

Análisis estadístico de aforos vehiculares en carreteras de México

Statistical analysis of traffic surveys on mexican highways

Alejandro Hernández Martínez¹, Braulio Saul Hernández Guillén², Andrea Sofía Flores Ramírez²

¹ Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

² Estudiante del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
alejandro.hernandez@ugto.mx

Resumen

Este artículo de investigación aborda un análisis estadístico de aforos vehiculares reales de vialidades situadas en México, a partir de datos obtenidos mediante sistemas de pesaje en movimiento (WIM, por sus siglas en inglés). El objetivo principal de la investigación fue describir fluctuaciones de parámetros del tránsito, como la velocidad, la distancia entre vehículos y la configuración vehicular (clasificación), para obtener una caracterización del comportamiento de vehículos en tramos carreteros. Para ello, se analizaron registros vehiculares provenientes de casos de estudio representativos, correspondientes a distintos periodos y configuraciones viales. En alineación con lo anterior, se desarrollaron códigos de programación en el entorno de MATLAB para el procesamiento de volúmenes de datos, a través los cuales, fue posible filtrar y determinar velocidades promedio, distancias estimadas entre vehículos y patrones de configuraciones vehiculares basados en su correspondiente geometría. Los resultados muestran que existen diferencias significativas en el comportamiento del tránsito según el tipo de vialidad y el año del estudio, con particular énfasis en la dispersión de datos. Asimismo, se evidenció que el mecanismo de clasificación normativa, NOM-012-SCT-2-2017, de las distintas configuraciones vehiculares muestra limitaciones para representar adecuadamente la variabilidad geométrica de los vehículos cuando se disponen de datos de circulación real. En más, los hallazgos derivados de la investigación pretenden contribuir al desarrollo de herramientas de análisis de predicción de daños, mantenimiento y diseño estructural de puentes vehiculares y, en un sentido más general, de la infraestructura vial del país.

Palabras clave: análisis estadístico; velocidad; distancia entre vehículos; configuración vehicular; puente vehicular.

Introducción

Los puentes vehiculares son estructuras fundamentales dentro de la infraestructura vial, cuya función principal es permitir la continuidad del tránsito, salvando obstáculos naturales (p. ej. ríos, barrancos o depresiones del terreno) y/o artificiales (p. ej. otras vialidades o construcciones). De acuerdo con Díaz (2012) y Cremades (2017), más allá de su evidente utilidad social y económica, la importancia de estos puentes radica en la necesidad de comprender su comportamiento estructural, es decir, la manera en que responden a las distintas sollicitaciones o acciones a las que están sometidas durante su vida útil. Ejemplo de ello es la consideración de distintos tipos de cargas: permanentes (p. ej. peso propio del puente), accidentales (p. ej. por viento o sismo) y variables, entre las que destacan las cargas derivadas del comportamiento vehicular, mismas que en menor o mayor medida imponen exigencias dinámicas específicas que pueden inducir efectos acumulativos como la fatiga estructural (deterioro progresivo por cargas repetidas), esfuerzos cortantes, momentos flexionantes, vibraciones y deformaciones residuales (permanentes y continuas) a lo largo del tiempo. En este contexto, el análisis estructural de puentes vehiculares requiere conocer, con cierto grado de confiabilidad, la naturaleza de dichas cargas, las cuales se ven influenciadas por la velocidad, la frecuencia de paso, el peso y la configuración geométrica de los vehículos que sobre estos transitan.

Para ello, una herramienta útil para la adquisición de estos datos son los sistemas de pesaje en movimiento (WIM, Weigh-In-Motion), los cuales son capaces de registrar, de manera automática y sin interrupción, variables del flujo vehicular como la velocidad, el peso por cada eje, la distancia entre ejes, entre otras, permitiendo así definir una adecuada caracterización del tránsito vehicular. En general, estos sistemas (ver **Figura 1**) consisten en dispositivos instalados sobre la carpeta asfáltica o el concreto hidráulico e integran sensores (p. ej. piezoeléctricos, de tensión u ópticos), unidades de procesamiento y sistemas de comunicación.



Figura 1. Ejemplo de un sistema WIM que emplea sensores piezoeléctricos y lazos electromagnéticos instalados en cada carril para registrar en tiempo real las características estructurales y dinámicas de los vehículos conforme atraviesan la zona de medición.

Continuando, los datos proporcionados por los sistemas WIM no sólo permiten caracterizar de forma estadística el tránsito real al que se ve sometido un puente vehicular (o una infraestructura vial en general), sino que también facilita la definición de cargas de diseño más realistas, en contraposición a los modelos simplificados tradicionalmente utilizados en normas y/o manuales técnicos.

En concordancia con lo anterior, la investigación tiene como propósito central realizar un análisis estadístico de datos obtenidos mediante tecnología WIM, aplicados a aforos vehiculares realizados en diversos periodos y carreteras del estado de Guanajuato: Irapuato – La Piedad (2009 y 2017), Guanajuato – Los Infantes (2017) y Querétaro – Irapuato (2017). El objetivo específico es identificar patrones de comportamiento vehicular que puedan ser integrados como cargas móviles representativas dentro del proceso de diseño estructural de puentes vehiculares. Para lograrlo, se desarrolló una metodología de procesamiento de datos mediante códigos de programación implementados en el entorno de MATLAB. Esta metodología se enfoca en el análisis de variables clave como la velocidad de circulación, la distancia entre vehículos (espaciamento), y la configuración vehicular (clasificación) según su correspondencia geométrica (número de ejes y espaciamento entre estos).

Análisis de velocidad vehicular y distancias entre vehículos

Metodología de análisis

Se recopilaron registros de aforos vehiculares obtenidos mediante sistemas WIM en distintos periodos (2009 y 2017), y correspondientes a distintos tramos viales dentro del estado de Guanajuato. Dichos aforos vehiculares (casos de estudio) analizados fueron:

- 1) Carretera Irapuato – La Piedad (2009)
- 2) Carretera Guanajuato - Los Infantes (2017)
- 3) Carretera Irapuato – La Piedad (2017)
- 4) Autopista Querétaro - Irapuato (2017)

Para determinar las características estadísticas y dimensionamientos relevantes de los aforos, se desarrollaron códigos de programación en MATLAB que procesan la información almacenada en archivos y cuyo funcionamiento se basa en la lectura de datos de velocidades correspondientes a los carriles existentes y se determina la duración entre el registro de ocurrencia de cada vehículo. Posteriormente se evalúan las distancias entre vehículos.

