

ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PARA EL USO DE DRONES (UAV) EN ESTUDIOS DE MOVILIDAD

Stefan Steiniger, CEDEUS & Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,
stefan.steiniger@pucv.cl

Juan Carlos Herrera, CEDEUS & Pontificia Universidad Católica de Chile, jch@ing.puc.cl

Sergio González, CEDEUS & Universidad de Concepción, sergonzalez@udec.cl

Rodrigo Mora, CEDEUS & Universidad de Chile, rodrigomora@uchile.cl

Juan Carlo Muñoz, CEDEUS & Pont. Universidad Católica de Chile, jcm@ing.puc.cl

RESUMEN

El desarrollo de drones de pequeño tamaño y equipados con una cámara de video ha abierto la puerta a nuevas formas de observar la movilidad. Además de la inspección visual de los videos tomados desde el aire, también se hace posible la recolección de datos de tráfico, como conteos, velocidades, tiempos de viaje, o la definición de pares origen-destino. Con un costo de adquisición y gestión alcanzable surge la necesidad de evaluar sus reales ventajas y limitaciones. En un proyecto de planificación de transporte para un barrio de la ciudad de Santiago, Chile, se utilizó un dron para medir flujos vehiculares y peatonales en las vías principales. El análisis post-estudio destaca limitaciones en el uso de drones por restricciones en el tiempo de vuelo, la necesidad de permisos en áreas urbanas, y limitaciones meteorológicas. Por otro lado, los videos han permitido el conteo de flujos de camiones, buses, transporte privado, bicicleta, y caminata, aunque durante una ventana de tiempo acotada. Así, esta tecnología permite acceder a diagnósticos iniciales gruesos sobre el uso del espacio en el tiempo (velocidad, tiempos de viajes, etc.), para lo cual la inversión de costo-tiempo para la planificación y ejecución de vuelo es razonable.

Palabras claves: dron, UAV, RPAS, flujos viales, partición modal, planificación de transporte

ABSTRACT

The development of small drones equipped with a video camera has allowed the observation of mobility patterns in new ways. Besides visual evaluation of drone videos taken from the air, it is also possible to derive traffic data such as counts, speeds, travel times, or the definition of origin-destination pairs. Considering the UAVs reasonable acquisition and management costs, there is a need to evaluate benefits and limitations. In a transportation planning project carried out in a particular neighbourhood of Santiago, Chile, a drone was used to measure vehicular and pedestrian flows on local main roads. From our post-study analysis, limitations emerge for the use of drones, which are related to flight time restrictions, a need for permits in urban areas, and meteorological flight restrictions. On the other hand, the drone videos allowed us to count flows of trucks, buses, cars, bicycles, and walking. Furthermore, the investment of time and money for flight planning and execution seems reasonable to us.

Keywords: drones, UAV, RPAS, traffic flows, transportation mode share, transport planning

1. INTRODUCCIÓN

Desde mediados de la década de los años 2000 están disponibles los micro drones, como vehículos aéreos no tripulados de pequeño tamaño ($< 5\text{kg}$), los cuales ya permitían tomar fotos de alta resolución (Eisenbeiss 2004, Hardin y Jackson, 2005; Puri 2005; Lucieer et al., 2010). Los avances tecnológicos han permitido que los drones, también conocidos por su sigla en inglés UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), ya no solo vienen equipados con una cámara que permite hacer fotos de alta resolución, sino también, la posibilidad de capturar videos de alta resolución (Kanistras et al., 2013; Salvo et al., 2014). Una gran demanda de aficionados y profesionales ha permitido la producción industrial de los micro UAV, llevando su precio a niveles accesibles (por ejemplo, de \$1.300.000 CLP -casi USD 2.000- para un modelo de nivel profesional en 2016). Esto ha permitido evaluar los micro UAV como una herramienta en áreas tan diversas como la cinematografía (Mademlis et al., 2019), el mapeo topográfico (Nex and Remondino, 2014), la investigación ecológica (Wallace et al, 2012; Harris et al, 2019), juegos competitivos (Madaan et al., 2020), la ingeniería civil (De La Torre-Molina, 2021) y, por supuesto, el transporte (Kanistras et al., 2013; Salvo et al., 2014; Barmounakis et al., 2016; Butilă y Boboc 2022).

