

CARACTERIZACIÓN DE BRECHAS CRÍTICAS DE MOTOCICLISTAS EN LA CIUDAD
DE TUNJA

DIEGO ALEJANDRO PÉREZ SIABATTO
DANIA LORENA SOBA MORENO



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2023

CARACTERIZACIÓN DE BRECHAS CRÍTICAS DE MOTOCICLISTAS EN LA CIUDAD
DE TUNJA

DIEGO ALEJANDRO PÉREZ SIABATTO
DANIA LORENA SOBA MORENO

Trabajo de grado en la modalidad de proyecto de investigación para optar al título
de Ingeniero en Transporte y Vías

Director
FREDY ALBERTO GUÍO BURGOS
Magíster

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2023

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este trabajo de grado.

Se autoriza su uso y reproducción indicando el origen.

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Currículo en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia para optar al título de Ingeniero en Transporte y Vías, actuando como jurados:

LUIS GABRIEL MÁRQUEZ DÍAZ
Doctor en ingeniería Civil

FLOR ANGELA CERQUERA ESCOBAR
Doctora en geografía del transporte

Tunja, 06 de marzo de 2023

DEDICATORIA

A Dios por darnos la salud y la fortaleza necesaria para culminar este proyecto de grado, a nuestros padres por todo su amor y acompañamiento en cada paso de este proceso, no solo para lograr ser buenos profesionales sino también mejores personas cada día, llenas de buenos valores, fuerza, disciplina, dedicación y compromiso con nuestras responsabilidades.

De igual modo, a nuestros hermanos por darnos motivación y consejos para entregar un excelente resultado en la parte investigativa y, por último, a todas esas personas que nos ofrecieron ese apoyo incondicional y ayuda necesaria que hizo posible que lográramos llevar a cabo el desarrollo de este trabajo. Muchas gracias a todos por hacer posible este sueño que nos llena de inmensa satisfacción y alegría.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia queremos agradecer a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y a la escuela de Transporte y Vías, por todos los años de acompañamiento, por todas las vivencias y por todos los conocimientos suministrados, que fueron de gran importancia para la correcta materialización de este proyecto de grado.

También queremos agradecerle de manera muy especial y sincera al ingeniero M.Sc. Fredy Alberto Guio Burgos, por su gran compromiso, paciencia, disponibilidad, asesoramiento y ayuda, en todo lo concerniente al proceso investigativo que se realizó con este proyecto.

Por último y no menos importante, a nuestros padres, familiares y amigos, que, con su apoyo incondicional, contribuyeron en gran medida en el desarrollo de este proyecto y adicionalmente en nuestro desarrollo como personas y como futuros profesionales.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
1.1 BRECHA CRÍTICA	14
1.2 TIEMPO DE SEGUIMIENTO.....	15
1.3 MÉTODOS	15
1.3.1 Método de percentiles.....	15
1.3.2 Método de Raff's.....	15
1.3.3 Método Distribución acumulativa de brechas	16
1.3.4 Modelo de capacidad HCM 2016.....	16
1.4 INVESTIGACIONES REALIZADAS	16
2. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	19
2.1 GENERALIDADES Y TOMA DE INFORMACIÓN.....	19
2.2 EXTRACCIÓN DE DATOS	21
2.3 MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA BRECHA CRÍTICA	24
2.3.1 Método de percentiles.....	24
2.3.2 Método de Raff's.....	24
2.3.3 Método de aceptación de brechas acumulativas	24
2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE BRECHAS Y TIEMPOS DE SEGUIMIENTOS	24
2.5 MODELO DE CAPACIDAD.....	25
3. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	26

3.1	BRECHAS CRÍTICAS	29
3.1.1	Método de Percentiles	29
3.1.2	Método de raff´s.....	32
3.1.3	Método de distribución acumulativa de brechas.....	35
3.2	RESULTADOS del ANÁLISIS ESTADÍSTICO	38
3.2.1	Comparación de muestras	44
3.2.1	Modelo de capacidad.....	46
3.2.2	Análisis de resultados.....	48
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
	BIBLIOGRAFÍA	53
	ANEXOS	55

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Cantidad de brechas obtenidas.....	26
Tabla 2. Volúmenes acceso sur – Glorieta del Gobernador.....	27
Tabla 3. Volúmenes acceso oriental – glorieta norte	27
Tabla 4. Volúmenes anillo – Glorieta del Gobernador.....	27
Tabla 5. Volúmenes anillo – glorieta norte	28
Tabla 6. Volumen total del aforo y proporciones	28
Tabla 7. Ejemplo de brechas extraídas	29
Tabla 8. Brecha crítica según tipo de vehículo (método percentiles) – Glorieta Gobernador	31
Tabla 9. Brecha crítica según carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Gobernador	31
Tabla 10. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Gobernador	31
Tabla 11. Brecha crítica según tipo de vehículo (método percentiles) – Glorieta Norte	31
Tabla 12. Brecha crítica según carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Norte	32
Tabla 13. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Norte	32
Tabla 14. Brecha crítica según tipo de vehículo (método Raff) – Glorieta Gobernador	34
Tabla 15. Brecha crítica según carril de acceso (método Raff) – Glorieta Gobernador	34
Tabla 16. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método Raff) – Glorieta Gobernador	34
Tabla 17. Brecha crítica según tipo de vehículo (método Raff) – Glorieta Norte.....	34
Tabla 18. Brecha crítica según carril de acceso (método Raff) – Glorieta Norte.....	35
Tabla 19. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método Raff) – Glorieta Norte	35
Tabla 20. Brecha crítica según tipo de vehículo (método DAB) – Glorieta Gobernador	37
Tabla 21. Brecha crítica según carril de acceso (método DAB) – Glorieta Gobernador	37
Tabla 22. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método DAB) – Glorieta Gobernador	37
Tabla 23. Brecha crítica según tipo de vehículo (método DAB) – Glorieta Norte.....	37
Tabla 24. Brecha crítica según carril de acceso (método DAB) – Glorieta Norte.....	38
Tabla 25. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método DAB) – Glorieta Norte	38
Tabla 26. Análisis estadístico tiempos de seguimiento	43
Tabla 27. Comparación de los valores de t_c , t_f , A y B en rotondas (2c -2e) - Glorieta del Gobernador	46
Tabla 28. Calibración ecuación de capacidad - Glorieta del Gobernador	47
Tabla 29. Comparación de los valores de t_c , t_f , A y B en rotondas (2c -2e) - Glorieta Norte.....	47
Tabla 30. Calibración ecuación de capacidad - Glorieta Norte	48

pág.

Tabla 31. Resumen de brechas críticas.....	48
Tabla 32. Comparación de brechas críticas	49

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Descripción visual de brecha o claro.....	14
Figura 2. Procesamiento de datos Sony Vegas	19
Figura 3. Punto de grabación Glorieta Norte.....	20
Figura 4. Punto de grabación Glorieta del Gobernador.....	21
Figura 5. Puntos de referencia	22
Figura 6. Ejemplo información extraída Glorieta Norte.....	23
Figura 7. Ejemplo de brecha con tiempos de seguimiento.....	23
Figura 8. Ecuación capacidad HCM 2016	25
Figura 9. Método percentiles general - Glorieta Gobernador	30
Figura 10. Método percentiles general - Glorieta Norte.....	30
Figura 11. Método Raff general – Glorieta Gobernador	33
Figura 12. Método Raff general – Glorieta Norte	33
Figura 13. Método DAB general – Glorieta Gobernador	36
Figura 14. Método DAB general – Glorieta Norte.....	36
Figura 15. Resumen estadístico de las brechas aceptadas – glorieta gobernador	38
Figura 16. Histograma de las brechas aceptadas – Glorieta Gobernador.....	39
Figura 17. Gráfico de dispersión de las brechas aceptadas – Glorieta Gobernador	39
Figura 18. Prueba de Normalidad de las brechas aceptadas – Glorieta Gobernador ...	40
Figura 19. Resumen estadístico de las brechas aceptadas – Glorieta Norte.....	41
Figura 20. Histograma de las brechas aceptadas – Glorieta Norte.....	41
Figura 21. Gráfico de dispersión de las brechas aceptadas – Glorieta Norte	42
Figura 22. Prueba de Normalidad de las brechas aceptadas– Glorieta Norte	42
Figura 23. Comparación de medianas de brechas aceptadas	44
Figura 24. Comparación de medias de tiempos de seguimiento para el carril central ..	45
Figura 25. Comparación de desviación estándar tiempos de seguimiento para el carril central.....	45
Figura 26. Comparación de medianas tiempos de seguimiento para el carril central ...	46

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Base de datos y cálculo glorieta del gobernador.....	55
ANEXO B. Base de datos y cálculo glorieta del norte.....	55

INTRODUCCIÓN

Dado que las brechas críticas son un factor clave a la hora de caracterizar el comportamiento del tráfico y determinar qué tanto pueden influir en la circulación vehicular que compone la intersecciones de estudio, puesto que las brechas reflejan el menor tiempo aceptado por los usuarios de la red con el propósito de ingresar a una corriente vehicular en circulación, se vuelve relevante analizar este parámetro con el fin de prevenir futuras afectaciones a la circulación adecuada de los medios de transporte que hacen uso de la red vial de una ciudad o municipio, evitando de este modo la creación de contrariedades a la movilidad e incluso a problemas ligados con la siniestralidad.

A raíz de todo ello, surge el objeto de caracterizar y analizar el comportamiento de los motociclistas y otros usuarios de la vialidad en la ciudad de Tunja, en lo que respecta a las brechas críticas en puntos específicos de la ciudad (Glorieta del Gobernador y Glorieta Norte) cuya participación vehicular es considerablemente alta, lo que permite evidenciar con más claridad este fenómeno de comportamiento. Es por ello, que se caracterizó la aceptación de brechas críticas en motociclistas en dos intersecciones tipo glorieta, de la mano de un análisis estadístico de brechas aceptadas y rechazadas como también de los tiempos de seguimiento que surgen a partir de los parámetros mencionados anteriormente y de este modo establecer el impacto de la motocicleta y las demás tipologías vehiculares implementadas y su aplicación en materia de modelos de capacidad evaluando los diversos valores de brecha crítica para cada intersección.

En lo que respecta a la metodología empleada para la toma de información, se hizo uso de herramientas visuales y de grabación ubicando una cámara de video en los puntos de análisis para luego extraer los datos y analizar de este modo las muestras empleando tres métodos de obtención de brecha crítica, el análisis estadístico a partir del software Statgraphics y la obtención de los parámetros de capacidad todo ello para ambas intersecciones.

En cuanto, al contenido de este documento, este se encuentra dividido en cuatro secciones iniciando por un fundamento teórico, el cual incluye algunos conceptos netamente ligados al tema de brechas, al tema de los modelos de cálculo y algunas investigaciones de referencia que ayudan a conocer ciertos antecedentes de las variables tratadas. En seguida se encuentra la metodología implementada para la obtención de los datos describiendo las zonas de análisis y los principales criterios establecidos para el manejo de la información. Como siguiente punto se tiene el desarrollo del trabajo el cual incluye los resultados de los tres métodos de obtención de brecha crítica, el análisis estadístico y como aspecto final la determinación de los parámetros de capacidad. Por último, se dan las conclusiones las cuales dan respuesta a los objetivos y demás aspectos sintetizados en el documento.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Con el fin de comprender claramente el proceso de investigación, los datos obtenidos y a su vez los resultados a partir de la información extraída, en esta primera parte se detalla cada uno de los conceptos y variables tenidas en cuenta en este documento.

1.1 BRECHA CRÍTICA

En una intersección de tipo glorieta, controlada con señalización, los vehículos que se aproximan al anillo por alguno de sus accesos deben ceder el paso a los vehículos que ya se encuentran circulando por los carriles de la glorieta, y los vehículos que se aproximan por los accesos sólo pueden entrar en el anillo cuando hay un espacio o hueco de longitud aceptable que permita efectuar la maniobra con total seguridad, lo cual se conoce como brecha (Ver *Figura 1*) o en otras palabras será ese tiempo libre del que disponen los vehículos medido entre el paso por un determinado punto de una vía del extremo trasero de un vehículo y el delantero del siguiente vehículo (Rivera Betancur & Cárdenas Suárez, 2012). Es así que la brecha crítica, es el tiempo mínimo aceptable para que un conductor entre en la intersección. Por lo tanto, es necesario de antemano considerar que cualquier brecha cuyo tiempo sea menor a la brecha crítica será rechazado por el conductor, el cual adicionalmente buscará aceptar brechas compuestas por una separación temporal superior a la brecha crítica (Mensah, 2009).

Cabe agregar, que la brecha crítica puede establecerse mediante estudios particulares sobre las intersecciones, considerándola como la mediana de las brechas aceptables mínimas, es decir, el valor de la brecha que se espera acepte un 50% de los conductores y rechace otro 50%. Además, los valores de brecha crítica se ven afectados en gran medida por aspectos como lo es la habilidad de conducción, la agresividad con la cual el conductor efectúa sus maniobras y también por la actitud del conductor al enfrentar el movimiento que desea realizar (Rivera Betancur & Cárdenas Suárez, 2012).

Figura 1. Descripción visual de brecha o claro



Fuente. Tomado de "Ingeniería de tránsito Fundamentos y aplicaciones". Cal y Mayor R, R., & Cárdenas G, J, 2018, México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. p316.

