Microscópicos:** Simulan el movimiento de vehículos de forma individual basado en los modelos de lane-changing y car-following.

**Modelos Mesoscópicos:** Utilizan interacciones entre las propiedades de los modelos de simulación, tanto microscópicos y macroscópicos, como en los modelos microscópicos los vehículos son modelados individualmente, sin embargo, los movimientos de los vehículos se modelan mediante la utilización de modelos macroscópicos.

**Modelos Macroscópicos:** Están basado en relaciones determinísticas de flujo, velocidad y densidad, son caracterizados por redes “pequeñas” de entre 50 y 150 intersecciones y que requieren un detallado análisis de la codificación de ellas.

En la presente memoria se utilizarán modelos de tráfico macroscópicos, debido al gran número de intersecciones que presenta la red de Concepción y al nivel de detalle bajo que se requieren los resultados. Específicamente se ocupará el Modelo Saturn pues es el más ocupado en Chile y es el que usa la Secretaría de Transporte (SECTRA).

### **3.2 Modelo SATURN.**

El modelo llamado Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks (SATURN) trata de reflejar un conjunto de vías y el comportamiento vehicular. SATURN modela una red de nodos unidos por arcos con su respectiva matriz de viajes. Asimismo, SATURN dispone de un grupo de programas interrelacionados dentro del modelo llamados submodelos.

#### **3.2.1 Submodelo de Asignación.**

SATURN ocupa el 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.

El procedimiento usado por SATURN se basa en el principio de Wardrop de Equilibrio de Tráfico que se puede resumir en las siguientes palabras: “los conductores elegirán entre cada par O/D, en equilibrio, tal que el costo generalizado de viaje de todas las rutas usadas deben ser iguales y mínimas”. Si para un par AB existe más de una ruta, el submodelo determinará la proporción del total de movimientos entre A y B que usa cada una de las rutas.

Para realizar el principio de Wardrop, SATURN se basa en el algoritmo de Frank Wolfe que pretende minimizar la siguiente función objetivo:

$$Z(n) = \sum_a \int_0^{V_a(n)} C_a(x) dx$$

Donde  $C_a(x)$  es el costo del arco “a” en función de un conjunto de flujos “x”.

### 3.2.2 Submodelo de Simulación.

La función del submodelo de simulación es calcular las demoras obtenidas para una cierta ruta especificada por el submodelo de asignación.

La ecuación de la curva flujo-demora es de la siguiente forma:

$$t = t_o + av^n \quad v \leq c$$

$$t = t_o + ac^n + b\left(\frac{v}{c} - 1\right) \quad v \geq c$$

Donde  $t_o$  = tiempo de viaje a flujo libre (hra)

$v$  = flujo en pcu/hra

$c$  = capacidad del arco en pcu/hra

$b$  = constante interna del programa y es igual a la mitad del periodo de tiempo a ser modelado (hra)

### 3.3 Capacidad

El concepto de capacidad vial se refiere al máximo número de vehículos por unidad de tiempo que puede pasar por una sección de una vía, bajo las condiciones prevalecientes de tráfico (Fernández, 2008).

En cuanto al control de intersecciones, la capacidad vial se define como el máximo flujo vehicular que el dispositivo analizado permite evacuar. En consecuencia, la capacidad dependerá del tipo de regulación existente y del propio dispositivo analizado, no siendo una constante universal para la gestión de tránsito (Fernández, 2014).

### 3.4 Ciudades de Gran Tamaño

De acuerdo a la Metodología para el Análisis de Sistemas de Transporte en Grandes Ciudades y Ciudades de Tamaño Medio (MESPE, 2008) se entiende por ciudades de gran tamaño aquellas

con una población superior a 500.000 habitantes y cuyo sistema de transporte urbano está afecto a niveles de congestión importantes.

### 3.5 Grado de Saturación.

Corresponde a la razón entre el flujo y la capacidad. Si se piensa en el flujo como la demanda por usar un dispositivo vial y en la capacidad como la oferta de atención que provee tal dispositivo, el grado de saturación muestra el entre oferta vial y demanda de tráfico.

$$x = \frac{\text{Demanda de tráfico}}{\text{Oferta vial}} = \frac{q}{Q}$$

### 3.6 Factor de Aumento de las Demoras (FAD).

El FAD corresponde al cociente entre la demora en la red con un porcentaje de daño y la demora de la red en la situación base.

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

### 3.7 Simulación de Monte Carlo.

Según a Law y Kelton (1991) la simulación de Monte Carlo es un esquema de análisis que emplea números aleatorios, los que distribuyen de acuerdo a una función de densidad de probabilidad uniforme entre 0 y 1, para ser usados en la solución de ciertos problemas estocásticos o determinísticos donde el paso del tiempo no juega un rol substancial.

Por ejemplo, supongamos que se quiere evaluar la siguiente integral:

$$I = \int_a^b g(x)dx$$

Donde  $(x)$  es una función que no es integrable analíticamente. En la práctica, la simulación de Montecarlo no suele ser utilizada para evaluar una sola integral, puesto que en ese caso es más eficiente el uso de algún método numérico, resultando más útil en la resolución de problemas con múltiples integrales. Para ver cómo este problema determinístico puede aproximarse con la simulación de Montecarlo, diremos que  $Y$  es una variable aleatoria que puede ser expresada a través de  $(b-a)g(X)$ , donde  $X$  es una variable aleatoria continua que distribuye uniformemente en

el intervalo  $[a,b]$  que será denotada por la expresión  $U(a,b)$ . Se tiene entonces que el valor esperado de  $Y$  corresponde a:

$$E(Y) = E[(b - a)g(X)]$$

$$E(Y) = (b - a)E[g(X)]$$

$$E(Y) = (b - a) \int_a^b g(x)f_x(x)dx$$

$$E(Y) = (b - a) \int_a^b \frac{g(x)dx}{(b - a)}$$

$$E(Y) = I$$

Donde  $f(x)=1/(b-a)$  es la función densidad de probabilidad de  $(a, b)$ . La expresión que permite estimar la esperanza de  $Y$  corresponde a la siguiente:

$$\bar{Y}(n) = \frac{\sum_1^n Y_i}{n} = (b - a) \frac{\sum_1^n g(X_i)}{n}$$

## **4 METODOLOGÍA.**

Luego de obtener la red codificada de Concepción con su respectiva matriz de viajes proporcionada por el SECTRA, se procedió con los siguientes pasos:

1. Elección de un modelo de tráfico.
2. Definición de la estrategia de daño de acuerdo con las herramientas metodológicas e información disponible.
3. Simular las variaciones del Nivel de Servicio producto a la pérdida de Capacidad.
4. Calcular el FAD para cada caso.
5. Obtener la demanda máxima para cada caso considerando un valor FAD máximo.
6. Análisis del Nivel de Servicio de acuerdo a los resultados entregados por la modelación

### **4.1 Elección de un modelo de tráfico**

Para esta memoria se eligió un modelo Macroscópico debido al alto número de intersecciones y al nivel bajo de detalle. Más específicamente se eligió el software SATURN descrito en el punto 3.2, debido a que es el software que ocupa el SECTRA y en el cual estaban codificadas las redes.

### **4.2 Simulación**

Luego de una catástrofe natural la red de transporte de alguna ciudad chilena de gran tamaño pierde capacidad. Esta reducción depende de la naturaleza y magnitud del evento, además de las características topológicas, demográficas y estructurales de la ciudad.

Por ejemplo, en inundaciones los arcos más afectados de la red son aquellos que poseen una cota más baja. En erupciones volcánicas e incendios las zonas más perjudicadas son aquellas más cercanas al foco. En cambio, el daño que provoca un terremoto es difícil de predecir ya que no se sabe que arcos dañará.

Las variaciones en el nivel de servicio de un sistema de transporte producto de pérdidas considerables de capacidad resultan costosas, por lo que se vuelve necesario simular los efectos que producen dichos eventos catastróficos.

Por lo tanto, para esta memoria se decidió utilizar la simulación de Monte Carlo para determinar los arcos a los que se le reducirá considerablemente su capacidad. Para el análisis se ocupará la totalidad de arcos de la red codificada de Concepción.

### **4.3 Aplicación de Daño.**

#### **4.3.1 Estrategia de Daño.**

La estrategia de daño es la forma lógica en que se distribuirá el daño sobre la red codificada. Para esta tesis se decidió por una estrategia de daño aleatoria uniforme sobre la red, es decir, que todos los arcos tienen la misma probabilidad de ser dañados.

Además, el daño sobre el arco corresponde a la restricción del 70% de su capacidad, dejando un 30% de capacidad remanente. Con ello se asegura un daño significativo sobre la red y que SATURN contabilice la totalidad de la demanda.

#### **4.3.2 Niveles de Daño.**

Los niveles de daño corresponden al porcentaje de los arcos de la red a los que se le afectará significativamente capacidad. Para esta memoria se eligieron cinco niveles de daño: 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de los arcos. Se dañó hasta un 25% de red pues se siguió con la metodología de tesis anteriores.

#### **4.3.3 Escenarios de Daño.**

Los escenarios de daño son las combinaciones aleatorias de arcos a los que se le reducirá significativamente se capacidad. Para este estudio, y siguiendo con la metodología de memorias previas, se eligieron 20 escenarios de daño. Cada escenario es un caso de estudio y tiene los cinco niveles de daño expuestos en el punto anterior. Además el daño es acumulativo, por ejemplo, para el escenario  $n$  el daño del 10% equivale al daño del 5% más otro 5% de arcos afectados.

### **4.4 Simulación de las variaciones del Nivel de Servicio producto a la pérdida de Capacidad.**

Una vez que se determinaron los escenarios de estudio con sus respectivos niveles de daño, se correrán con la matriz de viaje y red codificada en el software SATURN. De los resultados obtenidos, se ocupará el tiempo de viaje (demoras) para seguir con el análisis.

