

## **IDENTIFICANDO FACTORES QUE AFECTAN AL USO DE LA BICICLETA MEDIANTE INDICADORES PSICOFISIOLÓGICOS**

Paulina Leiva, Departamento de Ingeniería Civil, División Transportes, Universidad de Chile.

[paulina.leiva@ug.uchile.cl](mailto:paulina.leiva@ug.uchile.cl)

Maximiliano Rosadio, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.

[maximiliano.rosadio@ing.uchile.cl](mailto:maximiliano.rosadio@ing.uchile.cl)

Ángelo Guevara, Departamento de Ingeniería Civil, División Transportes, Universidad de Chile, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería. [crguevar@ing.uchile.cl](mailto:crguevar@ing.uchile.cl)

Angel Jimenez-Molina, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería. [angeljim@uchile.cl](mailto:angeljim@uchile.cl)

Gabriel Nova, Delft University of Technology. [G.N.Nova@tudelft.nl](mailto:G.N.Nova@tudelft.nl)

Ricardo Hurtubia, Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería. [rhurtubia@uc.cl](mailto:rhurtubia@uc.cl)

### **RESUMEN**

La bicicleta juega un rol importante en la sustentabilidad y eficiencia de los sistemas de transporte. Para promover y facilitar el uso de este modo es necesario entender cuáles son los factores de infraestructura que favorecen o desfavorecen su uso. Un desafío a este respecto es poder contar con medidas insesgadas y granulares sobre la percepción del nivel de servicio de este modo de transporte, reemplazando o complementando medidas tradicionales como encuestas de preferencias reveladas o declaradas. Para cumplir este objetivo, en este paper se sigue un enfoque que relaciona indicadores psicofisiológicos, información contextual, emociones auto reportadas y eventos granulares relativos al viaje en bicicleta, con la percepción de calidad del viaje del usuario. Esto permite, entre otras cosas, evaluar el impacto de las condiciones dinámicas y de la infraestructura en el estado afectivo de los ciclistas. El enfoque propuesto se aplica a un estudio de caso en el centro de Santiago donde 15 personas realizan un circuito predefinido en bicicleta que considera diferentes tipos de infraestructura. Este análisis permite detectar/evidenciar, entre otras cosas, cuáles son los tipos de ciclovías que gatillan percepciones más negativas en los usuarios, lo que permite sugerir posibles mejoras en políticas públicas.

*Palabras clave:* Bicicletas, indicadores psicofisiológicos, infraestructura ciclista.

### **ABSTRACT**

The bicycle plays an important role in the sustainability and efficiency of transport systems. To promote and facilitate the use of this mode, it is necessary to understand what are the infrastructure factors that favor or disfavor its use. A challenge in this regard is to be able to rely on unbiased and granular measures on the perception of their service levels, replacing or complementing traditional measures such as revealed or declared preference surveys. To meet this objective, this research uses a latent variables approach, which relates psychophysiological indicators, contextual information, self-reported emotions and granular events related to cycling travel. This allows, among other things, to evaluate the impact of dynamic conditions and infrastructure on the psycho-emotional state of cyclists. The proposed approach is applied to a case study in downtown Santiago where 15 people perform a pre-defined bicycle circuit that considers different types of infrastructure. This analysis allows to detect/evidence, among other things, which are the types of bicycle paths that trigger more negative perceptions in users, which allows to suggest possible improvements in public policies.

*Keywords:* Bicycles, psychophysiological indicators, cycling infrastructure.

## 1. INTRODUCCIÓN

La bicicleta juega un rol importante en la sustentabilidad y eficiencia de los sistemas de transporte. Para promover y facilitar el uso de este modo es necesario entender cuáles son los factores de infraestructura que favorecen o desfavorecen su uso. Un desafío a este respecto es poder contar con medidas insesgadas y granulares sobre la percepción del nivel de servicio de este modo de transporte, reemplazando o complementando medidas tradicionales como encuestas de preferencias reveladas o declaradas. Para cumplir este objetivo, en este paper se busca relacionar indicadores psicofisiológicos, información contextual, emociones auto reportadas y eventos granulares relativos al viaje en bicicleta con la experiencia del usuario. Esto permite, entre otras cosas, evaluar el impacto de las condiciones dinámicas y de la infraestructura en el estado psicoemocional de los ciclistas. El enfoque propuesto se aplica a un estudio de caso en el centro de Santiago donde 15 personas realizan un circuito predefinido en bicicleta que considera diferentes tipos de infraestructura. Este análisis permite detectar/evidenciar, entre otras cosas, cuáles son los tipos de ciclovías que gatillan percepciones más negativas en los usuarios, lo que permite sugerir posibles mejoras en políticas públicas.

En este Paper se describe y prueba una metodología que relaciona indicadores psicofisiológicos y emociones de un usuario con las características de infraestructura de su viaje en bicicleta. Se intenta responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influyen los atributos de infraestructura ciclista en el estado emocional y fisiológico de las personas?

Para esto, se toma la estructura del marco metodológico propuesto por Castro et al. (2020) para la incorporación de indicadores psicofisiológicos en modelos de elección de transporte, los cuales se miden con biosensores articulados en la pulsera *Biomonitor*, que debe llevar el ciclista en su muñeca. El objetivo es explorar distintas variables de la infraestructura ciclista y otros factores que afectan directamente en el estado afectivo de los usuarios, basándose en las señales psicofisiológicas.

Para lo anterior, se detalla el marco teórico del estudio con el fin de dar a conocer el estado del arte y sus alcances. Luego, se describe el estudio observacional en torno al cual gira la investigación y se enfatiza en cada uno de los detalles a tener en cuenta. Posteriormente, se describe y analiza la ruta escogida con el fin de dilucidar las primeras hipótesis del estudio, para luego ser probadas o refutadas en el último capítulo, Análisis de resultados. Se obtienen conclusiones tanto esperadas como inesperadas.

Se espera que este estudio permita dar cuenta de los factores más relevantes en la experiencia ciclista para construir una recomendación formal y detallada a las autoridades, con el fin de incluir este enfoque en la evaluación social de proyectos. Este tipo de contribuciones son necesarias para seguir construyendo el camino hacia un Chile sustentable, que entregue opciones atractivas a los ciudadanos para elegir un ambiente más saludable, responsable y eficiente.

