

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES QUE EXPLICAN EL NO RESPETO DE LA LUZ ROJA EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

Antonia Caviedes, CIS Asociados Consultores en Transporte y Universidad de Chile – acaviedes@cistrans.cl
Alejandro Tirachini, University of Twente y Universidad de Chile – alejandro.tirachini@utwente.nl

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo estudiar el fenómeno del no respeto de la luz roja, para luego entender sus causas y factores de riesgo. Se realizan mediciones en terreno en tres intersecciones en la ciudad de Santiago, utilizando dos cámaras de video y un radar de velocidad en cada intersección. Se estudia el intervalo de tiempo en el cual los conductores al ver la luz amarilla tienen la decisión de detenerse o cruzar sin respetar la luz roja, conocido como zona de dilema. Se mide una serie de variables, como flujo vehicular, tipo de vehículo, el rango de edad y género de los conductores, para luego caracterizar este fenómeno mediante la estimación de modelos logit binarios y análisis estadístico. Los resultados indican que la velocidad de aproximación es significativa la decisión de detenerse o seguir y que un 65\% de conductores comete esta infracción a exceso de velocidad.

Palabras clave: Seguridad vial, convivencia vial, cruces con luz roja, intersecciones semaforizadas, modelos de elección.

ABSTRACT

The objective of this research is to study the phenomenon of red light running, in order to later understand its causes and risk factors. A field research is carried out at three intersections in Santiago, Chile, using two video cameras and a speed radar at each intersection. We study the time interval in which drivers, when seeing the yellow light, have the decision to stop or cross without respecting the red light, known as the dilemma zone. A series of variables are measured, such as vehicle flow, type of vehicle, the age range and gender of the drivers, to later characterize this phenomenon through the estimation of binary logit models and statistical analysis. The results indicate that the approach speed is significant in the decision to stop or continue and that 65\% of drivers commit red light violation while speeding.

Keywords: Road safety, road coexistence, red light running, signalized intersections, choice model.

1. INTRODUCCIÓN

En el periodo 2011-2020 la “desobediencia a la luz roja del semáforo” fue causante de 19.732 siniestros en Chile, representa el 2.5% de siniestros a nivel nacional. Es el tipo de desobediencia a la señalización con consecuencias más letales, las muertes por esta causa, 426 en un periodo de diez años, comprenden el 60% del total de la categoría y el 2.7% de los fallecidos en el total de siniestros de tránsito en Chile.

Esta investigación tiene el objetivo de estudiar las infracciones por no respeto a la luz roja en intersecciones semaforizadas en Santiago mediante vídeos y observaciones en terreno, y caracterizar variables que las expliquen mediante la estimación de modelos logit binarios y análisis estadístico.

Para llevar a cabo esta investigación, se realiza una revisión y síntesis de estudios en el área, para conocer las variables que se han estudiado e integrarlas en este proyecto de investigación de campo, uno de los primeros de esta naturaleza a realizarse en Chile.

Con esta base, se define una metodología que permita realizar mediciones en intersecciones de la ciudad de Santiago mediante grabaciones y observadores en terreno. Se definen tres intersecciones de distintas características, pero que cuentan con el flujo suficiente y las condiciones de infraestructura que permitan la observación.

2. MARCO TEÓRICO

Desde al menos la década de 1990 a la fecha se han realizado numerosas investigaciones acerca del fenómeno del no respeto a la luz roja, el cuál es también conocido en inglés como *Red light violation* (RLV) o *Red light running* (RLR). Típicamente, estos estudios buscan caracterizar estas ocurrencias mediante su frecuencia y circunstancias en que ocurren, en relación al conductor que las perpetra o en la aplicación de contramedidas y su eficacia en reducir el número infracciones.

2.1. Cómo definir el no respeto a luz roja

Es clara una violación a la luz roja cuando un vehículo se aproxima a la intersección bajo esta señal y no se detiene, pero si al aproximarse se encuentra con luz amarilla el no respeto a la luz roja dependerá de su capacidad de detenerse antes del cruce, en función a la velocidad de aproximación y la distancia a que se encuentra de la intersección. Esto es conocido como la zona dilema de luz amarilla.

En esta zona, la decisión de no detenerse y encontrarse en la intersección cuando la luz cambie y tengan derecho de paso otros movimientos, puede llevar a un choque lateral. Por otro lado, de detenerse muy repentinamente, los conductores podrían provocar un choque por alcance. Existen dos tipos de zonas dilema, las cuales se definen como:

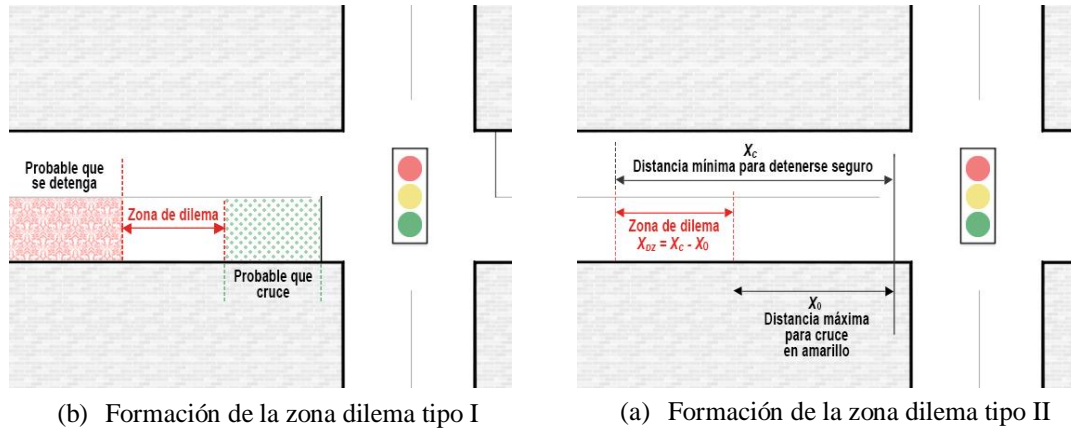


Figura 1: Representación gráfica de las zonas dilema (fuente: elaboración propia basada en Zhang, Fu y Hu, 2013)

- **Tipo I:** una zona donde no se puede detener de forma segura antes del cruce, ni salir de la intersección antes del fin de la luz amarilla (Gazis et al. 1960).
- **Tipo II:** también denominada zona de decisión, es la zona en donde el conductor puede decidir si detenerse o continuar (Parsonson, 1992).