#### 4.5 Casos de Estudio.

**Caso 1.** Se disminuirá la capacidad en un 70% de los arcos elegidos por simulación de Monte Carlo, a todos los escenarios con sus respectivos niveles de daño. Para este caso se ocupará la matriz de viaje original.

**Caso 2.** Se disminuirá la capacidad en un 70% a los mismos arcos elegidos en el caso 1, pero para este caso se ocupará la matriz de viaje aumentada 1,5 veces.

**Caso 3.** Se determinará la demanda máxima que es capaz de soportar la red para un nivel de servicio máximo.

#### 4.6 Calculo del FAD.

Una vez que se obtienen los valores de tiempo de viaje, para todos los escenarios y niveles de daño, se procede a compararlos con la demora de la situación base y con la matriz de viaje original. El FAD se calcula como se indica en el punto 3.6.

#### 4.7 Demanda Máxima.

Posteriormente se calculará la demanda máxima que es capaz de soportar la red considerando un nivel de servicio máximo impuesto, para esta tesis se ocupará un  $FAD_{m\acute{a}x} = 2$  y un  $FAD_{m\acute{a}x} = 4$ . En otras palabras, se buscará el porcentaje de la matriz de viajes de tal manera de que los usuarios de demoren como máximo el doble (Caso  $FAD_{m\acute{a}x} = 2$ ) y el cuádruple (Caso  $FAD_{m\acute{a}x} = 4$ ). De esta manera se pueden tomar decisiones desde el punto de vista de la gestión de tráfico una vez ocurrido un evento catastrófico. Para esta parte solo se ocupará el caso 1 de los casos de estudio.

#### 4.8 Análisis del Nivel de Servicio.

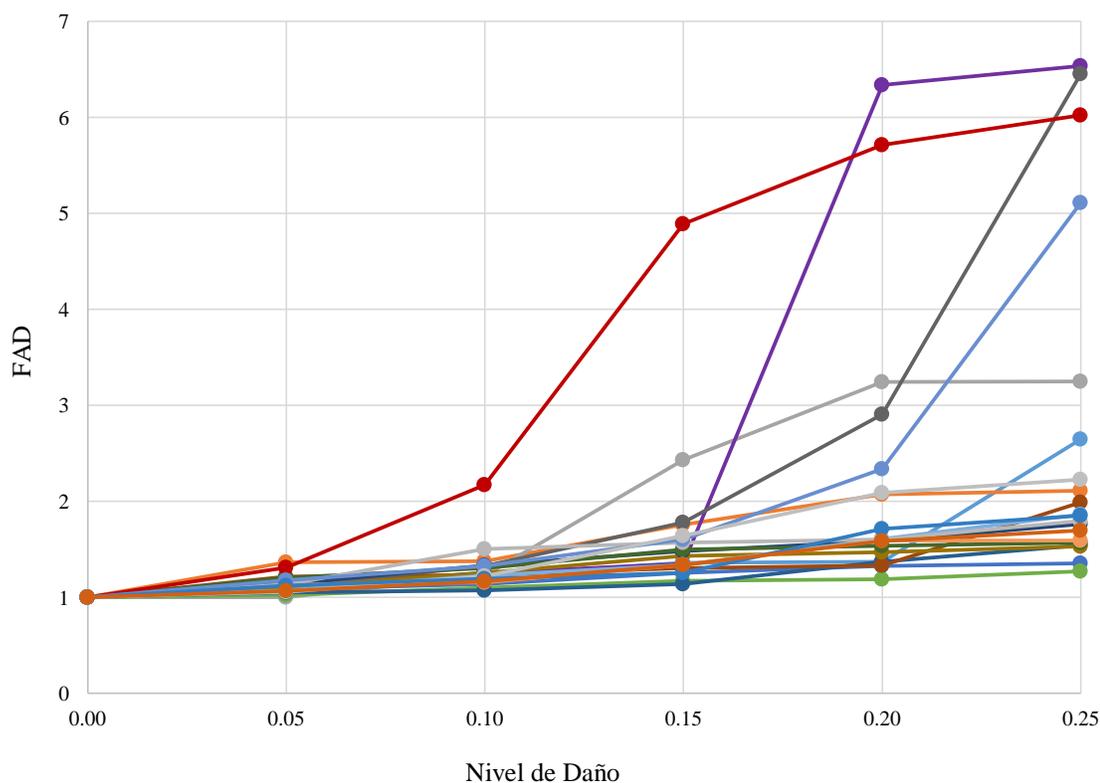
Posteriormente se analizarán los resultados obtenidos y se sacarán las conclusiones.

## 5 RESULTADOS.

A continuación se muestran los resultados tras haber aplicado la metodología anteriormente expuesta sobre la red de Concepción. Se mostrará las variaciones en el nivel de servicio producto de pérdidas considerables de capacidad para los veinte escenarios, con sus respectivos niveles de daño, para los tres casos de estudio. La medida que se utilizó para mostrar estas fluctuaciones fue el Factor de Aumento de la Demora.

Primero que todo, se comenzará exponiendo en la Figura 5.1 los veinte escenarios de daño, que ahora pasan a llamarse Trayectorias de Daño.

Figura 5.1. Trayectorias de daño.



Fuente. Elaboración propia.

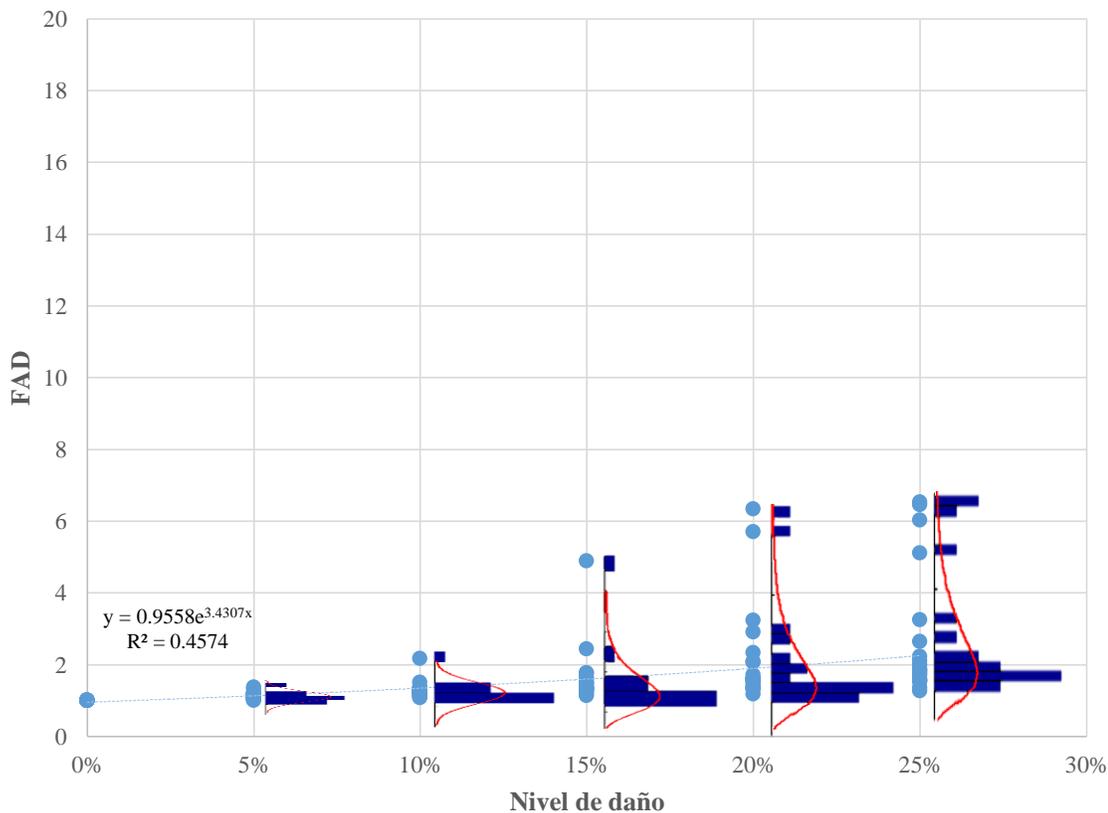
Se puede apreciar, que a medida que aumenta el daño sobre la red también aumenta los valores de FAD producto de la reducción del 70% de la capacidad de los arcos seleccionados.

Para el nivel de daño del 5% todas las trayectorias presentan un comportamiento similar en cuanto a los valores del FAD, los cuales bordean entre 1 y 1,5. Luego, la trayectoria 16 (color rojo) es la que presenta los mayores valores de FAD para los niveles de daño de 10% y 15% con

2,17 y 4,89 respectivamente. Finalmente, la trayectoria 4 (color morado) es la que presenta los mayores valores de FAD para los niveles de daño de 20% y 25% con 6,34 y 6,54 respectivamente.

La Figura 5.2 muestra los resultados del caso 1 de estudio, cuando se reduce la capacidad en un 70% de los arcos elegidos aleatoriamente.

Figura 5.2. FAD vs Nivel de Daño. Caso 1.



