

# Evaluación de la condición de la superficie de rodadura de ciclovías usando aceleraciones verticales obtenidas con GPS

## EVALUATING THE CONDITION OF THE CYCLEWAY SURFACE USING VERTICAL ACCELERATIONS OBTAINED FROM GPS

Tomás Echaveguren\*, Cristian Montoya, Alejandro Tudela

Universidad de Concepción, Chile

\* Autor para correspondencia:  
techaveg@udec.cl

### RESUMEN

Las bicicletas requieren infraestructura adecuada para realizar viajes eficientes, cómodos y seguros. Para ello se debe contar con indicadores que permitan medir el grado de logro de esos tres atributos. La comodidad se puede medir indirectamente a partir de las irregularidades de la superficie de rodadura de una ciclovía. En Chile existe un manual de diseño y construcción de ciclovías, que incluye un indicador de irregularidad pero no es específico para ciclovías. En el Gran Concepción existen 45 km de ciclovías y se incrementará en 75 km. En este trabajo se proponen indicadores de estado de la superficie de rodadura de ciclovías, basado en aceleraciones verticales obtenidas con un GPS de 10Hz. Se estimaron tres indicadores de vibraciones y se crearon umbrales de intervención basados en el error cuadrático medio. El 9% de las ciclovías se encontraba en un nivel Alto y el 57% y 34% estaban en niveles Medio y Bajo respectivamente.

Palabras clave: ciclovías, aceleración vertical, GPS, mantenimiento

### ABSTRACT

*Bicycles require infrastructure such that users can develop efficient, comfortable and safe trips, needing performance indicators to assess whether these attributes are being achieved. Comfort can be indirectly measured using proxy indexes describing pavement irregularities. The design and construction manual for bike routes from Chile, including a surface irregularities indicator, but it was not created for bike routes. There are 45 km of bike routes in the Great Concepcion area, which will be increased in 75 km, showing the relevance of this issue. A set of indicators are proposed in this paper to evaluate the bike routes rolling surface, resting on vertical accelerations measured with a 10 Hz GPS. Three vibration indicators were estimated, generating intervention thresholds based upon the Root Mean Square (RMS) index. A 9% of bike routes had a High performance level, whereas 57% and 34% achieved a Medium and Low performance level.*

*Keywords: bike routes, vertical acceleration, GPS, maintenance*

## 1. INTRODUCCIÓN

La bicicleta es un modo de transporte de uso creciente en Chile, que requiere infraestructura con características superficiales adecuadas para asegurar eficiencia, comodidad y seguridad en los desplazamientos.

En el Gran Concepción (GC) hasta el año 2013 existían aproximadamente 45 km de ciclovías, no necesariamente conectadas, diseminadas en diversas comunas de esta área metropolitana. Durante ese mismo año, SECTRA (2013), condujo un estudio que permitió elaborar un Plan Maestro de Ciclovías para el GC, que consideraba el aumento del stock hasta alcanzar aproximadamente 70 km. Al incorporar estas infraestructuras al patrimonio físico del GC cabe preguntarse de qué manera éste puede preservarse, de modo que proporcione un nivel de servicio adecuado para los usuarios.

Ante este escenario, es previsible la necesidad de contar con un sistema de gestión de mantenimiento para esta red de ciclovías, en el cual los elementos centrales corresponden al inventario, la evaluación de condición y la priorización y optimización de planes de mantenimiento. Bajo este esquema, un aspecto inicial a considerar son el inventario y la evaluación de la condición superficial. Si bien existe un amplio desarrollo acerca del mantenimiento de vías vehiculares, urbanas y rurales (Véase de Solminihac, 2001), en el caso de las vías para bicicletas la situación es opuesta. La literatura ofrece pocos ejemplos, casos de estudios e investigación al respecto.

Las denominaciones de las vías para bicicletas varían de acuerdo con la reglamentación vigente en cada país. En particular, la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones de Chile (OGUC), define a la ciclovía como una “vía destinada exclusivamente al tránsito de vehículos menores, tales como, bicicletas, motos de baja cilindrada, triciclos y otros, cuyas características pueden corresponder a las de ciclo-pistas o a las de ciclo-bandas” (MINVU, 2012). SECTRA (2010) a su vez establece precisiones a la definición de la OGUC, indicando que las ciclovías son de uso exclusivo de bicicletas. Las clasifica en ciclo-pistas o ciclo-bandas, especificando también que las ciclo-calles son de uso mixto.

Desde el punto de vista de la materialidad, la normativa vigente en Chile señala que las materialidades a usar pueden ser variadas con tal que aseguren comodidad, durabilidad y regularidad superficial y adherencia. Sin embargo, solo establece requerimientos constructivos para superficies de rodadura de asfalto y hormigón (MINVU, 2015).

En términos de control de calidad, establece como principal criterio el control receptivo de regularidad superficial, mediante el índice de regularidad internacional (IRI, en m/km) medido con el rugosímetro Merlin. Este rugosímetro es un perfilómetro de bajo costo diseñado para medir rugosidad de espacios vehiculares. Es un equipo de bajo rendimiento que requiere mediciones repetidas para estimar el error aleatorio ocasionado por el propio sistema de medición. Requiere, además, una ecuación de calibración propia de manera de escalar adecuadamente las diferencias de cota medidas con el equipo y el IRI en cada superficie (Cundill, 1991).

Uno de los aspectos relevantes en la gestión de ciclovías es la evaluación de su condición, la cual puede desagregarse en: condición de la superficie de rodadura, condición de los costados de la ciclovía, y condición de las señalizaciones y demarcaciones. En Chile no existen procedimientos formales para evaluar de manera objetiva la condición de la superficie de rodadura de ciclovías, a excepción de lo señalado en MINVU (2015), ni para control receptivo o programar operaciones de mantenimiento de corto plazo.