Los límites de la zona dilema tipo I están dados por la mínima distancia para detenerse de forma segura (X_c) y la máxima distancia para cruzar de forma segura (X_0). Esta zona queda delimitada por ambas distancias cuando $X_c > X_0$ (fig. 1.a). Estas se calculan según definiciones físicas dada la velocidad de aproximación (v_0), tasa de frenado (a_1) y tasa de aceleración (a_2). También considera como variables el tiempo de reacción (δ_i), la duración de la luz amarilla (τ), el ancho de la intersección (W) y el largo del vehículo (L).

$$X_c = v_0 \delta_1 + \frac{v_0^2}{2a_1} \quad (1)$$

$$X_0 = v_0 \tau + 0,5a_2(\tau - \delta_2)^2 - W - L \quad (2)$$

Los límites de la zona dilema tipo II nacen de un enfoque probabilístico, definiéndola como la zona en que un 10% hasta un 90% de los conductores se detiene al ver la luz amarilla (fig. 1.b). Esta probabilidad está asociada al tiempo necesario para llegar a la línea de detención (TTS, por sus siglas en inglés). La sugerencia más ampliamente adoptada es definir los límites de la zona dilema II entre los TTS de 2.5 [s] a 5.5 [s] hasta la línea de detención (Benneson et al., 2002). Los límites en términos de distancia dependerán de la velocidad y tasa de desaceleración del vehículo.

2.2 Variables que influyen en el no respeto de la luz roja

Si bien existen diferencias en la metodología de obtención de datos y la definición de infracción a la luz roja que utilizan diferentes estudios, como también en factores propios de cada intersección o país, algunos hallazgos aparecen frecuentemente en la literatura:

- Los conductores jóvenes tienen la mayor probabilidad de cometer infracciones a la luz roja (Retting et al., 1999; Retting y Williams, 1996).
- Se ha evidenciado que los conductores hombres tienen mayor probabilidad de cruzar una intersección con luz roja (Retting et al., 1999; Papaioannou, 2007; Wang, Yu y Zhong, 2016).
- Un mayor número de infracciones a la luz roja ocurren en intersecciones y periodos con mayor flujo vehicular (Porter and England, 2000; Brewer et al., 2002).

3. METODOLOGÍA

Considerando las definiciones encontradas en la literatura y el objetivo de este trabajo, se ha optado por enfocar la investigación en la decisión de detenerse o seguir por parte de los conductores, reconociendo que seguir implica una infracción a la luz roja. De acuerdo al escenario descrito en la zona dilema tipo II o zona de decisión, los conductores que se encuentren entre 2.5 y 5.5 segundos para llegar a la línea de detención deben decidir si detenerse o cruzar. En su caso, cuentan con la distancia necesaria para detenerse y deberían optar por esta opción. De no detenerse, llegarán a la línea de detención justo cuando o incluso después de que el semáforo cambie a rojo, por lo que se considerará como no respeto a la luz roja.

Las distancias asociadas a los TTS de 2.5 [s] para el inicio de la zona de decisión (DZ_i) y 5.5 [s] para el final de la zona de decisión (DZ_j) quedan definidas por la siguiente ecuación, donde 0,28 es un factor de conversión para trabajar con velocidades en [km/h]:

$$\begin{aligned} DZ_i &= v_0 * 0.28 * 2.5 \\ DZ_j &= v_0 * 0.28 * 5.5 \end{aligned} \quad (3)$$

Por otro lado, para asegurar que los conductores cuenten con la distancia mínima para detenerse, ocuparemos la fórmula (1) remplazando los valores de tiempo de reacción $\delta_1 = 1$ [s] y tasa de frenado $a_1 = 3.4$ [m/s²], valores corresponden al tiempo recomendado por el Instituto de Ingenieros de Transporte de EEUU para propósito de reacción al semáforo y a la desaceleración que pueden alcanzar vehículos en pavimento mojado (el 90% de los conductores desacelerará a una tasa más alta), respectivamente (Ross et al., 2010). También se introduce un factor de conversión para trabajar con velocidades en [km/h]. Con esto, la distancia mínima para detenerse de forma segura (X_c) queda como:

$$X_c = v_0 * 0.28 * 1 + \frac{(0.28 * v_0)^2}{2 * 3.4}$$

Idealmente X_c , DZ_i y DZ_j debiesen definirse individuales de acuerdo a la velocidad de aproximación de cada vehículo, pero para el propósito de este estudio se definirán en base a la velocidad máxima permitida, es decir 50 [km/h]. Con esta velocidad se tiene que $X_c = 43$ [m], mientras que los límites de la zona de decisión se encuentran a 35 [m] y 77 [m]. Considerando que el cálculo de X_c fue con una tasa de frenado conservadora, se fijará la línea de inicio de la zona de mediciones para el grupo 2 a 40 metros de la línea de detención.