Para el caso Irapuato – La Piedad (2009), se analizaron datos de cuatro carriles y dos acotamientos, correspondientes al periodo de enero a marzo. Por otro lado, el caso Guanajuato – Los Infantes (2017) dispone de dos carriles (uno por sentido), mientras que Irapuato - La Piedad (2017) y Querétaro - Irapuato (2017) cuentan con información de cuatro carriles. En estos tres últimos casos los aforos se realizaron durante una semana.

Análisis de resultados de las velocidades vehiculares

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los datos estadísticos más representativos de los cuatro aforos analizados. Se observa que la autopista Querétaro – Irapuato registra las velocidades promedio más altas, al igual que la carretera Irapuato – La Piedad en 2009. Sin embargo, esta comparación no es estrictamente equitativa, dado que el periodo de estudio para la carretera Irapuato – La Piedad fue significativamente más prolongado (tres meses), lo que explica una mayor dispersión en los datos.

Tabla 1. Velocidad promedio y desviación estándar de los cuatro aforos vehiculares.

Aforos vehiculares WIM	Velocidad promedio (km/h)	Desviación estándar (km/h)
Irapuato - La Piedad (2009)	91.08	19.34
Guanajuato - Los Infantes (2017)	62.59	12.65
Irapuato - La Piedad (2017)	87.87	16.79
Querétaro - Irapuato (2017)	93.85	17.43

De las tres carreteras y de la autopista, la de Guanajuato – Los Infantes 2017 es la que se presenta una velocidad máxima más baja (62.59 km/h), lo que se refleja visualmente en la **Figura 2** junto con una desviación estándar menor en comparación con las demás, que presentan velocidades promedio similares entre sí.

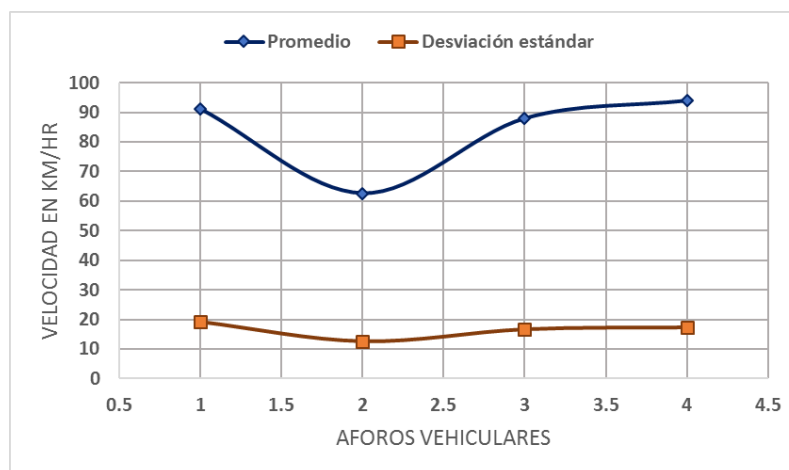


Figura 2. Velocidad promedio y desviación estándar de los cuatro casos de estudio.

En la Tabla 2 se resumen los datos estadísticos más importantes obtenidos para los más de 3.8 millones de vehículos registrados en la carretera Irapuato – La Piedad durante los meses de enero a marzo de 2009. El comportamiento de los datos confirma que en los carriles derechos se presencian velocidades más bajas (carriles 2 y 5) mientras que en los izquierdos (centrales) se encuentran velocidades más altas (carriles 3 y

4). Nótese que en los acotamientos (carriles 1 y 6) hay más dispersión en los datos, por lo que se encontraron velocidades variadas.

Tabla 2. Velocidad promedio y desviación estándar por carril de la carretera Irapuato - La Piedad (2009).

Carril	Velocidad Promedio (km/h)	Desviación Estándar (km/h)
(Acotamiento) 1	94.84	46.08
2	84.79	17.32
3	102.59	16.95
4	104.59	16.14
5	82.86	15.75
(Acotamiento) 6	71.27	27.32
Todos	91.08	19.34

En la Figura 3 se puede identificar de mejor manera qué número corresponde a cada carril y acotamiento de la carretera Irapuato – La Piedad.

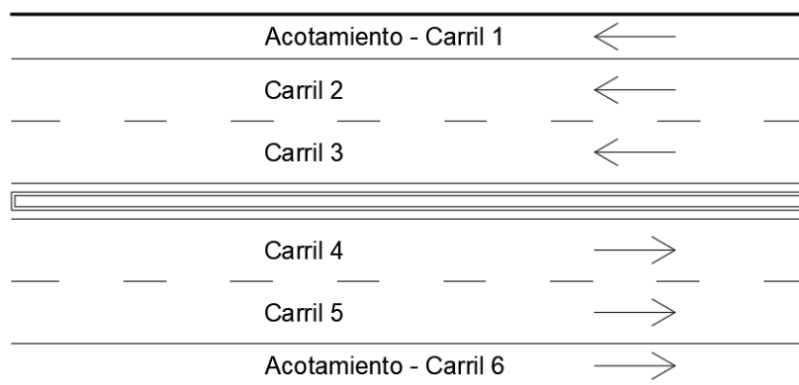


Figura 3. Representación visual de la carretera Irapuato - La piedad para el aforo del 2009.

La **Figura 4** muestra el comportamiento de las velocidades promedio para cada carril. Las velocidades más altas se encuentran en los carriles 3 y 4, y son de magnitudes promedio similares; lo mismo ocurre con las velocidades de los carriles 2 y 5, donde también se aprecia un notable descenso. En los acotamientos (carriles 1 y 6) las velocidades promedio varían significativamente, lo cual es coherente de acuerdo con la función específica que tienen los acotamientos en una carretera.