En este sentido, contar con métodos de evaluación de condición permite conocer el estado actual de la infraestructura, identificar aquellos lugares que están en peores condiciones y que necesitan ser atendidos con mayor urgencia. Cuando la evaluación se mantiene en el tiempo es posible conocer también, el comportamiento de las ciclovías en relación con sus deterioros y elaborar modelos de comportamiento que permitan predecir los deterioros y en consecuencia planificar la inversión en mantenimiento en el largo plazo. Al conocer mejor su estado y comportamiento, se pueden obtener también parámetros o índices que permitan establecer umbrales de condiciones mínimas de calidad en controles receptivos, o para activar la necesidad de mantenimiento de una ciclovía existente.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento de evaluación de estado de ciclovías, basado en aceleraciones verticales obtenidas con GPS. Para ello, inicialmente se discute acerca del mantenimiento de ciclovías, considerando las técnicas de evaluación de condición de la carpeta y el uso potencial de aceleraciones verticales para evaluar la condición. Se pone especial énfasis en la norma ISO 2631, sobre evaluación de vibraciones, la norma BS 6841 (ISO, 1997; BSI, 1987) y las experiencias de Lépine et al. (2013). Posteriormente se resume el inventario de ciclovías del Gran

Concepción, en cuanto a su ubicación y características generales: ancho, materialidad, longitud, número de pistas. Luego se explica el procedimiento de medición, que describe cómo se realizaron mediciones continuas de: velocidad longitudinal, tiempo, distancia y velocidad vertical, con tres repeticiones por sentido en cada una de esas vías.

Los datos fueron recolectados con un GPS de 10 Hz, implementado en una bicicleta de montaña con chasis rígido y sin sistema de amortiguación. Completadas las mediciones se describe la extracción de información desde el equipo GPS y a la depuración de datos, el cálculo de aceleraciones verticales, el tratamiento de datos, que incluye análisis de repetibilidad, eliminación de outliers y conformación de la base de datos para el cálculo de los indicadores. Luego se presentan el cálculo de indicadores, el análisis de resultados y su representación espacial en un sistema de información geográfica

## 2. GESTIÓN DE REDES DE CICLOVÍAS

La gestión de redes de ciclovías busca mantenerlas en condiciones estructurales y funcionales adecuadas a lo largo del tiempo, de manera que los ciclistas puedan circular por ellas en condiciones de seguridad y confort. Para ello, son tres los elementos de gestión: la gestión de tráfico, que se analiza en términos de la provisión de un nivel de servicio adecuado (TRB, 2010), la gestión del entorno, que se analiza en términos de la provisión de un galibo vertical y horizontal adecuado para la circulación de los ciclistas, y la gestión de la infraestructura misma. Esta última es el punto de atención de este trabajo.

La infraestructura de la ciclovía considera esencialmente la provisión de una superficie de rodadura adecuada. Para ello, se requiere conocer tres aspectos: Primero, es necesario conocer el inventario de la red de ciclovías, en cuanto a localización, materialidad y dimensiones. Segundo, se necesita conocer la condición actual de la superficie de rodadura, en términos de los defectos superficiales, la rugosidad y la resistencia al deslizamiento. Y tercero, se necesita conocer los valores, máximos o mínimos, de defectos superficiales, rugosidad y resistencia al deslizamiento que permiten al ciclista circular en condición de seguridad y confort. Tanto la condición actual como los umbrales generalmente se determinan en base a índices que combinan estas tres características del pavimento. Este es el proceso clásico de mantenimiento de redes basado en necesidades (de Solminihac, 2001).

Por lo tanto, un elemento esencial para la gestión de ciclovías es la determinación de la condición superficial mediante evaluación en terreno, para lo cual existen diversos indicadores: indicadores de deterioros superficiales (Gharaibeh et al., 1998); indicadores de condición integrales, como el descrito por Martínez et al. (2011), e indicadores basados en aceleraciones, como los utilizados en Bélgica (Martens, 2011).

Gharaibeh et al. (1998) proponen una metodología de inspección para la red de ciclovías de la Universidad de Illinois, usando la inspección visual como herramienta de recolección de información. Consideran distintos tipos de deterioros que afectan la operación de las ciclovías, como por ejemplo los deterioros superficiales de la carpeta de rodadura y las dificultades para la conducción a lo largo de la ciclovía. Consideran defectos superficiales, deformaciones verticales, deterioro de las demarcaciones, dificultades geométricas y en las transiciones, así como el confort en la conducción.

Martínez et al. (2011) describen el sistema de gestión para ciclovías de la ciudad de Bogotá. El sistema incluye un inventario de la red total de ciclovías, el cual se actualiza cada 2 años. Este inventario contiene tanto las características geométricas (números de carriles, ancho, longitud), como información respecto al estado de las ciclovías (rugosidad, tipo de falla, severidad de la falla, extensión de la falla, tipo de superficie). Con esta información obtienen un índice de condición de ciclovías (ICC) con el cual pueden priorizar el mantenimiento. El ICC considera la irregularidad superficial medida a través del IRI y los defectos de la superficie de rodadura. No especifican la técnica de medición del IRI, sino que más bien recomiendan adoptar el modelo de cuarto de carro de Sayers (1995) para estimarlo. Los defectos de la superficie de rodadura los obtienen mediante inspección visual usando los métodos de caracterización de deterioros del sistema de gestión de pavimentos PAVER (Shahin, 2005).

Martens (2011), en el portal de movilidad urbana Eltis, muestra un caso de estudio en que se midió el confort y la calidad de ciclovías en Bélgica. Para ello utilizaron bicicletas equipadas con acelerómetros para medir las aceleraciones causadas por la rugosidad de las ciclovías. Realizaron mediciones en aproximadamente 12.000 km de ciclovías considerando desde aquellas recién construidas hasta aquellas con 20 a 30 años. El objetivo era añadir el confort como un atributo de las ciclovías y ofrecer así a los municipios un instrumento para la mantención.

### 3. MEDICIÓN DEL CONFORT EN LA CONDUCCIÓN EN BASE A VIBRACIONES

Los enfoques de evaluación de condición de ciclovías antes revisados se centran fundamentalmente en el confort en la conducción y, por tanto, asumen que una superficie de rodadura libre de defectos es necesaria y parcialmente suficiente para ello. Una variable que permite describir el confort durante la circulación es la vibración transmitida por las irregularidades del pavimento a los ocupantes de un vehículo. Las vibraciones afectan negativamente al cuerpo humano en el largo plazo, mientras que en el corto plazo disminuyen el confort durante la conducción (Gómez-Cano, 2007).