1.2 TIEMPO DE SEGUIMIENTO

Otra variable o parámetro importante en el análisis de las intersecciones controladas por señalización, es el tiempo de seguimiento el cual según el Highway Capacity Manual 2000, se puede definir como el tiempo de separación entre vehículos que circulan por alguno de los accesos a la intersección y que hacen uso de una misma brecha para ingresar a la corriente vehicular principal en circulación, para el caso específico del proyecto en cuestión la corriente principal son los vehículos que circulan por el anillo de la glorieta (National Research Council, 2000).

En consecuencia, dicho aspecto toma gran relevancia a la hora de analizar el flujo vehicular puesto que dependiendo de ese primer conductor que se encuentra próximo a acceder a la circulación, se podrán llegar a crear las colas, ya que este forma una especie de barrera o tapón mientras logra encontrar ese espacio apropiado y seguro para los vehículos que están tras él, y en consecuencia ese segundo vehículo de la fila tiene que tomar esta misma posición para buscar dicha brecha apropiada (A., 2011), y así sucesivamente hasta que todos los vehículos logren seguir con su recorrido constante, lo cual también dependerá de la magnitud que posea el flujo de la vía prioritaria, lo que se convierte en mayor tiempo (en este caso segundos) de brechas aceptadas.

1.3 MÉTODOS

Los siguientes modelos fueron utilizados en la determinación de brechas críticas vehiculares en intersecciones controladas por señales de ceda el paso, caso específico de las intersecciones tipo glorieta, implementados para la investigación en la Glorieta Norte y Glorieta del Gobernador en la ciudad de Tunja.

1.3.1 MÉTODO DE PERCENTILES

En estadística se entiende por percentil a la medida de posición no central que divide la distribución ordenada de los datos en cien partes iguales. en palabras de los autores y estadísticos Lind, Marchal y Wathen “son ciertos números que dividen la sucesión de datos ordenados en cien partes porcentualmente iguales”. luego de que estos han sido organizados de menor a mayor, el percentil indicará el valor por debajo del cual se puede hallar un determinado porcentaje de observaciones (Lind, Marchal, & Wathen, 2012).

1.3.2 MÉTODO DE RAFF'S

En los años 1950 los investigadores Raff y Hart establecieron un método ampliamente aplicado en diversas investigaciones, el cual permite estimar la brecha crítica o desfase crítico para diversos tipos de vehículos, considerando dicho parámetro como igual al número de brechas aceptadas menores a la separación crítica que se equiparan al número total de brechas rechazadas superiores al valor crítico (Bandeira Pereira, Expósito Martín, & Mendoca de Castro neto, 2021). El método se centra como lo exponen

los autores Pawar & Patil (2016) en calcular la cantidad acumulada de brechas aceptadas y rechazadas en intervalos de tiempo o distancia y graficarlas respecto a una escala de tiempo, con la finalidad de encontrar la intersección de las dos curvas y de este modo el valor de la brecha crítica temporal o espacial.

1.3.3 MÉTODO DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA DE BRECHAS

Otro método implementado con el propósito de obtener la brecha crítica es el DAB, el cual mantiene grandes similitudes con el método de Raff's, ya que, hace uso de una escala de tiempo para graficar los resultados de las brechas rechazadas y aceptadas con el fin de obtener el intercepto entre ambas curvas, con la leve diferencia de que la acumulación de brechas se establece generando un porcentaje acumulativo, respecto a la cantidad de brechas aceptadas y rechazadas respectivamente (Pawar, Kumar, Singh, & Pati, 2016).

1.3.4 MODELO DE CAPACIDAD HCM 2016

La capacidad de una intersección de tipo rotonda se ve influenciada directamente por el patrón de comportamiento que presente el flujo vehicular que hace uso de la misma, ya sea el flujo de entrada, el flujo de circulación e incluso el flujo de salida (Transportation Research Board, 2016). existen diversas investigaciones y metodologías que permiten de manera clara y concisa calcular la capacidad en rotondas, entre ellas destaca la metodología del manual de capacidad de carreteras de los Estados Unidos HCM, en el cual como lo mencionan los autores (Flores Castellano, Depiante, & Galarraga, 2015), se desarrolla la capacidad como una expresión exponencial con estimaciones de los parámetros A y B en función de la brecha crítica (t_c), el tiempo de seguimiento por carril (t_f) y el volumen conflictivo (V_c), los cuales son parámetros que influyen de manera directa en la eficiencia de operación de la circulación vehicular de la rotonda.

1.4 INVESTIGACIONES REALIZADAS

En esta sección se da a conocer algunos de los estudios previos que se han hecho acerca del análisis de brechas los cuales permiten contribuir a la metodología planteada, esto tanto a nivel regional como nacional.

Tal es el caso de un proyecto realizado en la ciudad de Medellín, en el que se encontró que los valores aceptados para efectuar maniobras en intersecciones controladas por señal de pare son similares a los resultados obtenidos a las bases teorías propuestas por el Manual de capacidad de carreteras (HCM 2000), además de ser un tanto menores lo que permitió deducir que el comportamiento de los conductores en esta ciudad es más agresivo que el de los norteamericanos (Rivera Betancur & Cárdenas Suárez, 2012). Lo anterior, solo teniendo en cuenta las tipologías de vehículos livianos y pesados, dejando de un lado las brechas para motociclistas (a pesar de que para el año 2040 según Mojica Arboleda & Peralta Camargo (2013) habrá una motocicleta por cada cinco habitantes), pues concluyeron que debido a la mayor aceleración que estas hacen el comportamiento

es completamente diferente a las demás clases de vehículos por lo que pudiera afectar notablemente los resultados si se llegara a promediar sus tiempos con los demás hallados, por lo que debe llegar a pensarse en un futuro en establecer un factor de ajuste adicional (Sayago Alzate, 2014) si es que quiere incluirse las motos en las comparaciones efectuadas en relación con este manual. Hipótesis que se apoya en el texto de Sayago (2014), realizado en el Valle de Aburrá que mediante trabajo en campo se llega a la idea de que el comportamiento de las motos es diferente del resto de vehículos en especial si se ubican en una intersección semaforizada, donde estas se deciden formar en el inicio del acceso o incluso entre los carriles lo que se vuelve un parámetro importante de analizar, tal como en esta investigación que se analiza el uso de las motos exclusivamente en el carril medio.

Es por ello, que en estudios realizados en Bogotá se han determinado factores de ajuste debido a la presencia de motocicletas dentro de un flujo constante, en específico para el cálculo de flujo de saturación, en el que determinaron que para una participación máxima del cuarenta por ciento de motocicletas que acceden a una intersección semaforizada, su factor de ajuste es de 0.655. Lo que reafirma la idea de implementación de carriles exclusivos de motocicletas e incluso adecuar las líneas de avance situándolas delante del resto de vehículos, sabiendo que, en países como Madrid y Londres son estrategias que funcionan con total éxito, en la medida en que traen consigo excelentes ventajas no solo para estos usuarios sino para todos los partícipes de la red vial, al darles un espacio propio de circulación y acomodamiento en la vía evitando y reduciendo en gran medida las afectaciones a la capacidad vial por la presencia de tales motos (Mojica Arboleda & Peralta Camargo, 2013).

Y es que es de conocimiento público que la conducta de los motociclistas son un factor ampliamente asociado a la siniestralidad de las vías, pues llega a ser crítica e incluso a tener víctimas fatales en algunas ocasiones. Por ejemplo, en el estudio de Ospina (2021) hecho en Cartagena se describió que el 50% de los accidentes viales en esta ciudad corresponden a este tipo de vehículos, con un promedio de 40 muertos y 430 heridos al año. Concluyendo que en las intersecciones analizadas (zonas de mayor riesgo de accidentalidad vial) es que se presentan un 70% colisiones y en accesos no semaforizados se evidenció hasta un 90% de este efecto, lo que también dependerá de aspectos como la edad del conductor, los aspectos sociales y económicos de la persona, el dominio con el vehículo, el estado de ánimo, la hora en que transite, la calidad del pavimento y por supuesto la infraestructura del tramo, ya que se puede llegar a evidenciar intersecciones con señales de tránsito tanto horizontales como verticales en mal estado o incluso inexistente en algunas zonas (Lizarazo Godoy, 2018), lo cual también influirá en la creación de colas traducándose en mayores tiempo de brechas aceptadas.

Precisamente en el documento de Correa Núñez (2015), se puede constatar la gran participación y filtraciones que tienen las motocicletas en el flujo vehicular al ser en promedio 1.5 veces superior en unidades de pasajero/vehículo al flujo estrictamente

homogéneo caracterizado por la circulación exclusiva de autos. De igual modo, se encontró que si se dispone de un canal exclusivo para motocicletas este llegará a presentar un flujo promedio 1.36 veces superior al flujo observado para el tráfico con filtración de motos, siendo en promedio 1.15 veces mayor si se considera con un flujo estrictamente homogéneo, lo cual promueve la idea de que se debería considerar carriles exclusivos con el fin de maximizar la movilidad urbana para los usuarios, no sin antes crear un adecuado comportamiento ciudadano en el que se realicen maniobras responsables siguiendo las normas del Código Nacional de Tránsito y empáticas con el usuario que comparte la vía, puesto que muchas veces el grado de siniestralidad recaerá en el tipo de maniobra que se ejecute. Es por todo lo anterior, que evaluar y analizar las brechas y los tiempos de seguimiento toma gran relevancia al estudiar el flujo vehicular de un tramo, en especial de las rotondas que son un tipo de intersecciones circular cuya presencia de conflictos está presente no solo para vehículos sino también para peatones.

Justamente, en el documento de Uribe García (2018) se estudia este tema de brechas peatonales a mitad de calle para el centro de la ciudad de Tunja, en el cual se analiza el comportamiento que tienen estos usuarios en la vía mediante la determinación de brechas temporales y espaciales, obteniendo por ejemplo que el género masculino es el que cruza la calle con mayor velocidad esto al compararlo con el femenino, así como también el hecho de que cuando se cruza en grupo esa brecha aceptada será menor a una que se realiza en forma individual, esto con ayuda de varios modelos gráficos y probabilísticos y de variables que influyen en la elección de aceptar o rechazar una brecha disponible, ya sean características de los peatones, de los vehículos, relación entre estos dos últimos o físicas de la vía.

Precisamente para evaluar una aplicación de las brechas, es que se tiene el modelo de capacidad tal como lo expresa Flores Castellano, Depiante, & Galarraga (2015) en su artículo, el cual explica la calibración de la ecuación y los parámetros fundamentales para obtenerla. De este modo, este llega a la idea de que a pesar de que la formulación de la ecuación de capacidad se crea bajo los lineamientos del HCM 2016, la cual es ampliamente reconocida y empleada, habrá una variación en los valores de esta al definirla para los diferentes casos de estudio los cuales generalmente son mayores en comparación al texto guía, que en gran parte dependerá del comportamiento que tienen los conductores a la hora de ingresar a las rotondas y que posiblemente no es tan ideal como se plantea en el manual norteamericano, además de otros aspectos que también influyen como la geometría de la intersecciones, la cantidad de accesos que se incorporan a la glorieta, el volumen, la hora de análisis, el número de carriles, la tipología vehicular, entre otros. Sin embargo, es de gran importancia realizar este tipo de estudios con el fin de conocer las condiciones actuales de algunas intersecciones y de este modo crear precedentes para futuras evaluaciones del tráfico y de ser necesario prevenir futuros inconvenientes viales.

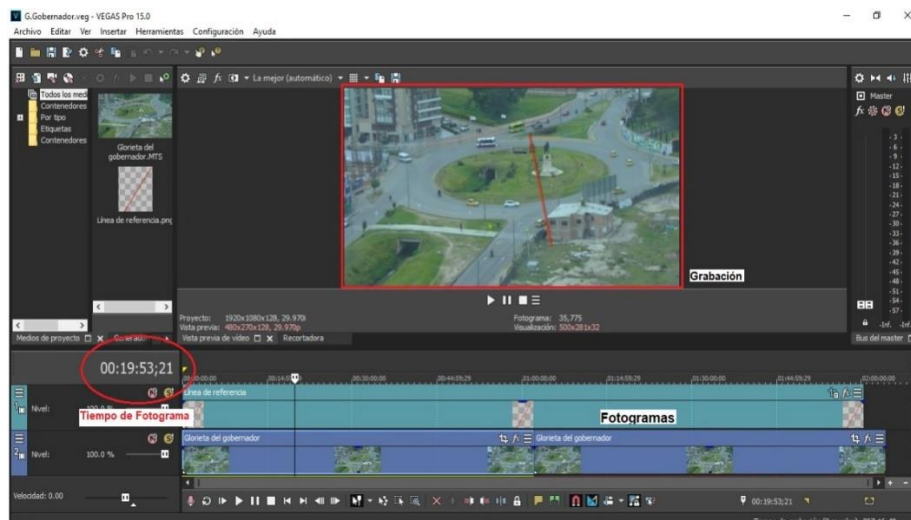
2. METODOLOGÍA EMPLEADA

2.1 GENERALIDADES Y TOMA DE INFORMACIÓN

En lo que respecta a la realización del estudio, como primera medida se establecieron las dos intersecciones de interés, para la toma de información, considerando de ante mano que dichas ubicaciones, son estructuras cuyo flujo vehicular e importancia para la ciudad son de gran relevancia, destacando adicionalmente que son intersecciones sin ningún tipo de control semafórico. Las dos intersecciones son de tipo glorieta y se encuentran ubicadas en la ciudad de Tunja, la primera de ellas conocida como la glorieta Norte y por último la glorieta del Gobernador.