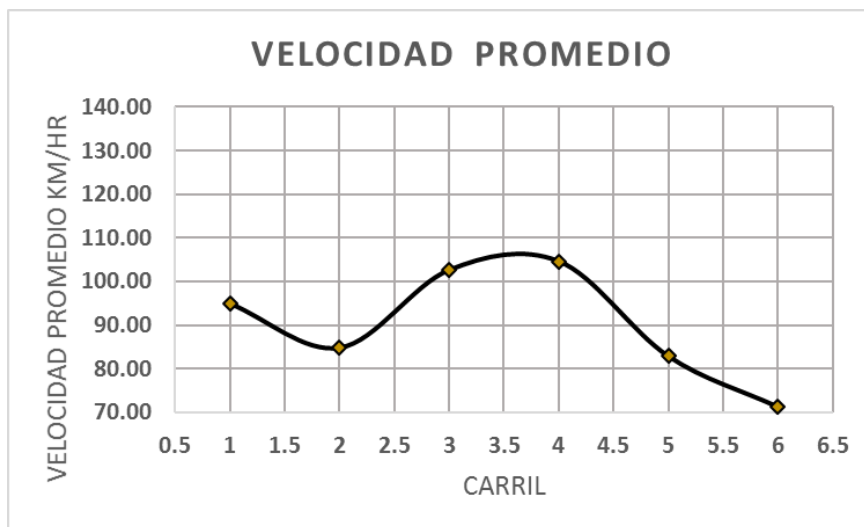


Figura 4. Velocidad promedio por carril de la carretera Irapuato – La Piedad (2009).

Análisis de resultados de las distancias entre vehículos

Se observó que en la autopista Querétaro – Irapuato existe menor congestión vehicular en comparación con las carreteras, lo cual puede deberse a la existencia tanto de velocidades más altas y al incremento en la cantidad de vehículos dado que optan transitar por carreteras sin cuota. Además, como se observa en la Tabla 3, existe mayor dispersión en los datos en la carretera Irapuato – La Piedad durante el año 2009 respecto del 2017, lo que indica un incremento en el volumen de tránsito vehicular a lo largo de ocho años, sin embargo, como se mencionó anteriormente, no sería adecuado hacer una comparación equitativa debido a los diferentes periodos de estudio que tiene cada caso en función de sus correspondientes aforos.

Tabla 3 . Distancia promedio y desviación estándar de los cuatro aforos vehiculares.

Aforos vehiculares WIM	Distancia promedio (m)	Desviación estándar (m)
Irapuato - La Piedad (2009)	545.7	3882.3
Guanajuato - Los Infantes (2017)	216.73	343.42
Irapuato - La Piedad (2017)	272.35	349.55
Querétaro - Irapuato (2017)	724.9	907.34

La Figura 5 ilustra la alta desviación estándar en las distancias de la carretera Irapuato – La Piedad en 2009, mientras que, en los demás casos, los datos de sus aforos muestran mayor consistencia y menor dispersión.

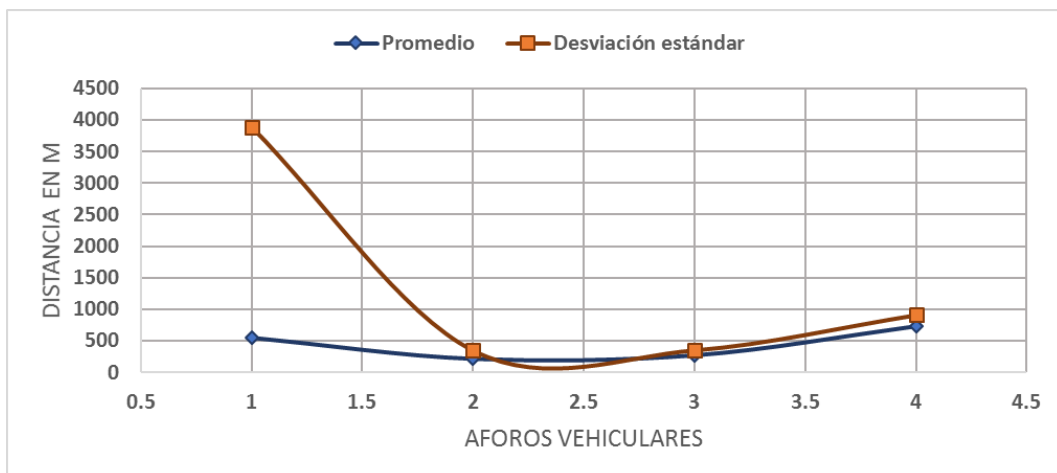


Figura 5. Distancia promedio y desviación estándar de los cuatro aforos vehiculares.

Las Figuras 6, 7, 8, y 9 presentan los histogramas de las distancias entre vehículos de los cuatro aforos vehiculares, respectivamente, clasificados por carriles, en donde la frecuencia más alta se encuentra entre los valores arriba de 0 a 100 metros y en donde baja de manera destacable hacia los 500 metros. Se llegaron a encontrar distancias de hasta más de 15,000 metros las cuales fueron descartadas por la mínima frecuencia que representaban.

Finalmente, la **Figura 10** muestra el histograma de las distancias entre vehículos de los cuatro estudios para todos los carriles en general.

