Ciencia y Educación
(L-ISSN: 2790-8402 E-ISSN: 2707-3378)
Vol. 7 No. 9.1
Edición Especial IX 2026

EFECTO DE LA RESOLUCIÓN TEMPORAL EN LA ESTIMACIÓN DIFERENCIAL DE VELOCIDAD, ACELERACIÓN Y CURVATURA DE TRAYECTORIAS VEHICULARES
EFFECT OF TEMPORAL RESOLUTION ON THE DIFFERENTIAL ESTIMATION OF SPEED, ACCELERATION, AND CURVATURE OF VEHICLE TRAJECTORIES

Autores: [1]Gianfranco Di Mattia Castro, [2]Evelin Lissette Quinaluiza Arias, [3]Marco Antonio Nolivos Vimos y [4]Víctor Daniel Álvarez Fajardo.
[1]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-1048-9554
[2]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0004-2757-9697
[3]ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7695-2284
[4]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-4497-2138
[1]E-mail de contacto: gianfranco@uteq.edu.ec
[2]E-mail de contacto: evelin.quinaluiza@unl.edu.ec
[3]E-mail de contacto: mnolivos@unach.edu.ec
[4]E-mail de contacto: victor.alvarez@casagrande.edu.ec
Afiliación: [1]*Universidad Técnica Estatal de Quevedo, (Ecuador). [2]*Universidad Nacional de Loja, (Ecuador). [3]*Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador). [4]*Universidad Casa Grande, (Ecuador).
Artículo recibido: 5 de Septiembre del 2026.
Artículo revisado: 7 de Septiembre del 2026.
Artículo aprobado: 7 de Septiembre del 2026.
[1]Ingeniero en Eléctrico Mecánica con mención en Gestión Empresarial Industrial, graduado de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, (Ecuador). Magíster en Control de Operaciones y Gestión Logística, graduado de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, (Ecuador).
[2]Licenciada en Pedagogía de las Matemáticas y la Física, graduada de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Educación con mención en Docencia Superior, graduada de la Universidad Nacional de Loja, (Ecuador).
[3]Ingeniero en Electricidad Especialización Electrónica, graduado de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, (Ecuador). Máster en Dirección de Empresas mención Proyectos, graduado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Gestión Académica Universitaria, graduado de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).
[4]Licenciado en Ciencias de la Educación mención Comercio Exterior de la Universidad de Guayaquil, (Ecuador). Magíster en Pedagogía con mención en Transdisciplinariedad de las Matemáticas, graduado de la Universidad Casa Grande, (Ecuador).

Resumen

El objetivo fue cuantificar el efecto de la resolución temporal en la aproximación numérica de velocidad, aceleración y curvatura a partir de trayectorias vehiculares urbanas de Guayaquil, Ecuador. Se empleó una base pública de registros de posicionamiento geográfico obtenidos mediante dispositivos móviles. Tras el control geográfico, temporal y cinemático se conformaron 203 segmentos correspondientes a 153 trayectorias y 82 participantes. Las posiciones se proyectaron a coordenadas métricas, se regularizaron a intervalos de cinco segundos y se generaron representaciones degradadas de 10, 15, 20 y 30 segundos. La velocidad, aceleración y curvatura se obtuvieron mediante diferenciación numérica; se compararon diferencias centrales y progresivas, se evaluaron todas las fases posibles de submuestreo y se cuantificó el error cuadrático medio normalizado respecto de la representación de cinco segundos. El error mediano aumentó de 3,49 % a 18,30 % para velocidad, de 16,57 % a 42,05 % para aceleración y de 23,05 % a 43,67 % para curvatura entre 10 y 30 segundos. Las diferencias entre resoluciones fueron significativas, con tamaños del efecto altos, y la curvatura mostró la mayor sensibilidad a la fase temporal. La diferencia central fue claramente superior en resoluciones más finas, pero su ventaja disminuyó al aumentar el intervalo. Se concluye que la resolución temporal condiciona de manera jerárquica la recuperación de información cinemática y geométrica, por lo que debe considerarse un parámetro metodológico al analizar trayectorias vehiculares de baja frecuencia.

Palabras clave: Análisis numérico, Curvatura, Diferenciación, Resolución temporal, Trayectorias vehiculares.