Diversos estudios realizados en vehículos, buses de transporte público, sistemas de ferrocarril urbano y en las mismas bicicletas han mostrado el efecto de transmisión de vibraciones hacia los ocupantes de los vehículos (Véase por ejemplo a Paddan y Griffin (2002)); El Sayed et al. (2013); Lépine et al. (2013) y Crequy et al. (2013)). Para ello han utilizado los métodos y criterios descritos en BSI (1987) e ISO (1997), respecto de valoración de vibraciones y de los efectos sobre la salud humana.

De los trabajos revisados, únicamente Lépine et al. (2013) y Crequy et al. (2013) analizan la dinámica de la bicicleta, pero en un ambiente controlado que simula las irregularidades de las ciclovías y estiman las vibraciones mediante acelerómetros dispuestos en el asiento y en el volante. Con esto determinan únicamente las aceleraciones y su caracterización estadística.

Kim et al. (2011) midieron vibraciones en vehículos circulando por distintos tipos de pavimento, establecieron como medida de confort los indicadores descritos en la norma ISO (1997): la variación cuadrática, el factor cresta y la variación cuarta (RMS: root mean square, CF: Crest factor; y RMQ: root mean quad). Con estos indicadores establecieron una suma ponderada que describía el confort en la conducción.

Bil et al. (2015) estimaron un índice de confort dinámico en base al contenido de energía en las aceleraciones. Midieron las aceleraciones con un acelerómetro de 20 Hz y la posición un GPS de navegación de 1 Hz, por lo cual hubo que acoplar ambas mediciones para estimar el índice de confort. Mostraron que dicho índice era inversamente proporcional a la velocidad longitudinal. Posteriormente cotejaron el índice con el confort subjetivo de una muestra de ciclistas.

En este trabajo se utilizan los indicadores de vibraciones de la norma ISO (1997) considerando sólo el efecto de vibraciones verticales, asumiendo que la bicicleta es un cuerpo lineal y rígido. Las Ecuaciones 1, 2, y 3 describen estos indicadores. El valor de  $a(t)$  corresponde al registro de aceleraciones verticales en el instante de tiempo  $t$ .  $T$  es el período de tiempo total de medición.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (1)$$

$$CF = \frac{\max \{a(t)\}}{RMS} \quad (2)$$

$$RMQ = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T a^4(t) dt} \quad (3)$$

### 4. LEVANTAMIENTO DE DATOS EN TERRENO

En primer lugar, se realizó un inventario de las ciclovías existentes en el Gran Concepción. Este inventario alcanzó para el año 2015 un total de 44,74 km, distribuidos en 8 comunas del área metropolitana (Ver Tabla 1 y Figura 1). El 57% de las ciclovías inventariadas poseían una superficie de rodadura de asfalto, un 37% de hormigón y un 6% con superficies de adoquines y baldosas.

Tabla 1  
*Inventario de ciclovías por comuna en el Gran Concepción*

Zona	Comuna	Longitud (km)	Porcentaje (%)
1	Concepción	15,80	35
2	San Pedro	8,82	20
3	Talcahuano	2,62	6
4	Chiguayante	4,87	11
5	Hualpén	6,77	15
6	Coronel	4,88	11
7	Tomé	0,35	1
8	Hualqui	0,63	1



Figura 1. Emplazamiento de las ciclovías analizadas

El registro de datos se realizó con el equipo VBOX mini, el cual utiliza el sistema de posicionamiento global GPS (Global Position System) con tecnología RTK (Real Time Kinematic), que corresponde a una tecnología utilizada para la topografía y navegación marina basada en el uso de medidas de fase de navegadores con señales GPS, GLONASS y/o de Galileo.

El equipo permite obtener cada 0,1 segundo: posicionamiento, velocidad longitudinal y vertical, aceleración lateral, aceleración longitudinal y azimut (Racelogic, 2008). El postproceso de los datos registrados se realizó mediante el software VBOXTools incluido en el equipo. Este software permite acoplar las mediciones de posicionamiento según tiempo o distancia con las variables cinemáticas, por lo cual permite obtener fácilmente una base de datos consolidada y geo-referenciada.

Para realizar las mediciones de aceleraciones verticales se implementó el equipo GPS en una bicicleta de montaña de chasis rígido sin amortiguación. El GPS se instaló en el volante. Se tomaron datos en 14 de los 26 tramos del inventario de ciclovías, con lo cual se logró información de los distintos tipos de pavimentos. Considerando una velocidad típica de 20 km/h y que los datos del GPS se procesaron cada 0,5 s, se obtuvo una cantidad media de 360 datos/km.

Los tramos se distribuyen en tres comunas: 10 en Concepción, 3 en San Pedro de la Paz y 1 en Hualpén. Esta selección se realizó considerando la cercanía existente entre tramos, y un fácil acceso para su recorrido en bicicleta. Con esta selección se obtuvo información del 57% del total de ciclovías en el Gran Concepción. En total, se midieron aproximadamente 25 km. Las mediciones se tomaron con un mínimo de 3 repeticiones por sentido, con el fin de obtener una base de datos suficientemente amplia que permita realizar los posteriores análisis estadísticos. Se adoptaron las siguientes condiciones de medición para reducir en lo máximo la variabilidad entre repeticiones:

- El recorrido de las ciclovías se realizó con la misma bicicleta y con el mismo ciclista,
- la posición del ciclista fue la más natural posible durante todo el recorrido, es decir, sentado, con manos en el manubrio y una leve inclinación del tronco,
- el recorrido fue lo más recto posible, intentando transitar en todas las repeticiones por el centro de la pista,
- se evitó medir con condiciones climáticas adversas, como días de lluvia, viento o de alta nubosidad,
- la velocidad de medición se mantuvo en rangos acordes a los que se alcanza en un viaje normal de bicicleta, lo que fluctúa típicamente entre 15 y 25 km/h,
- la medición se realizó solo cuando el tráfico era expedito, evitando los momentos de alta circulación de ciclistas o peatones.
- durante el proceso de medición se observaron condiciones que dificultaron la obtención de información. Dentro de estas condiciones se encuentran:
  - dificultades de recepción de señal satelital, lo que ocurre principalmente en ciclovías rodeadas por edificios,
  - pérdida de señal de satélite en pasos bajo nivel,
  - En algunas ciclovías circulan también peatones, lo que impide cumplir con algunas condiciones impuestas para reducir la variabilidad.

