

MODELO DE GREENSHIELDS

UN ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO (1935)

80 años de la ecuación fundamental del flujo vehicular

Ing. Henry Hernandez Vega, MSc
Correo electrónico: henry.hernandezvega@ucr.ac.cr
Unidad de Seguridad Vial y Transporte



Figura 1. Configuración para la toma de fotografías.
Tomado de: Greenshields (1935)

INTRODUCCIÓN

Este boletín presenta un resumen muy general de los resultados obtenidos por el Dr. Bruce Douglas Greenshields los cuales forman la base de las teorías modernas de flujo del tráfico.

Han pasado 80 años desde la publicación de las memorias de la catorceava reunión del Comité de Investigación en Carreteras (Highway Research Board) que tuvo lugar en Washington, D.C. en el mes de diciembre del año de 1934. Las memorias incluyen un artículo llamado Un estudio de la capacidad del tráfico (A Study of Traffic Capacity) el cual presenta la ecuación fundamental del flujo vehicular que estableció las relaciones

entre la velocidad, el flujo y la densidad vehicular. La relación de Greenshields, como veremos más adelante, propone una relación lineal entre la velocidad y la densidad.

$$\mu = \mu_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right)$$

donde:

μ : es la velocidad media espacial

μ_f : velocidad media espacial de flujo libre

k_j : es la densidad de congestión

k : es la densidad

El trabajo de Greenshields ha influido en ingenieros de tráfico e investigadores en todo el mundo (Kühne, 2011). Estas relaciones han sido las más utilizadas en modelos de flujo vehicular. El modelo da una visión básica de las interacciones entre flujo, velocidad y densidad, sin agregar la complejidad de relaciones no lineales entre densidad y velocidad.

Sin embargo, otros estudios muestran que estas relaciones tienden a no ser lineales. Dado que no siempre existe una buena correlación lineal entre la velocidad y la densidad (Cal y Mayor, y Cárdenas, 2007), otros modelos logran un mejor ajuste mediante relaciones no lineales.

Debido a lo anterior, Greenberg desarrolló en 1951 un modelo que daba mejores resultados para las relaciones que se dan entre las variables en zonas congestionadas. Por otro lado,

Underwood propone en 1961 un modelo exponencial a partir de estudios en Connecticut. Además, él estaba particularmente interesado en el régimen de flujo libre y le preocupaba el hecho de que la velocidad de flujo libre del modelo de Greenberg tendiera al infinito (May, 1990). Underwood propone un modelo exponencial. La ecuación propuesta es:

$$u = u_f e^{-k/k_0}$$

donde:

μ : es la velocidad media espacial

μ_f : velocidad media espacial de flujo libre

k_0 : es la densidad óptima

k : es la densidad

El modelo requiere el dato de la velocidad de flujo libre (que es fácil de observar) y la densidad óptima, que puede ser difícil de obtener y varía de acuerdo a las características de la vía. Sin embargo, la velocidad nunca llega a cero en el modelo y la densidad de congestión es infinita. Por otro lado, Eddie (1961) propuso combinar el modelo de Greenberg para la zona congestionada y el de Underwood para la zona de flujo no congestionado.

De acuerdo con May (1990) también se han propuesto modelos multi-régimen utilizando funciones de probabilidad para identificar los "límites" (puntos de quiebre) entre regímenes (por ejemplo, congestionado y no congestionado).

Este boletín hace referencia a dos documentos de Greenshields en específico: El método fotográfico para estudiar el comportamiento del tráfico (The Photographic Method of Studying Traffic Behavior, 1934) y Un estudio de la capacidad del tráfico (A Study of Traffic Capacity, 1935).

EL MÉTODO FOTOGRÁFICO PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO (THE PHOTOGRAPHIC METHODS OF STUDYING TRAFFIC BEHAVIOR, 1934)

Para hacer los estudios se tomaron fotografías a intervalos cortos preestablecidos (Greenshields, 1934). Estas fotografías eran tomadas a vehículos en movimiento. El estudio también recibió financiamiento para investigar el efecto de la superficie

de ruedo en las velocidades de los vehículos. Los resultados indican que el espaciamiento mínimo promedio (centro a centro), al cual los vehículos viajan puede estar expresado por la fórmula:

$$S = 21 + 1,1 * V$$

Donde:

- S: Espaciamiento en pies
- V: Velocidad en millas por hora

Greenshields, también determinó que el tiempo de reacción de frenado era de 0,75 segundos y que el tiempo de reacción varía entre carretera urbana y rural. Por otro lado indicó que los resultados podrían generar estudios futuros para diferentes casos:

- Práctica de rebase
- Relaciones flujo – velocidad
- Tiempo perdido por interrupciones
- Cantidad de congestión en una carretera

El estudio incluye una revisión de la literatura en el tema de velocidad y espaciamiento disponible en la época.