Una de las primeras revisiones de investigación con drones en transporte ha sido publicado por Kanistras et al. (2013). Sus investigaciones con el uso de esta herramienta se han basado principalmente en el monitoreo de tráfico, pero con objetivos bien diversos, como por ejemplo: detectar (y mapear) pistas en carreteras, determinar parámetros de tráfico (ocupación, capacidad de flujo y densidad de vehículos en carreteras), detectar vehículos sin movimiento, y seguir vehículos. También han desarrollado un proyecto con un enfoque en la detección y conteo de vehículos – una aplicación similar al trabajo presentado en este artículo. Cabe mencionar que Kanistras et al. (2013) identifica la necesidad de cumplir a las regulaciones del tráfico aéreo (por la agencia FAA en EE.UU.) y las normas de comunicación (FCC) como una barrera para la implementación de investigación con drones. Sin embargo, concluye que la maniobrabilidad y la comunicación inalámbrica son dos puntos clave que hacen a los UAVs más útiles que otros métodos para el monitoreo de tráfico.

Barmounakis et al. (2016) analizan de igual manera trabajos existentes con micro y mini UAVs ($< 25\text{kg}$), distinguiendo entre aplicaciones de (i) monitoreo y gestión de tráfico en el contexto de Sistemas de Transporte Inteligentes (STI), (ii) logística (como modo de delivery-reparto), (iii) inspección y mantención de carreteras (en conjunto con aplicaciones de Percepción Remota), y (iv) otras aplicaciones (inspección de puentes, uso en agronomía, etc.). También comparan el uso de UAV con el uso de Vehículos Aéreos Tripulados (sigla en inglés: MAV) y el uso de cámaras estáticas, destacando por un lado que el tamaño de los UAV permite llegar a lugares inaccesibles para un MAV. Por ejemplo, una zona urbana con edificios altos. Por otro lado, y comparando el uso de UAV con cámaras estáticas se destaca la flexibilidad para grabar y analizar “eventos extremos” (como accidentes) desde distintas perspectivas. Igualmente destacan la característica de un despliegue rápido – en pocos minutos - en áreas suburbanas y rurales cuando hay necesidades. Al igual que Kanistras et al. (2013), los autores apuntan a los desafíos en la regulación en temas de seguridad y privacidad, y concluyen que las limitaciones tecnológicas van a determinar el ritmo de los avances en el uso de UAVs.

La revisión de Butilă y Boboc (2022) presenta un análisis cualitativo de 34 artículos publicados entre 2014 y 2021 que usan micro UAVs para el análisis o el monitoreo de tráfico. Para cada artículo se informa sobre el tipo (y modelo) de UAV, resolución y duración de video, mediciones utilizadas, tipo de vehículo o modo, y software o algoritmos utilizados. Los autores ordenan los artículos según propósito, identificando un total de 19. Los propósitos con más publicaciones registradas tienen un enfoque en la detección de vehículos (6) y de extracción de trayectorias de vehículos (5 publicaciones). El análisis se enfoca principalmente en revelar el estado de arte técnico y la información que se puede extraer desde videos. Sin embargo, se discute también brevemente las limitaciones regulatorias por razones de seguridad o privacidad en el uso de UAVs en distintos países.

La evaluación cualitativa de 34 artículos hecho por Butilă y Boboc (2022) registra 3 artículos en los cuales no solo se identifican vehículos motorizados, sino también, modos activos. Entre ellos está el trabajo de Barmounakis et al. (2019), en el cual se observan velocidades y trayectorias de vehículos y peatones, el trabajo de Chen et al. (2019), analizando conflictos entre vehículos y peatones en dos cruces, y la publicación de Wan et al. (2019), enfocada en la detección y seguimiento de objetos. Ninguna de las 34 publicaciones incluye la detección de bicicletas. Sin embargo, hay un trabajo que evalúa uso de “motorbikes” y “riskhaws” (Ahmed et al., 2021) y otro de “motorcycles” y “scooters” (Barmounakis et al., 2018).