Es importante mencionar, que este estudio se encuentra actualmente en realización, siendo un trabajo de Tesis de magíster.

## 2. MARCO TEÓRICO

En Castro et al. (2020) se presenta un marco metodológico que incorpora indicadores psicofisiológicos recopilados por biosensores en modelos de comportamiento en elecciones de transporte. Aquí se incorpora un framework que explica la relación causal entre todas las variables que se quieren estudiar para llevar a cabo esta incorporación de indicadores al problema.

El marco conceptual canónico para la modelación discreta de emociones, consiste en que el individuo escoge cierta alternativa con atributos y características como datos observados, que junto a ciertas perturbaciones exógenas conforman la variable latente Utilidad indirecta. Luego, basándose en que las personas son seres racionales, se dice que el individuo escoge aquella combinación que maximiza su utilidad, traduciéndose en la elección observada. Es importante notar que, cuando se habla de perturbaciones exógenas, se hace referencia a la parte aleatoria de la utilidad, que supone la omisión de atributos no observados, los que se asumen como independientes de los atributos. En este estudio, estos atributos no observados son llamados eventos granulares específicos de cada experiencia, que pueden corresponder a distintas anomalías propias del viaje dinámico.

Entonces, el framework comentado anteriormente, propone que mediante biosensores, es posible recopilar indicadores psicofisiológicos que están directamente relacionados con los estados y emociones psicofisiológicas (PPSE) que percibe un usuario de algún sistema de transporte. Al día de hoy, se ha trabajado para desarrollar un sistema de medición poco invasivo que sea capaz de recopilar la información que se necesita. La ventaja de esto, es que estas señales que se desprenden son involuntarias, lo que es una ganancia con respecto al sesgo generado con las medidas tradicionales de percepciones durante el viaje, como lo son las preferencias declaradas o reveladas. En estudios anteriores ya se ha usado la actividad electrodermal de la piel para medir el estrés durante la realización de ciertas actividades. (Setz et al., 2010)

Luego, Barría et al. (2021) y Henríquez et al. (2023) entregan un enfoque de descripción, clasificación y análisis de emociones utilizando indicadores psicofisiológicos. Se realiza una adaptación del modelo circumplejo de emociones de Russell (1980), con el fin de analizar las emociones declaradas de una manera más simplificada.

Por otra parte, Stinson y Bhat (2005), Rossetti et al. (2018) y Echiburú et al. (2021) entregan resultados sobre la percepción de seguridad y satisfacción del usuario al andar en bicicleta y también, sobre cuáles son las componentes del entorno ciclista que determinan las preferencias del usuario. Sumado a esto, se tiene información sobre los principales atributos que se consideran relevantes en diversas encuestas (Kang y Fricker, 2013; Hood et al., 2011; Andrade y Kagaya, 2012). Estos resultados se obtienen mediante encuestas de preferencias declaradas que, si bien constituyen un mecanismo ampliamente utilizado en investigaciones de transporte por su flexibilidad y bajo costo, tienen el problema de estar sujetos al sesgo hipotético, como se comenta más arriba. En este estudio se espera disminuir este sesgo combinando los enfoques de las líneas investigativas descritas anteriormente.

### **3. ESTUDIO OBSERVACIONAL**

#### **3.1 Participantes**

Se invita a participar en el estudio a cualquier persona que así lo prefiera, realizando un llamado abierto por las páginas de la Facultad, en U-Cursos e Instagram. Se obtiene una muestra por conveniencia de 61 personas (media edad = 24,8 años, desviación = 4,8 años), de las cuales un 41% se declara de género femenino y un 59% de género masculino. Todo participante firma un consentimiento informado, que detalla todos los alcances de la etapa de medición. El estudio está aprobado por el comité de Ética de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

En la convocatoria, no se menciona ningún requisito sobre experiencia ciclista, sólo se pide saber andar en bicicleta y se aclara que todos los instrumentos a utilizar son entregados por el equipo organizador del proyecto. Lo anterior, con el fin de obtener datos para todo tipo de ciclistas posibles. El único requisito es ser mayor de edad, para evitar papeleos con permisos de tutores.

Es importante mencionar, que de los 61 participantes, 15 realizaron la versión Piloto y 46 realizaron la segunda versión del estudio. La segunda versión tiene mejoras con respecto a la primera, por lo tanto los datos obtenidos de los primeros 15 participantes tienen menos información que los 46 siguientes. Una vez que el participante confirma que puede participar en la segunda versión, éste responde una encuesta de salud y de experiencia en ciclismo, con el fin de obtener respuestas específicas del participante, tales como:

- Ocupación principal
- Estado de salud en general y con respecto a sus pares
- Padecimiento de enfermedades crónicas o comorbilidades
- IMC
- Clasificación de intensidad de la ocupación principal (Alta, moderada o baja)
- Tiempo de experiencia en ciclismo
- Tipo de ciclismo que realiza (Deportivo, recreativo o modo de transporte)
- Vivencias de siniestros en bicicleta y su impacto en su comportamiento
- Tipo de movilidad en general (Activa o pasiva)

Esta encuesta se aplica con el objetivo de tener una representación más completa del participante, entendiendo que los valores que se obtengan en las mediciones pueden depender del estilo de vida que lleve el sujeto.

La ruta se escoge considerando que el punto de inicio y de fin sea la Facultad de Ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile ubicada en Santiago Centro, buscando que sea variada en cuanto a los tipos de ciclovías y sus condiciones. Es esperable que se inscriban personas que vivan cerca del sector por la facilidad de llegada al lugar, pero no se especifica una restricción de residencia. También es esperable que algunos participantes conozcan las ciclovías antes de realizar el experimento ya que es un sector concurrido y central.

En la tabla Nº 1 se detalla la comuna de residencia de los participantes. De los 61 participantes experimentados, 28 son ciclistas frecuentes (todas las semanas), 18 sólo de vez en cuando y de los 15 restantes no hay información. Además, 35 participantes declaran conocer el sector del recorrido y 19 declaran haber utilizado las ciclovías del circuito anteriormente. Se entiende que ningún participante conocía el proyecto en su totalidad antes de realizar la experiencia.