El fin de la zona de decisión se encuentra a 77 [m], sin embargo, por limitaciones logísticas no es posible registrar mediante grabaciones hasta esta distancia. Como alternativa, el final del grupo a medir se definirá en base a un tiempo de 3 segundos después de la luz amarilla, es decir, justo cuando está cambie a rojo. La idea detrás es que un vehículo que llegue a los 40 [m] de la línea de detención en el segundo 3 luego del amarillo, se encontraba hace 3 segundos a un TTS de 5.5 segundos cuando vio la luz amarilla, en otras palabras se encontraba el final de la zona de decisión.

3.1. Variables a considerar

Las variables que se recogerán para estudiar su impacto en el no respeto a la luz roja son:

- Velocidad de aproximación: Esta es medida por un observador con una pistola radar de velocidad a 40 [m] de la línea de detención.
- Tipo de vehículo: El tipo de vehículo entrará dentro de alguna de las siguientes categorías:
 1. Buses o Camiones
 2. Vehículos largos: Camionetas, SUV y Furgones.
 3. Vehículos cortos: Sedan y Mini.
 4. Motocicletas.
- Género: Los conductores se categorizarán de manera subjetiva por el observador como hombre o mujer, en base a los registros audiovisuales tomados en la intersección.
- Edad: Los conductores se categorizarán de manera subjetiva por el observador según su edad, en base a los registros audiovisuales tomados en la intersección. Luego, se agruparán en 3 categorías:
 1. Conductores jóvenes: máximo 29 años de edad.
 2. Conductores de mediana edad: entre 30 y 49 años de edad.
 3. Conductores adultos: mayores a 50 años de edad.

- **Período:** Se registrará la hora del día en que fue tomada cada medición y se clasificará dentro de tres categorías:
 1. Punta mañana: Entre las 08:00 y 10:00 hrs.
 2. Fuera de punta: Entra las 12:00 y 15:00 hrs.
 3. Punta tarde: Entre las 16:00 y 19:00 hrs.
- **Flujo por pista:** El flujo asociado a cada medición será el registrado durante el cuarto de hora en que la medición fue tomada, y se normalizará por el número de pistas que tenga la vía de acceso a la intersección.
- **Ancho de la intersección:** La medida entre las líneas de detención a ambos lados de la intersección, se obtendrá a partir de imágenes satélites provistas por Google Earth, usando la herramienta para medir del software.

3.2. Recolección de datos

Para realizar el estudio se escogen tres intersecciones semaforizadas, con diferentes anchos de cruce, que permitieran enfocar el estudio en el transporte privado y que permitieran la sutil instalación del equipo de grabación y de los observadores, en orden de no influenciar el comportamiento de los conductores. Las intersecciones elegidas son:

1. Exequiel Fernández con Av. Alcalde Fernando Castillo Velasco, Ñuñoa
2. Av. Grecia con Av. José Pedro Alessandri, Ñuñoa
3. Av. Vicuña Mackenna con Av. Matta, Santiago

La configuración en terreno para la toma de datos (Figura 2) consiste en posicionar una cámara deportiva apuntando a línea de detención de la vía de acceso a la intersección, para lo cual se diseña un accesorio que fija la cámara a un poste o árbol cercano a la intersección. Por su tamaño reducido, la cámara deportiva tiene la ventaja de no ser invasiva tanto para peatones como para conductores. La segunda cámara tipo Handycam se sostiene mediante un trípode en la acera a un poco más de 40 [m] de la línea de detención, apuntando hacia la intersección. Un observador se ubica junto a la Handycam a 40 [m] de la línea de detención con el radar de velocidades, para medir la velocidad de aproximación de los vehículos. El observador está en una posición no visible o de espaldas al sentido de circulación, tapando la cámara, de forma de minimizar la interferencia que el ver una cámara pueda tener en el comportamiento de los conductores.

Durante una salida a tomar mediciones en terreno, las cámaras registran alrededor de una hora total de vídeo cada una. Estos archivos de vídeo son luego traspasados a un computador para analizarlos y traspasar los registros capturados a una hoja de cálculo para su posterior análisis estadístico. La recolección de datos se extendió desde finales del mes de abril de 2022 hasta inicios de agosto de 2022. En total entre las 3 intersecciones se registraron 21 horas con 46 minutos, recolectando más de 800 eventos.

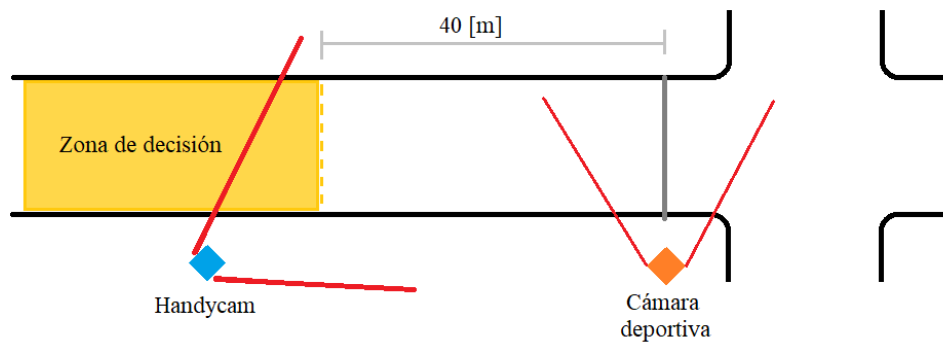


Figura 2: Configuración estándar de las cámaras en la toma de mediciones.