Adicionalmente, se pueden encontrar tres otros artículos que se enfocan a modos activos (y pasivos). El primero es de Park y Ewing (2018) en donde se experimenta con un UAV para observar peatones en Salt Lake City, Utah, EE.UU. En este experimento se realizó un vuelo de ida y vuelta por 26 cuadras en dos calles a una velocidad de vuelo de 1,8 m/s y una altura de 15-20 metros. Después analizaron los videos contando las personas, registrando sus perfiles demográficos (sexo y grupo de edad) y su modo (peatones sin asistencia, peatones con asistencia, ciclistas). Los autores concluyen que este método funciona bien para contar peatones según sus características demográficas. La comparación con el método de observación tradicional, en base a los tiempos involucrados, desemboca en un flujo de trabajo con mayor demora para el uso de UAV por la evaluación de los videos de forma manual. Finalmente, apuntan a problemas de seguridad, ética y privacidad en el levantamiento de datos mediante UAV. El segundo trabajo, presentado por Orduna et al. (2019), discute el aporte de los UAV en el análisis de la movilidad peatonal y utiliza la metodología propuesta por De Candia et al. (2018). Sin embargo, el trabajo no presenta resultados finales. El tercer artículo es el de Parra-Ovalle et al. (2023). Igual que Park y Ewing (2018) usan un dron a una altura de solo 25m y una velocidad de 6 km/h para observar actividades en algunas calles en Santiago de Chile. Este trabajo analiza las actividades de las personas observadas y no solo se enfoca en peatones, sino también se evalúan modos activos y pasivos, incluyendo a ciclistas, scooter, y silla de rueda.

En general, los trabajos reportados en la literatura muestran por un lado el avance tecnológico de los UAVs en la última década y media, concluyendo que los UAV pueden ser usados para registrar flujos de movilidad y sus distintos modos a nivel de calle. Sin embargo, son una herramienta no muy utilizada aún, cuyas ventajas y limitaciones son poco conocidas. Así, el objetivo de este trabajo es contribuir al conocimiento de las reales capacidades de esta tecnología para su uso en estudio de movilidad, así como levantar aspectos que requieren atención.

En la sección siguiente se detallará el estudio con sus objetivos, preguntas de investigación, métodos y resultados. Luego, se dará respuestas a las preguntas de investigación. Por último, se expondrán algunas recomendaciones para el uso de drones en estudios de movilidad.