Fuente. Elaboración propia

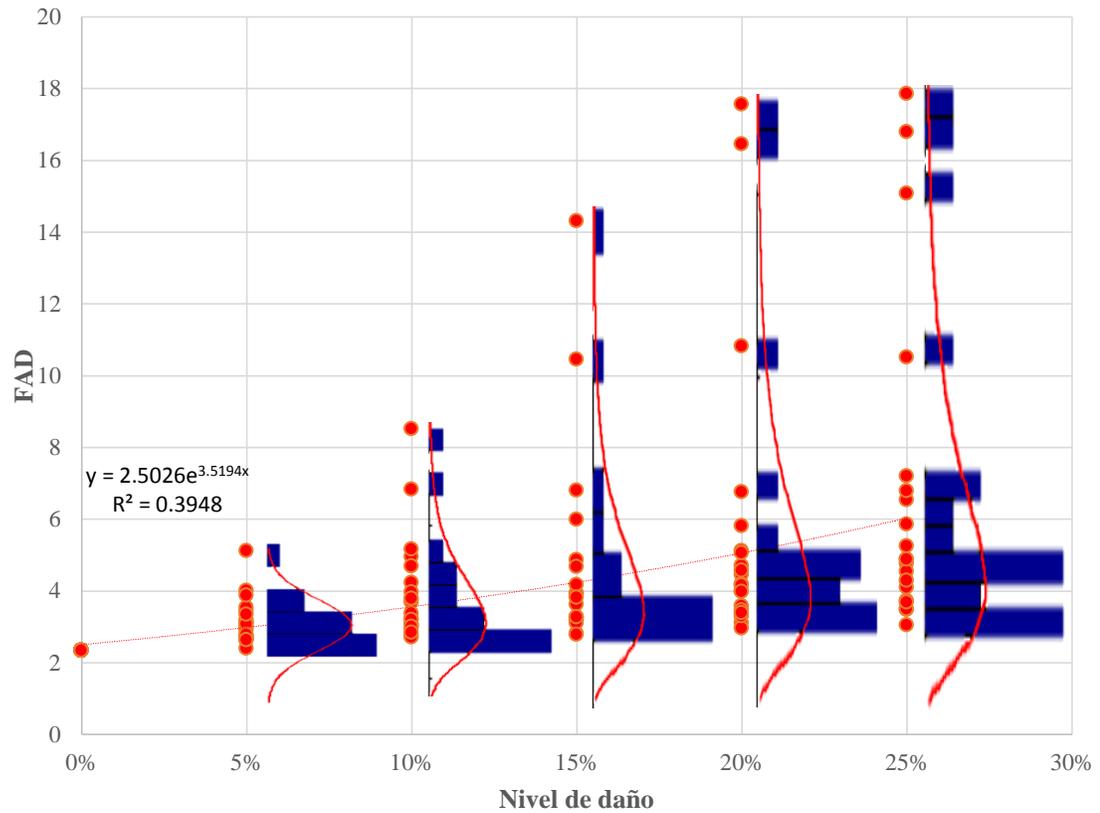
A los datos se les ajustó una línea de tendencia exponencial, la cual concentra la mayor cantidad de los datos para los niveles de daño de 5% y 10% pero que no se ajusta para los niveles de 15% de daño y superiores. Por ejemplo, cuando el daño es 25% los FAD varían entre 1,27 y 6,54.

Además se puede apreciar que a medida que aumenta el nivel de daño también aumentan los valores de los FAD producto del daño sobre la red.

Finalmente se puede ver que a medida que aumenta el nivel de daño la dispersión de los datos igual aumenta debido a la variabilidad en la respuesta del sistema.

La Figura 5.3 muestra los resultados del caso 2 de estudio, cuando se reduce la capacidad en un 70% de los arcos elegidos aleatoriamente pero con un aumento en la matriz de viaje de un 50%.

Figura 5.3. FAD vs Nivel de Daño. Caso 2.



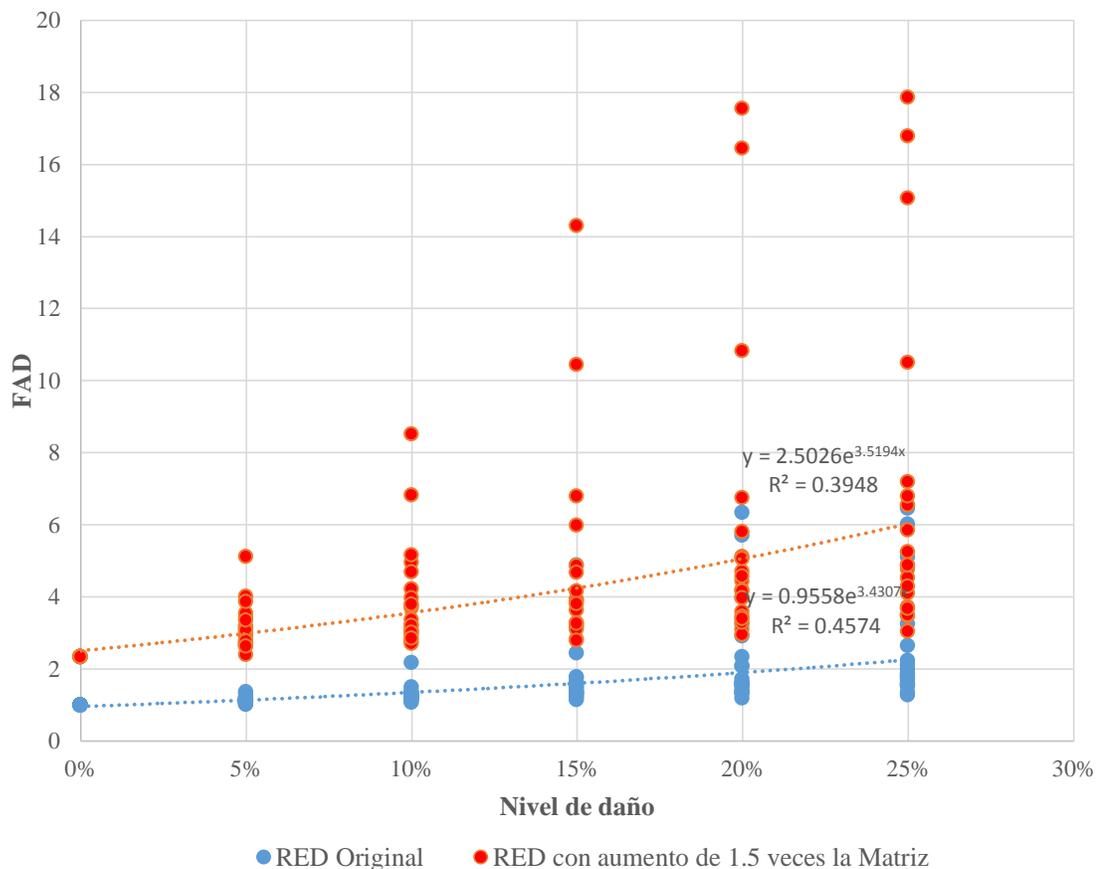
Fuente. Elaboración propia

Se puede ver que a medida que aumenta del nivel de daño también aumenta la dispersión de los datos producto a la variabilidad de respuesta del sistema.

Igualmente, a medida que aumenta el nivel de daño aumentan los valores de los FAD debido al porcentaje de arcos dañados.

A continuación, en la Figura 5.4 se comparan los dos casos anteriores.

Figura 5.4. FAD vs Nivel de Daño. Comparación.

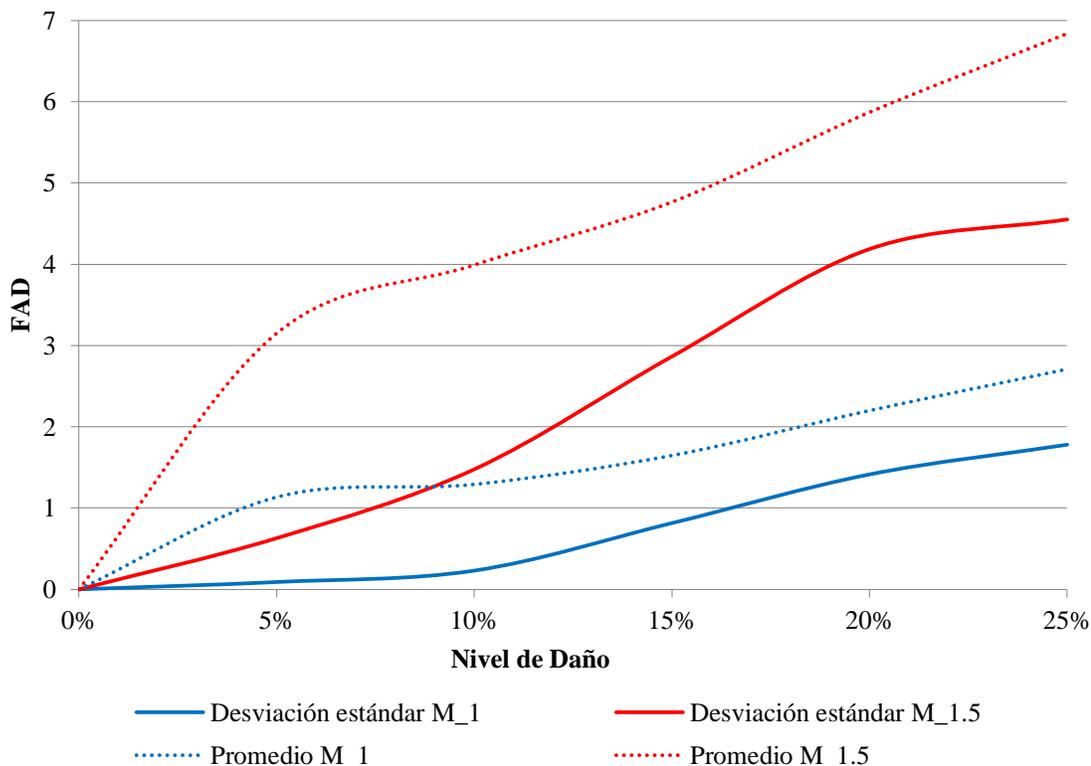


Fuente. Elaboración propia

En el gráfico se observa que el caso de la matriz de viaje aumentada 1,5 veces presenta mayores valores de FAD producto del mayor número de viajes en el sistema. También la dispersión se acrecienta cuando aumenta el nivel de daño debido a lo anterior.

La Figura 5.5 muestra la desviación estándar y el promedio de los dos casos anteriores.

Figura 5.5. Desviación Estándar.