Abstract

This study quantified the effect of temporal resolution on the numerical approximation of velocity, acceleration, and curvature from urban vehicle trajectories in Guayaquil, Ecuador. A public dataset of geographic positioning records acquired with mobile devices was used. After geographic, temporal, and kinematic quality control, the analytical sample comprised 203 segments from 153 trajectories and 82 participants. Positions were projected to metric coordinates, regularized at five-second intervals, and degraded representations were generated at 10, 15, 20, and 30 seconds. Velocity, acceleration, and curvature were obtained through numerical differentiation. Central and forward differences were compared, all possible subsampling phases were evaluated, and normalized root mean square error was calculated relative to the five-second representation. Median error increased from 3.49% to 18.30% for velocity, from 16.57% to 42.05% for acceleration, and from 23.05% to 43.67% for curvature between 10 and 30 seconds. Differences among temporal resolutions were significant with large effect sizes, while curvature showed the strongest sensitivity to temporal phase. Central differences clearly outperformed forward differences at finer resolutions, although this advantage diminished as the sampling interval increased. The findings show that temporal resolution hierarchically conditions the recovery of kinematic and geometric information. Consequently, temporal resolution should be treated as a methodological parameter rather than a merely descriptive feature when low-frequency vehicle trajectories are used for numerical analysis.

Keywords: Numerical analysis, Curvature, Differentiation, Temporal resolution, Vehicle trajectories.

Sumário

O objetivo foi quantificar o efeito da resolução temporal na aproximação numérica da velocidade, aceleração e curvatura a partir de trajetórias veiculares urbanas de Guayaquil, Equador. Utilizou-se uma base pública de registros de posicionamento geográfico obtidos por dispositivos móveis. Após o controle geográfico, temporal e cinemático, a amostra analítica foi composta por 203 segmentos correspondentes a 153 trajetórias e 82 participantes. As posições foram projetadas em coordenadas métricas, regularizadas em intervalos de cinco segundos e utilizadas para gerar representações degradadas de 10, 15, 20 e 30 segundos. A velocidade, a aceleração e a curvatura foram obtidas por diferenciação numérica; compararam-se diferenças centrais e progressivas, avaliaram-se todas as fases possíveis de subamostragem e calculou-se o erro quadrático médio normalizado em relação à representação de cinco segundos. O erro mediano aumentou de 3,49% para 18,30% na velocidade, de 16,57% para 42,05% na aceleração e de 23,05% para 43,67% na curvatura entre 10 e 30 segundos. As diferenças entre resoluções foram significativas, com tamanhos de efeito elevados, e a curvatura apresentou maior sensibilidade à fase temporal. A diferença central foi claramente superior nas resoluções mais finas, mas sua vantagem diminuiu com o aumento do intervalo. Conclui-se que a resolução temporal condiciona hierarquicamente a recuperação da informação cinemática e geométrica e deve ser tratada como parâmetro metodológico na análise de trajetórias veiculares de baixa frequência.

Palavras-chave: Análise numérica, Curvatura, Diferenciação, Resolução temporal, Trajetórias veiculares.

Introducción

Los datos de trayectorias vehiculares se han convertido en una fuente central para el análisis microscópico del tránsito, la estimación de estados de movilidad y la evaluación de sistemas inteligentes de transporte. Los sistemas de posicionamiento global y los teléfonos inteligentes permiten representar el movimiento mediante secuencias de posiciones asociadas a instantes discretos, pero la utilidad de esas secuencias depende de la calidad

espacial y de la frecuencia con que se registran. Patire et al. (2015) mostraron que la tasa de muestreo constituye una dimensión esencial de la calidad de los datos móviles, mientras que Piccoli et al. (2015) demostraron que la estimación de cantidades lagrangianas de orden superior puede deteriorarse cuando las posiciones vehiculares se submuestrean.

Desde el punto de vista matemático, una trayectoria plana puede describirse mediante una función vectorial de posición. La velocidad depende de la primera derivada, la aceleración de la segunda y la curvatura combina derivadas de primer y segundo orden en una relación no lineal. Cuando esas derivadas se estiman a partir de observaciones discretas, la elección del intervalo temporal y del esquema numérico condiciona el resultado. Ahnert y Abel (2007) señalaron que la diferenciación de datos experimentales es especialmente vulnerable al error de medición, y Van et al. (2020) formalizaron el compromiso entre fidelidad a los datos y suavidad de la derivada. Revisiones posteriores confirman que la estimación de derivadas de orden superior exige controlar cuidadosamente ruido y parametrización (Othmane et al., 2022).

En el ámbito vehicular, una parte de la literatura se ha centrado en reconstruir trayectorias afectadas por ruido, oclusiones y baja frecuencia. Rafati et al. (2017) propusieron una metodología basada en wavelets; Wang et al. (2019) reconstruyeron trayectorias en intersecciones a partir de datos de baja frecuencia; y Siddique y Ban (2019) mostraron que la frecuencia de adquisición puede adaptarse al estado dinámico del vehículo para conservar puntos críticos. Estos trabajos coinciden en que no toda reducción de datos es equivalente: los periodos de aceleración, desaceleración y cambio de dirección contienen información que puede perderse con un muestreo temporal grueso. La reconstrucción y el suavizado también han recibido atención reciente. Makridis y Kouvelas (2023) plantearon una reconstrucción informada por la física para manejar heterogeneidad de ruido y valores cinemáticos poco plausibles. Zhao et al. (2024) integraron wavelets, regresión local y filtrado Savitzky en trayectorias bidimensionales de intersecciones, mientras Wang et al. (2024) desarrollaron un procedimiento escalable para reconciliar errores en grandes volúmenes de trayectorias. Berghaus et al. (2024) subrayaron además la necesidad de validar velocidad y aceleración con fuentes independientes cuando se evalúa la calidad de un conjunto de trayectorias.