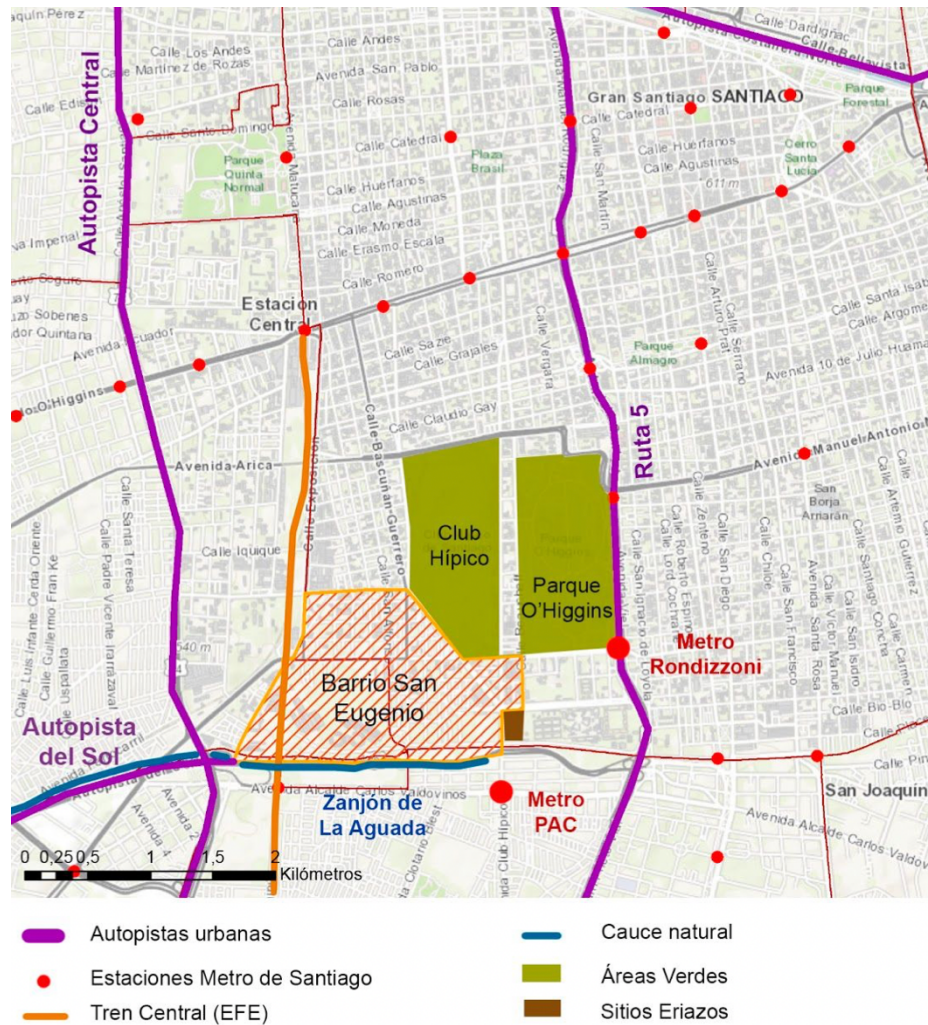


Figura 1. El Barrio San Eugenio en la Ciudad de Santiago de Chile. Autor: Roxanna Rios, CEDEUS.

2. ESTUDIO DE EVALUACION DE FLUJOS EN UN BARRIO DE SANTIAGO DE CHILE

El estudio que se presenta en adelante nació en 2018 cuando la Municipalidad de Santiago de Chile y el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) - un centro de investigación científica - acordaron en iniciar una colaboración para ejecutar un diagnóstico y proceso colaborativo con vecinos para la implementación del Plan Integral de Movilidad en el barrio de San Eugenio,

ubicado en el centro sur de la comuna de Santiago como se muestra en la Figura 1 (CEDEUS, 2019). El barrio San Eugenio nació a finales del siglo XIX alrededor de una maestranza de la Empresa Ferrocarriles del Estado y cuenta hoy en día con una población de aproximadamente 10.500 personas (INE 2018). La población del barrio tiene acceso a dos estaciones de metro ubicados en otros barrios cercanos (Metro Pedro Aguirre Cerda, y Metro Rondizzoni). Considerando modos y flujos esperados se puede identificar tres calles principales en dirección Norte-Sur (Exposición, Bascuñán Guerrero, y Av. Mirador), con flujos importantes hacia y desde el centro de Santiago, y dos calles principales con dirección Oriente-Poniente (Antofagasta, y Ramon Supercasaux). Además, existen múltiples bodegas y talleres, la casa matriz de un canal de televisión nacional, dos colegios, y un estacionamiento de buses de transporte público.

2.1. Objetivos y contexto del estudio

El diagnóstico solicitado requirió, entre otros elementos de estudio, un análisis de flujos en las principales calles que atraviesan el barrio, para luego proponer un rediseño vial que debe promover modos sustentables como la caminata, uso de bicicleta y uso de transporte público (CEDEUS, 2019; Sagaris et al., 2017). Así, el objetivo era medir y analizar los flujos existentes en el barrio, incluyendo modos activos y motorizados. Los datos de modos observados y flujos, en conjunto con datos adicionales recolectados (encuesta de hogar, entrevistas con vecinos, caminatas con vecinos, y mapeos participativos), fueron luego utilizados para desarrollar un plan de rediseño vial para el barrio (CEDEUS 2019, Vecchio et al., 2020, Steiniger et al., 2022).

Dada la falta de datos actuales, se consideraron dos métodos para su levantamiento: (a) mediciones de flujos a través de equipos en base al conteo de personas y vehículos en puntos seleccionados, y (b) el uso de un micro dron (< 5kg) para grabar las actividades viales y posteriormente inspeccionar los videos de forma manual. Dada la necesidad de medir los flujos para múltiples ejes de transporte al mismo tiempo (durante el mismo horario punta o valle) y la estimación de costos para el levantamiento de múltiples equipos, se decidió experimentar con un micro UAV (peso aprox.: 1.5kg) para evaluar posteriormente los videos y la utilidad del método. Debido a que los miembros del equipo no tenían la experiencia necesaria en el uso de drones para la medición de flujos, se realizaron solo unos vuelos de aprendizaje. Derivado de lo anterior surgieron las siguientes preguntas de investigación: (1) Grabando con un micro UAV, ¿es posible identificar todos los tipos de modos principales en las principales calles del barrio San Eugenio? (2) ¿Es posible grabar con un micro UAV durante un mismo horario las actividades para distintas calles principales del barrio? (3) ¿Se puede contar los flujos para los modos activos de caminata y bicicleta mediante la inspección de los videos? y (4) ¿Cuáles son las restricciones de uso de drones para emplearlos en estudios de transporte urbano?