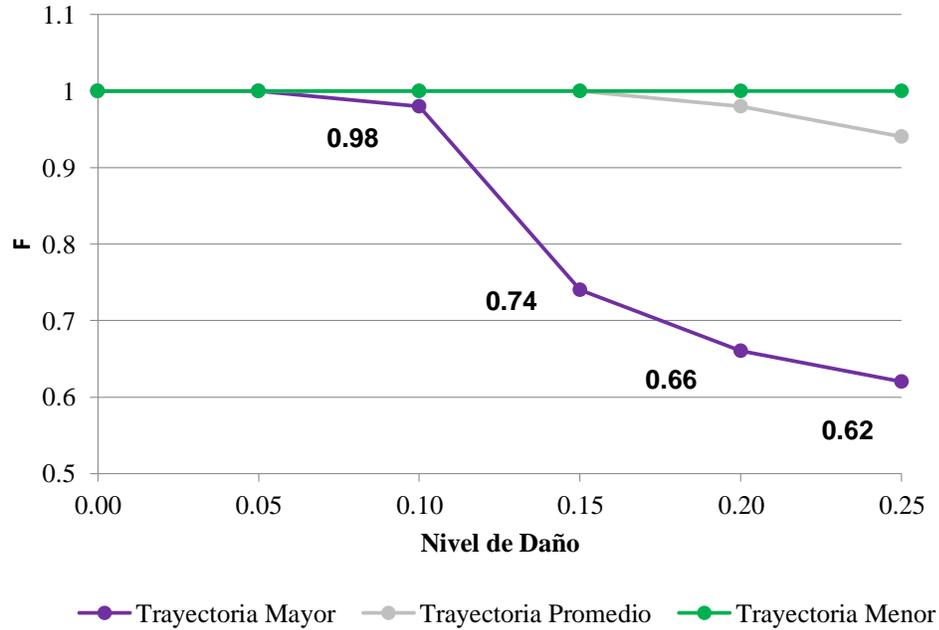
Fuente. Elaboración propia

Se puede apreciar que hasta el nivel de daño 20% ambos casos presentan un comportamiento exponencial similar, lo cual es parecido a los estudios de memorias anteriores en ciudades de tamaño medio. Sin embargo, de ahí en adelante la desviación estándar se estabiliza producto que este estudio se realizó en una ciudad de gran tamaño, donde la red es más compleja y hay más posibilidades de rutas.

A continuación se muestran los resultados del Caso 3 de estudio, en donde se calculó la máxima demanda de la red.

La Figura 5.6 muestra la máxima demanda que es capaz de soportar la red para que el máximo FAD sea igual a 2. Se eligieron tres trayectorias representativas del total, la trayectoria menor, promedio y mayor (Ver Anexo 2). El factor “F” representa el porcentaje de la matriz para que se cumpla con el valor de FAD.

Figura 5.6. F vs Nivel de Daño para un FAD máx. = 2



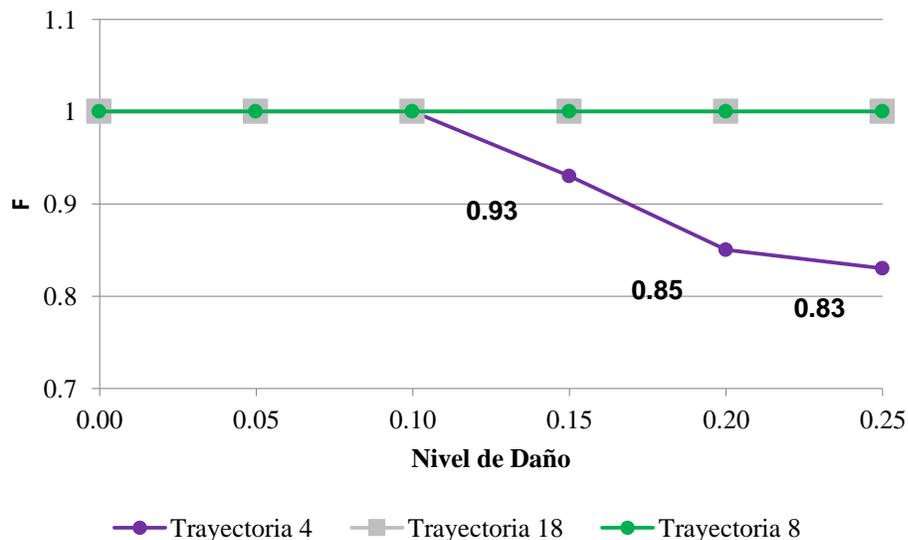
Fuente. Elaboración propia

Los valores de F de la trayectoria menor y promedio son muy cercanos a 1, por lo tanto no es relevante su análisis. En cambio, para la trayectoria mayor, se observa que cuando el daño es 15%, 20% y 25% el valor de F es 0,74; 0,66 y 0,62 respectivamente. Es decir, que cuando en Concepción hay un daño del 20% tiene que circular un 66% de la matriz de viaje para que los usuarios se demoren como máximo el doble. Otra lectura puede ser la siguiente: cuando el daño es de un 25% sobre la red, se necesita restringir un 38% de los viajes para que los usuarios se demoren como máximo el doble.

Estos datos son muy importantes para la gestión del tráfico cuando ha ocurrido una catástrofe natural.

La Figura 5.7 muestra la máxima demanda que es capaz de soportar la red para que el máximo FAD sea igual a 4 utilizando las mismas trayectorias del caso anterior.

Figura 5.7. F vs Nivel de Daño para un FAD máx. = 4



Fuente. Elaboración propia

Para este gráfico el análisis es el mismo que para el caso anterior: cuando el daño es de un 20% de la red se necesita restringir un 15% de los viajes para que los usuarios se demoren como máximo cuatro veces más que la situación base.

No se recomienda utilizar estos resultados para tomar decisiones de gestión de tránsito pues aumenta la percepción de catástrofe por parte del usuario al demorarse cuatro veces de lo que se demora normalmente. En su lugar se recomienda utilizar los resultados cuando el FAD máximo es 2 ya que es una aumento de tiempos de viaje permisible.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se aplicó la metodología estudiada en las memorias de Juan Silva (2016) y María Herrera (2016) sobre la red de transporte de Concepción con modificaciones. Las tesis anteriores crearon una metodología basada en una red vial estructurante ficticia que representaba las características de las ciudades chilenas de tamaño medio, en cambio, en esta memoria se aplicó dicha metodología en una ciudad de gran tamaño. La principal diferencia fue que la capacidad del arco afectado se redujo en un 70% dejando un 30% de capacidad remanente, en los estudios previos se restringía completamente los movimientos del arco dañado.

En esta memoria los efectos globales que dañaban la red fueron representados por pérdidas considerables de capacidad como se explicó anteriormente. Los escenarios y niveles de daño se determinaron con la simulación de Monte Carlo de manera completamente aleatoria, es decir, que todos los arcos tenían la misma posibilidad de ser afectados.

La metodología permitió estimar los cambios en el nivel de servicio producto de eventos catastróficos, representando para cada escenario de estudio distintos niveles de daño que reflejaban una disminución considerable de capacidad para los arcos dañados. Tras analizar los resultados se pudo observar que a medida que aumentaba el nivel de daño sobre la red aumentaban los valores de los FAD producto de la reducción de capacidad de los arcos afectados. También se pudo apreciar que a medida que aumenta el daño sobre la red aumenta la dispersión de los datos, debido a la variabilidad de respuesta del sistema de transporte de Concepción.

Este comportamiento se reflejó tanto para el caso de estudio con la matriz original como para el caso que amplificó 1,5 veces los viajes. Para este último caso el incremento de los FAD fue aún mayor debido al mayor número de viajes sobre el sistema y a que no se modificó la red codificada.

Se observó que la desviación estándar y la media aumentaron a medida que aumentaban los niveles de daño. Es evidente que aumente el promedio ya que la disminución de capacidad genera una mayor congestión y con ello aumentan los tiempos de viaje. La desviación estándar aumentó exponencialmente hasta el 20% de daño, de manera similar a las memorias anteriores. Sin embargo, de ahí en adelante tendió a estabilizarse debido a lo compleja de la red que significa una ciudad de gran tamaño como lo es Concepción.

Luego se determinó la máxima demanda que puede soportar la red para dos niveles de servicio definidos. Se obtuvo el porcentaje de la matriz de viaje que puede circular en Concepción cuando

hay daño sobre la red de tal manera que los usuarios se demoren como máximo el doble. Después se realizó el mismo análisis pero para que se demoren como máximo cuatro veces más.

Finalmente se determinó que hay combinaciones de arcos que son más sensibles que otras ante una reducción de capacidad. Para este estudio, la Rotonda Bonilla y Av. Los Carreras fueron los puntos que provocaron un mayor aumento en el nivel de servicio con respecto a los demás arcos de la red. Esta información es muy importante ya que se pueden tomar medidas de mitigación, desde el punto de vista de la gestión, cuando ocurra un evento catastrófico en Concepción.

Como recomendaciones para futuros estudios se sugiere aplicar esta metodología modificada a ciudades chilenas de tamaño medio para determinar los efectos de la reducción de capacidad en sus redes. También sería interesante observar que sucede más allá del 25% de daño y cómo se comportan las curvas de FAD vs Nivel de Daño.