Tabla 1: Comunas de residencia participantes

Comuna	Cantidad de participantes
Santiago Centro	11
Maipú	6
Providencia	6
Ñuñoa	4
Puente Alto	3
Estación central	3
Peñalolén	3
Las condes	3
Otras	7

### 3.2 Procedimiento Experimental

El experimento cuenta con un protocolo detallado de hitos que se deben seguir. Primero, es necesario calibrar e instalar cada instrumento de medición: Biomonitor, GPS, Contextino, GoPro, Audio emociones. Esto debe realizarse previo a la llegada de cada participante. Antes de comenzar cada experiencia, se realiza una introducción del experimento y se capturan las líneas de base de las señales psicofisiológicas en reposo con la pulsera Biomonitor V3.0, con el fin de hacer comparables las mediciones entre participantes. Cada participante lleva la pulsera en su muñeca, la cual va conectada vía Bluetooth a un smartphone en la aplicación Biomonitor, que va registrando y almacenando la información de las señales de cada usuario (temperatura superficial de la piel, ritmo cardíaco, actividad electrodermal, acelerómetro y giroscopio). En el mismo celular, va encendida en segundo plano la aplicación Geotracker, registrando y almacenando la información geográfica de la ruta (latitud, longitud, altura y Timestamp). Lo anterior, con el fin de poder enlazar señales y emociones a un tramo específico de la ruta.

Por otra parte, en otro smartphone va reproduciéndose un audio conectado a audífonos, que cada 4 minutos enumera la siguiente pregunta: “¿Cuál de las siguientes emociones te identifica en este momento?: Contento, Relajado, Aburrido o Estresado”. Estas etiquetas corresponden a la clasificación utilizada en el modelo circumplejo de emociones adaptado por Barriá et al. (2023), que serán comentadas más adelante. La pregunta se responde a viva voz por cada participante, que lleva un micrófono registrando el audio del viaje.

Por último, se lleva una cámara GoPro ubicada en el casco del experimentador, con el fin de registrar eventos granulares relativos al viaje, que puedan explicar ciertos fenómenos en el comportamiento de los datos.

### 3.3 Aparatos

A continuación, se presenta una descripción de cada aparato, seguido de su instalación al detalle:

#### 3.3.1 Biomonitor

La pulsera Biomonitor (Jimenez-Molina, A., Diaz-Guerra, F., Retamal, C., Guevara, C.A. (2023); <https://isci.cl/biomonitor/>), tiene una forma similar a un SmartWatch, que se puede observar en la imagen 1. El Biomonitor debe conectarse vía Bluetooth a un dispositivo que sea capaz de almacenar su información. En la experiencia Piloto, este dispositivo fue un smartphone, pero había limitaciones con el sistema operativo del celular y la gama de éste. Por lo anterior, para un correcto funcionamiento del Biomonitor, en la segunda instancia de medición, la pulsera se conectará vía Bluetooth a una Raspberry Pi, que se describe en las siguientes secciones.

Se enciende la pulsera en su botón superior y comienza a parpadear una luz azul. Se monta la pulsera en la muñeca del participante. Una vez que la luz azul se apague, y se encienda una luz verde en la parte trasera de la pulsera, ésta está conectada a la Raspberry, funcionando y registrando datos de manera correcta. Lo anterior se puede corroborar conectando la Raspberry a un monitor, viendo que se despliegue la pestaña de toma de datos.



Figura 1: Pulsera Biomonitor

### 3.3.2 Contexto Ambiental

El Contextino es una plataforma de sensores de contexto, basada en el microcontrolador tipo Arduino, creado por el WeSST Lab (Web Science & Smart Technologies Lab) de la Universidad de Chile y sirve para capturar señales ambientales. (Barria, et al. 2020). Específicamente, está compuesta por 4 placas marca Grove, que poseen los siguientes sensores incorporados, con sus respectivas funciones:



Figura 2: Contextino

1. SCD30: Sensor de CO<sub>2</sub>, temperatura ambiental y de humedad
2. Light sensor v1.2: luminosidad
3. Loudness sensor: Ruido ambiental
4. IMU 10DOF: acelerómetro, giroscopio, magnetómetro y presión. Se deriva la dirección e inclinación.

De igual manera que el Biomonitor, el Contextino necesita estar conectado a la Raspberry Pi para registrar las señales. Una vez que se conecta el Contextino a la Raspberry, se enciende una luz naranja en la rejilla de su parte superior y cuando comienza a tomar datos de manera correcta, comienza a parpadear una luz roja en la letra C del nombre CONTEXTINO, que se ve ilustrado en la imagen anterior. El contextINO va montado en la parrilla de la bicicleta, con

un sistema de velcros en dos direcciones para su seguridad. En la Figura A1 del anexo se ilustra un soporte adecuado para el ContextINO, para evitar que se mueva y en la Figura A2 del anexo se muestra su instalación en la bicicleta.

### 3.3.3 Raspberry Pi

Es una computadora de bajo costo de un tamaño compacto, que puede ser conectada a un monitor de computador o un TV vía HDMI, a un mouse y un teclado estándar para trabajar en él. Se puede observar en la Figura 4. Esta computadora debe ir conectada a una fuente de energía y en este caso se utiliza una batería externa para ello. La Figura 4 muestra la manera de conectar los aparatos para su correcto funcionamiento. De izquierda a derecha se observa la batería externa, la Raspberry Pi y el Contextino.



Figura 3: Conexión Raspberry - Contextino

### **3.3.4 Geoposicionamiento (GPS)**

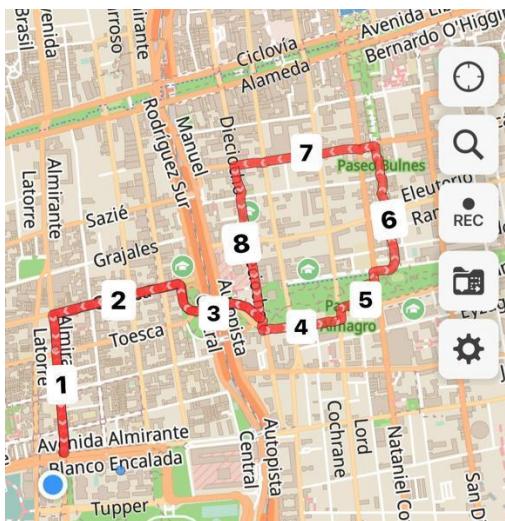


Figura 4: Recorrido

El recorrido es: 1-2-3-4-5-6-7-8-3-2-1, es decir que los tramos 1, 2 y 3 se recorren de ida y de vuelta.