El filtrado Savitzky-Golay es atractivo porque ajusta polinomios locales y permite suavizar sin eliminar por completo la estructura de la señal. Sin embargo, su desempeño depende de la ventana y del orden polinómico, y puede presentar limitaciones en la supresión de ruido de alta frecuencia y en los extremos de la serie (Schmid et al., 2022). En datos vehiculares recientes, Zhang et al. (2025) combinaron wavelets, interpolación y filtros para mejorar la consistencia de velocidad y aceleración, y Ding et al. (2026) propusieron una estrategia de dos pasos para corregir e interpolar trayectorias obtenidas mediante reconocimiento de video. Estos antecedentes justifican que cualquier conclusión sobre resolución temporal se compruebe frente a distintas decisiones de suavizado.

La curvatura plantea un problema adicional porque representa geometría local y depende simultáneamente de primeras y segundas derivadas. Zhou et al. (2025) mostraron teórica y experimentalmente que la precisión de la señal y la distancia entre muestras son

determinantes para estimar curvatura mediante posicionamiento global. En trayectorias viales, Ge et al. (2026) utilizaron curvatura y geometría de trayectoria para analizar comportamiento de salida de carril en rampas, reforzando el valor de esta magnitud para describir cambios locales de dirección. No obstante, la literatura sobre frecuencia de muestreo se ha concentrado principalmente en posición, velocidad y aceleración, y con frecuencia evalúa una sola fase de submuestreo.

En América Latina existen menos conjuntos abiertos de trayectorias urbanas con los que estudiar este problema. Reyes et al. (2022) analizaron trayectorias de Guayaquil, Ecuador, obtenidas mediante dispositivos móviles y demostraron su utilidad para caracterizar patrones dinámicos de velocidad. La disponibilidad de coordenadas, tiempo, modalidad de transporte y una señal independiente de velocidad ofrece una oportunidad para examinar no solo la pérdida de resolución, sino también la coherencia de las derivadas obtenidas en un contexto real de baja frecuencia.

En este contexto, el objetivo del estudio fue cuantificar el efecto de la resolución temporal en la aproximación numérica de velocidad, aceleración y curvatura a partir de trayectorias vehiculares de Guayaquil, y evaluar la influencia del método de diferenciación y de la fase de submuestreo sobre el error. Se planteó que el incremento del intervalo temporal produciría una degradación progresiva y que esta sería menor en velocidad que en aceleración y curvatura. Adicionalmente, se examinó si la complejidad geométrica de las trayectorias se asociaba con una mayor pérdida de precisión bajo muestreo grueso.

Materiales y Métodos

Se realizó un estudio cuantitativo de simulación numérica sobre datos secundarios de trayectorias vehiculares. La fuente fue el conjunto abierto utilizado por Reyes et al. (2022) que contiene registros de latitud, longitud, identificador de trayectoria, tiempo, modalidad de transporte y velocidad. El análisis se restringió a Guayaquil mediante un control geográfico con latitudes entre -2,30 y -2,00 grados y longitudes entre -80,00 y -79,80 grados. Este filtro retuvo 40 899 observaciones correspondientes a 261 trayectorias. Se incluyeron únicamente modos motorizados: auto, Metrovía, motocicleta, taxi, transporte urbano y vehículo particular, con 38 475 observaciones y 246 trayectorias antes de los controles temporales y cinemáticos.

Los timestamps se homogenizaron a segundos según su orden de magnitud y los valores nulos, cero o temporalmente incompatibles se trataron como no válidos. Dentro de cada trayectoria se ordenaron las observaciones cronológicamente y se eliminaron timestamps duplicados. Los intervalos superiores a 10 s se consideraron interrupciones y se utilizaron para dividir los recorridos en segmentos temporalmente continuos. Se conservaron segmentos con duración mínima de 180 s, distancia acumulada mínima de 100 m, al menos 30 observaciones, mediana del intervalo temporal entre 4 y 6 s, al menos 80 % de intervalos comprendidos entre 4 y 6 s y ausencia de desplazamientos que implicaran velocidades superiores a 40 m/s.