Por último se sugiere ampliar el área de estudio de Concepción, agregando zonas de San Pedro, Chiguayante, Talcahuano y Penco.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

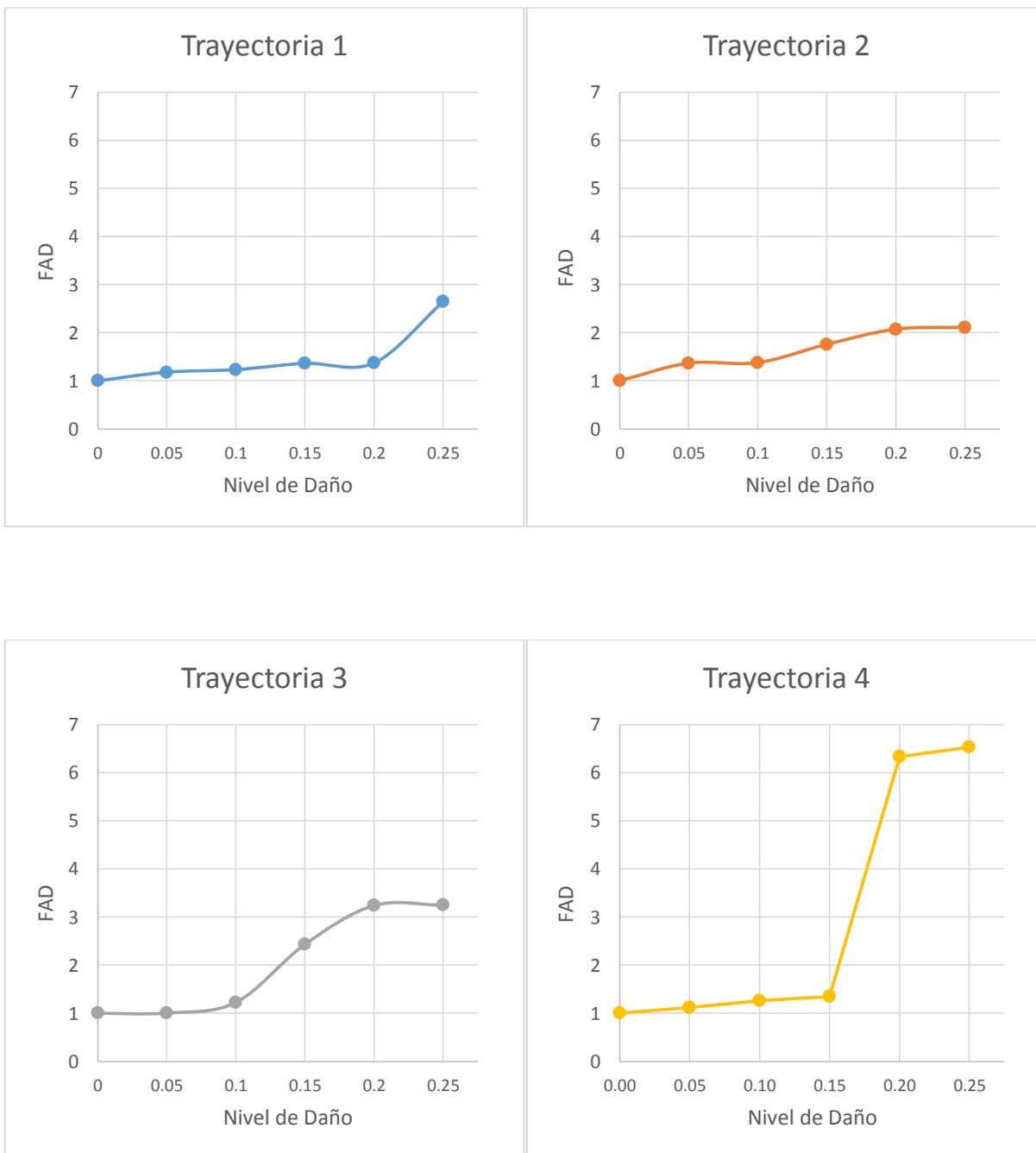
- Berdica, K. (2002). An Introduction to the road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9, 117-127.
- Bell, M. G. H., and Iida, Y. (1997). *Transportation network analysis*, Wiley, Chichester, U.K.
- David Wang, H. Liu, W. Y. Szeto & A. Chow (2016). *Identification of critical combination of vulnerable links in transportation networks – a global optimisation approach*. *Transportmetrica A: transport science*, 2016, vol. 12, no. 4, 346–365.
- Heaslip, K., Louisell, W., Collura, J., & Urena Serulle, N.(2010). An evaluation of network transportation resiliency for disasters and other events. *89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. TRB, Washington, D.C.
- Herrera Rojas, María Francisca, Evaluación de los cambios en el Nivel de servicio de redes de transporte urbano producto de eventos catastróficos, Concepción 2016.
- Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecological Systems* 4, 1-23.
- Mattsson, L., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems : “ A discussion of recent research. *Transportation Research Part, A*(81), 16-34.
- Nicholson, A. (2003). Transport Network Reliability Measurement and Analysis. *Transportes*, XI (Diciembre 2003), 49-62.
- Omer, M., Mostashari, A., & Nilchiani, R. (2011). Measuring the Resiliency of the Manhattan Points of Entry in the Face of Severe Disruption. *American J. Of Engineering And Applied Sciences*, 4(1), 153-161.
- Ortigoza, J., & Menendez, M. (2014). Traffic performance on quasi-grid urban structures. *Cities*, 36, 18-27.
- Ortúzar, J. D. and Willumsen, L.G. (1994). *Modelling Transport. Second Edition*. New York: Wiley and sons.
- Ortuzar, J., & Willumsem, L. (2008). *Modelos de Transporte* (pp. 259-263). Santander:

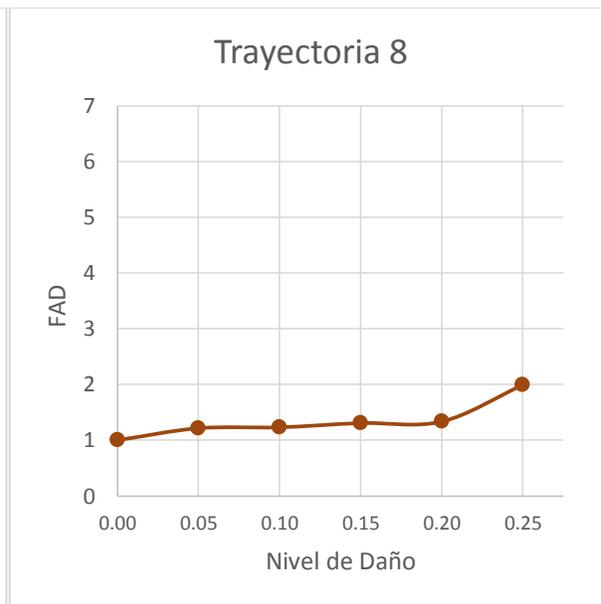
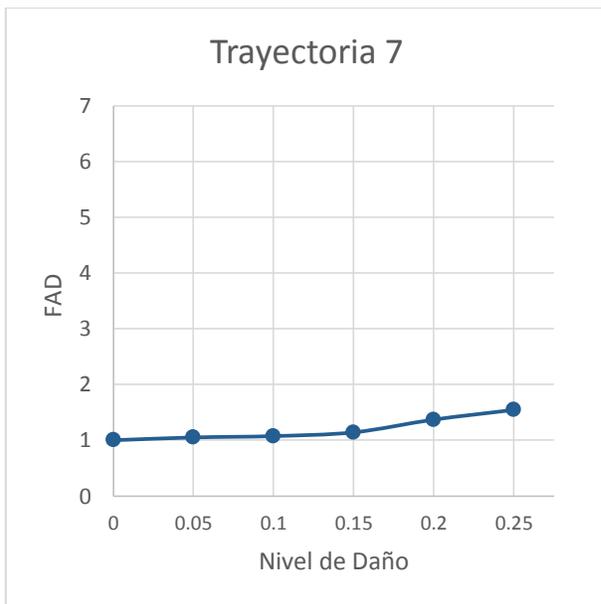
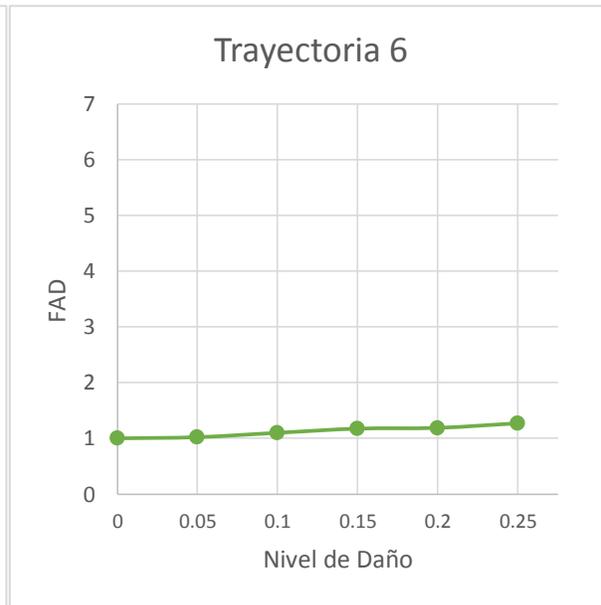
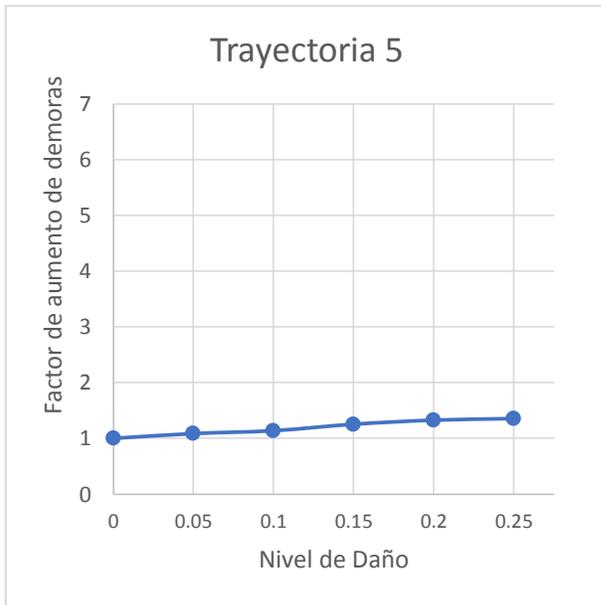
Universidad de Cantabria.