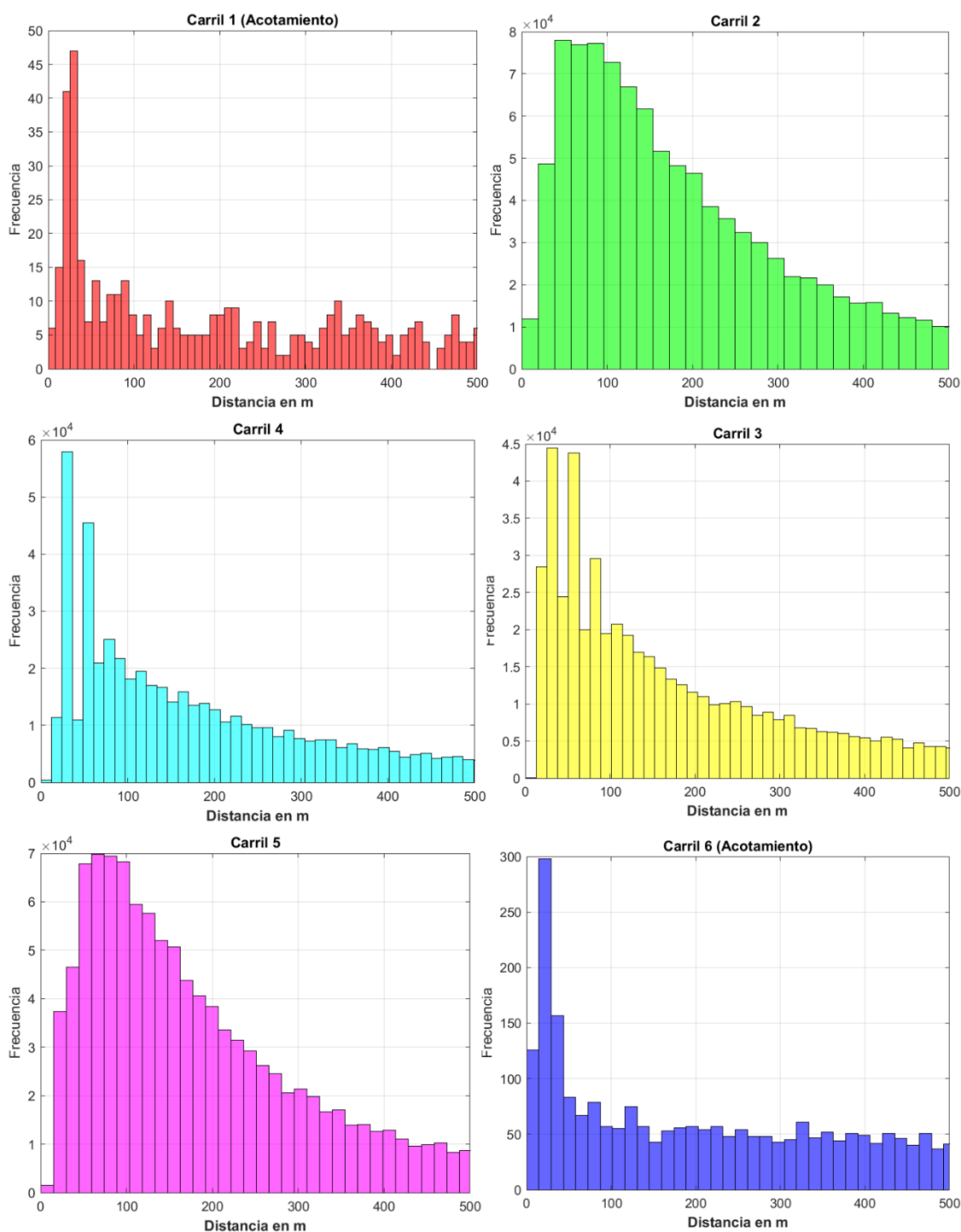


Figura 6. Histogramas de distancias entre vehículos por carril del aforo WIM de la carretera Irapuato - La Piedad durante los meses de enero a marzo del año 2009.

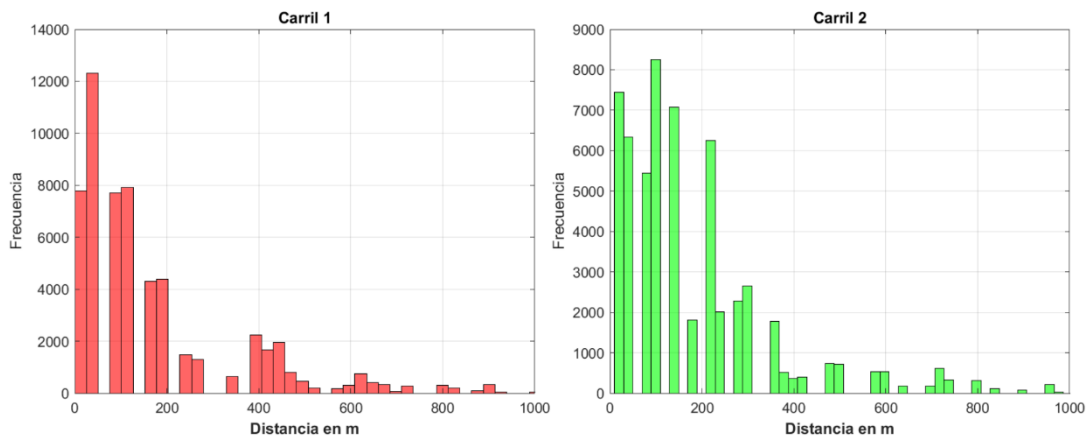


Figura 7. Histogramas de las distancias entre vehículos por carril del aforo WIM de la carretera Guanajuato - Los Infantes durante la tercera semana de enero del año 2017.

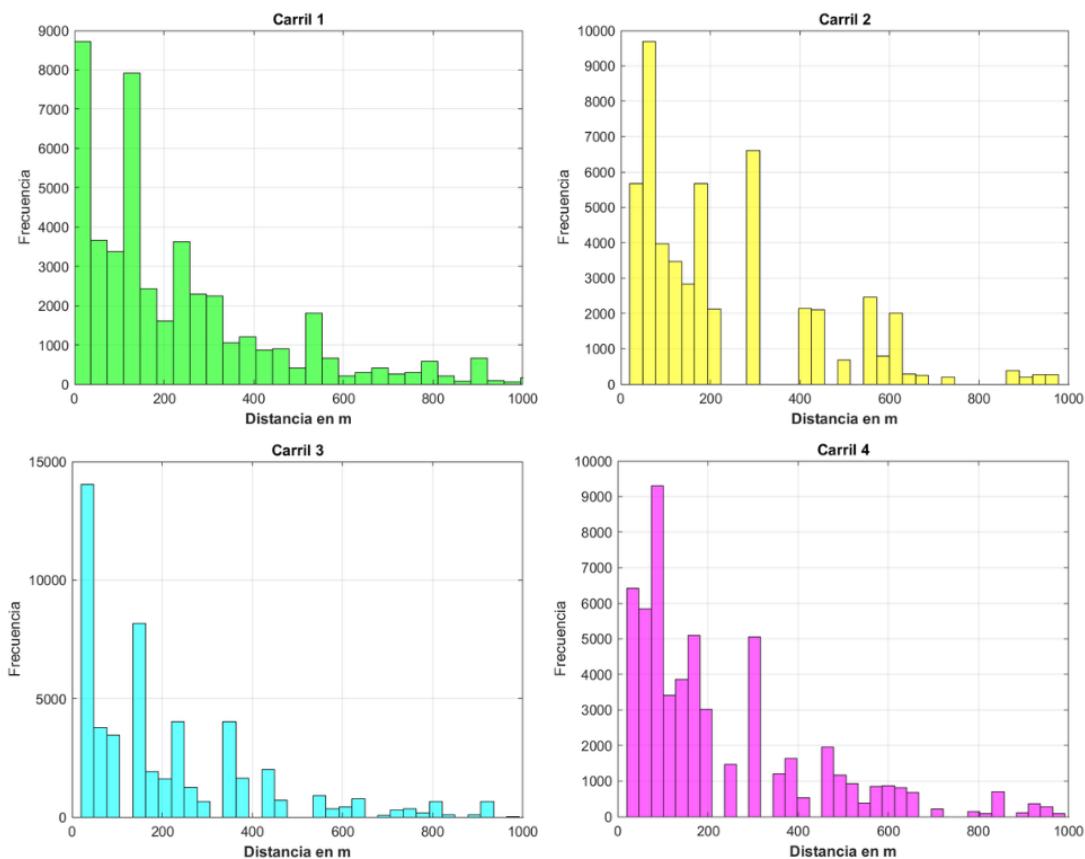


Figura 8. Histogramas de las distancias entre vehículos por carril del aforo WIM de la carretera Irapuato - La Piedad durante la cuarta semana de enero del año 2017.