El estudio se realizó entre las 12 m y las 2 pm, ya que, son horas de alta demanda vehicular, con el fin de que los datos recolectados sean significativos y teniendo como requerimiento un mínimo de 300 datos de brechas existentes en este periodo y acceso, se realizaron dos periodos de grabación, repartidos en días típicos de la semana, asignando una hora de grabación por intersección, la grabación se efectuó con la ayuda de una cámara de video Japan Victor Company (JVC), la cual se ubicó en puntos estratégicos cuya perspectiva facilitara la visualización adecuada de la intersección (cabe resaltar que previamente se hicieron videos prueba con el fin de ajustar y definir el enfoque y posición adecuada de la cámara de video), el acceso de interés y las diversas brechas vehiculares, asimismo es necesario mencionar que para la obtención de la base de datos se hizo uso de programa Sony Vegas (MAGIX Software GmbH, 2017) y del programa Excel debido a que el primero de ellos permite controlar los fotogramas de video con mayor facilidad consiguiendo de este modo valores en tiempo más precisos y de esta manera obtener mejores resultados.

Figura 2. Procesamiento de datos Sony Vegas



Fuente. Los autores

A continuación, se presenta de manera detallada la ubicación de los puntos de grabación y de toma de información.

GLORIETA NORTE: En cuanto a esta primera intersección la toma de información se realizó el día jueves 29 de septiembre del 2022 de las 12 m a 1 pm, ubicando la cámara en el quinto piso del conjunto residencial El Recreo, permitiendo de este modo efectuar una toma de todo el anillo de la glorieta y del acceso oriental, el cual por ubicación y perspectiva generaba la mejor toma y facilidad a la hora de efectuar la grabación y su posterior procesamiento, destacando que desde el punto de grabación seleccionado, el acceso oriental presentaba menores afectaciones visuales y obstrucciones que dificultaran la toma de información y la claridad de la misma.

Figura 3. Punto de grabación Glorieta Norte



Fuente. Elaboración propia con base en GOOGLE MAPS. Ciudad de Tunja. Escala 1:4200. Imágenes©2022 CNES/Airbus, Maxar Technologies. 2022.

GLORIETA DEL GOBERNADOR: Por otro lado, en la segunda intersección la toma de información se realizó el día miércoles 28 de septiembre del 2022 de las 1 pm a 2 pm, ubicando la cámara en el piso número 30 del edificio In Altezza, que se encuentra sobre el acceso proveniente del viaducto, el cual se seleccionó para la toma de información debido a que generaba la mejor visualización de los vehículos haciendo uso de la intersección.

Figura 4. Punto de grabación Glorieta del Gobernador



Fuente. Elaboración propia con base en GOOGLE MAPS. Ciudad de Tunja. Escala 1:4200. Imagenes©2022 CNES/Airbus, Maxar Technologies. 2022.

2.2 EXTRACCIÓN DE DATOS

Una vez finalizado el proceso de grabación, se hizo un largo proceso de extracción de la información por medio de la implementación del software de edición de video Sony Vegas Versión 15.0 el cual permitió revisar detalladamente toda la hora grabada, para de este modo determinar el aforo vehicular de cada uno de los accesos analizados, las brechas aceptadas y rechazadas por los vehículos en las intersecciones de estudio (cabe mencionar que este proyecto busca establecer esos tiempos mínimos y máximos de las brechas, es por ello que para el caso de las brechas rechazadas se eligió precisamente la mayor de las observadas en el video puesto que en muchas múltiples ocasiones determinado vehículo rechazaba varias brechas lo que hizo que debiera llevarse a cabo dicho proceso). Como a su vez algunos aspectos adicionales de interés para la investigación, como es el caso del carril, tipo de vehículo y observaciones generales de comportamiento se materializan en la base de datos y en un formato que facilite la manipulación de los resultados, cabe mencionar que para la obtención de la brechas se estableció un punto de referencia fijo en el video haciendo uso de procesos de edición, con el fin de facilitar la extracción de los tiempos y de este modo establecer de manera más sólida las diversas brechas, a continuación se puede observar los puntos de referencia establecidos en el software de video para la generación de las brechas.

Figura 5. Puntos de referencia



Fuente. Los autores

En consonancia con lo anteriormente descrito, es necesario mencionar que en materia de características físicas de la zona de estudio se consideró únicamente el carril de ingreso al anillo de la glorieta (Interior, exterior y central), el carril central aplica únicamente para el caso de las motocicletas, ya que, la ubicación y el comportamiento en el acceso por parte de los usuarios de las mismas es bastante particular al querer buscar estos un incorporación al flujo vehicular más rápida y “optimizadora de espacio” a pesar de poder llegar a generar inseguridad para el bienestar de los usuarios de la vía y de ellos mismos en varias ocasiones, lo cual hace que no se asemeje al de los demás vehículos.

Paralelamente, en lo que respecta a característica vehiculares solo se tomó en cuenta el tipo de vehículo como variable, destacando entre ellos a los automóviles, motocicletas, buses, taxis y camiones, agrupando a los buses interurbanos y TPCU en una sola categoría y los camiones articulados y rígidos de igual manera. Por último, en cuanto a características de las brechas se consideraron solo las brechas aceptadas y su respectiva brecha rechazada, teniendo presente su tiempo de inicio, tiempo final y el resultado. Además de si el vehículo al momento de aceptar la brecha ingresaba o se incorporaba al anillo de manera agresiva o no, y las respectivas observaciones que se consideraron a criterio propio, en especial el ingreso de los vehículos que accedían al anillo por diferente carril en la misma brecha analizada teniendo en cuenta su tipo, si había tiempos de seguimiento (varios vehículos usando la misma brecha), entre otras.

En la Figura 6 se muestran algunos de los datos extraídos para el caso de la Glorieta Norte, destacando que de igual manera se realizó para el caso de la Glorieta del Gobernador, la base de datos contempla todas las variables mencionadas anteriormente.

Figura 6. Ejemplo información extraída Glorieta Norte

BRECHAS GLORIETA NORTE										
Dato	Brecha Rechazada			Brecha aceptada			Tipo de Vehículo	Carril de acceso		
	Inicio	fin	Resultado	Inicio	fin	Resultado		Interior	Centro	Exterior
1	00:07.09	00:08.03	00:00.94	00:09.01	00:10.29	00:01.28	Moto		x	
2	00:26.23	00:27.15	00:00.92	00:28.18	00:30.02	00:01.84	Moto		x	
3	00:30.22	00:33.01	00:02.79	00:33.01	00:37.23	00:04.22	Bus	x		
4	00:53.05	00:55.03	00:01.98	00:56.16	01:00.06	00:03.90	Carro	x		
5	01:12.19	01:13.12	00:00.93	01:13.27	01:20.00	00:06.73	Moto		x	
6	01:13.27	01:20.00	00:06.73	01:20.15	01:24.28	00:04.13	Bus	x		
7	01:37.06	01:37.25	00:00.19	01:39.08	01:43.20	00:04.12	Carro	x		
8	01:53.22	01:55.09	00:01.87	01:56.06	02:05.22	00:09.16	Moto		x	
9	02:12.14	02:15.25	00:03.11	02:16.26	02:20.14	00:03.88	Carro	x		
10	02:26.00	02:27.08	00:01.08	02:27.20	02:29.28	00:02.08	Carro			x

Fuente. Los autores

De igual modo, fueron extraídos los tiempos de que se dieron en cada una de las brechas aceptadas tanto para el carril interior, central y exterior, esto claramente tanto para la Glorieta Norte como para la del Gobernador, tales datos fueron recopilados en tablas creadas específicamente para este tipo de información.

Figura 7. Ejemplo de brecha con tiempos de seguimiento



Fuente. Los autores

Un ejemplo claro de este suceso es la Figura 7 en la que se puede observar la brecha espacial conformada por la motocicleta y el taxi que se encuentran circulando por el anillo resaltados en color naranja, y ya para la obtención de los tiempos se tiene el automóvil que inicia la brecha y varios tipos de vehículos tanto en el carril interno como en el externo que se encuentra en cola esperando ingresar al anillo.

2.3 MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA BRECHA CRÍTICA

Para la obtención de la brecha crítica para las diversas tipologías vehiculares, se hizo uso principalmente de tres modelos gráficos, puesto que se encontró que estos brindaban facilidad de análisis y obtención de resultados para el tipo de datos de estudio en este documento. Estos métodos son:

- Método de percentiles
- Método de Raff's
- Método de Distribución Acumulada de Brechas (DAB)

2.3.1 MÉTODO DE PERCENTILES

Este método consiste en graficar los percentiles obtenidos tanto para las brechas aceptadas como para las brechas rechazadas, ya que, el percentil es una medida estadística que permite comparar resultados. De este modo, se puede establecer una relación de cantidad entre las dos tipologías de brechas con el fin de obtener la brecha crítica teniendo en cuenta las diferentes clases de vehículos y el carril de acceso.

2.3.2 MÉTODO DE RAFF'S

Este modelo es un método gráfico que igualmente permite determinar la brecha crítica, el cual se diferencia de los demás modelos debido a que acumula el número de brechas aceptadas y rechazadas en intervalos de tiempo, con el objetivo de hallar el intercepto y de este modo encontrar la brecha crítica. Es importante mencionar, que este método presenta variaciones en los resultados obtenidos, ya que estadísticamente presenta cierto grado de afectación lo cual repercute en la obtención de los mismos.

2.3.3 MÉTODO DE ACEPTACIÓN DE BRECHAS ACUMULATIVAS

Como siguiente punto, en lo que respecta al método de Distribución acumulativa de brechas, al igual que los anteriores métodos la obtención de resultados es de tipo gráfico, pero en este caso el gráfico se compone por la distribución porcentual acumulada de las brechas aceptadas y la distribución acumulada de las brechas rechazadas, contra una escala temporal, el punto de intercepto entre las dos curvas es el valor de la brecha crítica esperado.

2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE BRECHAS Y TIEMPOS DE SEGUIMIENTOS

Para llevar a cabo este análisis se empleó el programa Statgraphics, ya que es una herramienta especializada en el análisis estadístico de muestras y variables. Con el propósito de evaluar los dos tipos de brechas que se tienen para cada intersección mediante la estadística descriptiva y gráficos asociados a la misma. De igual modo, se realizaron los respectivos análisis para los tiempos de seguimientos asociados tanto al carril interior como al central y exterior, con sus respectivas comparaciones como a su vez de las brechas anteriormente mencionadas mediante la aplicación de pruebas paramétricas y no paramétricas según el caso de estudio.

2.5 MODELO DE CAPACIDAD

A partir de las brechas y los tiempos de seguimiento, se determinó el modelo de capacidad teniendo como guía el capítulo veintidós del Highway Capacity Manual (HCM) Versión 2016 (Vol 3), el cual se enfoca en el comportamiento de las rotondas. Precisamente para establecer la capacidad de las intersecciones analizadas en este documento, se hizo uso de la ecuación base (Ver Figura 8) y de las siguientes expresiones.

Figura 8. Ecuación capacidad HCM 2016

$$\begin{aligned} \text{Carril Exterior Derecha } C_{e,R,pce} &= 1,420e^{(-0.85 \times 10^{-3})v_{c,pce}} \\ \text{Carril Interior Izquierda } C_{e,L,pce} &= 1,350e^{(-0.92 \times 10^{-3})v_{c,pce}} \end{aligned}$$

Fuente. Ecuación de capacidad 21-4. Adaptada de Highway Capacity Manual. RoundBouts. Transportation Research Board Of The National Academies. HCM2010 HIGHWAY CAPACITY MANUAL. Vol 3. Washington D.C.

$$A = \frac{3600}{t_f} \quad [1]$$

$$B = \frac{t_c - \left(\frac{t_f}{2}\right)}{3600} \quad [2]$$

$$C = Ae^{(-Bv_c)} \quad [3]$$

Donde:

Tf: Tiempo de seguimiento (s)

Tc: Tiempo crítico (s)

Vc: Volumen conflictivo (veh/hora)

3. DESARROLLO DEL TRABAJO

En la presente sección se encuentran todos los datos y resultados obtenidos, que hacen parte del proceso de materialización de la brecha crítica, destacando que dicho parámetro se obtuvo no solo para las motocicletas, sino que se estableció la brecha crítica para cuatro tipologías adicionales de vehículos, tales como automóviles, buses (TPCU), camiones y taxis, con el propósito de hacer una comparación de los diversos resultados, cabe destacar que el proceso de análisis y obtención de resultados contempla las dos intersecciones de estudio (Glorieta del Gobernador y Glorieta Norte), de las cuales se extrajeron por medio de herramientas de video y edición un total de 1552 brechas conformadas tanto por brechas rechazadas como brechas aceptadas, resaltando que el total de datos extraídos corresponden a una hora completa de grabación, en la Tabla 1 se puede apreciar de manera más específica la información correspondiente a las brechas extraídas.