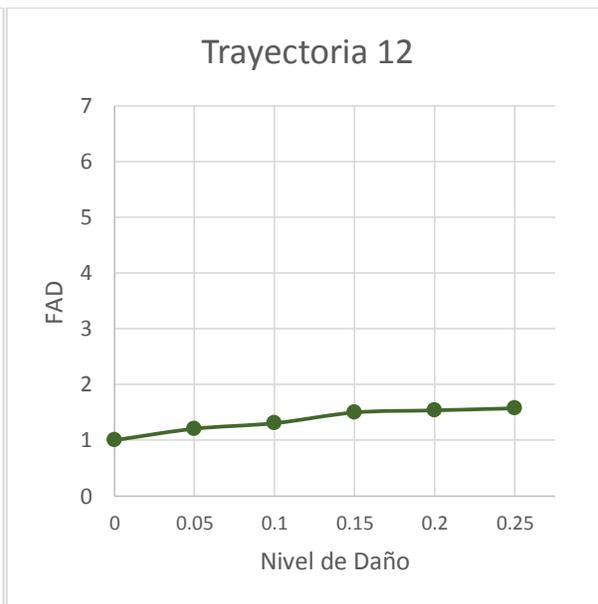
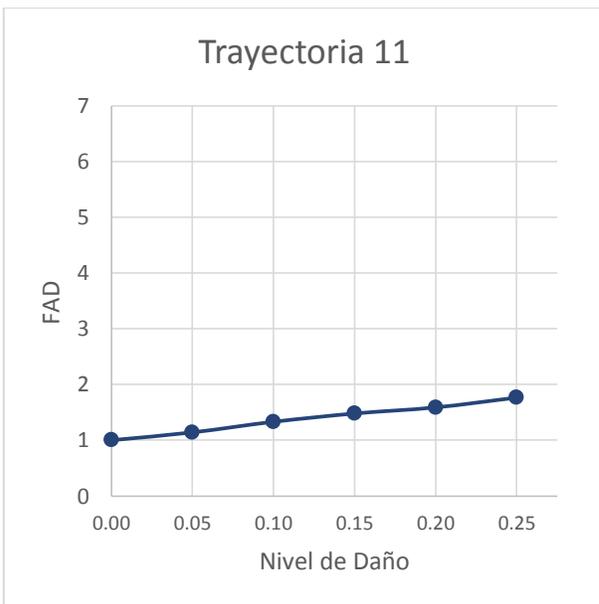
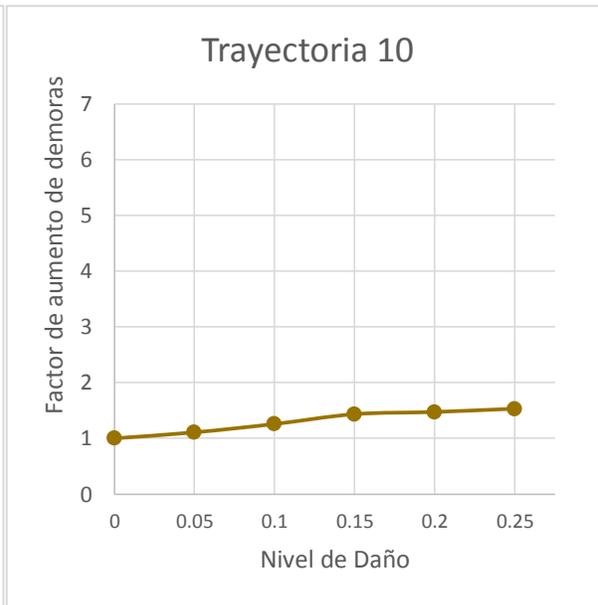
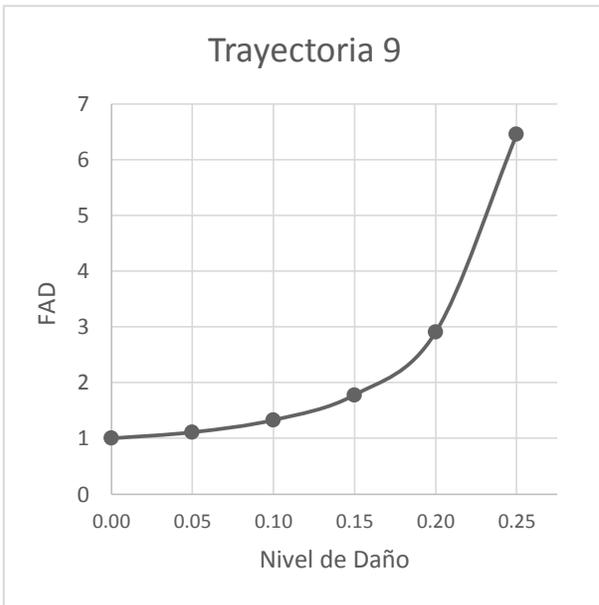
- Pimm, S.L., 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 307, 321-326
- Reggiani, A., 2013. Network resilience for transport security: Some methodological considerations. *Transport Policy* 28, 63-68.
- Rose, A., 2007. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards* 7(4), 383–398.
- Sanchez-Silva, M. (2001). Basic concepts in risk analysis and the decision making process. *Journal of Civil Engineering and Environmental Systems*. 18 (4), 255–277.
- Silva Medina, Juan Andres, Caracterización de los cambios en el Nivel de servicio de redes de transporte urbano producto de eventos catastróficos, Concepción 2016.
- Urena, N. (2010). *Transportation Network Resiliency: A Fuzzy Systems Approach* (All Graduate Theses and Dissertations). Utah State University.
- Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington: National Research Council.
- Wang, J., Muddada, R.R., Wang, H., Ding, J., Lin, Y., Liu, C., Zhang, W., 2014. Toward a resilient holistic supply chain network system: Concepts, review and future direction. *IEEE Systems Journal*, in press.

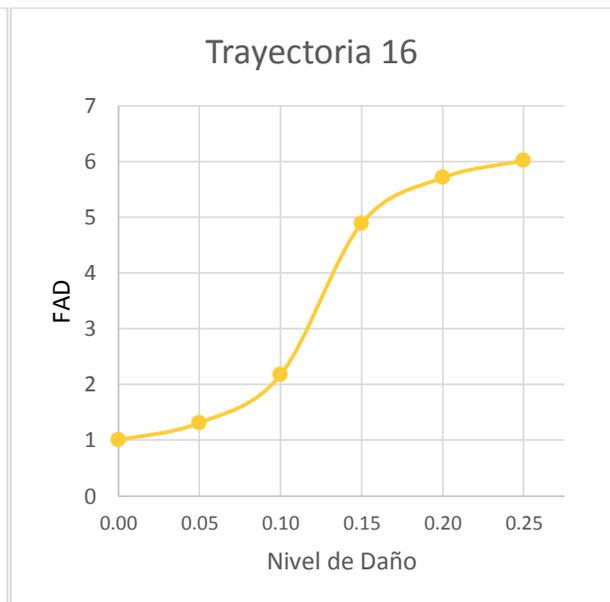
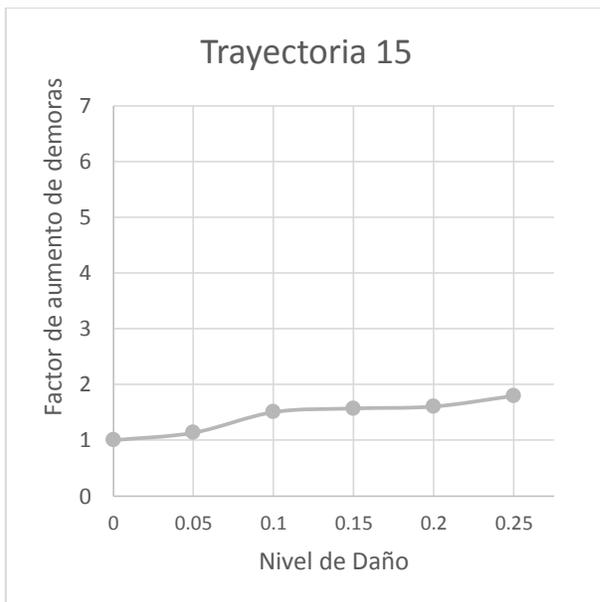
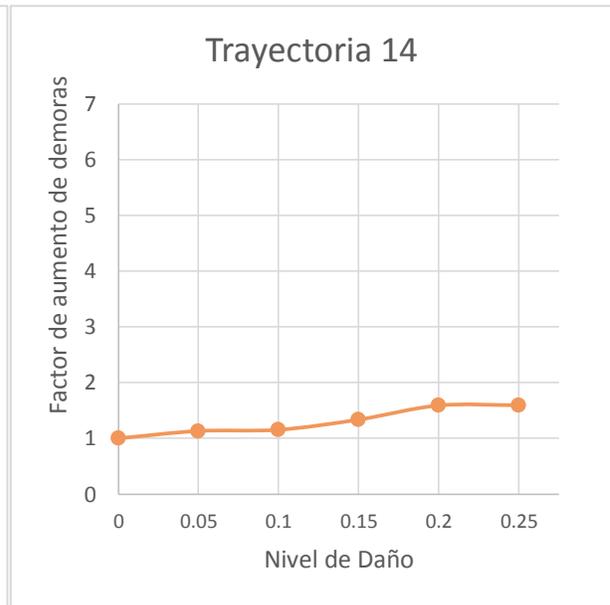
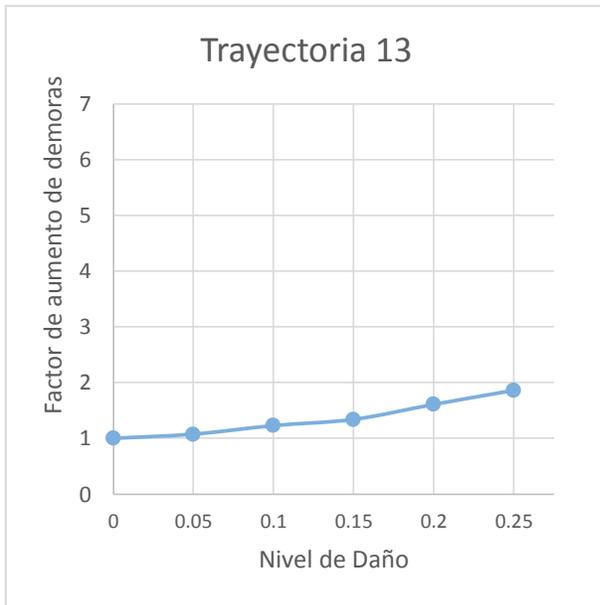
## 8 ANEXOS