#### 4. PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de datos se realizó con el propósito de configurar una base de datos depurada para estimar los indicadores de vibraciones. Para ello se realizaron las siguientes tareas: (a) extracción de datos; (b) cálculo de aceleraciones verticales; (c) verificación de correlación entre velocidad longitudinal y aceleración vertical, (d) depuración de datos y acoplamiento de mediciones; y (e), análisis de repetibilidad y eliminación de datos anómalos (outliers).

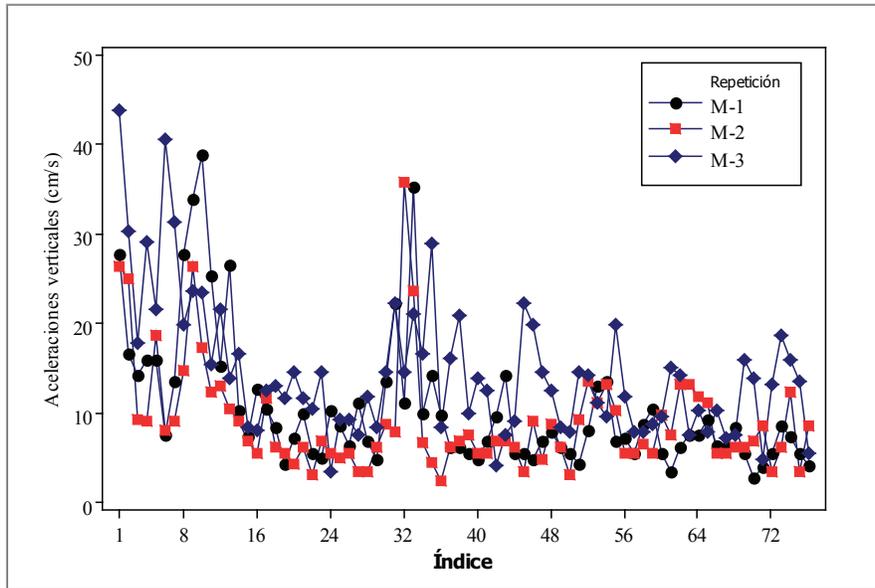
La extracción de datos se realizó utilizando el software VboxTools (Racelogic, 2008). Para ello se utilizan tres herramientas: el registro gráfico longitudinal de velocidades y distancia, el registro gráfico de la trayectoria geo-referenciada y el acoplamiento de velocidades y posición mediante el filtro de Kalman. En base a estas tareas, se eliminaron 5 km de ciclovías que resultaron con distorsiones importantes en la trayectoria de medición debido a la calidad de la señal satelital y al flujo peatonal, que impidió realizar mediciones de mejor calidad.

Con los registros de las ciclovías restantes se calcularon las aceleraciones verticales a partir de las velocidades verticales y de la posición. Paralelamente, en cada registro se eliminaron segmentos de datos asociados a intersecciones, debido a que las detenciones obligadas y los cambios de materialidad de la superficie alteraron las mediciones. Para identificar sectores con detención obligada durante la medición, se utilizó el registro de velocidad longitudinal. Este registro permite identificar los sectores de velocidad nula. Para identificar las intersecciones se superpusieron los registros de la trayectoria a mapas geo-referenciados.

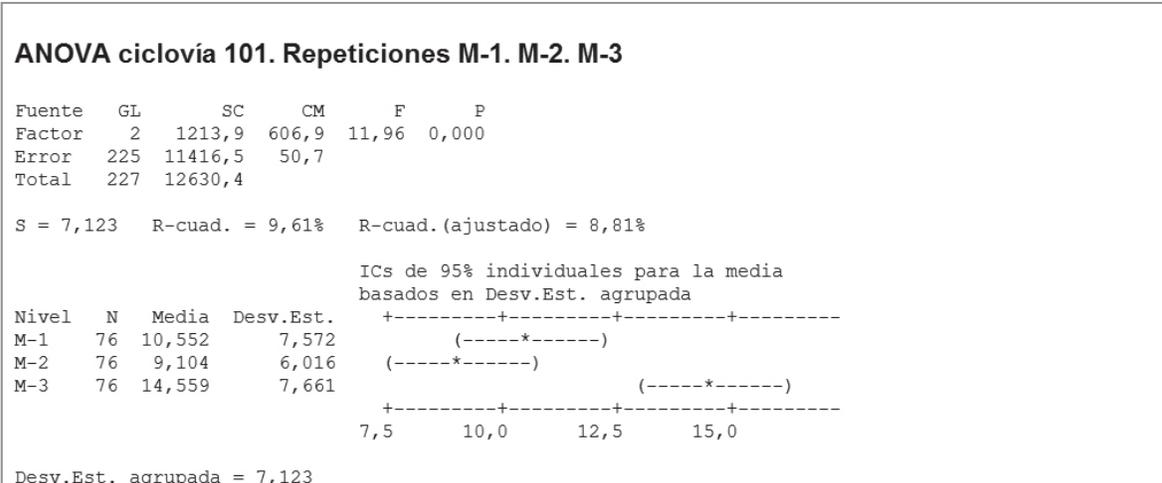
Existe evidencia de que a mayor velocidad de circulación las aceleraciones inducidas por el pavimento aumentan en magnitud. Sin embargo, esto ocurre en un rango de velocidades superior al registrado en las mediciones de las ciclovías. De todos

modos, se verificó en cada una de las repeticiones depuradas la posible correlación entre velocidad longitudinal y aceleración vertical, determinándose la ausencia de correlación entre estas dos variables, para el rango de velocidades de medición.