2.2. Planificación y Ejecución

Planificación - Con el objetivo de evaluar flujos para distintos modos, es necesario grabar por un tiempo un tramo vial elegido desde una posición fija. Según el “Manual de Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana” (MESPIVU – SECTRA 2013), para obtener cálculos de flujos representativos, los conteos deben ser efectuados por 15 minutos (ideal en múltiples ocasiones) y

ejecutado en días de la semana y horarios representativos. Entonces, para obtener datos que se apeguen a estas condiciones, se decidió grabar flujos durante tres horarios: en punta mañana de 7:30 a 9:15, horario valle de 11:45 a 14:00, y punta tarde de 17:00 a 18:15, en un día jueves. Considerando la temporada de invierno los horarios fueron ajustados según la disponibilidad de luz de día, ya que el dron no debe volar en oscuridad, por que el piloto del UAV debe tener contacto visual con el dron.

Para medir los flujos de las calles principales del barrio, incluso de algunas de las calles laterales, se determinaron siete puntos de observación donde el dron queda de forma fija grabando (Figura 2). En este contexto, se especificó que se debe grabar desde una altura de vuelo de aprox. 130 metros, teniendo la cámara en un ángulo oblicuo, lo cual permitió ampliar el área visible hasta al menos una cuadra en comparación con una vista vertical¹.

El micro UAV utilizado para las observaciones de tráfico es un modelo *off-the-shelf*, es decir sin modificaciones, y corresponde al modelo Phantom 4 Profesional de la marca DJI. Algunas especificaciones técnicas importantes del dron: la cámara montada incorpora un gimbal para su estabilización (suspensión cardan); posee una resolución de 4096 x 2160 pixel (4K) (espectro visible); la aeronave tiene un peso de 1,4 kg; y posee una duración de batería de hasta 28 minutos de vuelo.



Figura 2. Puntos de grabación de flujos con flechas indicando la dirección de la cámara. Punto “C” marca el lugar de recarga de baterías, la Parroquia, facilitado por vecinos.

La duración de 28 minutos para la batería es válida para una batería nueva de fábrica y bajo condiciones climáticas ideales. En la práctica hay que considerar tiempos para el posicionamiento del dron en el lugar de observación y para el retorno al lugar de despegue, vientos que pueden

¹ Cabe mencionar que los vuelos con una altura mayor de 130 m sobre el terreno son reservados para el tráfico aéreo y no disponibles para drones según la DAN 151 de la Dirección General Aeronáutica Civil (DGAC 2023).

variar fuertemente a distintas condiciones de altura y ubicación, y una reserva para eventos imprevistos. Con esto se debe planificar un tiempo efectivo de grabación de no más de 22 minutos para el modelo Phantom 4. Tomando entonces en cuenta: (i) los 7 puntos de observación, (ii) el tiempo disponible para el horario punta, (iii) las limitaciones de batería, (vi) un clima favorable, y (v) experiencias de un vuelo de prueba anterior (en otro lugar), se decidió que el tiempo de observación por cada posición/ángulo debe ser aproximadamente de 6 a 7 minutos. El plan final de vuelo fue desarrollado en base a estos 6 a 7 minutos, tiempos de traslado y posicionamiento, y la disponibilidad de 4 baterías (previsto observar 4 puntos por horario punta y 5 en horario valle). Los tiempos de pausa entre los horarios fueron previstos para recargar las baterías y respaldar los datos.

Ejecución – Gracias a condiciones atmosféricas favorables, los vuelos y grabaciones se ejecutaron principalmente en solo un día (jueves 9 de agosto del 2018). Se hicieron ajustes en el posicionamiento del UAV para tener mejores vistas de cruces o tramos de calles, ya que no era posible evaluar las vistas desde el aire pre-vuelo. Además, durante las primeras grabaciones se decidió que un tiempo de 5,5 min puede ser suficiente para cada posición si están revisitados en el horario punta de la tarde. Gracias a esto se ahorró batería-tiempo junto con la posibilidad de agregar un nuevo punto (en Figura 2, denominado punto No. 6), y se logró grabar desde otros puntos en más direcciones. Este extra en flexibilidad permitió grabar flujos “inesperados” (como por ejemplo peatones a la hora de almuerzo, o salidas de colegio). Cabe mencionar que cada video de 5,5 min de duración, grabado en alta resolución, tiene un tamaño de 4,1 GB.