Para la recolección de la información, se tomaron fotografías a intervalos constantes. La velocidad puede ser obtenida a partir de la distancia recorrida por el vehículo en las fotografías. La distancia entre los vehículos se mide directamente en las fotografías.



Figura 2. Uso de fondos de color blanco, para mejorar la resolución de los vehículos.
Tomado de: Greenshields (1934)

Las fotografías tenían líneas auxiliares en las imágenes que se utilizaban para determinar las distancias. Se utilizó una cámara de 16 mm y en las fotografías también aparecía la respectiva marca de tiempo.

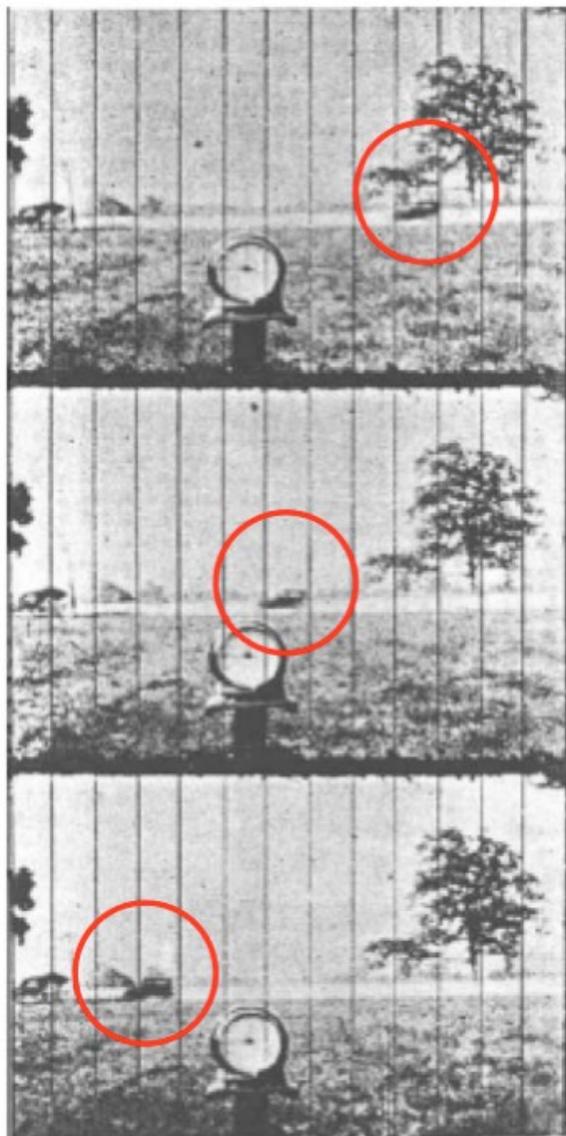


Figura 3. Tres fotografías tomadas de manera consecutiva al mismo vehículo en tres momentos diferentes. Tomado de: Greenshields (1934)

Por ejemplo, en la figura 4, en la primera fotografía el vehículo se encuentra a 16,76 m (55 pies) detrás del carro en frente. Sabiendo que las fotografías fueron tomadas en intervalos de 0,8 segundos, y al observar que el vehículo ha viajado 12,5 metros (41 pies) en el intervalo entre la toma de la primera y segunda fotografía, se puede determinar que el vehículo viajaba a una velocidad de 41 pies/0,8 segundos que es equivalente a 56,2 kilómetros por hora (34,9 millas por hora).