Con el fin de poder indexar correctamente las emociones y señales a un cierto punto específico de la ruta, se registra la ubicación en tiempo real de cada participante utilizando la aplicación GuruMaps. Esta aplicación se instala en un smartphone y cada participante lo lleva en su bolsillo. Se instala un soporte para celular en el manubrio de la bicicleta que lleva el mapa abierto con la ruta guardada y así corroborar que se sigue la ruta correctamente. En la aplicación está grabado el recorrido que debe seguir cada participante y se almacena la ruta que éste realiza.

### **3.3.5 Contexto Visual**

La GoPro es una cámara que generalmente se usa para registrar sesiones deportivas. Es cómoda porque es pequeña y graba vídeos de hasta 2 horas. Se elige esta manera de registrar la experiencia de cada usuario, para poder observar eventos granulares de cada una de las pruebas. Además de registrar la experiencia visualmente, se registra el audio del viaje, recogiendo la declaración de emociones y de comentarios que se hagan durante el viaje.



Figura 5: GoPro

### **3.3.6 Autorreporte de Emociones**

Con el fin de recoger declaraciones de emociones ante un estímulo exógeno, se incorpora un audio que pregunta cada 3 minutos la emoción que mejor representa al participante en ese momento. Este audio debe reproducirse en el smartphone que lleva cada participante y conectarlo a audífonos bluetooth. Por seguridad, el participante debe llevar sólo un audífono a un volumen moderado, para permitir que esté atento a eventualidades en la calle.

## **3.4 Preprocesamiento de Datos**

El primer paso es realizar la limpieza y procesamiento de los datos, el cual consiste en aplicar filtros de outliers y paso banda a cada una de las señales crudas con el objetivo de eliminar el ruido proveniente de ellas. El segundo paso es calcular algunas señales a partir de los datos limpios, por ejemplo, a través de la fotopletismografía (PPG) se calcula el ritmo cardíaco (HR) y la variación del ritmo cardíaco (HRV), y, a través de la actividad electrodermal de la piel (GSR) se calcula el nivel de conductancia de la piel (SCL) y respuesta de conductancia de la piel (SCR). Para más detalles sobre la limpieza de las señales psicofisiológicas, revisar Jimenez-Molina, A., Retamal, C. and Lira, H. (2018) y Jimenez-Molina, A., Diaz-Guerra, F., Retamal, C., Guevara, C.A. (2023). Finalmente se estructuran las señales obtenidas y se calculan distintos atributos de tendencia central como mediana, promedio, varianza, curtosis, etc. para las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia, a través de la transformada rápida de Fourier, junto con otros atributos relacionados al GSR como número de peaks, área total, etc. Por otra parte, se analiza la ruta establecida buscando caracterizar y relacionar la infraestructura vial con las variables continuas definidas previamente. Se toma en cuenta el tipo de ciclovía, el sentido de ésta y características como el ancho, el nivel, tipo de superficie, entre otras cosas. Se obtuvo un esquema dependiente del tiempo, que contiene la distribución de señales y emociones generadas, identificando en qué tramo se registra cada uno de los datos y cómo se caracteriza cada intervalo.

## **4. DESCRIPCIÓN DE LA RUTA**

La ruta a seguir se selecciona estratégicamente tomando en cuenta distintas variables:

- Ancho de ciclovía
- Nivel de ciclovía
- Lado de la calle
- Unidireccional o Bidireccional

- Tipo de suelo

A continuación, se presenta un cuadro resumen de cada uno de los tramos, que incluye las calles y el sentido de cada uno, una breve descripción y una ilustración del perfil. El objetivo de esta tabla, es poder conocer detalles de cada uno de los tramos para asignarles niveles de calidad a cada uno de ellos y compararlos entre sí más adelante. El mapa de la ruta puede observarse en la Figura 4 de la sección anterior.

Tabla 2: Cuadro resumen tramos

Tramo	Calles – Sentido	Descripción	Imagen
1	Almirante Latorre entre Blanco Encalada y Gorbea Sentido S-N	Ciclovía bidireccional al nivel de la calzada, al lado derecho de la calle (lado Oriente) a favor del tránsito vehicular.  Ciclovía de asfalto irregular, de ancho 2,5 [m]. Calzada de adoquines de 2 pistas, 1 de estacionamiento.	
2	Gorbea, entre Almirante Latorre y Santa Isabel Sentido P-O	Ciclovía bidireccional al nivel de la calzada, al lado derecho de la calle (lado Sur) en contra del tránsito vehicular.  Ciclovía de asfalto liso, de ancho 2,1 [m]. Calzada de asfalto de 2 pistas, 1 de estacionamiento.	
3	Santa Isabel, entre Gorbea y Dieciocho Sentido P-O	Ciclovía bidireccional al nivel de la calzada, al lado derecho de la calle (lado Sur) en contra del tránsito vehicular.  Ciclovía de asfalto liso, de ancho 2,4 [m]. Calzada de asfalto de 3 pistas.  Desde Manuel Rodríguez la ciclovía está al lado izquierdo de la mediana, en contra del tránsito.	

			
4	Santa Isabel, entre Dieciocho y Lord Cochrane Sentido P-O	Ciclovía unidireccional al nivel de la calzada, al lado derecho de la calle (lado Sur) a favor del tránsito vehicular.  Ciclovía de asfalto de ancho 1,8 [m]. Calzada de asfalto de 2 pistas.	
5	Parque Almagro, entre Lord Cochrane y Paseo Bulnes Sentido S-N	Parque con árboles, áreas verdes, juegos y asientos.  Caminos amplios de ripio, ancho de 6,5 [m].	
6	Paseo Bulnes, entre Mencía de los Nidos y Tarapacá Sentido S-N	Paseo peatonal de 11 [m] de ancho.  Hay 3 piletas de agua al centro del paseo a lo largo del tramo.	
7	Tarapacá, entre Paseo Bulnes y Dieciocho Sentido O-P	Ciclovía unidireccional al lado izquierdo de la calle (lado Sur) a favor del tránsito vehicular.  Ciclovía de asfalto de 1 [m] de ancho. Calzada de asfalto con 3 pistas.	