Una vez identificados estos sectores, se acoplaron los inicios de registro de datos para cada repetición, lo cual es necesario para el análisis de repetibilidad y para identificar y eliminar datos anómalos. Este análisis se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas, el cual permite a partir del valor-p y del coeficiente de correlación identificar pares de mediciones repetibles. El análisis se realizó utilizando software estadístico. La Figura 2 muestra un ejemplo del análisis de repetibilidad para una ciclovía considerando tres repeticiones (M-1, M-2, M-3). En la Figura 2a, cada repetición está representada por una serie de valores de aceleración vertical (en cm/s<sup>2</sup>) respecto de cada punto kilométrico en el cual el GPS registró un dato de posición y aceleración. La Figura 2b muestra los resultados del análisis de varianza de las mediciones de la Figura 2a.



a) Registro de tres repeticiones de aceleraciones



b) Resultado de análisis de repetibilidad usando ANOVA para 3 repeticiones

Figura 2. Ejemplo de análisis de repetibilidad

En el panel b) se aprecia que las 3 señales en su conjunto no son repetibles, dado que el valor p es 0 y el coeficiente de correlación es del orden del 10%. Se eliminó la señal no repetible (M-3), y se llegó a que el valor-p aumenta a 0.194 (valor mayor al valor crítico de 0.05) y el coeficiente de correlación disminuye a 1%. Este procedimiento se realizó en cada ciclovía con el total de repeticiones.

La Tabla 2 muestra el resumen del análisis de repetibilidad realizado. Las celdas sombreadas representan los registros repetibles. La columna de la izquierda muestra que, una vez eliminados los registros no repetibles, el valor-p obtenido siempre resultó mayor que el valor crítico, salvo en las ciclovías 202 y 502, en las cuales la repetibilidad de las señales resultó débil.

Tabla 2  
*Inventario de ciclovías por comuna en el Gran Concepción*

	Ciclovía	Sentido	Repetición				Valor-p	
101	Costanera Concepción	A	1A	2A	3A		0,194	
		B	1B	2B	3B	4B	0,490	
103	Andalién	A	1A	2A	3A	4A	0,647	
		B	1B	2B	3B		0,047	
104	Línea ferrocarril	A	1A	2A	3A		0,345	
		B	1B	2B	3B		0,052	
105.1	Laguna Redonda	A	1A	2A	3A		0,173	
		B	1B	2B	3B	4B	0,277	
105.2	Laguna Redonda	A	1A	2A	3A	4A	5A	0,196
		B	1B	2B	3B			0,167
106	21 de mayo	A	1A	2A	3A	4A	5A	0,386
		B	1B	2B	3B			0,549
107	Víctor Lamas	A	1A	2A	3A			0,064
		B	1B	2B	3B			0,206
111	Llacolén	A	1A	2A	3A	4A	5A	0,593
		B	1B	2B	3B			0,921
201	Pedro Aguirre Cerda	A	1A	2A	3A			0,839
		B	1B	2B	3B			0,376
202	Av. Laguna Grande	A	1A	2A	3A			0,708
		B	1B	2B	3B			0,028
502	Costanera Hualpén	A	1A	2A	3A			0,073
		B	1B	2B	3B			0,020

Posteriormente se realizó el análisis de outliers, para lo cual se utilizó el método de apalancamiento implementado por Vargas et al. (2008). La Figura 2 muestra gráficamente un ejemplo del test aplicado. En ella se muestra cada dato individual ( $X_i$ ), y la distancia de apalancamiento de cada variable  $X_i$ , denotada por  $H_i$ . Los valores  $H_{\min}$  y  $H_{\max}$  representan el rango de distancia de apalancamiento dentro del cual los datos no se clasifican como outliers. El test normaliza los datos y define un umbral crítico, de tal suerte que los valores que se encuentran sobre dicho valor se clasifican como outliers. (Valores encerrados en círculos en la Figura 3). Una vez finalizado este análisis, se configuraron las bases de datos para estimar los indicadores RMS, CF y RMQ.

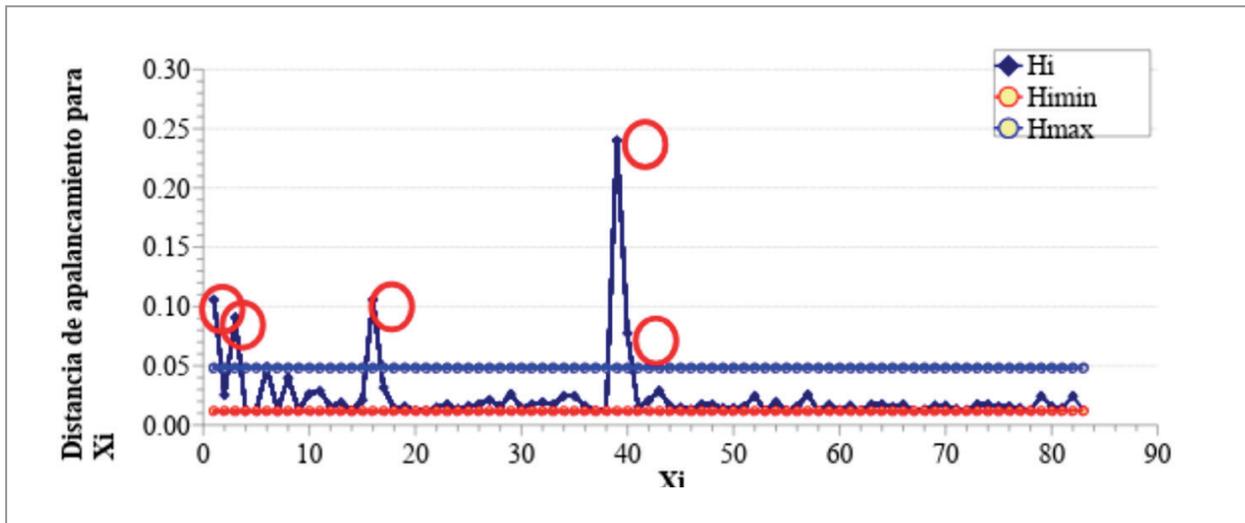


Figura 3. Ejemplo de identificación de outliers mediante el test de apalancamiento