2.3. Análisis de Videos y Datos Obtenidos

Los videos fueron analizados mediante interpretación visual por un analista (no entrenado) en un computador de escritorio. Se pudo identificar los modos bus (transporte público), camión, auto y bicicleta (Figura 3). No había un enfoque en motos, pero tal como las bicicletas, igualmente son identificables en los videos. En el caso de los peatones, estos son difícil de identificar por sus movimientos más lentos y su tamaño (pocos pixeles). Además, los peatones solo son identificables cuando están en movimiento. Las personas sentadas en un parque son casi indetectable por el ojo humano (Figura 4). Sin embargo, pueden ser detectables mediante el uso de algún software.

Ejemplo de resultado de conteo por una ubicación
(vehículos por hora)

5- FLUJO DE MAÑANA - SECTOR CALLE R. SUBERCASEAUX (1 Hora)



Mapa con flujos en detalle

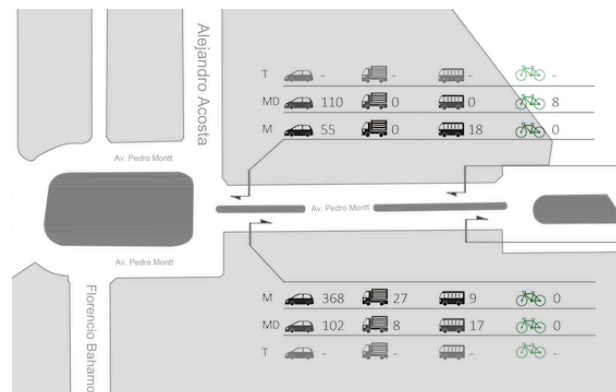


Figura 3. Resultados de análisis de modos y conteos de flujo en base de grabaciones de video.

Similar a lo que observaba Bernal-Giraldo (2016), el uso de software, como por ejemplo Smart Traffic Analyzer (STA, Picomixer), permite no solo contar flujos por modo, sino que también extraer otras características del tráfico motorizado desde los videos de alta resolución. Estas características pueden ser utilizados en la calibración de parámetros de algunos software de simulación de tráfico. La extracción es factible para (ver Figura 5): velocidades por tipo de vehículo y pista, largo de cola, orígenes y destinos (rutas), porcentaje de virajes, ocupación por pista, tiempos de detención de buses en paradas, cambios de pistas, entre otros.



Figura 4. La identificación de peatones de forma visual en los videos requiere buena atención del analista y que las personas estén en movimiento (marcado en círculos A y B). Personas en el parque son casi indetectable (circulo C).

3. ANÁLISIS POST-ESTUDIO

La primera parte del análisis de la experiencia en San Eugenio va a dar respuestas a las preguntas de investigación 1, 2 y 3 sobre la posibilidad de realizar conteos de flujos para distintos modos a nivel de barrio. La subsección siguiente se enfoca en responder a la cuarta pregunta de investigación sobre las restricciones en el uso de drones. Posteriormente se resumirán los beneficios encontrados.

3.1. Respondiendo a las Preguntas de Investigación: utilidad de UAV para determinar flujos de distintos modos en un barrio

La primera pregunta de investigación ha sido sobre la posibilidad de identificar todos los modos principales a nivel de barrio, incluyendo modos motorizados y no-motorizados. La respuesta tiene dos partes. Primero, la altura de observación de 130m y la resolución de la cámara (en píxeles) juega un rol importante, definiendo la posibilidad de detección de modos. Segundo, ha sido posible identificar los modos principales (los más utilizados), con la excepción de la caminata (en general

los modos “lentos”). Es decir, se pudo identificar camiones, buses, autos y bicicletas. Se asume que las motocicletas se pueden identificar de la misma forma que las bicicletas como han mostrados los trabajos de Barmounakis et al. (2018) y Ahmed et al. (2021). Los peatones también son identificables, pero cuesta encontrarlos en el video. Otro factor ha sido que los peatones no necesariamente caminan de forma homogénea (recta y constante), siguiendo la acera de un cruce al otro (llamado en inglés “jay walking”). Caminatas no homogéneas se puede observar especialmente cuando las calles son más pequeñas y existen plazoletas (ver Figura 4).