4. RESULTADOS

A continuación se detallan los resultados obtenidos mediante un análisis descriptivo y posteriormente la confección de modelos Logit binarios con base en la variable dependiente de detenerse o cruzar. Se comparan los resultados obtenidos en cada una de las intersecciones estudiadas y el peso de distintas variables en la decisión de los conductores de no respetar la luz roja. Además, se describe el tipo de infracciones observadas y cómo éstas se reflejan en los resultados de los modelos.

4.1. Frecuencia del no respeto de la luz roja

Del total de observaciones realizadas, un 20% corresponden a instancias en las que no se respetó la luz roja (RLV). En promedio, se registraron 7,6 RLV por hora. El desglose del porcentaje de infracciones por intersección registradas se muestra en la Tabla 1.

Intersección	Horas	Datos	RLV	RLV/h	% RLV
E.F.	7.2	251	40	5.5	16%
Grecia	8.6	378	86	10.0	23%
V.M	7.5	245	50	6.7	20%
Todas	23.3	847	176	7.6	20%

Tabla 1: Frecuencia del no respeto a la luz roja (RLV) por intersección.

Otra forma en que se puede medir la ocurrencia de este tipo de infracciones es la cantidad de ciclos en que al menos un conductor cruzó con luz roja. Para esto, contabilizamos como ciclos válidos solamente aquellos en que algún sujeto tuvo la opción de detenerse o seguir. El porcentaje de ciclos en donde ocurre una RLV se encuentra en la Tabla 2, donde se aprecia que en 1 de cada cuatro ciclos en los cuales se presentó el dilema, conductores optaron por no detenerse y cruzar con luz roja.

Intersección	Ciclos	Ciclos Validos	Ciclos con RLV	Porcentaje de ciclos con RLC
E.F.	272	185	35	19%
Grecia	299	234	71	30%
V.M	244	167	43	26%
Todas	815	586	149	25%

Tabla 2: Frecuencia de ciclos en donde no se respeta la luz roja.

4.2. Segundos después del rojo en que ocurren las infracciones

Del total de infracciones a la luz roja, en 156 entradas fue posible determinar en qué segundo con respecto al inicio de la luz roja los vehículos entraban a la intersección, en la Figura 3 se presenta un histograma del momento con respecto al inicio de la luz roja en que ocurrieron las infracciones.

Entre más tarde se ingresa a la intersección, más agresivo y peligroso es el comportamiento de los conductores. En un 6% de los casos, el sujeto que optaba por no detenerse lograba entrar a la intersección en los últimos 0,5 [s] de la luz amarilla, tiempo insuficiente para cruzar de forma segura. Estas 10 ocurrencias, representadas en la barra amarilla del histograma de la Figura 3, son perpetradas por conductores a exceso de velocidad y que posiblemente aceleraron. En el otro extremo, en un 10% de las infracciones observadas el vehículo ingresa a más de 2 [s] después del rojo, es decir, lo hace después que termine por completo el período de entreverde y tenga derecho de paso otro movimiento.

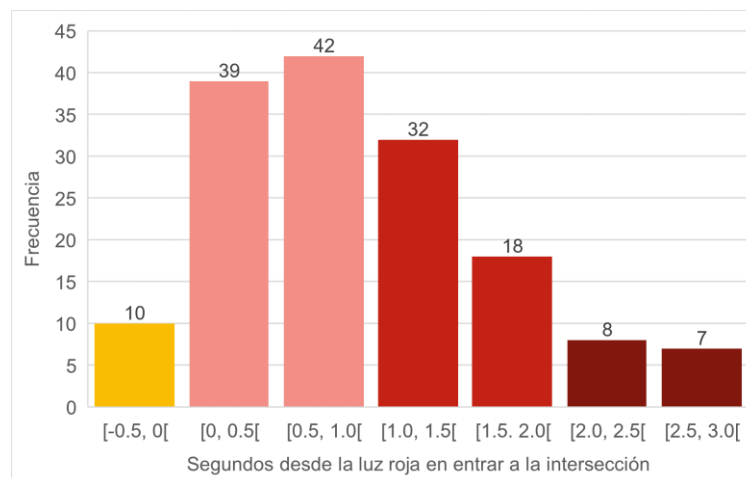


Figura 3: Histograma de segundos con respecto a la luz roja en que ocurren RLV.

Suponiendo que la velocidad se mantiene constante y conociendo el ancho de la intersección, podemos estimar para los vehículos de movimiento directo los segundos que demora en cruzar la intersección, y con esto los segundos desde el inicio de la luz roja en salir de la intersección. En la Figura 4 se presenta un histograma del momento en que los conductores que cometieron la infracción salen de la intersección con respecto al inicio de la luz roja.

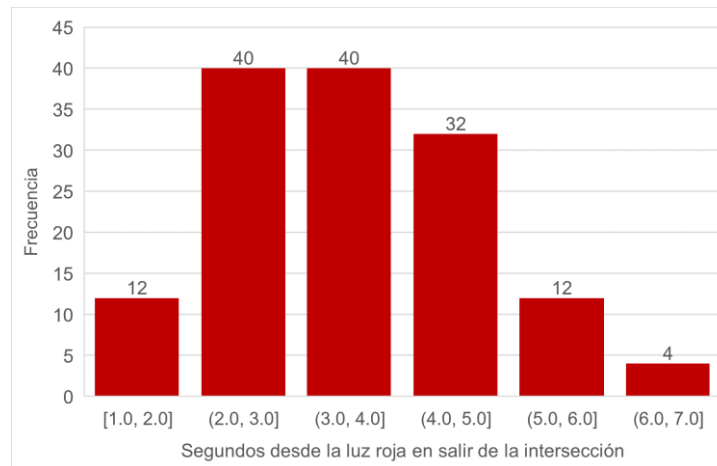


Figura 4: Histograma de segundos desde la luz roja al salir de la intersección.