		Desde C. San Ignacio hasta Dieciocho se acaba la ciclovía y los participantes eligen si van por vereda o calzada. Además, la calzada es de 2 pistas.	
8	Dieciocho, entre Tarapacá y Santa Isabel  Sentido N-S	Ciclovía bidireccional al lado derecho de la calle (lado Poniente) en contra del tránsito vehicular.  Ciclovía de asfalto de 2,7 [m] de ancho. Calzada de asfalto con 2 pistas, 1 de estacionamiento.	

Luego de observar, clasificar y analizar cada componente de la ruta establecida, es posible dilucidar las primeras hipótesis del estudio. Se observa que los tramos pueden diferenciarse entre sí según sus características antes expuestas. Se espera que ante una mejor calidad de la infraestructura, se evidencien cambios significativos tanto en las señales que entrega la pulsera como las emociones que declara cada participante.

Apoyada en literatura, se toman estas variables de la ruta como consideraciones relevantes a estudiar y analizar. El objetivo es contar con una ruta variada que pueda evidenciar cambios en las mediciones, ya que no tendría sentido fijar una ruta plana sin cambios significativos.

## 5. ANÁLISIS DE DATOS/RESULTADOS y DISCUSIONES

### 5.1 Estadística descriptiva de emociones declaradas

La base de datos obtenida está separada en dos partes: los resultados válidos de 12 participantes de la experiencia piloto y los resultados válidos de 40 participantes de la segunda experiencia. En total se tienen 52 mediciones correctas, de un total de 61 mediciones, es decir que hubo 9 participantes que registraron errores en las mediciones por lo que no serán utilizados para el análisis de resultados. Para el análisis de resultados, se consideran los 40 datos válidos en una sola base de datos. Los datos son:

- Señales del Biomonitor
- Señales del Contextino (Sólo segunda versión)
- Eventos granulares
- Recorrido
- Emociones declaradas

Usando esta información, es posible obtener una estadística tanto de los participantes como de las emociones que se declaran por cada tramo. El análisis de los participantes se encuentra en

la sección 3.1. La distribución de emociones declaradas en cada uno de los tramos es la siguiente:

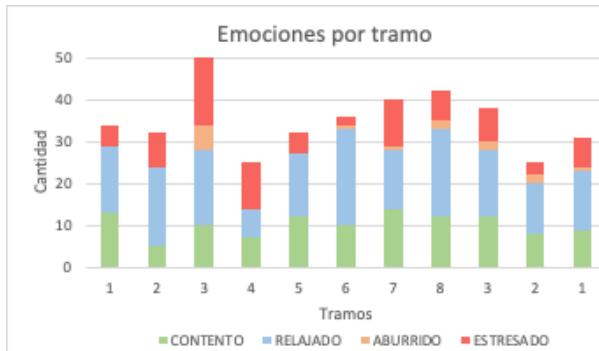


Figura 6: Distribución de emociones por tramo

De la figura 6 se puede observar la distribución de las emociones por tramos. Las emociones que predominan son Relajado y Contento, lo que es un buen indicio ya que refleja que las emociones positivas son más comunes al andar en bicicleta en comparación a las negativas. Además, se observa una bajada en las emociones positivas y una subida en las emociones negativas al pasar por los tramos 3 y 4.

Lo anterior, evidencia que el tramo 3 y 4 generan repercusiones negativas en los ciclistas, lo que puede ser explicado por la tabla 2, con la información de cada tramo. El tramo 3 pasa sobre la autopista Central, donde hay mucho tráfico, ruido y las condiciones del entorno son poco seguras ya que la ciclovía va a un costado de la mediana y no hay separadores físicos. El tramo es más tranquilo, ya que pasa por una calle con menos tráfico, pero es angosta y los automóviles pasan muy cerca del ciclista.

Como el audio es reproducido cada 3 minutos, la cantidad de respuestas no están distribuidas homogéneamente a lo largo de la experiencia, lo que se puede observar en la figura 6, el tramo 3 tiene cerca de 50 declaraciones, mientras que el tramo 2 de vuelta tiene cerca de 25.

A continuación, se ilustra un gráfico con el comportamiento de las señales más relevantes para el estudio, a lo largo del viaje del participante 3:

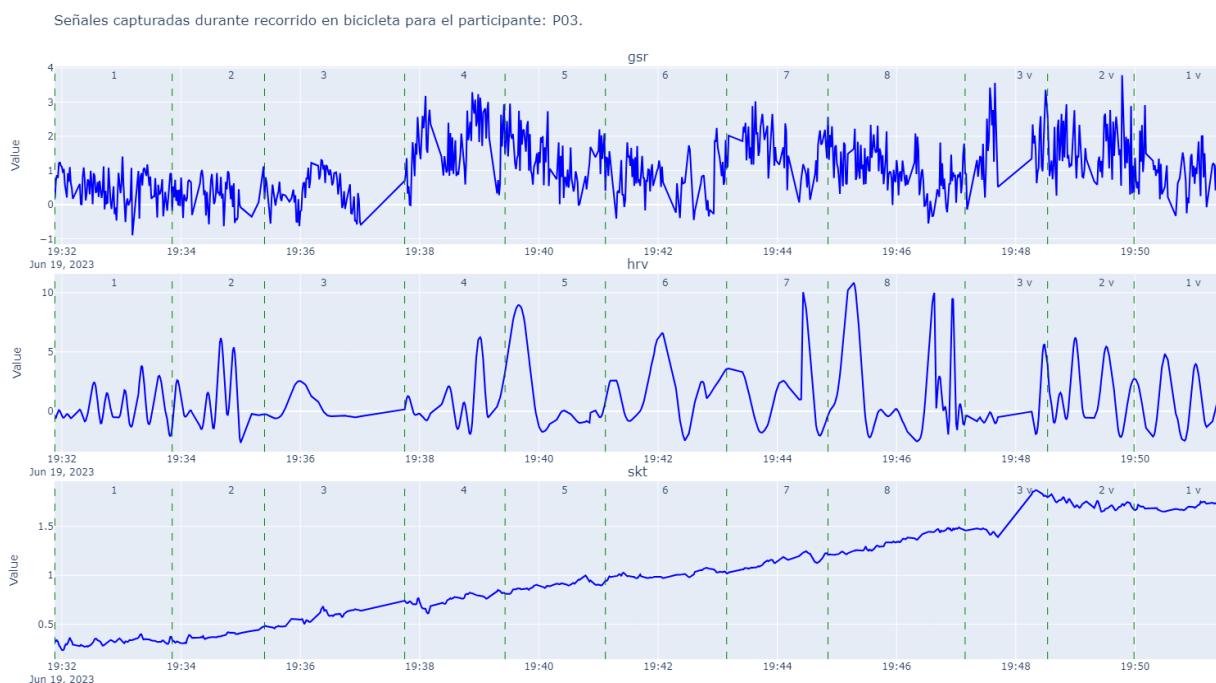


Figura 7: Comportamiento señales participante 3

Ahora, se presenta la misma imagen para el participante 40:

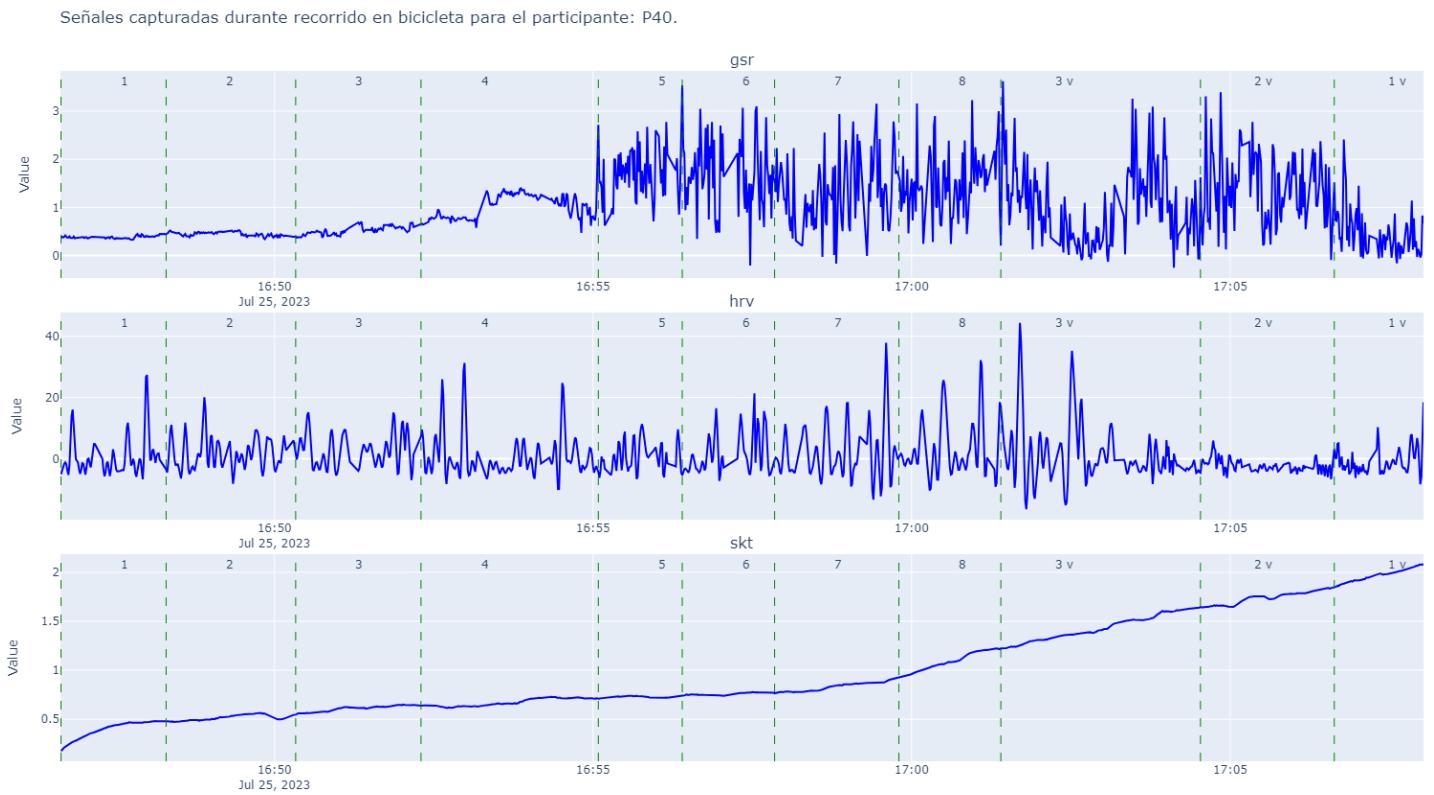


Figura 8: Comportamiento señales participante 40

Tanto para el participante 3 como el 40 se refleja un aumento sostenido en la temperatura superficial de la piel a lo largo del recorrido, lo cual puede ser un efecto directo de la misma actividad física. Las otras señales son más difíciles de interpretar y es necesario utilizar distintas *features* para caracterizarlas.

Por otra parte, tomando en cuenta el trabajo realizado por Barría et al. (2023), se utiliza su adaptación del modelo circumplejo de Emociones y su visión de la Valencia y Activación para clasificar las declaraciones. Según el Modelo circumplejo de emociones de Russell, los estados emocionales se componen de sensaciones que emergen de la actividad de dos sistemas neurofisiológicos básicos (Posner et al., 2005; Russell, 1980). El primero corresponde a un continuo de placer y desagrado, el cual es llamado valencia y el segundo corresponde a un continuo de alta y baja excitación o exaltación, llamado activación.