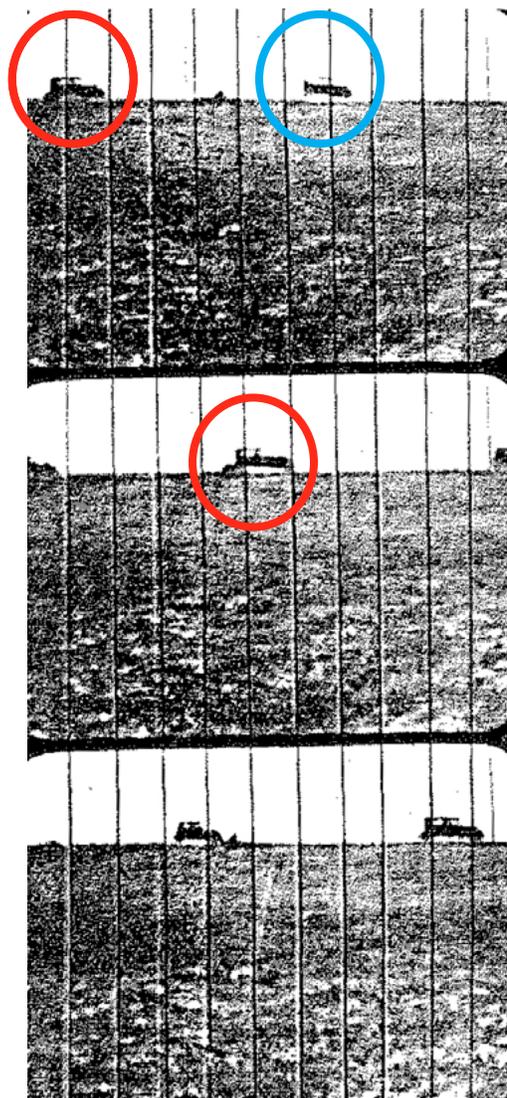


Figura 4. Fotografías usadas para el cálculo de separación y de velocidad. Tomado de: Greenshields (1934)

Las fotografías hacen posible la derivación de una fórmula que expresa en una manera útil la relación entre el número de vehículos en un carril, el espaciamiento mínimo promedio y su velocidad.

El artículo habla del término “personal equation” en la conducción para introducir el concepto de tiempo de reacción del conductor. Greenshields (1934) establece que, en carreteras de dos carriles altamente transitadas, la velocidad de los vehículos en un grupo está restringida por el vehículo liderando el pelotón.

Cuando los vehículos viajan a mayores velocidades y separados a mayores distancias es difícil determinar si los vehículos están

afectados por congestión. Debido a lo anterior, no se utilizaron datos donde la diferencia de velocidades entre vehículos sea mayor a 5,5 km/h (cinco pies por segundo)

El estudio incluyó el análisis de seis mil fotografías y 794 vehículos.

UN ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DEL TRÁFICO (A STUDY OF TRAFFIC CAPACITY, 1935)

El documento corresponde a un estudio empezado en 1934 por el Departamento de Carreteras del Estado de Ohio en los Estados Unidos. Greenshields (1935) define el punto en el cual la congestión empieza y marca el límite de la capacidad de trabajo ("working capacity" or "free moving capacity") de una vía. En términos generales (para vías de 2 carriles) cuando el flujo vehicular se aumenta más allá de 400 a 600 vehículos por hora, la velocidad promedio de todos los vehículos disminuye y el efecto de vehículos lentos se hace más pronunciado. Esta pérdida en velocidad podría ser usada como una medida de la congestión o carga de la vía más allá de su capacidad de flujo libre. Para este estudio se observaron más de 22 mil vehículos.

Se tomaron, de manera conveniente, 88 fotografías por minuto con el fin de tener una distancia recorrida en pies entre cuadros que equivale a la velocidad en millas por hora. Esto debido a que 88 pies/minuto = 1 milla/hora, entonces:

$$1 \text{ pie}/[(1/88) \text{ minuto}] = 1 \text{ milla/hora (1,61 km/h)}$$

El artículo también menciona densidad como el número de vehículos que pueden pasar por una sección de carretera por un periodo determinado de tiempo (flujo). Greenshields indica que la pérdida en velocidad, una vez superado el flujo libre, podría ser usada como una medida de la congestión o carga de la vía.

Las fórmulas tienen la limitación de que asumen un flujo de tráfico uniforme. Algo que no ocurre en la realidad. Tampoco toman en cuenta las variaciones en velocidad de los vehículos, y las oportunidades (o falta de) para rebasar permitidas por el tráfico en sentido opuesto (Public Roads, 1975).