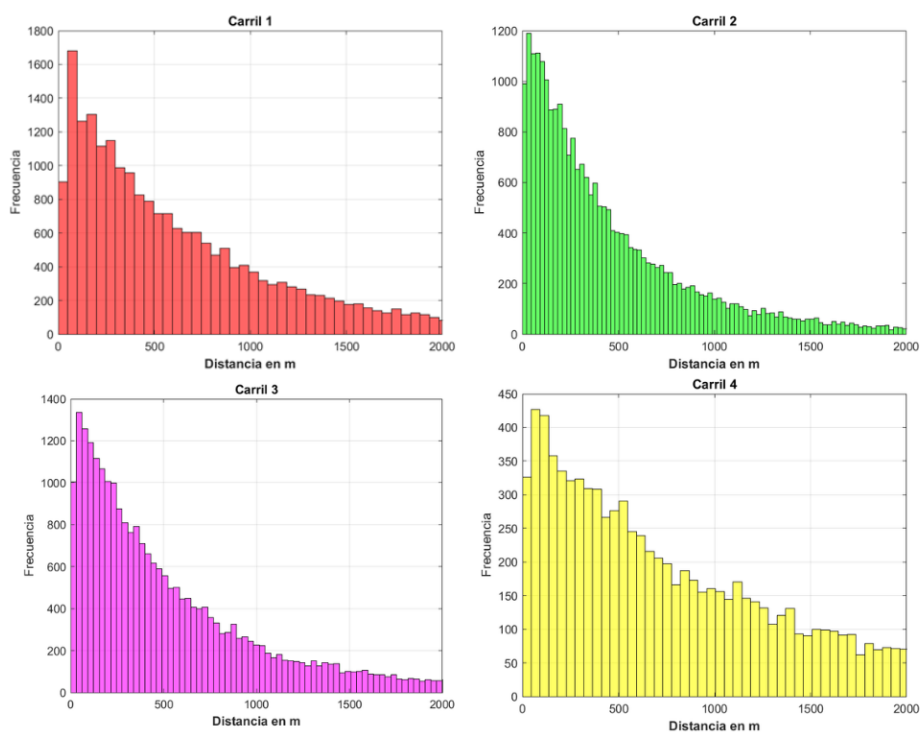


Figura 9. Histogramas de las distancias entre vehículos por carril del aforo WIM de la autopista Querétaro - Irapuato durante la tercera semana de octubre del año 2017.

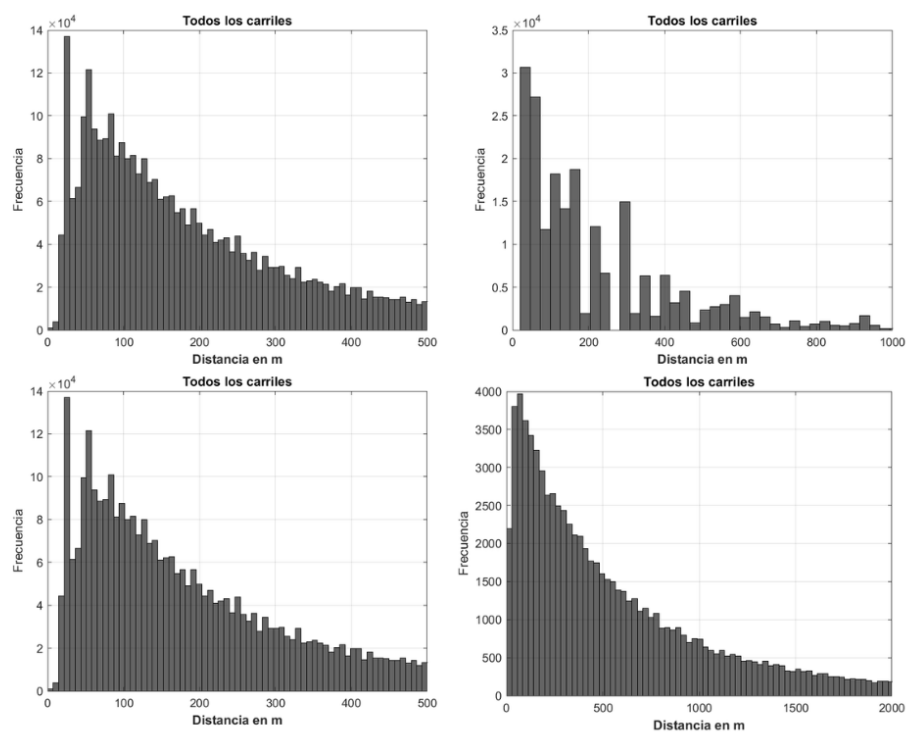


Figura 10. Histogramas distancias entre vehículos de todos los carriles de los cuatro casos de estudios.

Clasificación vehicular

En México, la clasificación de vehículos de carga está regida por la norma NOM-012-SCT-2-2017, la cual establece criterios con base en el número de ejes, número de llantas, peso bruto vehicular máximo y longitud máxima permitida, además existen diferenciaciones por tipo de camino. De acuerdo con lo establecido, esta tiene como objetivo regular el peso, dimensiones y capacidad de vehículos de autotransporte federal y privado, lo cual visualizándolo a temas de ingeniería puede contribuir a la preservación de la integridad estructural de la infraestructura carretera, así como garantizar condiciones de seguridad vial.

No obstante, al aplicar esta clasificación normativa a bases de datos de aforos vehiculares reales, se identifica un nivel significativo de variabilidad entre los datos de registro y sus correspondientes predicciones de configuración vehicular (tipo de vehículo). En este sentido este fenómeno se debe a que los límites de las variables normativas no consideran la naturaleza aleatoria de las dimensiones, configuraciones, entre otras características, de vehículos en el país.

Como ejemplo de lo anterior, se hace referencia a la siguiente caracterización vehicular (Tabla 4) según lo dispuesto en la normativa antes señalada. En esta caracterización se comparan únicamente dos vehículos, C3-R2 y T2-S1-R2, en sus respectivas configuraciones.