## 5. CÁLCULO DE INDICADORES DE CONDICIÓN

Para calcular los indicadores en base a las Ecuaciones 1, 2 y 3 (RMS, FC, y RMQ), primero es necesario segmentar los registros de aceleraciones de manera de realizar cálculos en tramos estadísticamente homogéneos. La segmentación consiste en identificar tramos homogéneos en la media o en la varianza usando métodos visuales o analíticos (Vargas et al., 2008). En este caso se usó un método de segmentación visual, verificando la homogeneidad de la varianza y la media en los extremos de cada segmento. En la Figura 4 se aprecia que existen cuatro segmentos con comportamientos distintos que es necesario separar para calcular los indicadores RMS, RMQ y FC. El primer segmento, ubicado aproximadamente en los primeros 400 m, exhibe una varianza elevada. Lo mismo ocurre para el tercer segmento ubicado entre los 700 y 900 m. El segundo segmento ubicado entre los 400 y 700 m, posee una media uniforme y una varianza aproximadamente uniforme. El cuarto segmento, ubicado entre los 900 y 1700 m, posee una varianza menor. Esta segmentación permite, además, tener una primera apreciación de la calidad de la carpeta de rodadura, puesto que en la medida que contenga más irregularidades superficiales la varianza será mayor.

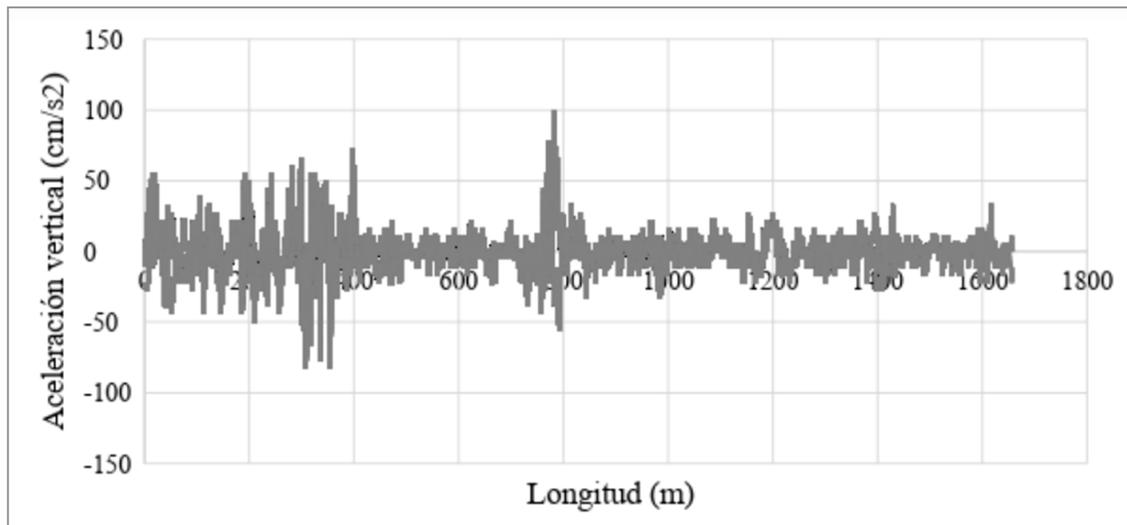


Figura 4. Ejemplo de un registro de aceleraciones verticales

Una vez realizada la segmentación se calcularon los indicadores para cada uno de los segmentos. La Tabla 3 resume los resultados.

Tabla 3

Valores de RMS, CF, y RMQ obtenidos en cada tramo de ciclovia

Ciclovia	Sentido	Tramo	RMS (m/s <sup>2</sup> )	RMQ (m/s <sup>1,75</sup> )	MAX ai (m/s <sup>2</sup> )	FC
101	A	1	0,231	1,218	0,833	3,612
		2	0,090	0,401	0,222	2,462
		3	0,225	1,016	1,000	4,441
		4	0,096	0,553	0,333	3,460
	B	1	0,144	0,817	0,611	4,237
		2	0,234	0,972	0,778	3,317
		3	0,125	0,600	0,556	4,458
		4	0,598	2,849	2,278	3,808
103	A	1	0,235	1,871	1,556	6,624
	B	1	0,248	1,613	1,000	4,028
104	A	1	0,226	1,374	1,056	4,667
		2	0,397	2,698	2,278	5,738
		3	0,135	0,789	0,722	5,332
		4	0,233	1,344	1,056	4,530
	B	1	0,253	1,589	0,944	3,740
		2	0,142	0,925	0,556	3,920
		3	0,357	2,688	2,111	5,908
		4	0,229	1,365	0,889	3,877
105.1	A	1	0,283	1,551	1,389	4,908
		2	0,489	2,820	2,722	5,568
	B	1	0,273	2,072	1,833	6,709
		2	0,254	1,854	1,833	7,208
105.2	A	1	0,208	1,734	1,556	7,465
	B	1	0,169	0,983	0,722	4,266
106	A	1	0,263	1,533	1,222	4,655
		2	0,377	2,060	1,833	4,859
		3	0,209	0,886	0,667	3,194
		106	0,366	2,025	1,611	4,401
	B	1	0,262	1,720	1,333	5,080
		1	0,184	0,882	0,667	3,631
		2	0,352	2,245	1,444	4,107
		3	0,251	1,509	1,056	4,203
107	A	4	0,200	0,903	0,611	3,056
		1	0,195	0,844	0,556	2,855
		2	0,308	1,706	1,389	4,504
		3	0,216	1,087	0,667	3,088
	B	4	0,373	2,129	1,778	4,763
		5	0,258	1,613	0,833	3,226
		1	0,205	1,453	0,722	3,519
		1	0,145	0,938	0,500	3,459

Con estos resultados se realizó un análisis de conglomerados usando el algoritmo de las k-medias, que permitió identificar en términos estadísticos 3 niveles de aceleraciones en base a los valores de RMS, como lo muestra la Tabla 4. De este modo los resultados se pueden clasificar en niveles que permiten su posterior representación en un sistema de información geográfica.