La muestra final estuvo formada por 203 segmentos pertenecientes a 153 trayectorias y 82 identificadores de usuario. Los identificadores personales de la base no se incorporaron a los productos analíticos ni se reportaron individualmente. Las coordenadas geográficas se transformaron al sistema UTM

zona 17S para expresar la posición en metros. Cada segmento se interpoló linealmente sobre una malla regular de 5 s, elegida por corresponder a la mediana del intervalo original y a la mayor concentración de separaciones observadas. La serie de 5 s se trató como representación temporal de referencia, no como trayectoria física exacta. Para el análisis principal de discretización, las coordenadas regularizadas se suavizaron mediante un filtro Savitzky-Golay con ventana de siete puntos y polinomio cúbico. La sensibilidad a esta elección se evaluó repitiendo el procedimiento con ventanas de cinco y nueve puntos.

La trayectoria bidimensional se representó por la posición r(t) en coordenadas métricas. La rapidez se obtuvo a partir de la norma de la primera derivada de la posición y la aceleración a partir de la norma de la segunda derivada. La curvatura se calculó mediante la expresión clásica para curvas planas parametrizadas por el tiempo. Para reducir la inestabilidad del denominador, la curvatura se evaluó únicamente en instantes con velocidad de referencia y velocidad estimada iguales o superiores a 2 m/s.

$$r(t) = [x(t), y(t)] \quad (1)$$

$$v(t) = \sqrt{(x'(t)^2 + y'(t)^2)} \quad (2)$$

$$a(t) = \sqrt{(x''(t)^2 + y''(t)^2)} \quad (3)$$

$$\kappa(t) = \mathrm{abs}(x'y'' - y'x'')/\sqrt{[(x'^2 + y'^2)^3]} \quad (4)$$

El análisis principal utilizó diferencias centrales sobre la representación suavizada. Para cada trayectoria se generaron resoluciones de 10, 15, 20 y 30 s mediante submuestreo sistemático de la malla de 5 s. En cada factor se evaluaron todas las fases posibles; por ejemplo, un intervalo de 20 s admitió cuatro alineaciones distintas respecto de la serie base. Como análisis secundario se compararon diferencias progresivas y centrales aplicadas a las posiciones regularizadas para determinar en qué medida la elección del esquema podía compensar la pérdida de resolución.

$$x'_i \approx (x_{i+1} - x_{i-1})/(2\Delta t) \quad (5)$$

$$x''_i \approx (x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1})/\Delta t^2 \quad (6)$$

La degradación se cuantificó mediante el error cuadrático medio normalizado por el percentil 95 del valor absoluto de la magnitud de referencia de cada trayectoria. Para cada fase de submuestreo, las estimaciones obtenidas a 10-30 s se compararon con los valores correspondientes de la representación de 5 s en tiempos coincidentes. Posteriormente se calculó la mediana entre fases. La velocidad derivada de las coordenadas a 5 s se contrastó con la señal de velocidad incluida en la base, convertida a unidades compatibles, mediante correlación de Pearson y error absoluto mediano.

$$\mathrm{NRMSE} = 100\sqrt{[\Sigma(\hat{z}_i - z_i)^2/n]}/P_{95}(z) \quad (7)$$

Aunque el control de calidad produjo 203 segmentos, la unidad inferencial fue la trayectoria original. Cuando una trayectoria generó más de un segmento, sus métricas se agregaron antes de las pruebas. Las diferencias entre resoluciones se evaluaron mediante la prueba de Friedman para medidas repetidas y el tamaño del efecto se expresó con W de Kendall.

Las comparaciones pareadas se realizaron mediante Wilcoxon con corrección de Holm. Las medianas principales se acompañaron de intervalos de confianza del 95 % obtenidos por bootstrap. Se evaluó mediante correlación de Spearman la asociación entre el cambio acumulado de orientación por 100 m y el error a 30 s. Se adoptó un nivel de significancia de 0,05.

Resultados y Discusión

La cohorte final conservó diversidad de modos motorizados, aunque los automóviles representaron la mayor cantidad de segmentos y trayectorias. La Tabla 1 resume la composición analítica. La concentración temporal de observaciones fue mayor en octubre de 2017, por lo que el diseño se orientó a comparar aproximaciones dentro de las mismas trayectorias y no a caracterizar patrones estacionales del tránsito de Guayaquil.

Tabla 1. *Composición de la cohorte analítica por modalidad de transporte.*

Modalidad	Segmentos	Trayectorias	Participantes
Auto	82	62	34
Metrovia	43	29	22
Moto	3	3	2
Taxi	23	17	13
Transporte Urbano	27	20	19
Vehiculo particular	25	22	8
Total	203	153	82

Fuente: Elaboración propia.