Tabla 1. Cantidad de brechas obtenidas

Intersección glorieta Norte	
Nº de brechas aceptadas	300
Nº de brechas rechazadas	300
Total, brechas	600
Intersección glorieta del Gobernador	
Nº de brechas aceptadas	476
Nº de brechas rechazadas	476
Total, brechas	952

Fuente. Los autores

Adicionalmente, cabe mencionar que mediante el uso de la herramienta de edición Sony Vegas versión 15, se determinaron los volúmenes vehiculares presentes en los dos periodos de grabación (tomando intervalos de quince minutos) los volúmenes obtenidos se dividen en dos secciones diferentes, los vehículos que ingresan por el acceso al anillo, y los vehículos que se encuentran circulando por el anillo al momento del conteo, en lo que respecta al acceso de ingreso al anillo, este se seleccionó considerando principalmente, la facilidad visual que presentaba al momento de ubicar la cámara de video.

A continuación, se muestran los volúmenes extraídos para las dos intersecciones de análisis, inicialmente se encuentran los valores de los diferentes accesos (Ver Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2. Volúmenes acceso sur – Glorieta del Gobernador

ACCESO SUR							
Intervalo (min)	AUTOMÓVIL	TAXIS	BUSES	CAMIONES	MOTOS	Σ	
13:00 - 13:15	114	30	11	6	42	203	
13:15 - 13:30	103	40	11	9	48	211	
13:30 - 13:45	171	36	7	10	68	292	
13:45 - 14:00	146	45	6	11	71	279	
Σ	534	151	35	36	229	985	

Fuente. Los autores

Tabla 3. Volúmenes acceso oriental – glorieta norte

ACCESO ORIENTAL							
Intervalo (min)	AUTOMÓVIL	TAXIS	BUSES	CAMIONES	MOTOS	Σ	
13:00 - 13:15	141	43	11	11	73	279	
13:15 - 13:30	93	29	12	18	67	219	
13:30 - 13:45	113	34	17	6	49	219	
13:45 - 14:00	140	27	9	15	65	256	
Σ	487	133	49	50	254	973	

Fuente. Los autores

De igual manera, en las Tablas 4 y 5 se puede observar los volúmenes asociados al flujo vehicular que circula por el anillo de las respectivas intersecciones, obteniendo un mayor volumen vehicular debido a que el flujo vehicular proviene de los accesos adicionales que hacen parte de la intersección.

Tabla 4. Volúmenes anillo – Glorieta del Gobernador

ANILLO							
Intervalo (min)	AUTOMÓVIL	TAXIS	BUSES	CAMIONES	MOTOS	Σ	
13:00 - 13:15	141	36	8	12	50	247	
13:15 - 13:30	127	48	9	18	43	245	
13:30 - 13:45	168	46	4	23	53	294	
13:45 - 14:00	141	36	5	19	44	245	
Σ	577	166	26	72	190	1031	

Fuente. Los autores

Tabla 5. Volúmenes anillo – glorieta norte

ANILLO							
Intervalo (min)	AUTOMÓVIL	TAXIS	BUSES	CAMIONES	MOTOS	Σ	
13:00 - 13:15	200	64	58	10	82	414	
13:15 - 13:30	175	68	40	7	72	362	
13:30 - 13:45	182	65	45	10	87	389	
13:45 - 14:00	237	43	38	12	95	425	
Σ	794	240	181	39	336	1590	

Fuente. Los autores

De manera complementaria, se halló el número total de vehículos que circulan tanto en el acceso como en el anillo durante el periodo total de conteo. Evidenciando un mayor volumen en la glorieta norte debido a su ubicación, número de accesos y conexión con algunos puntos principales de la ciudad.

Tabla 6. Volumen total del aforo y proporciones

TOTAL AFORO				
T.VEH	GLORIETA NORTE	% ACC	GLORIETA DEL GOBERNADOR	% ACC
AUTOMÓVIL	1281	50	1111	54
TAXIS	373	14	317	15
BUSES	230	5	61	4
CAMIONES	89	5	108	4
MOTOS	590	26	419	23
Σ	2563	100	2016	100

Fuente. Los autores

Por otro lado, al analizar los valores obtenidos para la Glorieta del Gobernador se tiene que las motocicletas presentan una participación considerable en la totalidad del flujo vehicular superando inclusive a la participación del transporte público, con hasta un porcentaje del 19% con relación a la totalidad de los vehículos. Adicionalmente, al detallar la Tabla 6 en la cual se respalda la afirmación anterior ya que se ve que las motocicletas cuentan un 23% de proporción, siendo así el segundo tipo de vehículo con mayor representación en el flujo vehicular, además de representar aproximadamente la mitad de los automóviles que ingresan por el acceso sur, la cual se debe al aumento que se ha generado en los últimos años por la facilidad de adquisición de este tipo de vehículo. En cuanto, a la Glorieta Norte se puede observar un comportamiento similar a la anterior intersección, pero con ciertos aumentos en las proporciones debido a que este punto posee un volumen superior.

3.1 BRECHAS CRÍTICAS

Con el fin de facilitar la manipulación de los datos extraídos, se realizó un formato personalizado en el programa Excel el cual ayudo a establecer los tiempos de brechas para cada dato registrado. Cabe resaltar que para presentar los tiempos de las brechas en este formato se tuvo que realizar la conversión a datos presentados en segundos (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Ejemplo de brechas extraídas

Formato Personalizado		Adaptación	
Aceptadas	Rechazadas	Aceptadas (s)	Rechazadas (s)
00:01,28	00:00,94	1,28	0,94
00:01,84	00:00,92	1,84	0,92
00:04,22	00:02,79	4,22	2,79
00:03,90	00:01,98	3,90	1,98
00:06,73	00:00,93	6,73	0,93
00:04,13	00:06,73	4,13	6,73
00:04,12	00:00,19	4,12	0,19
00:09,16	00:01,87	9,16	1,87
00:03,88	00:03,11	3,88	3,11
00:02,08	00:01,08	2,08	1,08
00:04,20	00:01,96	4,20	1,96
00:03,91	00:00,97	3,91	0,97
00:03,06	00:00,95	3,06	0,95
00:09,78	00:02,01	9,78	2,01

Fuente. Los autores

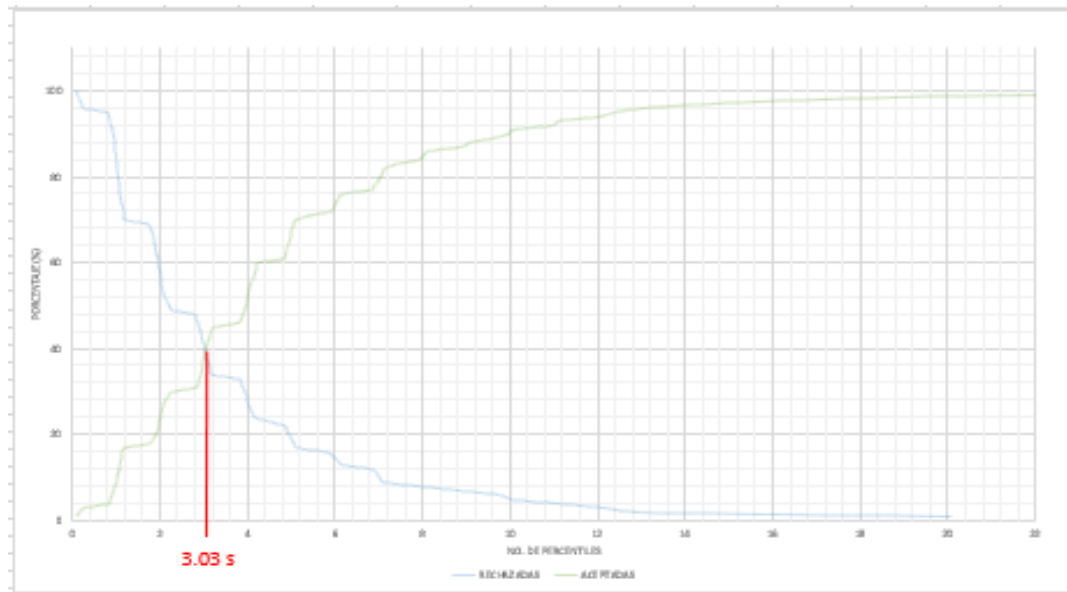
A partir de los tiempos anteriores, se obtienen las diferentes brechas tanto aceptadas como rechazadas para de esta manera realizar los cálculos correspondientes a los métodos de obtención de brecha crítica.

3.1.1 MÉTODO DE PERCENTILES

En este método se obtuvo los diferentes percentiles tanto para las brechas aceptadas como para las rechazadas, considerando de antemano que inicialmente se hizo el procedimiento de cálculo considerando la totalidad de los datos sin inmiscuir porque tipo de carril tuvo ingreso al anillo y contemplando cada una de las tipologías vehiculares, esto con el fin de obtener un valor global de brecha crítica.

Con base en los porcentajes y los percentiles de las brechas aceptadas y de las brechas rechazadas, estos se grafica con la intención de encontrar el intercepto de las dos curvas, observando que la brecha crítica temporal para la intersección glorieta del gobernador es de 3.03 segundos (Ver Figura 9).

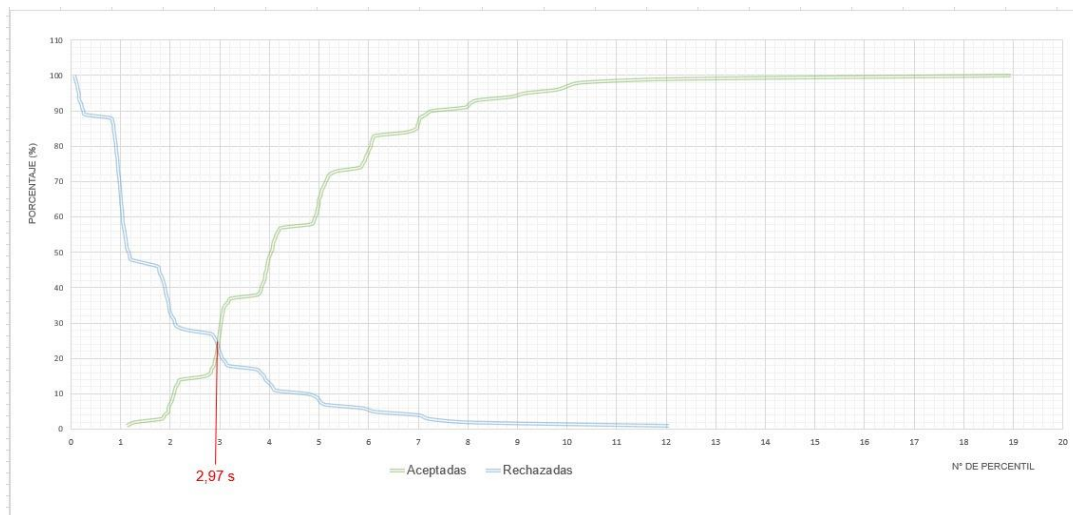
Figura 9. Método percentiles general - Glorieta Gobernador



Fuente. Los autores

Ahora, para el caso de la Glorieta Norte se tiene un valor de brecha crítica general de 2.97 segundos (Ver Figura 10).

Figura 10. Método percentiles general - Glorieta Norte



Fuente. Los autores

De manera paralela, se efectuó el mismo procedimiento anterior, pero en esta ocasión filtrando los valores de las brechas por tipo de vehículo, por tipo de carril y por tipo de vehículo considerando adicionalmente el carril de acceso a la intersección, esto para ambas glorietas de estudio.