Dentro de las conclusiones se indicó que la velocidad de flujo libre para una carretera de primer orden rondaba las 43 millas por hora. También indicó que conforme se aumenta la congestión hay menos consistencia en la relación entre la velocidad y la densidad. Conforme se reduce el espacio entre vehículos se acentúa el efecto de vehículos lentos.

Al hacer un gráfico de los valores de flujo y la densidad Greenshields obtuvo una línea recta. Además, al asumir la siguiente relación:

$$k = \frac{q}{\mu}$$

Donde:

k = densidad (veh/milla)

q = flujo (veh/hora)

μ = velocidad (milla/hora)

Greenshields obtiene una curva parabólica entre la velocidad y el flujo. El siguiente gráfico muestra la relación entre flujo y velocidad encontrada en el estudio. Este último gráfico ha sido la base para la metodología usada para realizar análisis de capacidad y determinar niveles de servicio en autopistas en Costa Rica y en muchos países del mundo.

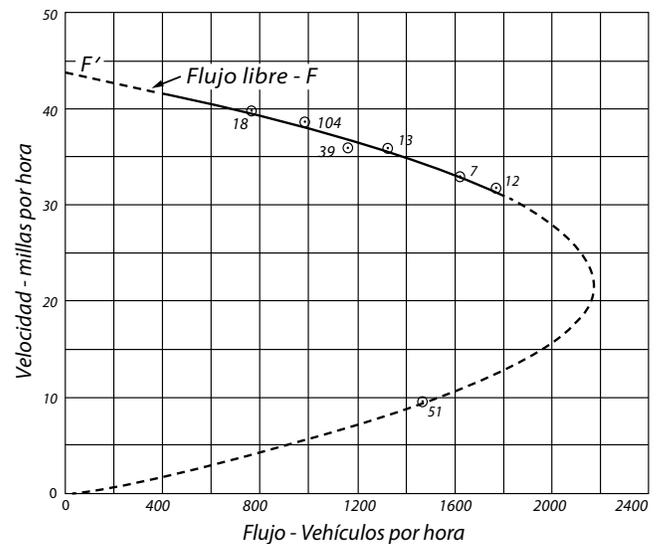


Figura 5. Relación entre el flujo y la velocidad para una carretera de dos carriles. Tomado de: Greenshields (1935)

CONCLUSIONES

Las relaciones que existen entre flujo y velocidad han permitido a lo largo de la historia de la ingeniería de tránsito definir la cantidad de carriles que son requeridos en una carretera y han sido la base de los manuales de capacidad de autopistas en Norteamérica, que usualmente son usados en Costa Rica.

Evidentemente, la teoría de flujo del tráfico ha ido evolucionando a través de los años. El presente boletín tiene como fin brindar tributo a los aportes Dr. Bruce Douglas Greenshields al inicio de las teorías de flujo del tráfico. Su dedicación y enfoque han influenciado, innegablemente, el trabajo que miles de ingenieros han realizado a lo largo de los últimos 80 años en la ingeniería de carreteras.

REFERENCIAS

- Cal y Mayor, R.; Cárdenas, J. (2007) Ingeniería de Tránsito Fundamentos y aplicaciones. 8ª Edición. Alfa Omega Grupo Editor, S.A. de CV., México D.F.
- Edie, L. C. (1961). Car-following and steady-state theory for noncongested traffic. *Operations Research*, 9(1), 66-76.
- Greenshields, B., Thompson, J., Dickinson, H., & Swinton, R. (1934) The Photographic Method of Studying Traffic Behavior. *Proceedings of the 13th Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C. December 7 -8. Part I: Reports of Research Commites and Papers. Vol 13, Part I. Págs 382-399*
- Greenshields, B.; Bibbins, J.; Channing, W.; Miller, H. (1935) A Study of Traffic Capacity. *Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C. December 6-7 Part I. Vol 14, Part I. Págs 448-477.*
- Kühne, R. D. (2011). Greenshields' legacy: Highway traffic. *Transportation Research E-Circular*, (E-C149).
- May, A.D. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice Hall.
- Public Roads (Dic, 1975) *Highway Design for Motor Vehicles: A Historical Review. Part 4: The Vehicle – Carrying Capacity of the Highway.*
- Solano, A. (1999) *Caracterización del Flujo Vehicular en Autopistas. Trabajo Final de Graduación . Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.*