La reducción de la resolución temporal produjo un aumento monotónico del error en las tres magnitudes (Tabla 2; Figura 1). A 10 s, el error cuadrático medio normalizado mediano fue de 3,49 % para velocidad, 16,57 % para aceleración y 23,05 % para curvatura. A 30 s, los valores alcanzaron 18,30 %, 42,05 % y 43,67 %, respectivamente. La jerarquía velocidad < aceleración < curvatura se mantuvo en todos los niveles de resolución, lo que indica que la pérdida de información no se distribuye uniformemente entre magnitudes derivadas.

Tabla 2. *Error cuadrático medio normalizado mediano por resolución temporal.*

Resolución (s)	Velocidad % [IC95]	Aceleración % [IC95]	Curvatura % [IC95]
10	3,49 [2,98-3,71]	16,57 [15,65-17,65]	23,05 [20,54-25,03]
15	7,69 [6,91-8,06]	27,65 [26,88-29,33]	33,85 [32,42-37,09]
20	11,62 [10,83-12,67]	34,49 [33,53-35,45]	37,82 [36,56-39,31]
30	18,30 [17,78-19,43]	42,05 [41,32-43,29]	43,67 [42,44-44,66]

Nota: IC95 = intervalo de confianza bootstrap del 95 %. La curvatura tuvo n = 153, 151, 151 y 150 trayectorias en 10, 15, 20 y 30 s, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

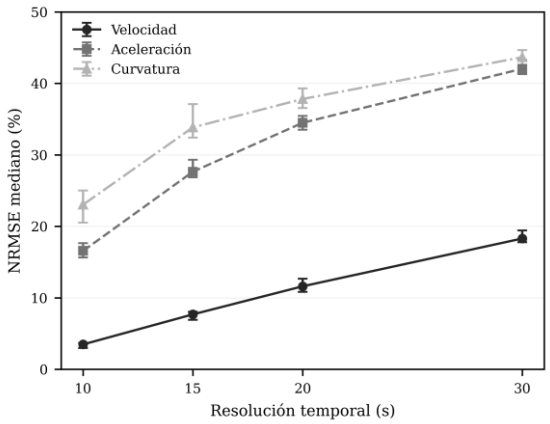


Figura 1. *Degradación del error numérico con la resolución temporal.*

Fuente: Elaboración propia.

El efecto de la resolución fue significativo para velocidad ($\chi^2 = 459{,}00$; $p < 0{,}001$; $W = 1{,}000$), aceleración ($\chi^2 = 454{,}23$; $p < 0{,}001$; $W = 0{,}990$) y curvatura ($\chi^2 = 256{,}29$; $p < 0{,}001$; $W = 0{,}570$). Todas las comparaciones pareadas entre 10, 15, 20 y 30 s permanecieron significativas después de la corrección de Holm. La menor diferencia relativa se observó para curvatura entre 15 y 20 s, pero también fue significativa (p ajustado < 0,001). Por tanto, el incremento del intervalo temporal generó una degradación sistemática y no únicamente una diferencia entre los extremos del experimento. El patrón de aceleración es coherente con Piccoli et al. (2015) quienes mostraron que cantidades de

orden superior son especialmente vulnerables al submuestreo de posiciones. La coincidencia es relevante porque el presente estudio parte de registros urbanos de teléfonos móviles con una referencia de 5 s, mientras que buena parte de la literatura utiliza trayectorias de mayor frecuencia. Desde el punto de vista numérico, la segunda derivada acumula el efecto de diferencias sucesivas y amplifica perturbaciones que tienen menor efecto sobre la primera derivada, tal como se ha documentado para datos experimentales ruidosos (Ahnert y Abel, 2007; Van et al., 2020).

La curvatura presentó el mayor error en todas las resoluciones y una dispersión superior entre trayectorias. Este comportamiento es compatible con su estructura no lineal, ya que combina primeras y segundas derivadas y puede cambiar de forma marcada cuando una curva local queda representada por pocos puntos. Zhou et al. (2025) demostraron que el espaciamiento entre muestras y la precisión de la señal condicionan la estimación de curvatura mediante posicionamiento global. Los resultados de Guayaquil extienden esta observación a trayectorias vehiculares urbanas de baja frecuencia y muestran que el problema aparece incluso cuando las posiciones provienen de una misma fuente y la degradación temporal se controla experimentalmente.

La fase de muestreo fue una segunda fuente de variabilidad (Tabla 3; Figura 2). Con una resolución de 10 s, cambiar únicamente el origen temporal produjo un rango mediano de 0,18 puntos porcentuales en velocidad, 1,01 en aceleración y 8,08 en curvatura. A 30 s, esos rangos aumentaron a 5,90, 9,43 y 25,02 puntos porcentuales. Esto implica que dos series con la misma frecuencia nominal pueden retener información local distinta si sus instantes de observación no coinciden. El hallazgo complementa los enfoques de muestreo adaptativo de Siddique y Ban (2019): además de seleccionar con qué frecuencia observar, resulta relevante cuándo se produce la observación dentro de los cambios dinámicos.