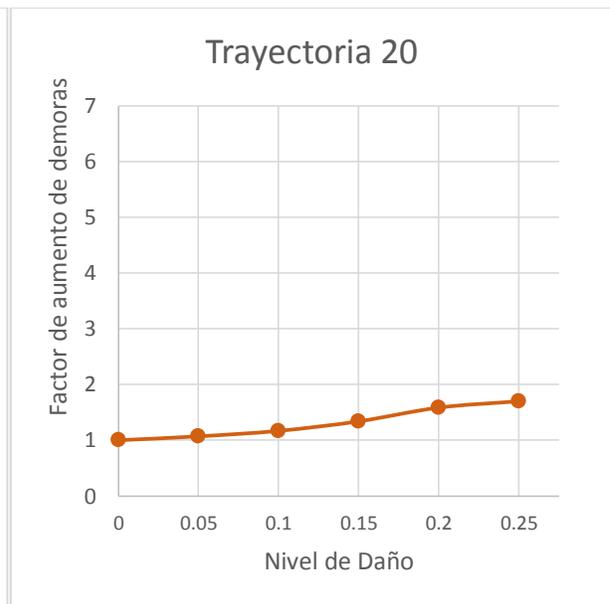
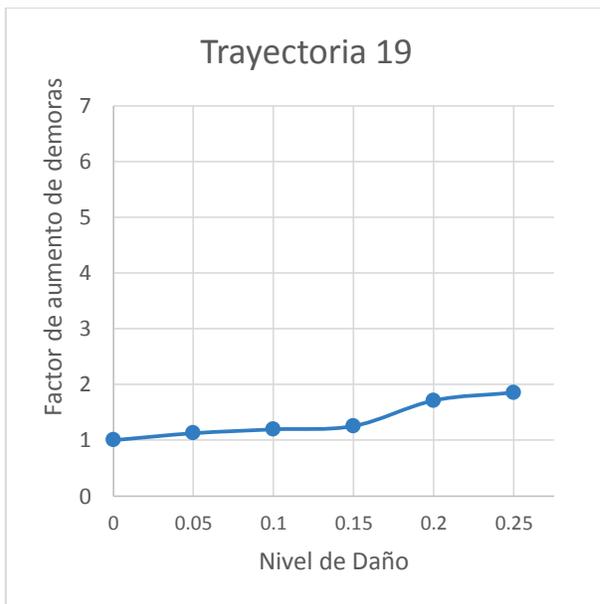
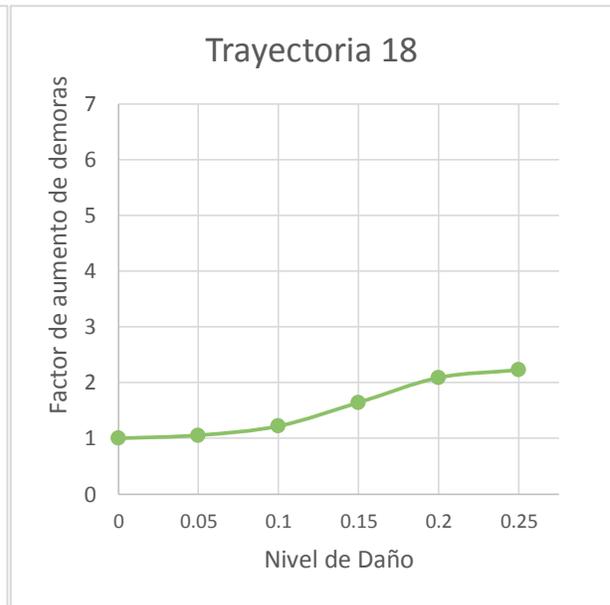
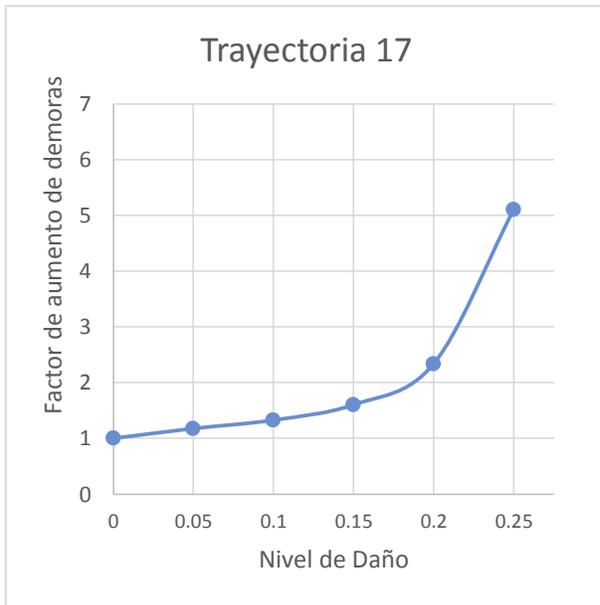
### ANEXO 1. Trayectorias de estudio