Tabla 4. Comparativa de configuraciones vehiculares, C3-R2 y T2-S1-R2.

Vehículo	Número de ejes	Número de llantas	PBV Máximo (ton)	PBV Mínimo (ton)	Longitud mínima* (m)	Longitud máxima* (m)
C3-R2	5	18	42.0	44.5	28.5	31.0
T2-S1-R2	5	18	47.5	47.5	31.0	31.0

PVB = Peso bruto vehicular

* Longitudes mínima y máxima permisibles acorde con la NOM-012-SCT-2-2017

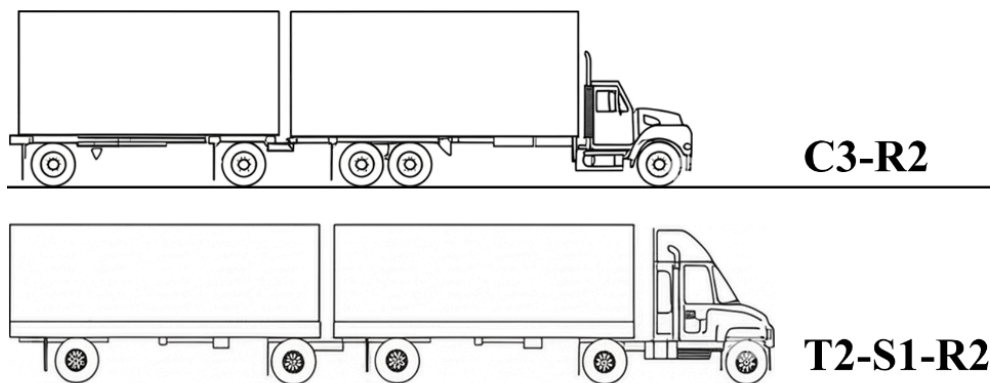


Figura 11. Dibujo de línea del perfil lateral de las configuraciones de vehículos C3-R2 y T2-S1-R2.

Respecto de lo anterior, ambos vehículos comparten similitudes que pueden generar ambigüedad al momento de clasificar un vehículo, ya que, conforme a los rangos permitidos por la normativa, este podría ubicarse en cualquiera de las dos. Esta situación incrementa la distancia entre las configuraciones vehiculares según las clases principales (ver Tabla 5), lo que a su vez eleva la dispersión en la distribución de los datos. Como resultado, una clasificación de acuerdo con las configuraciones vehiculares, en relación con estos valores, tiende a ser menos representativa cuando se trata de un aforo real.

En este contexto, la norma no permite reflejar apropiadamente la diversidad ni la frecuencia de los vehículos en circulación, limitando la capacidad de predecir y cuantificar la distribución real de configuraciones vehiculares. Ante esta limitación normativa, se propone la siguiente metodología de análisis para la realización de una clasificación acorde con la configuración vehicular establecida en la norma, con el objetivo de aportar herramientas que permitan, en su caso, fortalecer evaluaciones estructurales o determinar posibles daños en estudios específicos asociados con puentes vehiculares.

Tabla 5. Clasificación de vehículos por clase, NOM-012-SCT-2-2017.

Clase: vehículo o configuración	Nomenclatura
Autobús	B
Camión unitario	C
Tractocamión	T
Camión remolque	C-R
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R y T-S-S

Metodología de análisis

Se implementó el desarrollo de un código de programación utilizando datos obtenidos a partir de sistemas WIM, posibilitando así la clasificación vehicular de grandes volúmenes de información. Para lograrlo, el procesamiento y análisis de los datos fueron realizados en el entorno de programación de MATLAB. El código se centra en el reconocimiento de la distancia entre ejes como criterio principal de clasificación. En contraste, se descartaron variables como el peso total del vehículo y el número de llantas, ya que presentan una alta variabilidad debido a factores asociados con la diversidad en los procesos de fabricación, las modificaciones estructurales y las diferencias en carga útil. De esta manera se evita la pérdida de generalidad del proceso de clasificación. Se presenta la **Figura 12** como muestra del código realizado.

```

for i=1:NUMCLAS
    for j=1:NUMV
        if strcmp(TINSERT{i,1},AFORO{j,13})
            for k=1:(TINSERT{i,2}-1)
                if AFORO{j,76+k}<TINSERT{i,2*k+1}
                    TINSERT{i,2*k+1}=AFORO{j,76+k};
                end
                if AFORO{j,76+k}>TINSERT{i,2*k+2}
                    TINSERT{i,2*k+2}=AFORO{j,76+k};
                end
            end
        end
        NUMREV=NUMREV+1;
    end
end

```

Figura 12. Extracto del código de programación para el reconocimiento de distancias entre ejes de vehículos.

Una vez definida la métrica de reconocimiento vehicular, se procede al desarrollo de un código de programación de clasificación (**Figura 13**) cuya lógica se basa en la asignación de cada registro a una clase específica o clases según las mejores coincidencias. Para ello, se implementa el uso de una matriz binaria (arreglo con valores de 0 y 1), en la cual cada fila representa una muestra (vehículo del aforo) y cada columna una clase vehicular posible (de la 1 a la 27). Un valor de "1" indica una adecuada coincidencia entre la muestra analizada (vehículo) y la clase correspondiente, según criterios previamente definidos.

```

NUMEJV=AFORO(k,1)-1;
VRECOPEJ=zeros(NUMEJV,1);
for l=1:NUMEJV
    VRECOPEJ(l)=AFORO(k,2+l);
end
for j=1:NUMCLAS
    if (NUMEJV==TINSERT{j,2}-1)
        LAMBDA=TCLASES(k,j);
        if all(VRECOPEJ>=VEC_GRAL_DIS_MIN{j})&&all(VRECOPEJ<=VEC_GRAL_DIS_MAX{j})
            LAMBDA=1;
        end
    else
        TLAMBDA=0;
    end
end
end

```

Figura 13. Extracto del código de programación de reconocimiento de configuraciones vehiculares (tipos de vehículos).

Confiabilidad numérica: porcentajes de coincidencia

A partir de la estructura binaria obtenida (matriz), se procede a determinar la confiabilidad numérica (expresada como porcentaje), lo que permite cuantificar el grado de acierto o coincidencia entre la configuración vehicular predicha por el algoritmo (modelo de clasificación) y la de referencia asignada en bases de datos.