Tabla 3. *Sensibilidad a la fase de submuestreo.*

Resolución (s)	Velocidad (pp)	Aceleración (pp)	Curvatura (pp)
10	0,18	1,01	8,08
15	1,33	4,29	20,22
20	2,97	6,41	23,67
30	5,90	9,43	25,02
Nota: pp=puntos porcentuales del rango mediano del error entre fases posibles.			

Fuente: Elaboración propia.

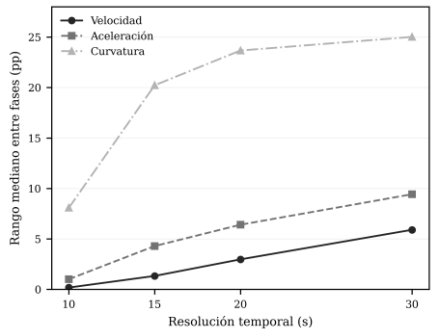


Figura 2. *Variación del error atribuible a la fase de submuestreo.*

Fuente: Elaboración propia.

La elección del esquema de diferenciación modificó el error, especialmente en las resoluciones más finas (Tabla 4; Figura 3). A 10 s, la diferencia central presentó errores medianos de 2,50 %, 14,55 % y 19,97 % para velocidad, aceleración y curvatura, respectivamente, frente a 12,39 %, 43,51 % y 52,27 % con la diferencia progresiva. A 30 s, la ventaja de la diferencia central persistió para velocidad y curvatura, pero prácticamente desapareció para aceleración. Este resultado sugiere que un esquema numérico de mayor

orden mejora la aproximación mientras la trayectoria conserva suficiente información temporal; cuando el intervalo se hace demasiado grueso, la ausencia de observaciones intermedias pasa a dominar sobre el orden formal de la fórmula de diferencias.

Tabla 4. *Comparación de diferencias progresivas y centrales en resoluciones extremas.*

Resolución (s)	Método	Velocidad %	Aceleración %	Curvatura %
10	Progresiva	12,39	43,51	52,27
10	Central	2,50	14,55	19,97
30	Progresiva	25,06	41,38	51,71
30	Central	18,37	41,82	43,40

Fuente: Elaboración propia.

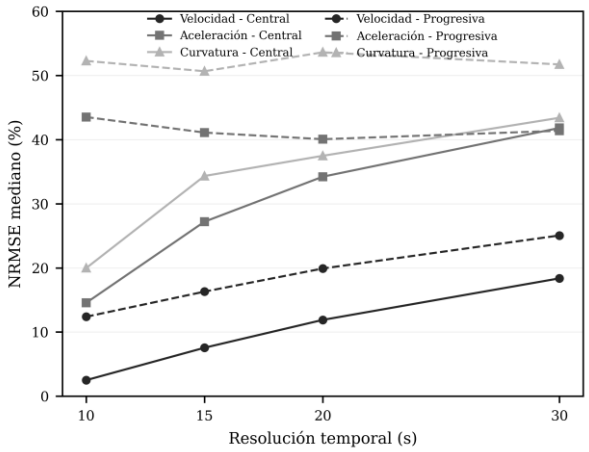


Figura 3. *Comparación de los esquemas de diferenciación a través de las resoluciones evaluadas.*

Fuente: Elaboración propia.

Esta interpretación es consistente con la literatura de reconstrucción. Wang et al. (2019) mostraron que el error de interpolaciones simples crece con el intervalo de muestreo; Makridis y Kouvelas (2023), Zhao et al. (2024), Wang et al. (2024), Zhang et al. (2025) y Ding et al. (2026) han propuesto estrategias más sofisticadas para corregir, suavizar o reconstruir trayectorias. Sin embargo, ninguna reconstrucción puede recuperar sin supuestos adicionales una dinámica local que no estuvo contenida en las observaciones. Los resultados obtenidos aquí delimitan precisamente esa pérdida antes de introducir modelos de reconstrucción complejos. La validación interna de velocidad fue favorable. La señal derivada de las coordenadas mediante diferencia central a 5 s mostró una correlación de Pearson de 0,9845 con la velocidad proporcionada por la base, a partir de 25 333 pares de observaciones. El error absoluto mediano por trayectoria fue 1,27 km/h, con intervalo de confianza del 95 % entre 1,14 y 1,32 km/h. Este grado de concordancia respalda la coherencia del procedimiento espacial y temporal y sigue la recomendación de contrastar trayectorias procesadas con información cinemática adicional cuando está disponible (Berghaus et al., 2024).