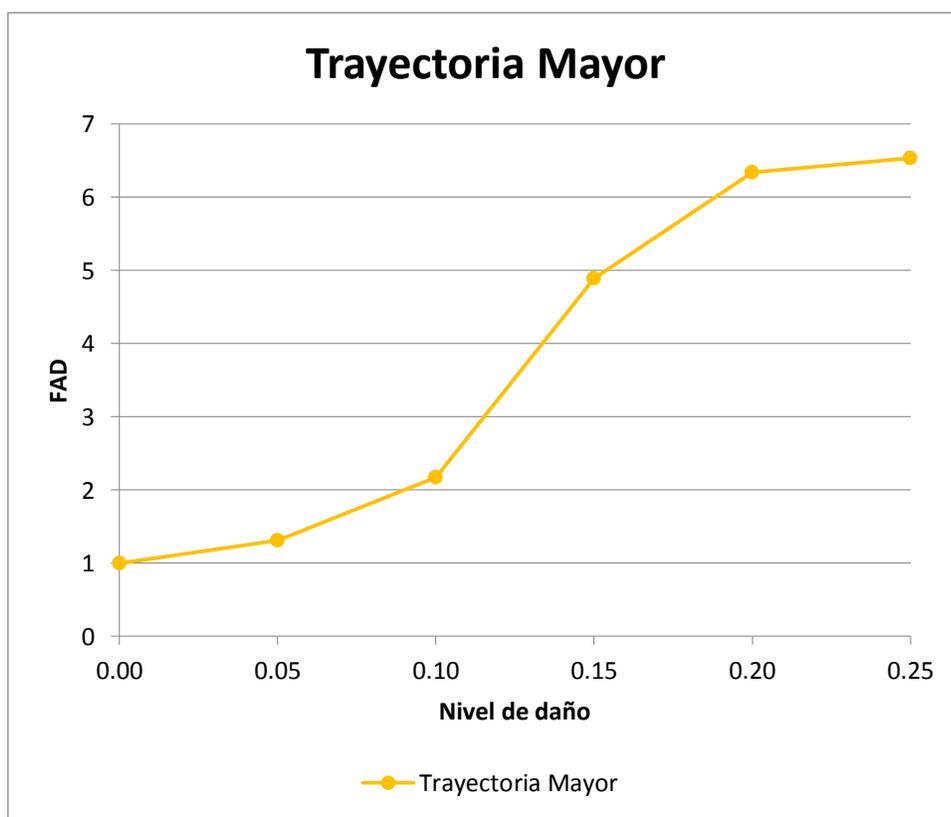


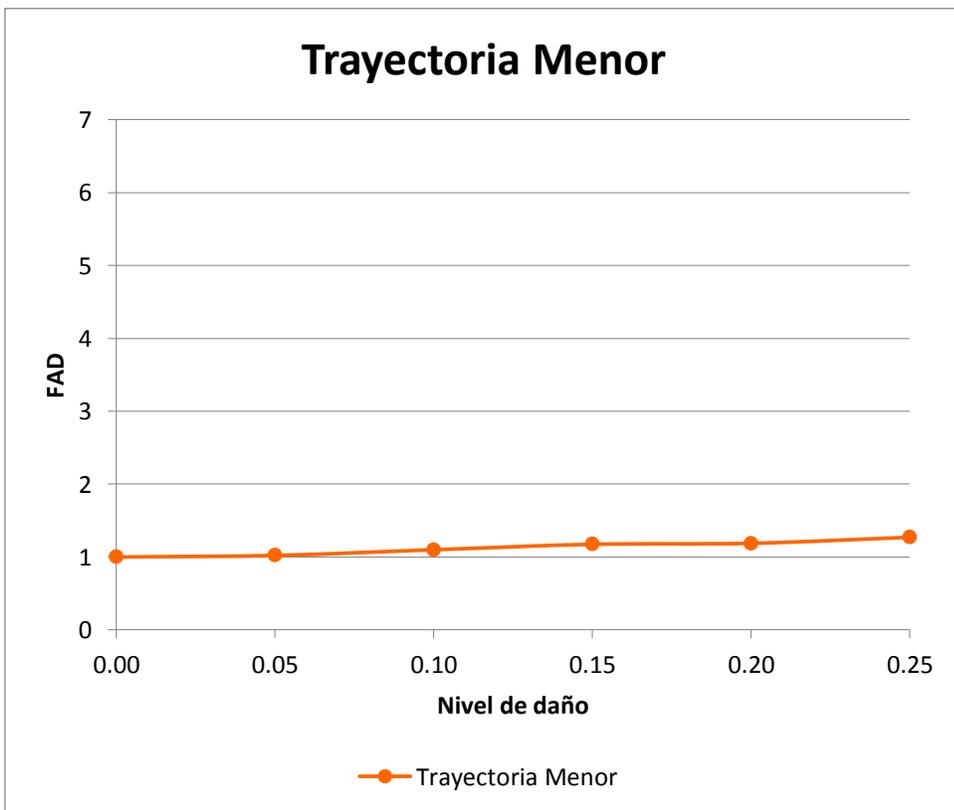
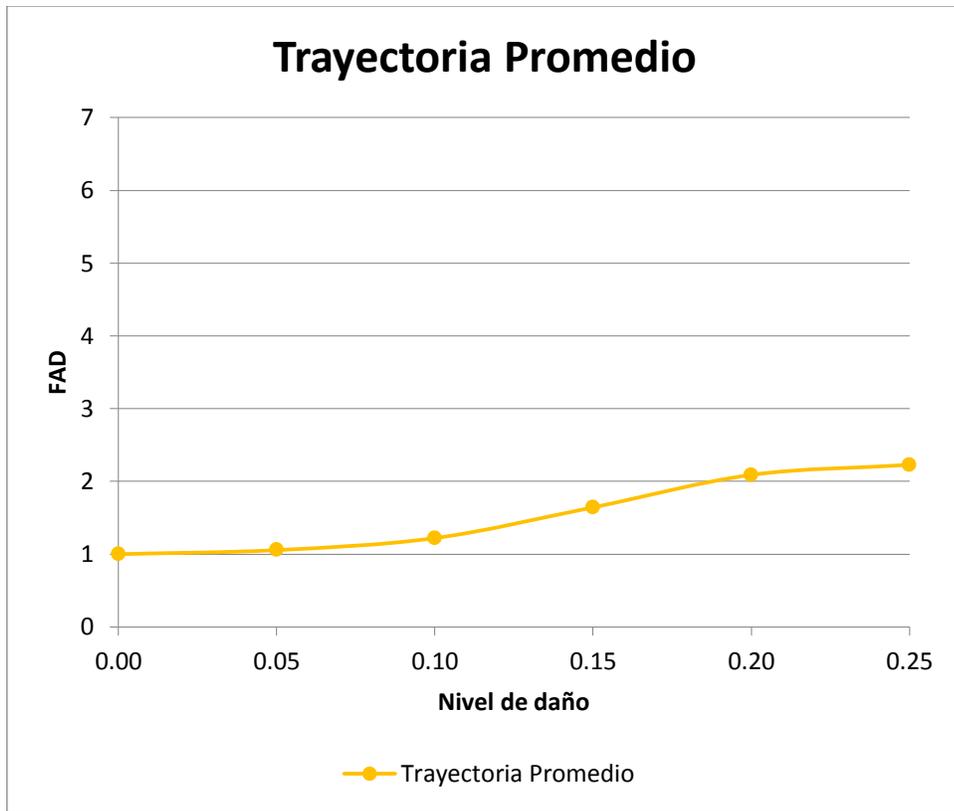


## ANEXO 2. Trayectorias para determinar la demanda máxima.

Del total de trayectorias de daño mostradas en la figura 5.2 se escogieron tres de ellas para determinar la demanda máxima que es capaz de soportar la red, estas son la trayectoria mayor, menor y promedio.

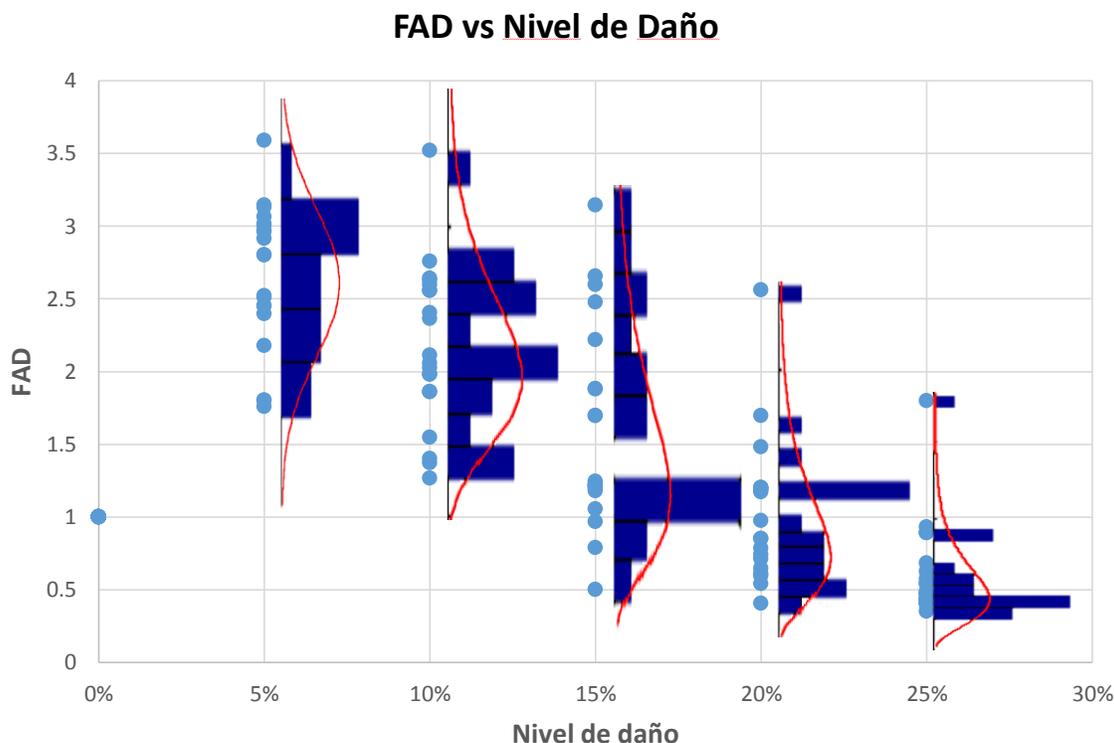
Las trayectorias menor y promedio salen directamente del gráfico, en cambio la trayectoria promedio se hizo con los valores más altos del FAD de todos los niveles. La trayectoria mayor es el escenario más desfavorable de los casos de estudio y se recomiendan que se usen esos resultados para tomar decisiones de gestión de tránsito.





### ANEXO 3. Estudio con “Remoción Aleatoria de Arcos”

Antes de modificar la metodología, se realizó el estudio aplicando al pie de la letra la metodología que se venía trabajando en las tesis anteriores. Es decir, tras elegir aleatoriamente los escenarios de daño, se procedía a remover el arco afectado. Los resultados son los siguientes:



Se puede apreciar que los valores del FAD aumentan hasta en nivel de daño de 5% lo cual es lógico. Sin embargo, del nivel 10% hacia adelante las demoras comienzan a bajar lo cual es un comportamiento anómalo. Esto sucede porque se remueven arcos de los accesos, los cuales son muy sensibles a daño y por lo tanto no entran todos los viajes a la red. Debido a esto SATURN no contabiliza la totalidad de los viajes por lo que las demoras disminuyen.

Finalmente se decide no aplicar la metodología de memorias previas al pie de la letra.

## ANEXO 4. Estudio con “Arcos Blindados”

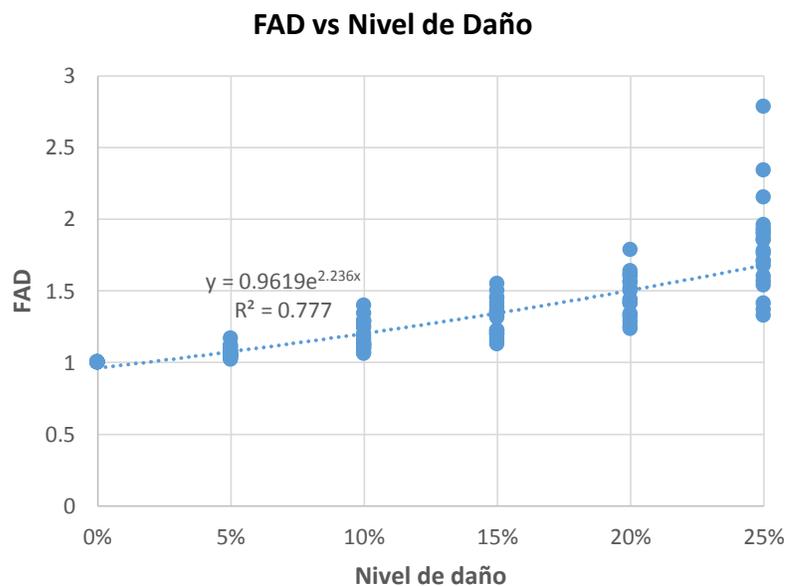
Se realizó un estudio considerando arcos externos blindados. En otras palabras, no se consideraron los arcos externos para afectarles su capacidad, sino que solo se dañaron los arcos internos de la red como se muestra en la siguiente imagen.



Figura. Arcos blindados

La estrategia de daño fue afectarles completamente su capacidad, es decir, se removían de la red para el análisis. Se consideraron veinte escenarios de daño con cinco niveles de daño cada uno, de igual manera que la metodología que se explicó en el informe.

Los resultados fueron los siguientes:



Se puede apreciar que a medida que aumenta el daño sobre la red también aumentan los valores del FAD, pero en muy baja medida. Esto se debe, que al haber arcos externos protegidos, no se

dañen los arcos de los accesos por donde entra la mayor cantidad de los viajes, por lo tanto no aumentan en demasía la demoras y se obtienen resultados muy ideales.

Debido a esto, se decidió no considerar en el análisis este resultado.

### ANEXO 5. Función de servicio de Concepción.