Por último, conociendo el tiempo de rojo-rojo, igual a 1 [s] en Exequiel Fernández, y 2 [s] en Av. Grecia y Av. Vicuña Mackenna, es posible calcular los segundos de verde de la fase siguiente que fueron bloqueados por los conductores que no respetaron la luz roja. En la Figura 5 se presenta un histograma con los segundos de la luz verde bloqueados.

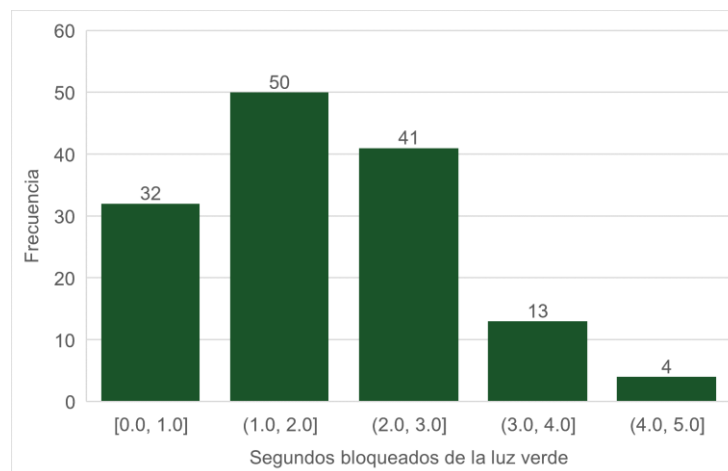


Figura 5: Histograma de segundos de la luz verde bloqueados en la fase siguiente.

A partir de los histogramas se observa que si bien la mayoría (55%) de los conductores que cruzan en rojo ingresan a la intersección durante el primer segundo de la luz roja, se estima que en el caso de los movimientos directos, un 91% de quienes cruzan en rojo termina de salir de la intersección 2 o más segundos después de que la luz cambió a rojo, y un 41% bloquea la luz verde de la fase siguiente por 2 o más segundos (considerando el tiempo de rojo-rojo), produciéndose en un riesgo de seguridad vial e intimidación para peatones.

4.3 Relación entre el no respeto a la luz roja, el período y el flujo vehicular

El periodo en que ocurre una medición se clasifica dentro de tres categorías según la hora en que fue tomada: punta mañana (PM), fuera de punta (FP) y punta tarde (PT). El flujo se obtiene a partir del conteo de vehículos de los vídeos generados en la intersección, el flujo asignado a cada medición corresponde al flujo que se observa en el cuarto de hora en que ocurre el evento. Al calcular el porcentaje de RLV como $RLV/Datos$ para el conjunto de las intersecciones, se tiene que las RLV ocurren en mayor proporción durante la punta mañana (24% de las observaciones), mientras que en la punta tarde tienen una menor ocurrencia.

Sin embargo, estos resultados varían por intersección. En las Figura 6 se relaciona el flujo con el porcentaje de RLV ocurridas en cada periodo para las intersecciones de Exequiel Fernández y Av. Grecia respectivamente. El comportamiento que revelan los gráficos lleva a pensar que existen dos tipos de escenarios en que ocurren las infracciones por no respeto a la luz roja: las propensas a originarse en intersecciones con un alto flujo vehicular y las propensas a originarse en intersecciones de bajo flujo. Analizando los vídeos de las infracciones en Av. Grecia PM y Exequiel Fernández FP se propone describir con ejemplos ambos tipos de comportamiento.

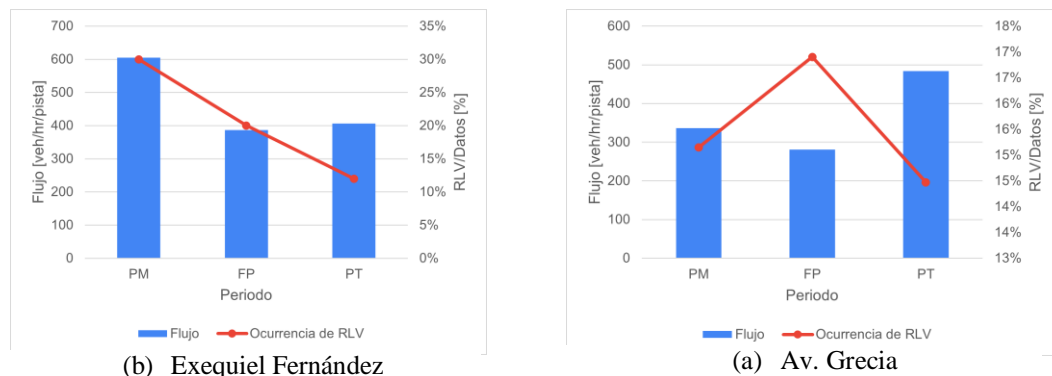


Figura 6: Flujo y ocurrencia de RLV según período

- **RLV en alto flujo:** Como observamos, en Av. Grecia un mayor porcentaje de infracciones por el no respeto a la luz roja ocurren en la punta mañana junto al pico de flujo vehicular. En un caso típico, en el momento en que el semáforo cambia a luz amarilla, hay bastantes vehículos a menos de 40 [m] de la línea de detención. Estos pueden cruzar la intersección de forma segura sin problemas, a menos que vayan a una velocidad muy baja.

Los vehículos que entran a esta zona después de dada la luz amarilla pueden optar por detenerse o cruzar, muchos de ellos optando por esta última opción, incorrectamente asumiendo que también puede cruzar de forma segura como los vehículos a su delantera.