El análisis de sensibilidad al suavizado mantuvo las conclusiones principales. Las ventanas Savitzky-Golay de cinco, siete y nueve puntos modificaron los valores absolutos, pero en todos los casos el error aumentó con el intervalo y se conservó la jerarquía entre velocidad, aceleración y curvatura. Este resultado es importante porque el filtro no debe considerarse neutro: Schmid et al. (2022) advierten que su respuesta depende de la parametrización y que el cálculo de derivadas puede amplificar sus limitaciones. La estabilidad cualitativa frente a tres ventanas reduce el riesgo de que la conclusión dependa de una única elección de suavizado.

En la figura 1 la complejidad geométrica se asoció positivamente con la pérdida de precisión a 30 s. El cambio acumulado de orientación por 100 m presentó correlaciones de

Spearman de 0,626 con el error de velocidad, 0,289 con el de aceleración y 0,355 con el de curvatura, todas con $p < 0,001$. La Figura 4 muestra la asociación para curvatura. Aunque se esperaba una relación particularmente fuerte entre complejidad geométrica y error de curvatura, la asociación más elevada correspondió a velocidad. Por ello, la hipótesis de que la curvatura sería la magnitud más dependiente de la complejidad geométrica no quedó respaldada en esos términos.

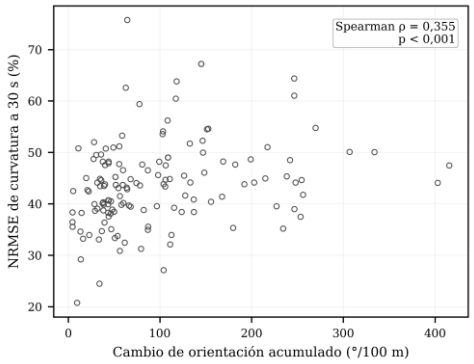


Figura 4. *Complejidad geométrica y error de curvatura a 30 s.*

Fuente: Elaboración propia.

El resultado sugiere que los recorridos con cambios frecuentes de dirección también reducen la representatividad de la rapidez local cuando la separación temporal aumenta. Los usos recientes de curvatura en análisis de geometría vial Ge et al. (2026) refuerzan la necesidad de documentar simultáneamente resolución y complejidad de la trayectoria.

El estudio presenta tres limitaciones principales. Primero, la serie de 5 s es la representación de mayor resolución disponible y no un valor verdadero libre de incertidumbre; por tanto, los errores cuantifican la pérdida adicional causada por el submuestreo. Segundo, los registros provienen de dispositivos móviles y contienen incertidumbre de posicionamiento que no puede separarse completamente del proceso de diferenciación. Tercero, la concentración temporal de los datos impide generalizar los resultados como descripción del tránsito habitual o estacional de Guayaquil. Estas limitaciones no invalidan la comparación intra-trayectoria, porque cada resolución se obtuvo de la misma serie de referencia, pero restringen cualquier interpretación en términos de exactitud física absoluta.

En conjunto, los resultados muestran que la resolución temporal debe tratarse como un parámetro metodológico del análisis y no solo como una característica descriptiva del conjunto de datos. Para aplicaciones centradas en rapidez, la degradación puede ser relativamente moderada en intervalos intermedios; para aceleración y, especialmente, curvatura, la misma reducción produce pérdidas sustancialmente mayores y una dependencia importante de la fase. Esta distinción es relevante en ciudades donde los datos disponibles proceden principalmente de teléfonos inteligentes o sistemas de posicionamiento de baja frecuencia y no de infraestructura especializada de seguimiento.

Conclusiones

La resolución temporal condiciona de manera jerárquica la información que puede recuperarse de una trayectoria vehicular discreta: la velocidad es la magnitud más robusta, mientras que la aceleración y la curvatura requieren una representación temporal más densa. La fase de submuestreo constituye una fuente independiente de variabilidad y debe evaluarse cuando se estudian magnitudes locales, particularmente curvatura, porque una misma frecuencia nominal puede producir aproximaciones diferentes según la alineación de los instantes de observación. Las diferencias centrales ofrecen una ventaja clara frente a las

progresivas cuando la información temporal es suficiente, pero esa ventaja disminuye a resoluciones gruesas; en ese régimen, la ausencia de observaciones intermedias no puede compensarse únicamente con un esquema numérico de mayor orden. El enfoque aplicado a Guayaquil demuestra que bases abiertas de posicionamiento vehicular de frecuencia relativamente baja pueden utilizarse para estudios de matemática aplicada siempre que la incertidumbre, el suavizado, la unidad estadística y la resolución se incorporen explícitamente al diseño.