Tabla 8. Brecha crítica según tipo de vehículo (método percentiles) – Glorieta Gobernador

Tipo de vehículo	Brecha crítica (s)
Moto	2,85
Automóvil	3,12
TPCU	3,02
Taxi	3,01
Camión	3,62

Fuente. Los autores

Tabla 9. Brecha crítica según carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Gobernador

Brecha crítica (s)		
Carril		
Interior (Izq)	Central	Exterior (Der)
3.97	2.63	2.83

Fuente. Los autores

Tabla 10. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Gobernador

Tipo de vehículo	Izquierdo		Derecho
	Interior (s)	Central (s)	Exterior (s)
Moto	3.13	2.74	2.78
Automóvil	3.99	-	2.82
TPCU	5.02	-	2.98
Taxi	3.84	-	2.12
Camión	3.88	-	2.47

Fuente. Los autores

Tabla 11. Brecha crítica según tipo de vehículo (método percentiles) – Glorieta Norte

Tipo de vehículo	Brecha crítica (s)
Moto	2,12
Automóvil	2,99
Bus	3,89
Taxi	3,02
Camión	3,90

Fuente. Los autores

Tabla 12. Brecha crítica según carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Norte

Brecha crítica (s)		
Carril		
Interior(Izq)	Central	Exterior(Der)
3,03	2,11	2,97

Fuente. Los autores

Tabla 13. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método percentiles) – Glorieta Norte

Tipo de vehículo	Izquierdo	Derecho	
	Interior (s)	Central (s)	Exterior (s)
Moto	2,47	2,11	2,31
Automóvil	3,09		2,97
Bus	3,74		3,95
Taxi	3,36		2,99
Camión	4,08		3,36

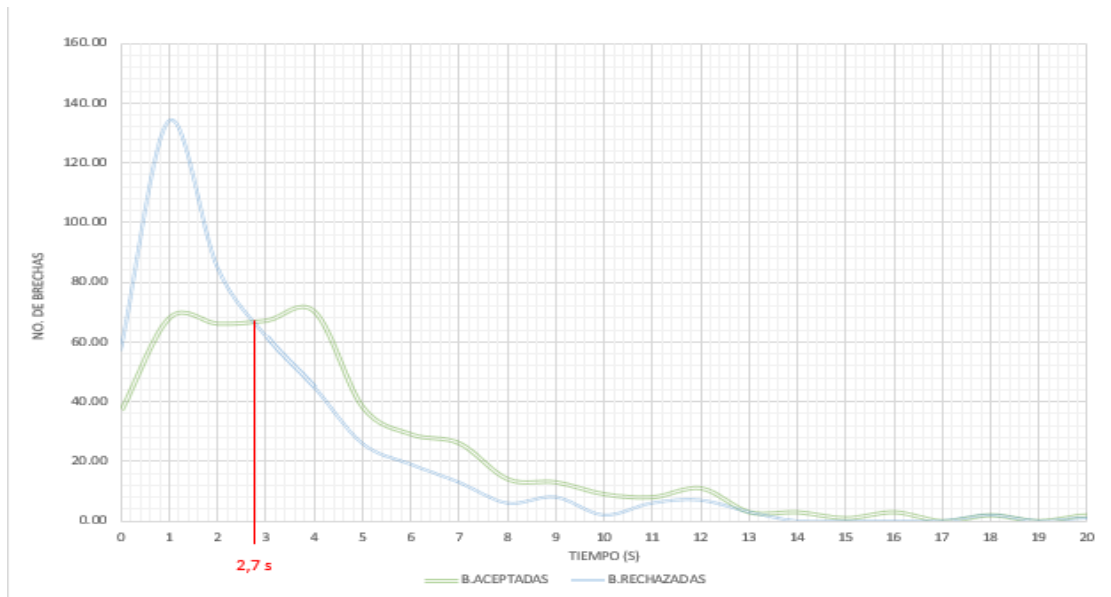
Fuente. Los autores

3.1.2 MÉTODO DE RAFF'S

Para realizar el método inicialmente, los tiempos de brechas (aceptadas y rechazadas) se redondean con el fin de facilitar la agrupación de las brechas en intervalos.

Posteriormente, se grafica el número de brechas contra un escala de tiempo considerando el valor mínimo tanto de aceptadas como de rechazadas, y así mismo para el caso del valor máximo, observando que la brecha crítica temporal para la intersección glorieta del gobernador es de 2.7 segundos (Ver Figura 11).

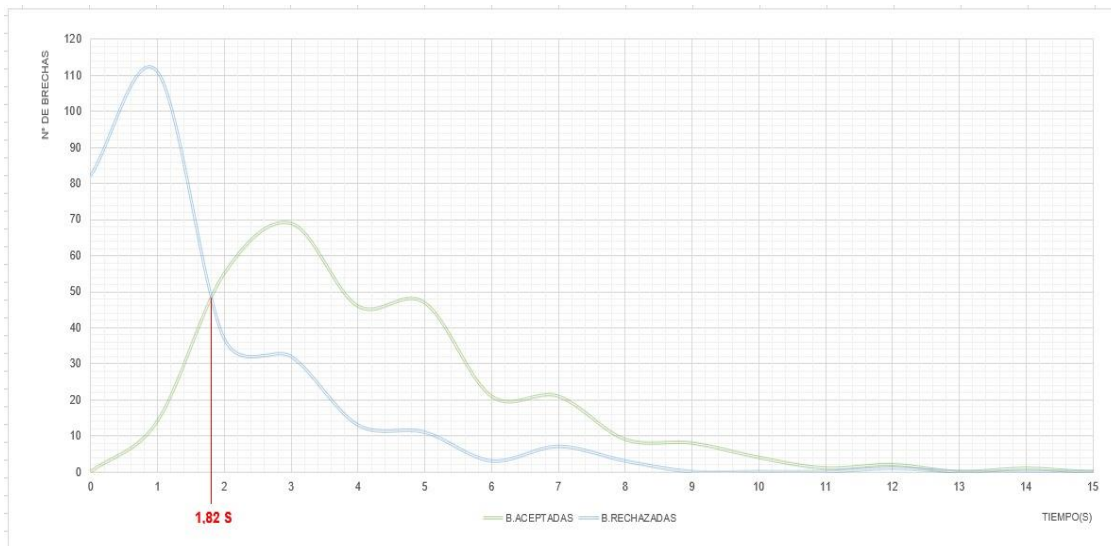
Figura 11. Método Raff general – Glorieta Gobernador



Fuente. Los autores

Asimismo, se realiza el procedimiento con los datos provenientes de la Glorieta Norte, para los cuales se obtuvieron una brecha crítica de 1.82 segundos (Ver Figura 12).

Figura 12. Método Raff general – Glorieta Norte



Fuente. Los autores

De manera similar, al modelo anterior se aplicó el método de Raff para las cinco tipologías vehiculares, como a su vez para el carril de acceso y cada vehículo por carril, esto para ambas glorietas de estudio.

Tabla 14. Brecha crítica según tipo de vehículo (método Raff) – Glorieta Gobernador

Tipo de vehículo	Brecha crítica (s)
Moto	2.11
Automóvil	2.61
TPCU	2.32
Taxi	2.51
Camión	3.01

Fuente. Los autores

Tabla 15. Brecha crítica según carril de acceso (método Raff) – Glorieta Gobernador

Brecha crítica (s)		
Carril		
Interior (Izq)	Central	Exterior (Der)
2.75	2.82	1.70

Fuente. Los autores

Tabla 16. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método Raff) – Glorieta Gobernador

Tipo de vehículo	Izquierdo		Derecho
	Interior (s)	Central(s)	Exterior (s)
Moto	1.80	2.82	1.00
Automóvil	3.00	-	1.68
TPCU	2.00	-	1.41
Taxi	2.18	-	2.34
Camión	2.50	-	3.00

Fuente. Los autores

Tabla 17. Brecha crítica según tipo de vehículo (método Raff) – Glorieta Norte

Tipo de vehículo	Brecha crítica (s)
Moto	1,68
Automóvil	1,79
Bus	2,58
Taxi	1,72
Camión	2,43

Fuente. Los autores

Tabla 18. Brecha crítica según carril de acceso (método Raff) – Glorieta Norte

Brecha crítica (s)		
Carril		
Interior (Izq)	Central	Exterior (Der)
2,17	1,67	1,75

Fuente. Los autores

Tabla 19. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método Raff) – Glorieta Norte

Tipo de vehículo	Izquierdo		Derecho
	Interior (s)	Central (s)	Exterior (s)
Moto	1,99	1,67	1,59
Automóvil	2,08		1,71
Bus	2,67		2,52
Taxi	1,68		1,72
Camión	3,01		3,91

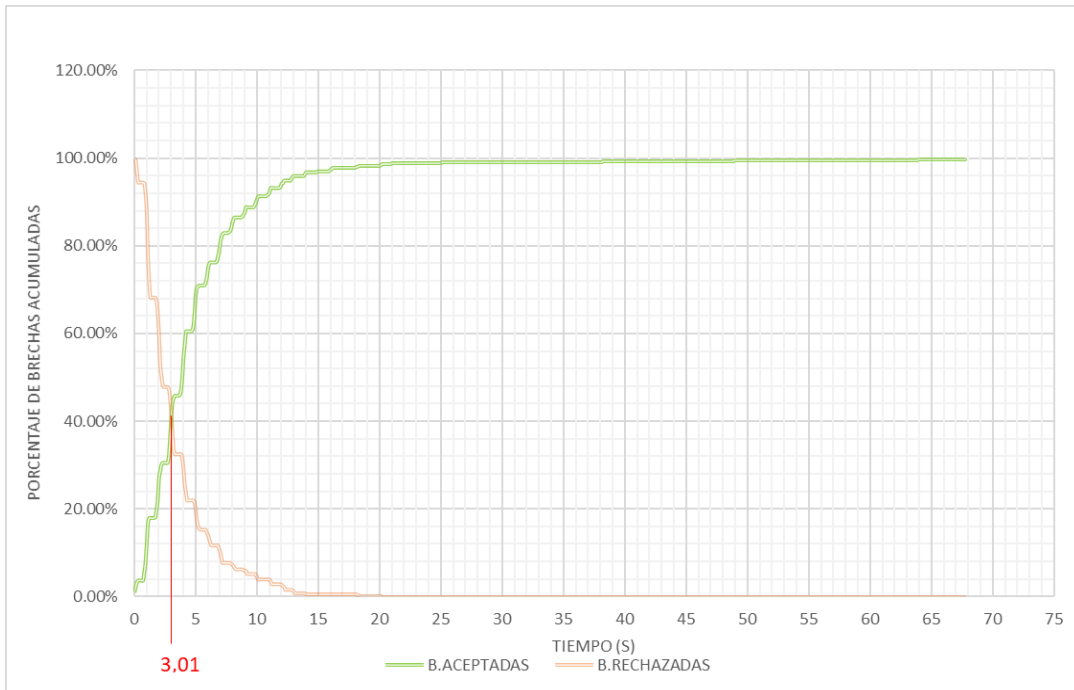
Fuente. Los autores

3.1.3 MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA DE BRECHAS

Como último proceso de cálculo, se empleó el método de Distribución Acumulativa de brechas, teniendo presente las mismas condiciones consideradas para los dos métodos anteriores.

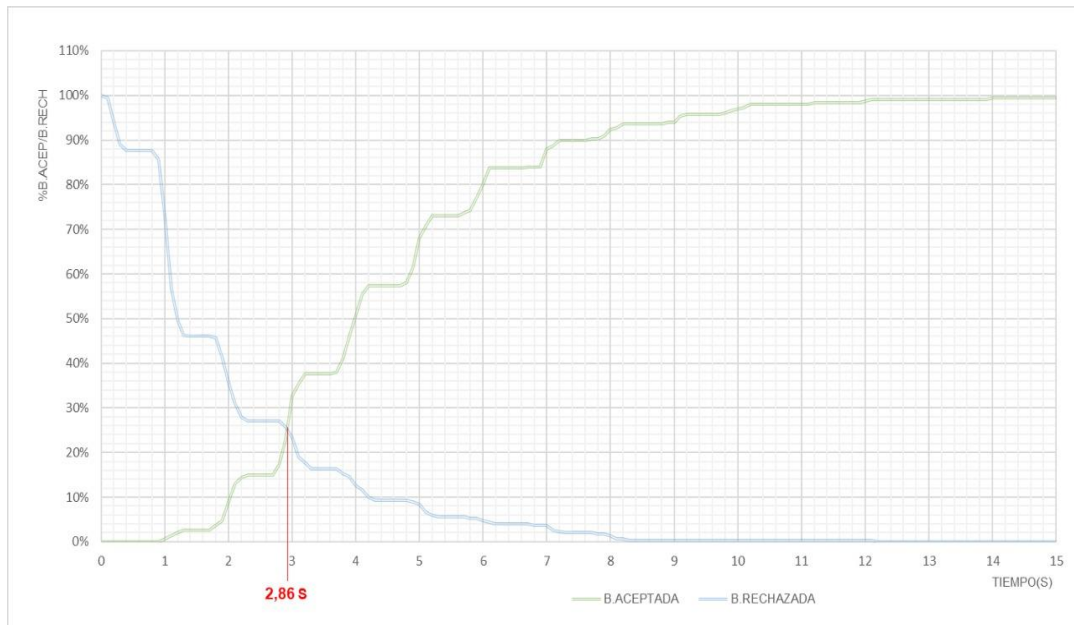
Partiendo de los diversos valores de brechas aceptadas y rechazadas, se grafica el porcentaje acumulado de brechas contra una escala de tiempo haciendo uso del valor mínimo tanto de aceptadas como de rechazadas, y así mismo para el caso del valor máximo, observando que la brecha crítica temporal para la intersección Glorieta del Gobernador es de 3.01 segundos (Ver Figura 13), y para la Glorieta Norte, es de 2.86 segundos (Ver Figura 14).

Figura 13. Método DAB general – Glorieta Gobernador



Fuente. Los autores

Figura 14. Método DAB general – Glorieta Norte



Fuente. Los autores

A su vez se aplicó el método de DAB para las cinco tipologías vehiculares, como también para el carril de acceso y cada vehículo por carril, esto para ambas intersecciones.