Otra característica, es que estos conductores suelen entrar a la intersección muy pocos segundos después del rojo, ya que se encuentran muy cerca detrás del pelotón de vehículos que cruzó de forma segura.

- **RLV en bajo flujo:** El segundo tipo de infracción a la luz roja, propiciada por un bajo flujo vehicular, se puede encontrar en las registradas en Exequiel Fernández en el horario fuera de punta. Un caso típico en esta intersección es encontrarse con la pista despejada a 40 [m] desde la línea de detención al momento de cambiar a luz amarilla. En estos casos, los conductores ven el cambio de señal a distancia suficiente para detenerse de forma segura. Sin embargo, considerando la condición de una pista despejada, los conductores tienden a acelerar en vez de detenerse.

Debido a la larga distancia hasta el cruce (más de 40 [m]), estos conductores no logran de forma segura, resultando en una infracción a la luz roja.

4.4. Modelos de elección binaria

A partir de la información recolectada en terreno y a través de los vídeos se generan las bases de datos por intersección y de la muestra total.

4.4.1. Modelo 1: modelo de especificación con características objetivas

En este primer modelo se asume que el tipo de vehículo (si es un automóvil, moto o vehículo pesado), la velocidad y el flujo en que se encuentran los conductores en la zona de decisión influencia la función de utilidad (V). Estas son características objetivas que describen la preferencia revelada del conductor sobre detenerse o no detenerse frente a la luz amarilla en la zona de decisión. Además, se agrega el término ASC que indicará la preferencia por detenerse o no si todos los valores son cero. La forma funcional es la siguiente:

$$V_{NORLV} = ASC_{NORLV} = 0 \quad (4)$$

$$V_{RLV} = ASC_{RLV} + \beta_{VEL} * VEL + \beta_{SUV} * SUV + \beta_{MOTOS} * MOTOS + \beta_{PESADOS} * PESADOS + \beta_{FLUJO} * FLUJO \quad (5)$$

Para reproducir el modelo en la muestra total, se incluyen la intersección como variable explicativa. Recordemos que cada intersección cruza un distinto número de pistas, siendo el cruce más corto el de Exequiel Fernández con 2 pistas, y el más largo el de Av. Vicuña Mackenna con 10 pistas. Para incluir la intersección asociada agregamos a la función de utilidad la variable dummy $E = 1$ para Exequiel Fernández y la variable dummy $G = 1$ para Av. Grecia.

Los resultados de la muestra total se tienen en la Figura 7. Notamos que β_E y β_G no son significativas, es decir en este modelo no influye la intersección en la decisión de los conductores sobre detenerse o seguir. El flujo tampoco es significativo, probablemente debido al contraste de

Número del parámetro	Descripción	Coef. estimado	Robust Asympt. std. error	t-stat	p-value
1	ASC_RLV	-5.80	1.15	-5.03	0.00
2	BETA_E	0.427	0.300	1.42	0.15
3	BETA_FLUJO	-0.000301	0.000981	-0.31	0.76
4	BETA_G	0.322	0.338	0.95	0.34
5	BETA_LARGOS	0.00805	0.147	0.05	0.96
6	BETA_MOTOS	0.266	0.288	0.93	0.35
7	BETA_PESADOS	0.559	0.287	1.95	0.05
8	BETA_VEL	0.108	0.0266	4.08	0.00
9	Scale2	2.42	0.727	1.95 ¹	0.05
10	Scale3	1.12	0.332	0.36 ¹	0.72

Resumen estadístico

Número de observaciones = 860

$$\mathcal{L}(\hat{\beta}) = -341.628$$

$$-2[\mathcal{L}(0) - \mathcal{L}(\hat{\beta})] = 508.957$$

$$\rho^2 = 0.427$$

$$\bar{\rho}^2 = 0.410$$

Figura 7: Modelo 1 – Muestra total,

los fenómenos de infracciones en alto flujo e infracciones en bajo flujo de las diferentes intersecciones. Los vehículos largos tienen un estimador cercano a cero y p-value cercano a 1, por lo que no se diferencian a los vehículos cortos y se eliminarán como variable en los próximos modelos. Contrario a lo esperado por su sobre representación en las infracciones a la luz roja, las motos no son significativas, mientras que los vehículos pesados lo son a un 10%. La única variable significativa en este caso es la velocidad de aproximación con signo positivo.

Al modelar por intersección, se obtiene como resultado para Exequiel Fernández y Av. Grecia lo expuesto en la figura 8. Ambos resultados señalan como variable significativas, con p -value = 0.5 o inferior, la velocidad y el flujo. β_{FLUJO} tiene signo negativo en Exequiel Fernández, reafirmando lo que se veía en la figura 6, es decir un mayor número de infracciones ocurren en el periodo de menor flujo. Por otro lado, β_{FLUJO} en la modelación de Av. Grecia tiene signo positivo, recogiendo el fenómeno de que en esta intersección un mayor número de infracciones ocurren en el período de mayor flujo. En ambos casos, β_{VEL} tiene un signo positivo, indicando que quienes circulan a mayor velocidad optarían más por no detenerse.