Como producto de este análisis, se genera un diagrama de dispersión (**Figura 14**), permitiendo identificar el grado de acierto y nivel de confiabilidad alcanzados. Para ello fueron revisados 2,561,523 vehículos, distribuidos en 80 conjuntos de datos.

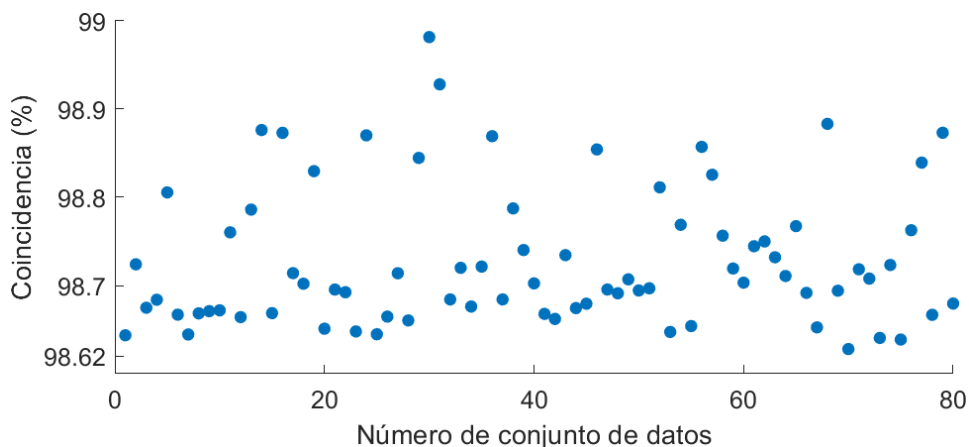


Figura 14. Diagrama de dispersión de grado de acierto de clasificación vehicular mediante algoritmo.

De lo anterior, se concluye que el algoritmo de clasificación vehicular demuestra una confiabilidad del 98.73%, el cual coincide con el valor promedio.

Resultados de casos de estudio de aforo real

Se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de clasificación vehicular a tres casos de aforos reales en distintas vialidades: 1) Carretera Guanajuato – Los Infantes, 2) Carretera Irapuato – Zapotlanejo, 3) Autopista Querétaro – Irapuato.

Para cada caso de estudio, se incluyen representaciones gráficas de la distribución porcentual de configuraciones vehiculares del aforo real, para cada caso de estudio, que permiten describir y analizar el comportamiento de las configuraciones vehiculares identificadas. Es estas gráficas cada barra refleja el porcentaje que representa una configuración vehicular específica respecto al total (no acumulado) de coincidencias obtenidas en el proceso de clasificación para el aforo real analizado. Para conservar la representatividad de la información, especialmente en configuraciones con baja frecuencia relativa, se utilizó una escala logarítmica en el eje vertical. Esto implica que una misma unidad visual en el eje representa incrementos exponenciales (por ejemplo, una barra que aparece al 1.0% representa visualmente un valor diez veces mayor respecto de la escala en la figura), permitiendo así una mejor interpretación comparativa entre clases con diferentes órdenes de magnitud.

Es importante señalar que solo se incluyen las clases que coinciden con las configuraciones vehiculares identificadas por el algoritmo, por lo que se incorpora una clase denominada "N/A", que agrupa aquellos vehículos cuyas características y/o dimensiones no se ajustan a ninguno de los perfiles previamente establecidos.

Los resultados específicos de cada uno de estos casos se presentan enseguida:

1) Caso 01: Carretera Guanajuato – Los Infantes:

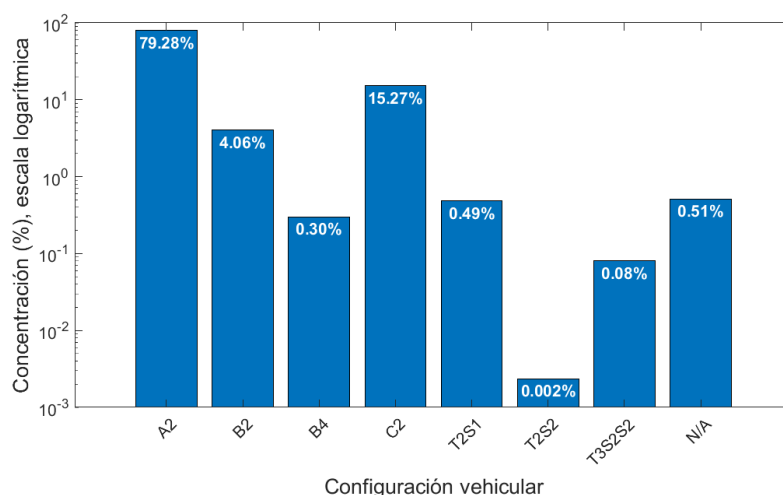


Figura 15. Porcentajes de distribución de configuraciones vehiculares de aforo real, caso "Carretera Guanajuato - Los Infantes".

2) Caso 02: Carretera Irapuato – Zapotlanejo

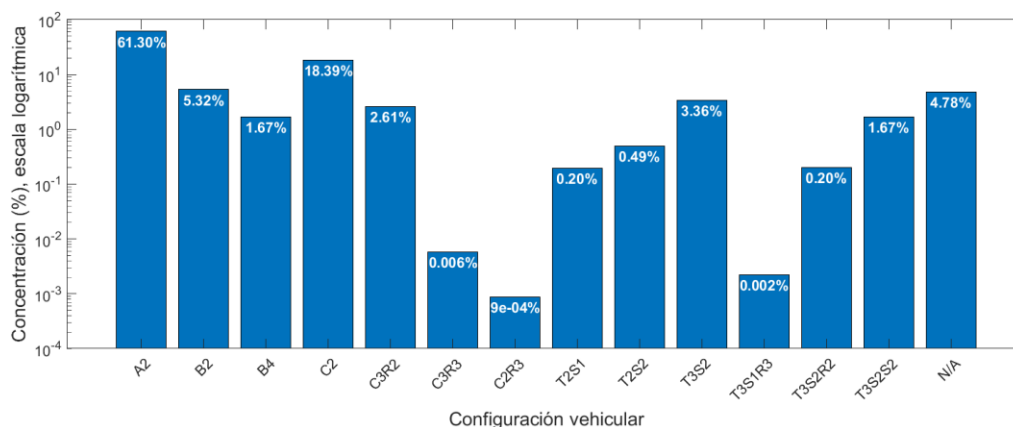


Figura 16. Porcentajes de distribución de configuraciones vehiculares de aforo real, caso "Carretera Irapuato - Zapotlanejo".