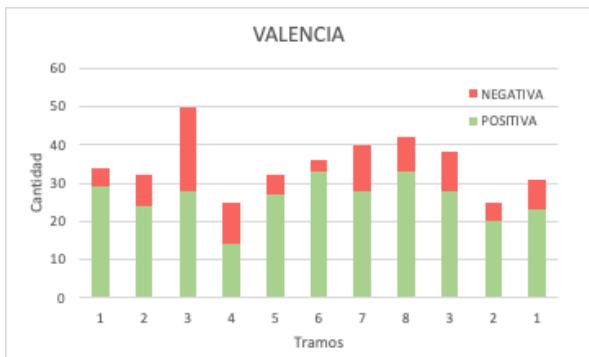


Figura 9: Valencia

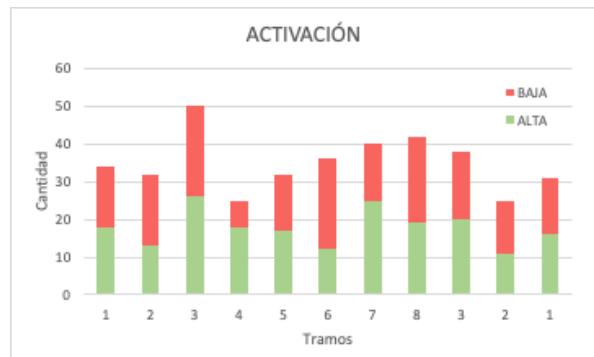


Figura 10: Activación

Observando las figuras anteriores, es posible notar que la bicicleta es un modo de transporte que tiende a aumentar la excitación de quien la utiliza (Activación), esto puede deberse a que es un modo interactivo que conlleva un ejercicio físico de por medio, a diferencia de otros en que incluso se podría dormir en el viaje. Por otra parte, se observan emociones más ligadas al placer que al desagrado (Valencia), lo que podría entenderse como un gusto por andar en bicicleta.

## 5.2 Test de Hipótesis

Con el fin de probar la hipótesis de que al cambiar de infraestructura, se generan cambios tanto en las señales como en las declaraciones, se aplican test de varianza ANOVA en ambos escenarios. Se analizan estos cambios entre pares de tramos consecutivos y pares de tramos de interés que tengan diferencias evidentes de infraestructura. La hipótesis nula de dicho test es que los promedios muestrales de los dos grupos comparados son iguales, para efectos de este trabajo se considera una variable significativa cuando se puede rechazar la hipótesis nula con un 95% o más de probabilidad.

### 5.2.1 Emociones declaradas

En esta sección, se analiza la veracidad de la hipótesis nula utilizando un test-t de muestras emparejadas. Para esto, se calcula el valor de t según el cambio de las emociones que se declaran de un tramo al siguiente. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(x_1 - x_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Es necesario verificar la suposición de normalidad de la muestra, utilizando el test de Shapiro-Wilk y que la muestra no contenga valores atípicos. Si las suposiciones no se cumplen, se aplica el test de Wilcoxon, que es su versión no paramétrica.

### 5.2.2. Señales Biomonitor

Luego, se aplica un test de hipótesis en Python, para conocer si hay diferencias significativas en una señal a medida que el ciclista va cambiando de tramo y por consiguiente, de infraestructura.

Para esto, se realiza una prueba de análisis de varianza: ANOVA, donde analizamos las medias de variables cuantitativas. Primero, se estudia la significancia al pasar de un tramo a otro consecutivo, obteniendo resultados poco concluyentes, es decir, no significativos. Por otra parte, se analizan las diferencias entre dos tramos de interés, que según las hipótesis, debieran generar cambios en las señales. Por ejemplo, el tramo 6 que es por el paseo peatonal, debiera tener mejores indicadores de satisfacción de los participantes a diferencia del tramo 3, que pasa por la autopista y hay bastante interacción con vehículos motorizados. Lo mismo sucede con el tramo 8 que es una ciclovía tranquila y ancha y el tramo 4 que es una ciclovía angosta y muy transitada por vehículos motorizados.

Bajo esta premisa, se analizan las diferencias entre este tipo de tramos obteniendo los siguientes resultados:

Primero, comparamos los tramos 3 y 6:



Figura 11: Boxplot atributos significativos para los tramos 3 y 6

Donde el primero, tercero, cuarto y quinto tienen una significancia del 90% y el segundo del 95%.

Luego, comparamos los tramos 3 y 8:

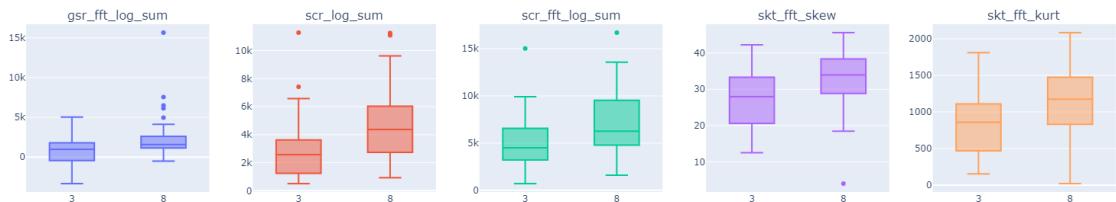


Figura 12: Boxplot atributos significativos para los tramos 3 y 8

Donde el primero, segundo, cuarto y quinto tienen una significancia del 95% y el tercero del 90%. De la figura 11 y 12 se aprecia que existen atributos significativos tanto para el GSR como para aquellos atributos calculados a partir de este. Lo anterior se da específicamente entre pares de tramos clasificados como estresantes y relajados.

De las dos figuras anteriores, es posible notar que existen diferencias significativas en varios atributos al comparar dos tramos en específico, que se cree que debieran generar cambios en los comportamientos de los participantes.

Se encuentran atributos significativos relacionados a la temperatura (*skt*) y a la actividad electrodermal (*eda*) también referido como GSR. En el caso de la temperatura, ésta tiende a ser en promedio menor cuando el participante se encuentra de ida (tramo 3) en comparación a cuando está en mitad del recorrido (tramo 8), lo cual se puede asociar con una disminución del esfuerzo y una sensación de relajo cuando se encuentra cerca del final del recorrido, lo cual hace que disminuya la temperatura corporal. Finalmente para el *GSR* se pueden asociar

estas diferencias en las distintas variables como cambios en sensaciones experimentadas por el participante (Ayata, et al., 2017).