Número del parámetro	Descripción	Coef. estimado	Robust Asympt. std. error	t-stat	p-value
1	ASC_RLV	-11.1	1.96	-5.67	0.00
2	BETA_FLUJO	-0.0114	0.00353	-3.24	0.00
3	BETA_MOTOS	0.622	1.31	0.47	0.64
4	BETA_PESADOS	1.15	0.886	1.29	0.20
5	BETA_VEL	0.301	0.0432	6.96	0.00

Resumen estadístico					
Número de observaciones = 243					
$\mathcal{L}(\hat{\beta}) = -62.810$					
$-2[\mathcal{L}(0) - \mathcal{L}(\hat{\beta})] = 211.250$					
$\rho^2 = 0.627$					
$\bar{\rho}^2 = 0.597$					

(a) Modelo 1 - Exequiel Fernández

Número del parámetro	Descripción	Coef. estimado	Robust Asympt. std. error	t-stat	p-value
1	ASC_RLV	-8.57	1.01	-8.48	0.00
2	BETA_FLUJO	0.00354	0.00112	3.15	0.00
3	BETA_MOTOS	0.343	0.644	0.53	0.59
4	BETA_PESADOS	0.775	0.589	1.32	0.19
5	BETA_VEL	0.134	0.0169	7.93	0.00

Resumen estadístico					
Número de observaciones = 373					
$\mathcal{L}(\hat{\beta}) = -162.283$					
$-2[\mathcal{L}(0) - \mathcal{L}(\hat{\beta})] = 192.523$					
$\rho^2 = 0.372$					
$\bar{\rho}^2 = 0.350$					

(b) Modelo 1 - Av. Grecia

Figura 8: Modelo 1: modelo de especificación con características objetivas

4.4.2. Modelo 2: modelo de especificación con características objetivas y atributos socio-demográficos

En este segundo modelo se incluyen variables demográficas como la variable dummy *EDAD*, la cual es 1 si el individuo es mayor a 50 años y la variable dummy *GENERO* igual a 1 para conductores hombres. Estas variables son determinadas de manera subjetiva por quien analiza los vídeos grabados en la intersección. Las funciones de utilidad quedan de la forma:

$$V_{NORLV} = ASC_{NORLV} = 0 \quad (6)$$

$$V_{RLV} = ASC_{RLV} + \beta_{VEL} * VEL + \beta_{MOTOS} * MOTOS + \beta_{PESADOS} * PESADOS + \beta_{FLUJO} * FLUJO + \beta_{GENERO} * GENERO + \beta_{EDAD} * EDAD \quad (7)$$

En la figura 9 se obtienen los resultados para la muestra total entre las tres intersecciones, ocupando el mismo método descrito en el modelo 1 para combinar las bases de datos. Se tiene que ni la variable género ni edad son significativas en la elección, siendo la única variable significativa la velocidad con parámetro positivo.

Número del parámetro	Descripción	Coef. estimado	Robust Asympt. std. error	t-stat	p-value
1	ASC_RLV	-4.81	1.23	-3.92	0.00
2	BETA_E	0.758	0.392	1.94	0.05
3	BETA_EDAD	-0.204	0.176	-1.16	0.25
4	BETA_FLUJO	-0.00132	0.00110	-1.20	0.23
5	BETA_G	0.521	0.506	1.03	0.30
6	BETA_GENERO	0.0424	0.175	0.24	0.81
7	BETA_MOTOS	0.209	0.268	0.78	0.43
8	BETA_PESADOS	0.370	0.287	1.29	0.20
9	BETA_VEL	0.0903	0.0337	2.68	0.01
10	Scale2	3.17	1.29	1.67 ¹	0.09
11	Scale3	1.24	0.540	0.45 ¹	0.65

Resumen estadístico

Número de observaciones = 688

$$\mathcal{L}(\hat{\beta}) = -252.517$$

$$-2[\mathcal{L}(0) - \mathcal{L}(\hat{\beta})] = 448.737$$

$$\rho^2 = 0.470$$

$$\bar{\rho}^2 = 0.447$$

Figura 9: Modelo 2 – Muestra total.

5. CONCLUSIONES

5.1. Resumen: resultados principales

Frente a la problemática de las infracciones por no respeto a la luz roja y las consecuencias muchas veces fatales que estas producen, es que nace el interés por investigar este fenómeno. En esta investigación se estudia este tipo de infracciones en intersecciones semaforizadas en Santiago a través de un trabajo en terreno en tres intersecciones de la ciudad, midiendo una serie de variables asociadas a los conductores que se enfrentaban a la decisión de detenerse o continuar al ver la luz amarilla teniendo la elección.

Como variables explicativas a la decisión de detenerse o cruzar con luz roja se consideró la velocidad de aproximación, el tipo de vehículo, el flujo de vehículos, el género y la edad de los conductores. Estudios anteriores han evidenciado la influencia de estas variables, siendo los hallazgos más comunes que los conductores hombres jóvenes tienen una mayor probabilidad de cruzar una intersección con luz roja y que el mayor número de estas infracciones ocurren en intersecciones y periodos con mayor flujo vehicular.

En el caso de Santiago, un 20% de los eventos registrados corresponde a conductores que no respetaron la luz roja, registrándose en promedio 7,6 infracciones por hora. El peak de infracciones se registró en Av. Grecia en el horario punta mañana, donde un 30% de los conductores no respetó la luz roja del semáforo.

La distribución de velocidades de aproximación para el grupo de conductores que se detienen y quienes no respetan la luz roja reveló que estos últimos circulan mayormente a más de 40 [km/h], mientras que los primeros circulan en mayor proporción a menos de 40 [km/h]. En el caso de los conductores que circulan a exceso de velocidad un 65% de ellos opta por no detenerse, siendo un 38% de las infracciones a la luz roja a exceso de velocidad.

Para las variables género y edad, es difícil determinar un comportamiento en base a los datos, debido a que la imagen obtenida por los vídeos no permite identificar estas características del conductor en un 20% de los casos.