Referencias Bibliográficas

Ahnert, K., & Abel, M. (2007). Numerical differentiation of experimental data: Local versus global methods. *Computer Physics Communications, 177*(10), 764-774. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.03.009

Berghaus, M., Lamberty, S., Ehlers, J., Kalló, E., & Oeser, M. (2024). Vehicle trajectory dataset from drone videos including off-ramp and congested traffic: Analysis of data quality, traffic flow, and accident risk. *Communications in Transportation Research, 4*, 100133. https://doi.org/10.1016/j.commtr.2024.100133

Ding, S., Zhang, S., Peng, F., Zeng, L., Ren, Y., & Li, W. (2026). Reconstruction strategy of vehicle trajectory data for video recognition based on a two-step method of interpolation filtering. *Scientific Reports, 16*, 7428. https://doi.org/10.1038/s41598-026-38947-0

Ge, T., Dai, Z., Wang, Y., Cai, S., Li, Z., & Wang, X. (2026). An exploratory analysis of geometric alignments on lane departure behaviors at loop ramps. *Applied Sciences, 16*(5), 2582. https://doi.org/10.3390/app16052582

Makridis, M., & Kouvelas, A. (2023). Adaptive physics-informed trajectory reconstruction exploiting driver behavior and car dynamics. *Scientific Reports, 13*, 1121. https://doi.org/10.1038/s41598-023-28202-1

Othmane, A., Kiltz, L., & Rudolph, J. (2022). Survey on algebraic numerical differentiation: Historical developments, parametrization, examples, and applications. *International Journal of Systems Science, 53*(9), 1848-1887. https://doi.org/10.1080/00207721.2022.2025948

Patire, A., Wright, M., Prodhomme, B., & Bayen, A. M. (2015). How much GPS data do we need? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 58*, 325-342. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.011

Piccoli, B., Han, K., Friesz, T. L., Yao, T., & Tang, J. (2015). Second-order models and traffic data from mobile sensors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 52*, 32-56. https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.12.013

Rafati, M., Shariat, A., & Shahri, M. (2017). A new methodology for vehicle trajectory reconstruction based on wavelet analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 74*, 150-167. https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.010

Reyes, G., Lanzarini, L. C., Estrebou, C. A., & Fernández Bariviera, A. (2022). Dynamic grouping of vehicle trajectories. *Journal of Computer Science & Technology, 22*(2), e11. https://doi.org/10.24215/16666038.22.e11

Schmid, M., Rath, D., & Diebold, U. (2022). Why and how Savitzky-Golay filters should be replaced. *ACS Measurement Science Au, 2*(2), 185-196. https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.1c00054

Siddique, C., & Ban, X. J. (2019). State-dependent self-adaptive sampling method for vehicle trajectory data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 100*, 224-237. https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.018

Van, F., Kutz, J., & Brunton, B. (2020). Numerical differentiation of noisy data: A unifying multi-objective optimization framework. *IEEE Access, 8*, 196865-196877.

https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034077

Wang, H., Gu, C., & Ochieng, W. Y. (2019). Vehicle trajectory reconstruction for signalized intersections with low-frequency floating car data. *Journal of Advanced Transportation, 2019*, 9417471. https://doi.org/10.1155/2019/9417471

Wang, Y., Gloudemans, D., Ji, J., Teoh, Z, Liu, L., Zachár, G., Barbour, W., & Work, D. (2024). Automatic vehicle trajectory data reconstruction at scale. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 160*, 104520. https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104520

Zhang, X., Gao, Y., & Zhou, C. (2025). Enhancing vehicle trajectory quality: A two-step data reconstruction method using wavelet transform and normal acceleration value. *Engineering Reports, 7*, e13090. https://doi.org/10.1002/eng2.13090

Zhao, J., Yang, X., & Zhang, C. (2024). Vehicle trajectory reconstruction for intersections: An integrated wavelet transform and Savitzky-Golay filter approach. *Transportmetrica A: Transport Science, 20*(2), 2163207. https://doi.org/10.1080/23249935.2022.2163207

Zhou, Y., Yang, Y., Ren, Z., & Hecht, M. (2025). Estimating railway track curvature using gyroscope and GPS sensors. *Scientific Reports, 15*, 8037. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91255-x

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Gianfranco Di Mattia Castro, Evelin Lissette Quinaluiza Arias, Marco Antonio Nolivos Vimos y Víctor Daniel Álvarez Fajardo.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)
Gianfranco Di Mattia Castro: conceptualización, metodología, análisis formal, redacción del borrador original y supervisión.
Evelin Lissette Quinaluiza Arias: curación de datos, software, validación y visualización.
Marco Antonio Nolivos Vimos: investigación, recursos, validación y revisión crítica del manuscrito.
Víctor Daniel Álvarez Fajardo: metodología, análisis formal, supervisión y revisión y edición del manuscrito.

Declaración de conflicto de intereses
Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento
La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor
El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores
Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación
Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial
Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos
Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.