Es importante destacar que a todos los participantes se les aplicó una línea base, la cual fue usada para normalizar las señales entre los participantes. Para esto se capturaron datos en reposo para cada participante antes de realizar su viaje, y se restó el promedio de las señales capturadas en esa ventana al resto de la experiencia, intentando disminuir la variación de las señales entre participantes, basándose en la metodología usada por Wagner et al. (2021)

## 6. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

Se obtiene un primer acercamiento al análisis de los datos con respecto a la infraestructura ciclista. Para esto, fue necesario desarrollar una caracterización completa de la ruta utilizada, en cada uno de sus tramos, lo cual facilita el proceso de entender las relaciones causales que se busca probar.

El estudio logra obtener información sobre algunos cambios que genera el entorno construido en las emociones e indicadores que experimenta el usuario a lo largo de su viaje. Es posible dilucidar los primeros resultados satisfactorios, pero aún no es posible obtener conclusiones contundentes, ya que el estudio aún se encuentra en su etapa inicial.

Luego de caracterizar la ruta es posible notar que existen diferencias notorias en el entorno construido para cada uno de los tramos a lo largo del recorrido, esto se ve reflejado en las emociones declaradas por los participantes, las cuales son mayoritariamente positivas para tramos de buena calidad y negativas para tramos que están en condiciones no óptimas o que generan un esfuerzo adicional para el usuario, tanto física como mentalmente, un ejemplo de esto es el cruce de la autopista central. Esto a la vez se ve reflejado en el comportamiento de las señales medidas por la pulsera, en donde se encuentran diferencias significativas entre los tramos de interés para los atributos relacionados a la carga mental y/o el estrés.

Como trabajo futuro se espera poder mostrar que las emociones que siente una persona que circula en bicicleta, pueden ser explicadas por la calidad de la infraestructura de la ruta en que circula el usuario, y que cada emoción puede ser relacionada con los indicadores fisiológicos medidos. De esta manera, se espera que el estudio sea un aporte a las autoridades al momento de evaluar proyectos y estados actuales de la infraestructura para bicicletas, según las características de la ruta elegida en el experimento.

## AGRADECIMIENTOS

FONDEF

FONDECYT 1191104; 1231584

Cristian Retamal y Francisco Díaz, desarrollo y manufactura del contexto.

Proyecto Corfo Código 18PTECMA-102646: IMA (Innovación en Manufactura Avanzada).

Leandro Gayozo, apoyo en funcionamiento aplicaciones y progreso del proyecto

## REFERENCIAS

- Ayata, D., Yaslan, Y., & Kamasak, M.E. (2017). Emotion Recognition via Galvanic Skin Response: Comparison of Machine Learning Algorithms and Feature Extraction Methods. Istanbul University - Journal of Electrical and Electronics Engineering, 17, 3147-3156. <https://dergipark.org.tr/download/article-file/272082>
- Barría, C., Guevara, C.A., Jiménez-Molina & A., Seriani, S., (2023). Relating emotions, psychophysiological indicators and context in public transport trips: case study and a joint framework for data collection and analysis. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* **95**, 418-431, ISSN 1369-8478, <https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.05.002>.
- Biomonitor V3.0. Disponible en línea: <https://isci.cl/biomonitor/>. Accedido 21 de abril 2023
- Castro, M., Guevara, C.A. & Jimenez-Molina, A. (2020). A methodological framework to incorporate psychophysiological indicators into transportation modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **118**, 102712 <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102712>.
- Echiburú, T., Hurtubia, R., & Muñoz, J. C. (2021). The role of perceived satisfaction and the built environment on the frequency of cycle-commuting. *Journal of Transport and Land Use*, **14**(1), 171-196. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2021.1826>.
- Henríquez, B., Guevara, C.A. & Jiménez, A. (2023). Identifying instant utility (latent emotion) triggers using psychophysiological indicators with an Experience-Based Choice Model in a travel experiment. Available at SSRN 4454000.
- Jimenez-Molina, A., Retamal, C. & Lira, H. (2018). Using Psychophysiological Sensors to Assess Mental Workload During Web Browsing. *Sensors* 18, no. 2: 458. <https://doi.org/10.3390/s18020458>
- Jimenez-Molina, A., Diaz-Guerra, F., Retamal, C. & Guevara, C.A. (2023). Towards Psychophysiological Markers for Affect-Aware Vehicles. In: Bravo, J., Ochoa, S., Favela, J. (eds) Proceedings of the International Conference on Ubiquitous Computing & Ambient Intelligence (UCAmI 2022). UCAmI 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 594. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21333-5\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21333-5_58)
- MINVU. Vialidad ciclo-inclusiva, Recomendaciones de diseño (2015). URL: <http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/doc/MPALL/mpall3docs/Cap%204%20Diseno%20y%20Ejecucion%20de%20Ciclovias.pdf>
- Programa de Vialidad y Transporte Urbano SECTRA Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Guía de composición y diseño operacional de ciclovías. Antecedentes para obtener la aprobación operacional, 2a Edición. (2020). URL:[http://www.sectra.gob.cl/publico/Gu%C3%A3da\\_Ciclov%C3%A3das\\_2020\\_v2.pdf](http://www.sectra.gob.cl/publico/Gu%C3%A3da_Ciclov%C3%A3das_2020_v2.pdf)

Rossetti, T., Guevara, C.A., Galilea, P. & Hurtubia, R. (2018). Modeling safety as a perceptual latent variable to assess cycling infrastructure. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice* **111**. 252-265. ISSN 0965-8564. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.03.019>.

Rossetti, T., Saud, V. & Hurtubia, R. (2019). I want to ride it where I like: measuring design preferences in cycling infrastructure. *Transportation* **46**, 697-718. <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9830-y>

Setz, C., Arnrich, B., Schumm, J., La Marca, R., Tröster, G. y Ehlert, U., (2010). Discriminating Stress from cognitive load using a wearable EDA device. *Transactions on Information Technology in Biomedicine* **2** (14), 410-417. doi: 10.1109/TITB.2009.2036164.

Wagner RE, Plácido da Silva H, Gramann K. Validation of a Low-Cost Electrocardiography (ECG) System for Psychophysiological Research. *Sensors (Basel)*. (2021) 21(13). doi: 10.3390/s21134485.

## ANEXOS



Figura A1: Soporte Contextino



Figura A2: Montaje Contextino en la bicicleta