Tabla 4  
Niveles de aceleraciones en función del indicador RMS

Nivel de aceleraciones	Valores de RMS (m/s <sup>2</sup> )
Bajo (B)	RMS < 0,20
Medio (M)	0,20 < RMS < 0,35
Alto (A)	0,35 < RMS < 0,50
Muy alto (MA)	RMS > 0,50

A partir de la Tabla 4 y usando los criterios de confort de la norma ISO 2631, se puede interpretar que valores de RMS inferiores a 0,35 m/s<sup>2</sup> resultan cómodos, valores entre 0,35 y 0,50 m/s<sup>2</sup> resultan ligeramente molestos y valores superiores a 0,50 m/s<sup>2</sup> tienden a ser molestos. De acuerdo con esto, los niveles B y M de la Tabla 4 pueden resultar tolerables para los ciclistas, en tanto que el nivel A tiende a ser ligeramente molesto y el nivel MA molesto. En este sentido, se recomienda preliminarmente utilizar el valor de 0,35 m/s<sup>2</sup> como umbral de control receptivo y un umbral de 0,5 m/s<sup>2</sup> como umbral de intervención.

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS

Usando los resultados resumidos en la Tabla 3 y 4, se evaluó la red de ciclovías medida en este trabajo. Se llegó a que un 9% de las ciclovías estaba en un nivel alto de aceleraciones verticales, un 57% en el nivel medio y un 34% en el nivel bajo. Las medias en los valores de RMS para asfalto y hormigón fueron de 0,246 m/s<sup>2</sup> y 0,208 m/s<sup>2</sup> respectivamente, no existiendo una diferencia estadística significativa entre los valores de RMS debido a las materialidades. Estos resultados se muestran gráficamente en la Figura 5. Cada punto representa para un tramo de ciclovía medida un valor de RMS. En ella se aprecia que la mayor parte de los tramos medidos se encuentra en el rango de RMS “Bajo” y “Medio” y cuatro tramos en rangos de RMS que ocasionan molestias al ciclista.

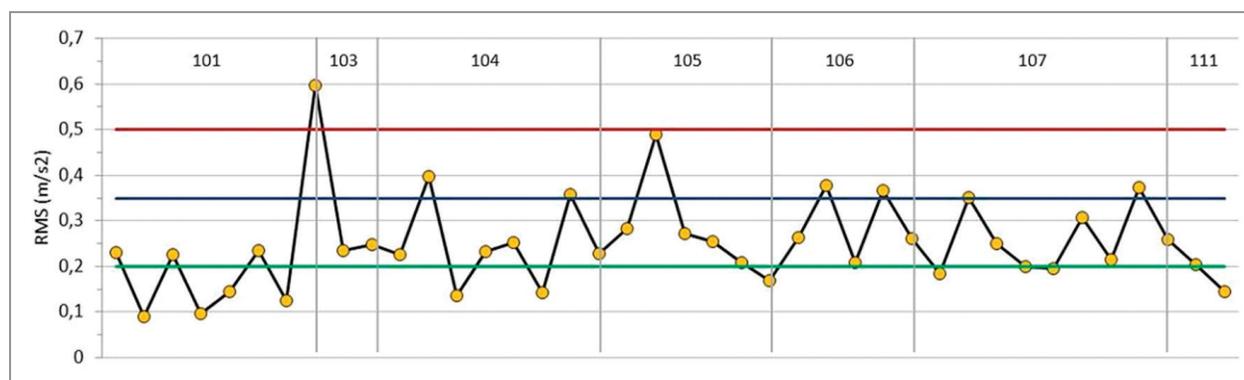


Figura 5. Valores de RMS de cada tramo de ciclovía y niveles de aceleración

Al revisar el indicador CF (factor cresta) de la Tabla 3 se pudo apreciar que en todos los tramos resultaron superiores a la unidad. Esto quiere decir que, en cada tramo, existe al menos un valor máximo de aceleración que difiere notablemente de la media de las aceleraciones del tramo, evidenciando la presencia de irregularidades puntuales en la superficie de rodadura que inducen estas aceleraciones verticales máximas. Considerando que RMS no es más que una aceleración ponderada, se puede verificar que las aceleraciones máximas descritas en la Tabla 3 superan largamente el valor del umbral “Muy Alto” de la Tabla 4. Esto muestra que, en al menos un lugar en cada tramo de ciclovía, los defectos de la superficie inducen molestias a los ciclistas al conducir.

Se calcularon los valores de RMS y RMQ con y sin singularidades, y se realizó una prueba t-student para los dos casos. El valor p para las pruebas t-student confirmó la mayor sensibilidad que tiene el índice RMQ a los picos de aceleración respecto al índice RMS. Se concluyó que el índice RMQ es más eficiente para detectar cambios en las características de la superficie de rodadura. Sin embargo, esta hipótesis se debe cotejar con datos de deterioros superficiales medidos en terreno, para lo cual se requiere caracterizar los defectos superficiales y establecer un protocolo de medición de su magnitud y severidad.

Considerando que en el 73% de las ciclovías la materialidad de la superficie era asfalto y el 20% de hormigón, se analizó si estadísticamente existía una diferencia en los indicadores utilizados. El análisis se realizó con una prueba t-student. Los resultados se muestran en la Figura 6. En ella se aprecia que la media en superficies de asfalto y hormigón resulta de 0,246 m/s<sup>2</sup> y 0,208 m/s<sup>2</sup> respectivamente. También se observa que el valor p para la prueba estadística resultó superior al 5%. Se concluyó que no existe una diferencia estadísticamente significativa en los valores de RMS debido a las materialidades de asfalto y hormigón. Este resultado resulta relevante debido a que independiza los indicadores del tipo de superficie.

Prueba T - student: Hormigón. Asfalto				
T de dos muestras para Hormigón vs. Asfalto				
	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Hormigón	4	0,2082	0,0461	0,023
Asfalto	46	0,2463	0,0989	0,015

Diferencia = mu (Hormigón) - mu (Asfalto)  
 Estimado de la diferencia: -0,0380  
 IC de 95% para la diferencia: (-0,1391. 0,0630)  
 Prueba T de diferencia = 0 (vs. no =): Valor T = -0,76 Valor P = 0,453 GL = 48  
 Ambos utilizan Desv.Est. agrupada = 0,0964

Figura 6. Resultados de la prueba t-student para RMS según la materialidad de la superficie de rodadura de la ciclovías

## 7. CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo por objetivo desarrollar un procedimiento de estimación de la calidad de la superficie de rodadura de ciclovías, utilizando datos de aceleraciones verticales obtenidas con un GPS de 10 Hz. Para desarrollar y aplicar el procedimiento se utilizó un conjunto de ciclovías localizadas en el Gran Concepción, así como las recomendaciones de la norma ISO 2631 para estimar indicadores de vibraciones.