Tabla 20. Brecha crítica según tipo de vehículo (método DAB) – Glorieta Gobernador

Tipo de vehículo	Brecha crítica (s)
Moto	2,90
Automóvil	3,15
TPCU	3,00
Taxi	3,00
Camión	3,30

Fuente. Los autores

Tabla 21. Brecha crítica según carril de acceso (método DAB) – Glorieta Gobernador

Brecha crítica (s)		
Carril		
Interior (Izq)	Central	Exterior (Der)
3.92	2.30	2.90

Fuente. Los autores

Tabla 22. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método DAB) – Glorieta Gobernador

Tipo de vehículo	Izquierdo		Derecho
	Interior	Central	Exterior
Moto	3.18	2.28	2.77
Automóvil	4.00	-	2.88
TPCU	4.95	-	1.00
Taxi	3.30	-	2.10
Camión	3.70	-	1.90

Fuente. Los autores

Tabla 23. Brecha crítica según tipo de vehículo (método DAB) – Glorieta Norte

Tipo de vehículo	Brecha crítica (s)
Moto	2,17
Automóvil	2,95
Bus	3,83
Taxi	2,98
Camión	3,95

Fuente. Los autores

Tabla 24. Brecha crítica según carril de acceso (método DAB) – Glorieta Norte

Brecha crítica (s)		
Carril		
Interior (Izq)	Central	Exterior (Der)
2,98	2,12	2,93

Fuente. Los autores

Tabla 25. Brecha crítica según tipo de vehículo y carril de acceso (método DAB) – Glorieta Norte

Tipo de vehículo	Izquierdo		Derecho
	Interior (s)	Central (s)	Exterior (s)
Moto	2,17	2,12	2,25
Automóvil	2,97		2,96
Bus	2,99		3,84
Taxi	3,04		2,98
Camión	3,99		3,12

Fuente. Los autores

3.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para efectuar el análisis estadístico, se inició con la muestra de brechas aceptadas pertenecientes a la Glorieta del Gobernador, obteniéndose el resumen estadístico visto a continuación.

Figura 15. Resumen estadístico de las brechas aceptadas – glorieta gobernador

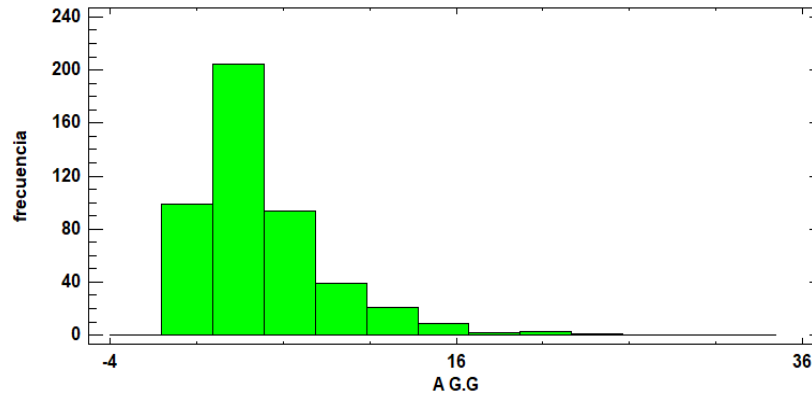
Recuento	476
Promedio	5.05006
Mediana	3.945
Moda	0.95
Varianza	35.8303
Desviación Estándar	5.98584
Coefficiente de Variación	118.53%
Error Estándar	0.274361
Mínimo	0.02
Máximo	67.78
Rango	67.76
Sesgo	5.9651
Curtosis Estandarizada	230.43
Suma	2403.83

Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Es así que se tiene el siguiente histograma, en el cual se puede apreciar que los datos no se agrupan en una tendencia central, por el contrario, presentan una dispersión hacia

el costado izquierdo, ya que, las brechas aceptadas se tienden a acumular entre los rangos de 0 a 4 segundos, generando este tipo de distribución.

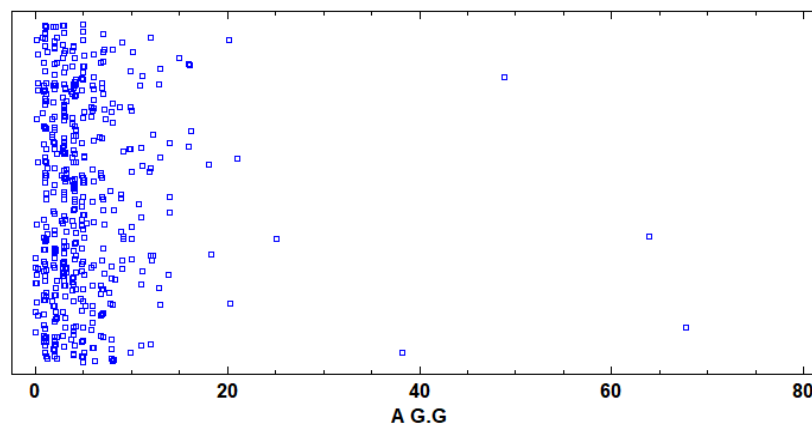
Figura 16. Histograma de las brechas aceptadas – Glorieta Gobernador



Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Por otra parte, con ayuda del gráfico de dispersión se puede destacar que hay gran similitud en el conjunto de datos ya que la mayoría de estos se agrupan en los primeros intervalos de tiempos y solo se cuentan con una pequeña cantidad de datos atípicos que no obedecen al patrón de comportamiento habitual de las brechas aceptadas.

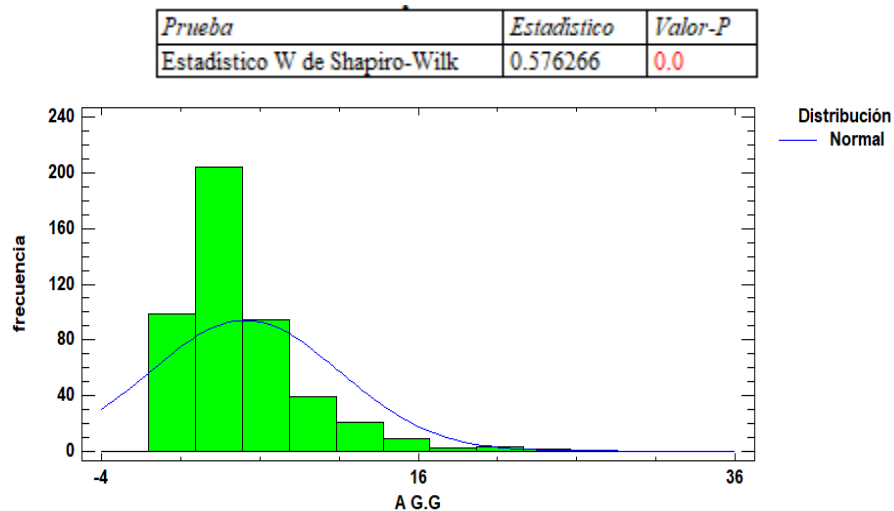
Figura 17. Gráfico de dispersión de las brechas aceptadas – Glorieta Gobernador



Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

De manera complementaria, se le hizo la prueba de normalidad a los datos de brechas para las dos glorietas, esto con el fin de demostrar si estas se ajustan a una distribución normal y a partir de ello realizar las respectivas comparaciones, ya sea de sus medias, desviaciones estándar o medianas dependiendo de dicha normalidad.

Figura 18. Prueba de Normalidad de las brechas aceptadas – Glorieta Gobernador



Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Según los resultados de la prueba estadística debido a que el valor P de las pruebas realizadas es cero, es decir, es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que las brechas aceptadas de la Glorieta del Gobernador provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

Ahora, al realizar el mismo análisis estadístico para las brechas rechazadas se puede mencionar que estas representan aproximadamente la mitad de las aceptadas al tener un promedio de 3.25 segundos en relación al promedio de las brechas aceptadas las cuales cuentan con un promedio de 5.05 segundos. Al obtener el histograma de las brechas rechazadas un comportamiento similar a las aceptadas, puesto que, no hay una tendencia central, sin embargo, con la diferencia de que hay una mayor dispersión de los datos respecto del valor central debido a que los valores de las rechazadas tienden a agruparse en intervalos muy pequeños de tiempo, que para el caso oscilan entre 0.8 a 2.5 segundos.

En cuanto, al análisis de dispersión se encontró que los datos se agrupan en franjas y que tienen una dispersión considerable con ciertos valores atípicos. También se realizó la prueba de normalidad para las brechas rechazadas, encontrando que estas tampoco se ajustan a una distribución normal, debido a su valor del parámetro P el cual sigue siendo cero.

En lo que respecta a la Glorieta Norte, el resumen estadístico arroja similitudes muy marcadas en cuanto a las diferencias resalta en la glorieta anterior para este tipo de variable (brechas aceptadas), por lo que se puede decir que cuentan con una tendencia

similar a las de los valores extraídos a pesar de cada una contar con un comportamiento diferente en los tiempos y variables analizadas para cada tipo de glorieta.

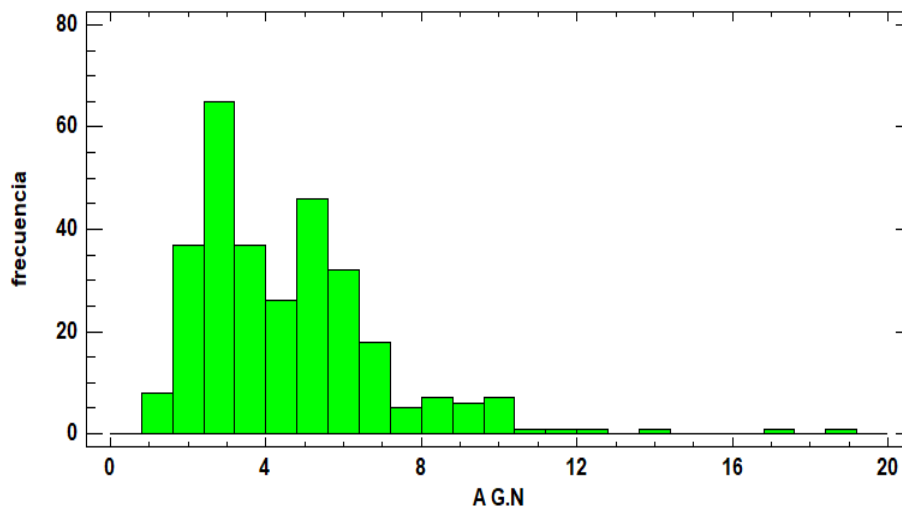
Figura 19. Resumen estadístico de las brechas aceptadas – Glorieta Norte

Recuento	300
Promedio	4.60367
Mediana	4.03
Moda	4.99
Varianza	5.93886
Desviación Estándar	2.43698
Coefficiente de Variación	52.9356%
Error Estándar	0.140699
Mínimo	0.99
Máximo	18.94
Rango	17.95
Sesgo	1.83617
Curtosis Estandarizada	21.5607
Suma	1381.1

Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

En cuanto a la agrupación de los datos, se puede evidenciar en la Figura 20 que no existe una tendencia centralizada, sino que presenta una dispersión de los datos a un costado, con la particularidad de que presenta dos picos elevados de agrupación de datos.

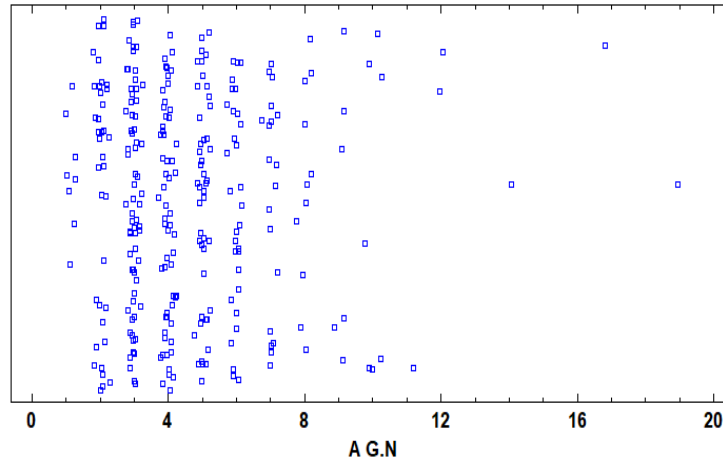
Figura 20. Histograma de las brechas aceptadas – Glorieta Norte



Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Al igual que comportamientos anteriores, se evidencia que las brechas aceptadas se distribuyen de manera agrupada en los primeros intervalos de tiempo presentando ciertos patrones de franjas, sin la presencia de una cantidad elevada de datos atípicos.

Figura 21. Gráfico de dispersión de las brechas aceptadas – Glorieta Norte

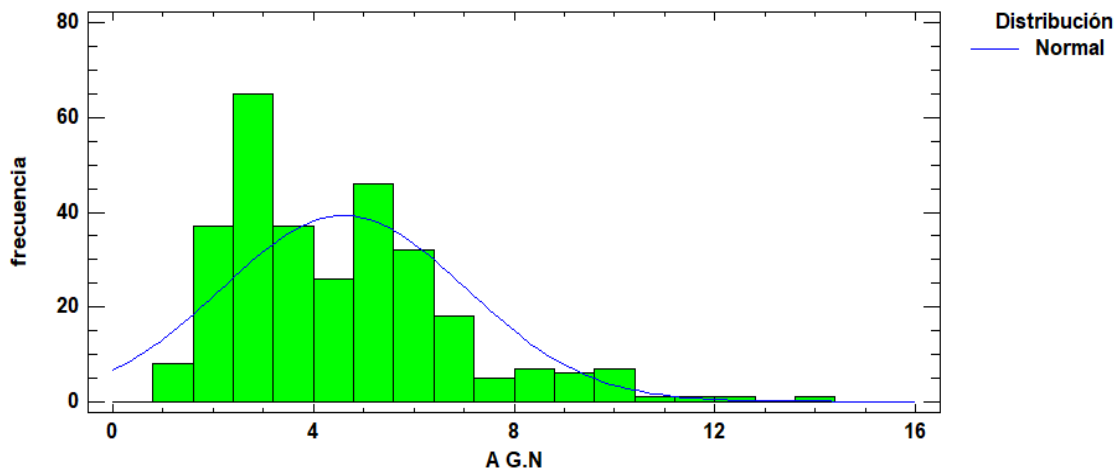


Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Al mismo tiempo, se efectuó el análisis de normalidad para el caso de la Glorieta Norte con el propósito de analizar su comportamiento tanto en brechas rechazadas como en aceptadas (Ver Figura 22).