3) Caso 03: Autopista Querétaro – Irapuato

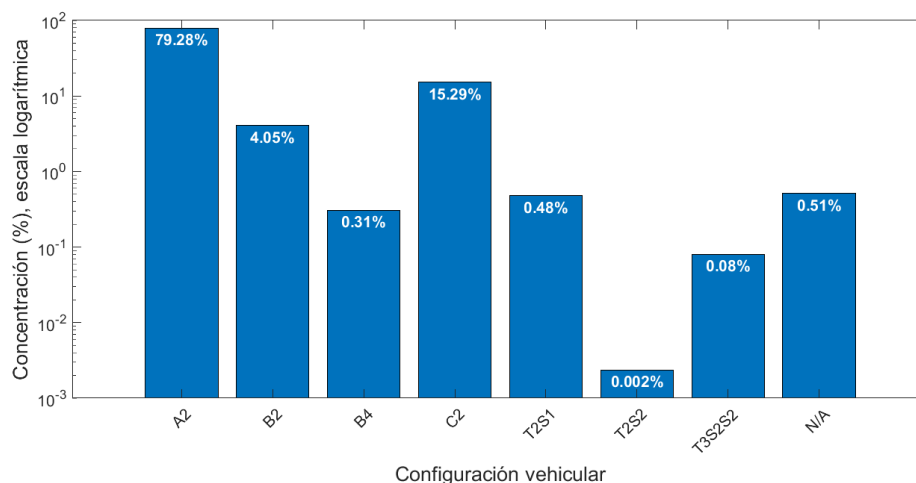


Figura 17. Porcentajes de distribución de configuraciones vehiculares de aforo real, caso "Autopista Querétaro - Irapuato".

Conclusiones

Se revela que los carriles centrales presentan mayores velocidades promedio, mientras que los acotamientos muestran una mayor dispersión, lo cual es consistente con lo esperado en lo que corresponde al diseño de una infraestructura vial. Respecto de los casos de estudio, se puntualiza un rango de velocidades comunes que van desde los 60 a 95 km/h, donde las velocidades de la carretera Guanajuato – Los Infantes resulta tener valores mucho menores que en la autopista Querétaro – Irapuato. Asimismo, las distancias entre vehículos varían según el nivel de tráfico y el horario, lo que permite estimar la probabilidad de que múltiples vehículos circulen simultáneamente sobre el claro de un puente vehicular, encontrando valores promedio de 500 a 750 metros. De forma similar, se encuentra que el comportamiento de los valores respecto a las distancias entre vehículos en la carretera de Guanajuato – Los Infantes es significativamente menor que para la autopista de Querétaro – Irapuato. De esta manera, estos comportamientos distintos para vialidades con características y objetivos diferentes coadyuvan al desarrollo de un mejor análisis probabilístico en tanto que se permitan definir parámetros para la aplicación y el modelamiento de cargas vivas en puentes vehiculares.

Por otro lado, la clasificación vehicular según la NOM-012-SCT-2-2017 presenta limitaciones cuando se confronta con datos empíricos, especialmente por la superposición de parámetros entre distintas configuraciones. En respuesta a ello, la propuesta metodológica basada en distancias entre ejes demuestra ser eficaz, alcanzando una tasa de coincidencia superior al 98%, lo cual respalda su pertinencia para estudios de ingeniería estructural y planificación vial. En relación con los resultados obtenidos de los casos de estudio, se observa que el flujo vehicular está conformado predominantemente por vehículos tipo A2, correspondientes a unidades de dos ejes tales como automóviles y camionetas tipo pick-up. En contraste, la participación de tránsito de vehículos articulados (p. ej. T2S1) presenta una menor concentración, la cual disminuye aún más en el caso de vehículos doblemente articulados (p. ej. T2S2S2). Esta distribución de volúmenes de circulación sugiere que la modelación del tránsito vehicular para fines estructurales de diseño de puentes vehiculares debe considerar de manera prioritaria las configuraciones vehiculares con mayor frecuencia de ocurrencia, dado que estas habrían de tener una mayor influencia en las cargas asociadas al comportamiento mecánico de la infraestructura de un puente vehicular. Por otro lado, se identificó un porcentaje reducido de vehículos clasificados como "N/A" (no identificados). No obstante, debido al volumen total de vehículos registrados y la baja proporción que representan, dicha cifra puede considerarse aceptable para efectos de un aforo representativo y confiable.

Referencias

- Chávez, O. A. (1999). *Modelo de cargas vivas vehiculares para diseño estructural de puentes en México*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt118.pdf>
- Chávez, O. A. (1999). *Sistema de cargas vivas vehiculares para diseño de puentes en carreteras alimentadoras*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt130.pdf>
- Cremades, S. M. (2017). *Diseño estructural de puentes*. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. <https://elibro.net/es/ereader/ugto/109017>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (22 de noviembre de 2012). *Reglamento de Tránsito en Carreteras y Puentes de Jurisdicción Federal*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5278684&fecha=22/11/2012#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (26 de diciembre de 2017). *Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=0
- Díaz, E. E. (2012). *Ingeniería de puentes. Tomo I*. Bogotá, D. C.: Pontificia Universidad Javeriana. <https://elibro.net/es/ereader/ugto/100484>
- Dirección General de Servicios Técnicos. (2018). *Manual para inspección de puentes*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Ciudad de México, México. https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Inspeccion%C3%B3n_de_Puentes/Manual_de_Inspeccion_de_Puentes.pdf
- Espinola, S. A. (2023). *Evaluación de modelos de carga viva en la estimación de fuerzas actuantes causadas por tráfico real en puentes de armaduras*. Tesis de licenciatura, Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental, Guanajuato, México. http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/9673/1/SERGIO%20ANDR%C3%89S%20CH%C3%81VEZ%20ESP%C3%8dNOLA_Tesis.pdf
- Grajeda, E. F., Colunga, A. C., & Díaz, A. M. (2014). *Criterios de ubicación de estaciones fijas automatizadas para el control de peso, dimensiones y velocidades que circulan por las carreteras federales*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt397.pdf>
- Martínez, A. H., Soto, A. D., & Vázquez, J. G. (2025). Numerical evaluation of code live-load models for estimating forces at bridge supports. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1680/jbren.24.00044>
- Swarco. (s.f.). *Weigh-in-motion systems as an important part of intelligent transportation systems*. <https://www.swarco.com/mobility-future/intelligent-transportation-systems/weigh-motion-systems>