Al estudiar la relación entre el flujo y las infracciones a la luz roja se detectaron dos tipos de infracciones: en alto flujo vehicular y en bajo flujo vehicular. Las primeras son cometidas a menores velocidades, en donde un conductor se incorpora al pelotón de vehículos que cruza la intersección sin estimar correctamente que su caso debiese detenerse pues no alcanza a salir de la intersección antes de la luz roja. Las últimas ocurren a velocidades altas, donde el conductor al tener la vía despejada opta por acelerar tratando de cruzar la intersección antes de la luz roja, pero estando a demasiada distancia para lograrlo. Ambos comportamientos son descritos y ejemplificados.

Por último, se modela la elección de detenerse o cruzar mediante un modelo Logit de elección binaria. Si bien se obtienen algunas diferencias dependiendo de la intersección, un hilo común es que en todos los modelos la variable explicativa velocidad es significativa con parámetro positivo. De hecho, analizando los datos, encontramos que un 65% de los infractores cruza en rojo a exceso

de velocidad. Esto indica que circular a exceso de velocidad influye en la decisión de detenerse o seguir, aumentando la probabilidad de cometer una infracción por no respeto a la luz roja. Como contribución a la política de seguridad vial en el país, nuestros resultados muestran que la aplicación de control automatizado de velocidad (sistema CATI) en los alrededores de intersecciones podría tener el efecto asociado de disminuir los cruces en rojo, y, a su vez, la instalación de cámaras de fiscalización de cruces en rojo en intersecciones podría tener un efecto en la velocidad de circulación, por la alta correlación encontrada en esta investigación entre velocidad de circulación y cruces en rojo. Tales efectos, de existir, deberían analizarse en aquellas intersecciones donde se instale cámaras de control de infracciones.

La segunda variable significativa en la mayoría de los casos es el flujo, pero el signo de β_{FLUJO} puede ser positivo o negativo dependiendo de la intersección: en Av. Grecia donde un mayor número de infracciones ocurren durante los períodos punta es positivo, mientras que en Exequiel Fernández, donde un mayor porcentaje de infracciones ocurren fuera de punta, β_{FLUJO} es negativo.

5.2. Líneas futuras de investigación

Siendo el primer estudio de estas características en Santiago, cada hallazgo es relevante, pero a su vez queda mucho trabajo por delante para comprender el fenómeno del no respeto a luz roja y como mitigarlo. Es relevante ampliar el tamaño muestral, tanto en número de intersecciones como en horas y períodos de análisis, con tal de mejorar nuestro entendimiento de las dinámicas involucradas en las infracciones a la luz roja. Futuras investigaciones podrían estudiar el efecto de otras variables, como por ejemplo la duración de la luz roja.

Por el ámbito de la metodología, dadas las limitaciones existentes se definió una línea fija a 40 [m] desde la intersección como comienzo de la zona de decisión, sin embargo es más adecuado que esta zona se defina dinámicamente para cada vehículo dependiendo de su velocidad. Una medición continúa, con cámaras que detecte cómo evoluciona la velocidad y distancia en este fenómeno podría ser la solución. Otra forma de abordarlo, es incluir una segunda línea de medición a una distancia más corta para los vehículos de baja velocidad. También es importante mejorar esta metodología con el fin de reducir la incertidumbre en la determinación del género y la edad de los conductores en futuras investigaciones.

Por último, de implementarse el sistema CATI u otra acción de mitigación, es deseable comparar la tasa de infracciones y siniestros provocados por desobediencia a la luz roja reportadas en este informe, con las que se encuentren después de que esté en acción dicha medida. A su vez, es necesario investigar la sensación de seguridad de los peatones en las calles, particularmente al momento de cruzar una, y también comparar este indicador antes y después de una medida de mitigación, para entender como las infracciones por no respeto a la luz roja afectan a las personas.

REFERENCIAS

- BONNESON, J., MIDDLETON, D., ZIMMERMAN, K., CHARARA, H., & ABBAS, M. (2002). Intelligent detection-control system for rural signalized intersections. *Texas Department of Transportation*.
- BREWER, M. A., BONNESON, J., & ZIMMERMAN, K. (2002, MARCH). Engineering countermeasures to red-light-running. En *Today's Transportation Challenge: Meeting Our Customer's Expectations* Institute of Transportation Engineers (ITE) (No. CD-016).
- GAZIS, D., HERMAN, R., & MARADUDIN, A. (1960). The problem of the amber signal light in traffic flow. *Operations Research*, 8(1), 112-132.
- PAPAIIOANNOU, P. (2007). Driver behaviour, dilemma zone and safety effects at urban signalised intersections in Greece. *Accident Analysis & Prevention*, 39(1), 147-158.
- PARSONSON, P. S. (1992). *Signal timing improvement practices* (No. 172).
- PORTER, B. E., & ENGLAND, K. J. (2000). Predicting red-light running behavior: a traffic safety study in three urban settings. *Journal of Safety Research*, 31(1), 1-8.
- RETTING, R. A., & WILLIAMS, A. F. (1996). Characteristics of red light violators: Results of a field investigation. *Journal of Safety Research*, 27(1), 9-15.
- RETTING, R. A., ULMER, R. G., & WILLIAMS, A. F. (1999). Prevalence and characteristics of red light running crashes in the United States. *Accident Analysis & Prevention*, 31(6), 687-694.
- ROESS, R., PRASSAS, E., & MCSHANE, W. (2004). *Traffic Engineering* (4th ed.) Pearson Higher Education, Inc.
- WANG, X., YU, R., & ZHONG, C. (2016). A field investigation of red-light-running in Shanghai, China. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 37, 144-153.
- ZHANG, Y., FU, C., & HU, L. (2014). Yellow light dilemma zone researches: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English edition)*, 1(5), 338-352.