Figura 22. Prueba de Normalidad de las brechas aceptadas– Glorieta Norte

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.872103	0.0



Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Tal como se puede observar en la Figura 22 las brechas no presentan una distribución normal debido a los resultados arrojados en el parámetro P. Análogamente, para el caso de la Glorieta Norte las brechas rechazadas representan en cuanto a promedios un valor menor que las aceptadas siendo estas aproximadamente menores en un 50 a 60%. A partir de la evidencia estadística del histograma de las brechas rechazadas están presentan un comportamiento similar a las aceptadas, ya que, no hay una tendencia central, con la diferencia de que hay una mayor dispersión de los datos respecto del valor central debido a que los valores de las rechazadas tienden a agruparse en intervalos muy pequeños de tiempo, que para el caso oscilan entre 1 a 2 segundos. De igual manera al revisar lo correspondiente al análisis de normalidad se encuentra que estas no presentan una distribución normal.

De manera continua, se analizó los tiempos de seguimientos para los carriles interior (izquierdo), central y exterior (derecho). Efectuando el mismo proceso estadístico que se realizó para las muestras de brechas aceptadas y rechazadas.

Tabla 26. Análisis estadístico tiempos de seguimiento

Glorieta del Gobernador		
Carril interior (Izq)	Carril central	Carril exterior (Der)
Los datos no cuentan con una agrupación y similitudes muy marcadas, por el contrario tienden a disgregarse desde 0 a 3 segundos y entre 6 a 10 segundos son atípicos. Además, sus datos no se ajustan a una distribución normal.	Los datos cuentan con una agrupación nula por lo que se dispersan a lo largo de toda la escala de tiempo. A diferencia de los otros carriles este se ajusta a una distribución normal, debido a que su valor del parámetro P es mayor a 0.05 (0.19).	Los datos no cuentan con una agrupación y similitudes muy marcadas, por el contrario tienden a disgregarse desde 0 a 3 segundos y entre 7 a 15 segundos son atípicos. Asimismo, sus datos no corresponden a una distribución normal con un valor de P igual a 0.
Glorieta Norte		
Los datos no cuentan con una agrupación y similitudes muy marcadas, por el contrario tienden a disgregarse desde 0 a 2 segundos y entre 2.5 a 4 segundos son atípicos. Además, sus datos no se ajustan a una distribución normal.	Los datos cuentan con una agrupación nula por lo que se dispersan a lo largo de toda la escala de tiempo. Se destaca que los datos obedecen a una distribución normal, puesto que, el parámetro P es mayor a 0.05 (0.15).	Los datos no cuentan con una agrupación y similitudes muy marcadas, por el contrario tienden a disgregarse desde 0 a 2 segundos y entre 2.5 a 4 segundos son atípicos. Además, sus datos no se ajustan a una distribución normal con un valor de P menor a 0.05.

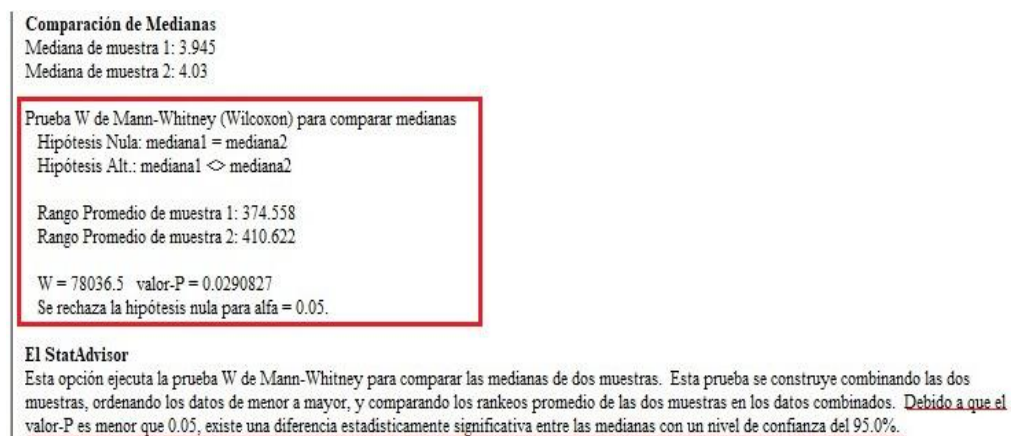
Fuente. Los autores

3.2.1 COMPARACIÓN DE MUESTRAS

En esta sección se comparan algunos parámetros tales como: las medias, la desviación estándar y las medianas con el fin de comprobar si los datos de brechas y los tiempos de seguimientos de las dos intersecciones se pueden trabajar de manera conjunta o si sus diferencias indican un análisis independiente para cada intersección. Es necesario mencionar, que la gran mayoría de las muestras analizadas estadísticamente no obedecen a una distribución normal, tal y como se evidencia en secciones anteriores del documento, por tal motivo, ya que, la distribución en algunos casos es muy sesgada no se puede recurrir a realizar la comparación de medias mediante la prueba t, ni tampoco una comparación de las desviaciones estándar, debido a que son pruebas paramétricas que precisan que la distribución sea normal, mencionado lo anterior la principal comparación recaerá en prueba W de Mann-Whitney para comparar medianas obedeciendo a pruebas de carácter no paramétricas.

En primera instancia, se tiene la comparación de brechas aceptadas mediante la prueba de Mann-Whitney mediante el análisis de sus medianas, ya que, las brechas aceptadas para el caso de las dos intersecciones de análisis no obedecen a una distribución normal, el cual con la ayuda de Statgraphics permite evidenciar que existe una diferencia significativa entre las medianas de las dos muestras de las brechas aceptadas (Ver Figura 23).

Figura 23. Comparación de medianas de brechas aceptadas



Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

En segunda instancia, se analizaron las brechas rechazadas evaluando sus medianas, considerando que las brechas rechazadas tampoco presentan una distribución normal. Por lo cual, se encontró que se presenta una diferencia significativa estadísticamente en los datos lo que indica que el estudio debe realizarse de manera independiente para cada intersección, dado que, el combinar los datos generaría grandes afectaciones en materia estadística y les quitaría confiabilidad y utilidad a los resultados.

De forma continua, se realizó el análisis estadístico de la misma variable para los tiempos de seguimiento en los tres diferentes carriles, con el fin de observar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de seguimiento de las dos intersecciones de estudio. Para el caso específico del carril central, si se realizaron los tres análisis debido a que esta muestra si presenta una distribución normal, lo que lleva a hacer uso de pruebas paramétricas (prueba t de medias, prueba f de desviación estándar).

Figura 24. Comparación de medias de tiempos de seguimiento para el carril central

Prueba t para comparar medias
 Hipótesis nula: media1 = media2
 Hipótesis Alt.: media1 < media2
 suponiendo varianzas iguales: t = -1,49975 valor-P = 0,145283
 No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

El StatAdvisor

Esta opción ejecuta una prueba-t para comparar las medias de las dos muestras. También construye los intervalos, ó cotas, de confianza para cada media y para la diferencia entre las medias. De interés particular es el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -1,92775 hasta 0,299665. Puesto que el intervalo contiene el valor de 0, no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95,0%.

También puede usarse una prueba-t para evaluar hipótesis específicas acerca de la diferencia entre las medias de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras. En este caso, la prueba se ha construido para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la diferencia no es igual a 0,0. Puesto que el valor-P calculado no es menor que 0,05, no se puede rechazar la hipótesis nula.

Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Figura 25. Comparación de desviación estándar tiempos de seguimiento para el carril central

Intervalos de confianza del 95,0%
 Desviación Estándar de C. Cn GN: [0,798244, 1,59475]
 Desviación Estándar de C. Cn GG: [1,30855, 3,28661]
 Razones de Varianzas: [0,092883, 0,942826]
 Prueba-F para comparar Desviaciones Estándar
 Hipótesis Nula: sigma1 = sigma2
 Hipótesis Alt.: sigma1 < sigma2
 F = 0,322643 valor-P = 0,0389481
 Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

El StatAdvisor

Esta opción ejecuta una prueba-F para comparar las varianzas de las dos muestras. También construye intervalos ó cotas de confianza para cada desviación estándar y para la razón de varianzas. De particular interés es el intervalo de confianza para la razón de varianzas, el cual se extiende desde 0,092883 hasta 0,942826. Puesto que el intervalo no contiene el valor de 1, existe diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las dos muestras con un 95,0%.

También puede ejecutarse una prueba-F para evaluar una hipótesis específica acerca de las desviaciones estándar de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras. En este caso, la prueba se ha construido para determinar si el cociente de las desviaciones estándar es igual a 1,0 versus la hipótesis alternativa de que el cociente no es igual a 1,0. Puesto que el valor-P calculado es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la alterna.

Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Figura 26. Comparación de medianas tiempos de seguimiento para el carril central

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas
 Hipótesis Nula: mediana1 = mediana2
 Hipótesis Alt.: mediana1 <> mediana2

Rango Promedio de muestra 1: 13,8889
 Rango Promedio de muestra 2: 16,8182

W = 119,0 valor-P = 0,38072
 No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

El StatAdvisor

Esta opción ejecuta la prueba W de Mann-Whitney para comparar las medianas de dos muestras. Esta prueba se construye combinando las dos muestras, ordenando los datos de menor a mayor, y comparando los rankeos promedio de las dos muestras en los datos combinados. Debido a que el valor-P es mayor ó igual que 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95,0%.

Fuente. Elaboración propia a partir del Software Statgraphics

Obtenidos los resultados previos, se puede observar que en algunos de los carriles las comparaciones arrojan que no existe diferencia estadística entre las dos muestras de datos, pero en la gran mayoría de las comparaciones predominan las diferencias estadísticas en las muestras de análisis.

3.2.1 MODELO DE CAPACIDAD

Una vez se hallaron los parámetros A, B y C se llegó a los siguientes resultados, los cuales se establecieron considerando los diversos valores de brechas críticas obtenidos con los tres modelos de estudio (Percentiles, Raff's y DAB). Cabe resaltar, que el volumen conflictivo corresponde al volumen vehicular que circula por los carriles pertenecientes al anillo, puesto que, dicho volumen es el que entra en disparidad con el que trata de ingresar por el acceso, que para el caso de la glorieta del gobernador es de 1031 veh/ h y de 1590 veh/h para la glorieta norte.

Tabla 27. Comparación de los valores de tc, tf, A y B en rotondas (2c -2e) - Glorieta del Gobernador

Carril interior (Izquierdo)					
Método	tc	tf	A	B	Capacidad (Veh/h)
Percentiles	3.97	1.71	2102	0.00086	862
Raff's	2.75	1.71	2102	0.00053	1222
DAB	3.92	1.71	2102	0.00085	874
HCM 2016	4.65	2.67	1130	0.00075	
Carril exterior (derecho)					
Método	tc	tf	A	B	Capacidad (Veh/h)
Percentiles	2.83	2.38	1509.68	0.00045	944
Raff's	1.7	2.38	1509.68	0.00014	1305
DAB	2.9	2.38	1509.68	0.00047	926
HCM 2016	4.32	2.54	1130	0.00070	
Carril central					
Método	tc	tf	A	B	Capacidad (Veh/h)
Percentiles	2.63	2.13	1688.70	0.00043	1079
Raff's	2.82	2.13	1688.70	0.00049	1022
DAB	2.3	2.13	1688.70	0.00034	1186

Fuente. Los Autores

Tabla 28. Calibración ecuación de capacidad - Glorieta del Gobernador

Ecuación capacidad Glorieta Gobernador 2c - 2e (Percentiles)	
Ce, lzq	$C = 2102e^{-0.00086Vc}$
Ce, Der	$C = 1510e^{-0.00045Vc}$
Ce, Cl	$C = 1689e^{-0.00043Vc}$
Ecuación capacidad Glorieta Gobernador 2c - 2e (Raff's)	
Ce, lzq	$C = 2102e^{-0.00053Vc}$
Ce, Der	$C = 1510e^{-0.00014Vc}$
Ce, Cl	$C = 1689e^{-0.00049Vc}$
Ecuación capacidad Glorieta Gobernador 2c - 2e (DAB)	
Ce, lzq	$C = 2102e^{-0.00085Vc}$
Ce, Der	$C = 1510e^{-0.00047Vc}$
Ce, Cl	$C = 1689e^{-0.00034Vc}$

Fuente. Los Autores

Tabla 29. Comparación de los valores de tc, tf, A y B en rotondas (2c -2e) - Glorieta Norte

Carril interior (Izquierdo)					
Metodo	tc	tf	A	B	Capacidad (Veh/h)
Percentiles	3,03	1,41	2545	0,00065	912,28
Raff's	2,17	1,41	2545	0,00041	1333,78
DAB	2,98	1,41	2545	0,00063	932,65
HCM 2016	4,65	2,67	1130	0,00075	
Carril exterior (Derecho)					
Metodo	tc	tf	A	B	Capacidad (Veh/h)
Percentiles	2,97	1,57	2289	0,00061	872,50
Raff's	1,75	1,57	2289	0,00027	1495,48
DAB	2,93	1,57	2289	0,00060	888,06
HCM 2016	4,32	2,54	1130	0,00070	
Carril central					
Metodo	tc	tf	A	B	Capacidad (Veh/h)
Percentiles	2,11	1,32	2732	0,00040	1439,40
Raff's	1,67	1,32	2732	0,00028	1748,16
DAB	2,12	1,32	2732	0,00041	1433,06