La irregularidad de la superficie de una ciclovía determina el nivel de confort que experimenta un ciclista. En el estado del arte se identificaron principalmente tres tipos de indicadores del nivel de confort: defectos superficiales, rugosidad de la superficie y las aceleraciones verticales. Este último indicador condensa los primeros dos, dado son los causantes de las vibraciones que experimenta el ciclista debido a las irregularidades de la superficie de rodadura de la ciclovía.

Además de contar con el indicador, es necesario contar con umbrales de aceleraciones. En este trabajo se propusieron umbrales de vibraciones verticales en base a criterios estadísticos que permiten tener una primera aproximación a un criterio que permite estimar cuándo mantener una ciclovía. Sin embargo, umbrales más completos debieran considerar por un lado la percepción subjetiva de (in)comodidad de una muestra de ciclistas y, además, los efectos sobre la salud ante exposiciones prolongadas y repetitivas a vibraciones, considerando también distintos tipos de bicicletas.

Un aspecto fundamental para una correcta evaluación de la condición de la ciclovía es la precisión de los datos levantados en campo. Esto se logra principalmente mediante análisis de repetibilidad de medidas repetidas y de la eliminación de datos anómalos. En este trabajo se utilizó en análisis de varianza de medidas repetidas para evaluar precisión y el método de apalancamiento para identificar datos anómalos. En la literatura se observó que a este aspecto no se le daba relevancia, dado que en su mayoría los experimentos son controlados en laboratorio. Puesto que en terreno no siempre es posible controlar todas las variables involucradas, cobra más relevancia aún los métodos empleados en este trabajo para lograr datos con la mejor calidad posible.

Para potenciar el uso de este indicador como criterio de decisión de mantenimiento de ciclovías, es necesario desarrollar un procedimiento sistemático y repetible de medición de indicadores de condición de la superficie de rodadura de una ciclovía y establecer una correlación con los indicadores calculados en este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer el financiamiento otorgado por el Comité CORFO INNOVA BIO BIO al proyecto INNOVA BIO BIO 11.PCS2-1116, “Plataforma Tecnológica para la Gestión Integral del Sistema de Transporte en la Región del BioBio”, dentro del cual se desarrolló este trabajo.

## REFERENCIAS

Bín, M., Andrášik, R. y Kubecek, J. (2015) How comfortable are your cycling tracks? A new method for objective bicycle vibration measurement. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 415 – 425.

BSI (1987) Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. BS 6841. British Standard Institution. Reino Unido.

Crequy, S., Chiementin, X. y Bertucci, W. (2013) Experimental protocol for the risk assessment in cycling. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 16, 88-89.

Cundill, M. (1991) MERLIN. A low-cost machine for measuring road roughness in developing countries. *Transportation Research Record*, 1291, 106 – 112.

de Solminihaç, H. (2001) Gestión de Infraestructura Vial. Ediciones Universidad Católica de Chile. 2a Edición. Santiago

El Sayed, M., Habashy, S. y El Adawy, M. (2013) Whole-body-vibration measurement and assessment for Cairo subway (metro), car and bus passengers. *International Journal of Electronics, Communication & Instrumentation Engineering Research and Development*, 3(1), 185-202.

Gharaibeh, N., Wilson, C., Darter, M. y Jones, G. (1998) Development of a bike path management system for the University of Illinois at Urbana-Champaign, *Transportation Research Record*, 1639, 56 – 63.

Gomez-Cano, M. (2007) Evaluación de las vibraciones de cuerpo completo sobre el confort, percepción y mareo producido por el movimiento. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Notas técnicas de prevención N° 784. España.

Griffin, M. J. (1998) A comparison of standardized methods for predicting the hazards of wholebody vibration and repeated shocks. *Journal of Sound and Vibration*, 215(4), 883 – 914.

International Organization for Standardization (1997) Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole body vibration. ISO 2631-1. International Organization for Standardization. Suiza.

Kim, M.S., Kim, K.W. y Yoo, W.S. (2011) Method to objectively evaluate subjective rating of ride comfort. *International Journal of Automotive Technology*, 12(6), 831-837.

- Lépine, J., Champoux, Y. y Drouet, J. (2013) Road bike comfort: on the measurement of vibrations induced to cyclist. *Sports Engineering*, 17(2), 113-122.
- Martens, S. (2011) Bicycles measure the quality of cycle paths in Belgium. The urban mobility portal (<http://www.eltis.org>). [Visitado el 14/11/2013].
- Martínez, G., Fuentes, L. y Torregroza L. (2011) Revisión del sistema de gestión de pavimentos de la red ciclorrutas de Bogotá. *Revista Ingeniería de Construcción*, 26(2), 150-170.
- MINVU (2012) Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Ministerio de Vivienda. Chile.
- MINVU (2015) Construcción de ciclovías. Estándares técnicos. Serie Espacios Públicos Urbanos N°2. Ministerio de Vivienda. Chile.
- Paddan, G.S. y Griffin, M. J. (2002) Evaluation of whole-body vibration in vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 253(1), 195-213.
- Racelogic (2008) VBOX Mini User Guide. Reino Unido.
- Sayers M. (1995) On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record*, 1501, 1 – 12.
- SECTRA (2010) Recomendaciones para el diseño de elementos de infraestructura vial urbana (REDEVU). Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Chile.
- SECTRA (2013) Construcción red de ciclorutas Gran Concepción y Los Ángeles. Tomo 1: Gran Concepción. Informe final. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Chile.
- Shahin, M.Y. (2005) Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots. 2a Edición. Springer. Estados Unidos.
- Vargas, S., de Solminihac, H. y Echaveguren, T. (2008) Proposal of a segmentation procedure for skid resistance data. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(1B), 89 – 104.