Fuente. Los Autores

Tabla 30. Calibración ecuación de capacidad - Glorieta Norte

Ecuación capacidad Glorieta Norte 2c - 2e (Percentiles)	
Ce, Izq	$C = 2545 * e^{(-0,00065+Vc)}$
Ce, Der	$C = 2289 * e^{(-0,00061+Vc)}$
Ce, Cl	$C = 2732 * e^{(-0,00040+Vc)}$
Ecuación capacidad Glorieta Norte 2c - 2e (Raff's)	
Ce, Izq	$C = 2545 * e^{(-0,00041+Vc)}$
Ce, Der	$C = 2289 * e^{(-0,00027+Vc)}$
Ce, Cl	$C = 2732 * e^{(-0,00028+Vc)}$
Ecuación capacidad Glorieta Norte 2c - 2e (DAB)	
Ce, Izq	$C = 2545 * e^{(-0,00063+Vc)}$
Ce, Der	$C = 2289 * e^{(-0,00060+Vc)}$
Ce, Cl	$C = 2732 * e^{(-0,00041+Vc)}$

Fuente. Los Autores

3.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez finalizado el proceso de obtención de resultados, se puede establecer que los tres diferentes modelos de estudio presentan variación en el parámetro de brecha crítica analizado por tipo de carril, cabe mencionar que el método de Raff's presenta variaciones considerables debido a que está diseñado para analizar conductores con un comportamiento constante lo cual no se aplica para la zona y tipo de intersección de análisis. Es por ello, que inicialmente para el cálculo del modelo de capacidad se optó por hacer uso del valor crítico obtenido mediante el método de percentiles, visto que, este se centra en una medida estadística que se divide por partes iguales y no tanto del comportamiento de los conductores que conforman el flujo vehicular.

Tabla 31. Resumen de brechas críticas

GLORIETA GOBERNADOR		
Interior (Izq)	Exterior (Der)	Central
Brecha crítica método de Raff's (s)		
2,75	1,70	2,82
Brecha crítica método DAB (s)		
3,92	2,90	2,30
Brecha crítica método de Percentiles (s)		
3,97	2,83	2,63

Fuente. Los Autores

Tabla 31. Resumen de brechas críticas (Continuación)

GLORIETA NORTE		
Interior(izq)	Exterior(Der)	Central
Brecha crítica método de RAFF(s)		
2,17	1,75	1,67
Brecha crítica método de DAB(s)		
2,98	2,93	2,12
Brecha crítica método de Percentiles(s)		
3,03	2,97	2,11

Fuente. Los Autores

Es así, que, comparando los valores anteriores con los valores de referencia establecidos por el HCM 2016 para el caso de glorietas con dos carriles de entrada y dos carriles de circulación, es de destacar que el método de percentiles es el que más se acerca a estos parámetros de referencia. Ahora, para los tiempos de seguimientos (obtenidos a partir de las brechas por carril) se observa igualmente una variación siendo los tomados para este caso menores en comparación a los de referencia por el HCM 2016, a causa de un comportamiento más errático de los conductores al querer ingresar por una brecha a la intersección.

Tabla 32. Comparación de brechas críticas

BRECHA CRÍTICA HCM 2016 (s)		TIEMPO DE SEGUIMIENTO HCM 2016 (s)	
Interior (Izq)	Exterior (Der)	Interior (Izq)	Exterior (Der)
4,65	4,32	2,67	2,54
CONDICIONES LOCALES (s)		CONDICIONES LOCALES (s)	
Glorieta gobernador		Glorieta gobernador	
3,97	2,83	1,71	2,38
Glorieta norte		Glorieta norte	
3,03	2,97	1,41	1,57

Fuente. Los Autores

Por otra parte, es importante mencionar que debido al análisis estadístico de las diversas muestras de datos incluyendo brechas y tiempos de seguimiento, estas presentaron diferencia estadísticamente significativa que impide trabajar los datos en conjunto, más que, el comportamiento de las dos intersecciones considera bajas similitudes lo que lleva a realizar la obtención de parámetros por separado. Asimismo, se observa en las comparaciones analizadas las diferencias entre las muestras de ambas intersecciones destacando que principalmente se hizo uso de la prueba W de Mann Whitney con el fin de comparar las medianas debido a que como se evidencia en la sección de análisis estadístico las muestras no se ajustan a una distribución normal por lo tanto no se pueden hacer pruebas paramétricas para lograr comparar los datos, lo que hace necesario emplear pruebas no paramétricas como es el caso de la prueba mencionada anteriormente siendo esta más adecuada.

En cuanto a los resultados de capacidad, se observa una tendencia marcada en la capacidad de los diversos carriles, por razón de, que se evidencia que a menor valor de la brecha crítica mayor capacidad poseerán los carriles de las glorietas. Todo ello de la mano de la obtención de los parámetros A y B, puesto que, en comparación a los establecidos por el HCM 2016 se obtuvieron valores más grandes debido a que se tienen brechas y tiempos de seguimientos más pequeños.

Ya en lo que respecta a un comparación entre brechas como se puede observar en secciones anteriores, la motocicleta en las dos intersecciones de estudio presenta los menores tiempos de brechas aceptadas y críticas debido al comportamiento de los conductores (agilidad o experticia), a la configuración del vehículo y al poco espacio que ocupan al querer ingresar a las brechas que se presenten en las intersecciones, siendo estas las únicas que emplean un carril central de circulación aprovechando el espacio libre entre vehículos de mayor envergadura.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al realizar la caracterización de brechas de motociclistas, las cuales se obtuvieron con ayuda de modelos gráficos teniendo así una brecha crítica de 2.85 para el método de percentiles, 2.4 para el método de Raff's y 2.9 para el método DAB, esto para la glorieta del gobernador y para la glorieta norte se tiene brechas críticas de 2.12 s, 1.85 s y 2.19 s para los mismos modelos mencionados, lo que permite concluir que en comparación con los demás tipos de vehículo este medio es el que menor tiempo emplea para ingresar a las intersecciones de análisis, influyendo en gran medida su configuración física, ubicación dentro de los carriles de acceso y su percepción de la seguridad y comodidad para acceder al anillo.

Comparando las muestras de datos de manera estadística para el caso de las dos intersecciones de estudio, se advierte la presencia de diferencias estadísticamente significativas, que influyen directamente en el análisis de cada rotonda, como efecto de lo descrito anteriormente los datos deben tratarse de manera separada, considerando un procesamiento individual para cada intersección, debido a sus marcadas diferencias estadísticas, aunque, es necesario resaltar que existen similitudes en aspectos de distribución y dispersión de los datos, pero los valores de brechas y tiempos de seguimiento varían considerablemente de intersección a intersección, lo que impide trabajar en conjunto la totalidad de los datos, resaltando adicionalmente que las diferencias no solo radican en materia de comportamiento de brechas y tiempos de seguimiento, sino en diferencias geométricas e inclusive de flujo vehicular.

En definitiva, la calibración del modelo de capacidad en materia local (Tunja-Boyacá), presenta diferencias marcadas respecto a los parámetros y modelos de referencia norteamericanos, ya que, estos aspectos de referencia arrojan valores mucho más elevados de brecha crítica y tiempo de seguimiento, puesto que, obedecen a un comportamiento más ideal homogéneo y constante por parte de los conductores que los encontrados para condiciones locales con dos accesos de ingreso y dos carriles de circulación, todo ello como consecuencia del comportamiento de los conductores, debido a que el comportamiento en el entorno local es más agresivo e impulsivo, principalmente en lo que respecta a los motociclistas debido a que su conducta en materia de circulación afecta considerablemente la obtención de la brecha crítica, a causa de, que su comportamiento es diferente al resto de la composición vehicular, lo que implica menores tiempos de brechas y tiempos de seguimiento generando variaciones considerables en la capacidad incrementando los valores de calibración A y B y por lo tanto afectando la ecuación de capacidad.

A pesar de que en algunas investigaciones no se ha considerado la motocicleta como una variable importante para la obtención de los modelos de capacidad, en vista de que, al mezclarse con los demás vehículos se observa que esto genera cambios en la

capacidad lo que afectará la calibración del modelo. Sin embargo, es imperativo tener en cuenta para este tipo de metodologías enfocadas a la obtención de modelos, la presencia de motocicletas, dado que, en los últimos años se ha notado un incremento considerable de este medio de transporte, por ejemplo, para el caso de la glorieta del gobernador se observa una participación de hasta el 23% respecto al total de vehículos que ingresan a la glorieta, y un 26% en lo que respecta a la glorieta norte superando inclusive a los taxis, buses y camiones en ambos casos.

Es por ello, que se recomienda observar detalladamente el porcentaje de participación de las diferencias tipologías vehiculares antes de incluirlas en procesos de obtención de brechas críticas y modelos de capacidad.

BIBLIOGRAFÍA

- A., R. F. (2011). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Bandeira Pereira, T., Expósito Martín, L., & Mendoca de Castro neto, M. (2021). A method for estimating pedestrian critical gap using microsimulation. *Transportes*, 132-143.
- Correa Núñez, J. C. (Abril de 2015). *Simulaciones y observaciones de la filtración de motos en el tránsito heterogéneo*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/281293503_SIMULACIONES_Y_OBSERVACIONES_DE_LA_FILTRACION_DEMOTOS_EN_EL_TRANSITO_HETEROGENEO
- Flores Castellano, G., Depiante, V., & Galarraga, J. J. (2015). *Calibración del modelo de capacidad de rotondas del HCM2010 a condiciones locales: caso Córdoba, Argentina*. Obtenido de <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/832>
- Lind, D., Marchal, W., & Wathen, S. (2012). *Statistical Techniques in Business & Economics*. New York: McGRAW-HILL.
- Lizarazo Godoy, J. O. (30 de Mayo de 2018). *Evaluación de la Afectación de Motocicletas en Intersecciones en Bogotá*. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/768/Lizarazo%20Godoy%2c%20%20Jaime%20Orland%20-%202018%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MAGIX Software GmbH. (28 de Agosto de 2017). Sony Vegas Pro.
- Mensah, S. (01 de Agosto de 2009). *Researchgate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Sepideh-Eshragh/publication/256286154_A_critical_Gap_Analysis_for_Modern_Roundabouts/links/0046352211a3c424b8000000/A-critical-Gap-Analysis-for-Modern-Roundabouts.pdf
- Mojica Arboleda, V., & Peralta Camargo, M. C. (4 de Junio de 2013). *Influencia por la presencia de motocicletas en la capacidad vial de accesos semaforizados*. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21447/MojicaArboledaVanesa2013.pdf?sequence=3>
- National Research Council. (2000). HIGHWAY CAPACITY MANUAL (HCM). En *HIGHWAY CAPACITY MANUAL (HCM)* (pág. 92). Washington D.C: TRB.
- Ospina Mateus, H. (20 de Diciembre de 2021). *El comportamiento, los conflictos de tráfico y los factores asociados con la accidentalidad de los motociclistas en las intersecciones de las vías de Cartagena*. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/59125>
- Pawar, D., & Patil, G. (2016). Critical gap estimation for pedestrians at uncontrolled mid-block crossings on high-speed arterials. *Safety Science*, 86, 295-303.
- Pawar, D., Kumar, V., Singh, N., & Pati, G. (2016). Analysis of dilemma zone for pedestrians at high-speed uncontrolled midblock crossing. *Transportation Research*, 70, 42-52.
- Rivera Betancur, S. A., & Cárdenas Suárez, D. E. (2012). *Universidad de Medellín*. Obtenido de [https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/196/Aceptabilidad%20de%20intervalos%20\(brechas\)%20para%20maniobras%20en%20intersecciones%20de%20prelaci%C3%B3n%20vial.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/196/Aceptabilidad%20de%20intervalos%20(brechas)%20para%20maniobras%20en%20intersecciones%20de%20prelaci%C3%B3n%20vial.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sayago Alzate, A. F. (2014). *Determinación del efecto de las motos en el flujo de saturación en intersecciones semaforizadas de dos carriles*. Obtenido de <https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/136/Determinaci%C3%B3n%20del%20efecto%20de%20las%20motos%20en%20el%20flujo%20de%20saturaci%C3%B3>

n%20en%20intersecciones%20semaforizadas%20de%20dos%20carriles..pdf?sequenc
e=3&isAllowed=y

Transportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual* (Vol. 3). Washington, D.C.:
Transportation Research Board.

Uribe García, C. C. (2018). *Análisis de cruces peatonales a mitad de cuadra en el centro de la
ciudad de Tunja*. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3073>

ANEXOS

Los anexos se encuentran en un medio magnético, anexo a este documento. A continuación, se muestra la lista de anexos:

ANEXO A. Base de datos y cálculo glorieta del gobernador

ANEXO B. Base de datos y cálculo glorieta norte

Cabe mencionar, que los videos de toma de información no fueron incluidos debido al gran peso que tienen, no obstante, a solicitud de quien lo desee se pueden compartir en medio digital.