Figura 5. Grabación de video con el UAV DJI Phantom 4 desde una altura de 130m de un área con edificios de baja altura, permitiendo la extracción de parámetros de tráfico como velocidades, largo de colas, ocupación de pistas, porcentaje de virajes, entre otros.

¿Es posible observar las actividades, o flujos de las calles principales de un barrio durante un horario con un UAV? Esta es la segunda pregunta de investigación. En el caso de San Eugenio era posible grabar desde hasta 7 diferentes puntos durante el horario punta (mañana), por el tiempo acotado de grabación (5,5 min) y por las distancias cortas entre los puntos de observación. Sin embargo, queda la duda si esto igual es posible en otros tipos de barrios. Por ejemplo, en lugares donde existen edificios altos que puedan bloquear la visión.

La respuesta a la tercera pregunta de investigación (¿Se pueden contar los flujos para los modos activos de caminata y bicicleta observando los videos?) es parcialmente positiva, pues es posible contar flujos para bicicletas, pero el conteo de peatones es menos confiable. En efecto, el conteo depende de la altura del dron y también de la distancia al cruce objetivo (ver Figura 5). Al bajar la altura del UAV, como lo hecho por Park y Ewing (2018) y Parra-Ovalle et al. (2023), o si se evalúa solo el cruce más cercano asumiendo “pocos” peatones a la vez, debe ser posible contar flujos. Cabe notar que, para evaluar flujos de peatones en relación al transporte público, puede ser importante aumentar el tiempo de grabación a 15 minutos, porque la frecuencia de aparición de peatones va a depender de la frecuencia de este servicio.

3.2. Limitaciones en el uso de UAV

La cuarta pregunta de investigación ha sido sobre las restricciones en el uso de drones para estudios de transporte urbano. El que sea un área “urbana”, o más bien “poblada”, es relevante debido a que en Chile y otros países se hace una diferencia entre áreas pobladas y no-pobladas, ya que para áreas pobladas se deben cumplir con ciertos requisitos y permisos de vuelo por razones de seguridad (DAN 91 - párrafo 102, DGAC 2023b). Otra diferencia es la que existe para los vuelos en áreas pobladas con drones de un peso menor a 750g. Para estos RPA (denominación ocupada en la norma) no se requiere autorización previa de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) bajo las condiciones de una altura máxima de vuelo de 50 metros, fines de uso privado, y uso en lugares privados. Las normas de la DGAC también establecen que los RPAS usados deben ser inscritos en el registro de la DGAC (teniendo además un seguro, tal como lo tendría un auto), y que el piloto debe contar con una licencia/credencial para RPAS (DAN 151 y DAN 119, DGAC 2023c).

Otras limitaciones que encontramos durante la planificación y ejecución de los vuelos en San Eugenio fueron los siguientes:

- Un vuelo no brindó más de 22 min de video continuo, por limitaciones de batería, peso de UAV y condiciones meteorológicas (vientos, calor y heladas). Sin embargo, nuevos modelos de UAV similares tienen una mayor autonomía, hasta 40 minutos (modelo DJI Mavic 3). Mediciones continuas o por más tiempo de observación requieren interrupciones por cambio de baterías. A menos que se cuente con un segundo dron para operar de forma alternada, existirán ventanas de tiempo en que no se registrarán datos. Esto último puede ser determinante en muchos casos.
- Vuelos en áreas pobladas, en particular sobre espacios públicos y con tráfico, requieren (caso a caso) un permiso por la dirección aeronáutica (DAN 91.102) - incluyendo una justificación - (declarando un interés público) y plan de vuelo que evite sobrevolar sobre personas, lo cual aumenta los costos y (eventualmente) los plazos para la planificación.
- Vuelos en áreas pobladas igualmente requieren siempre una línea de vista libre entre el piloto y UAV (DAN 151.103 f), por ende, volar con luz del día. Esto puede limitar la selección de puntos de observación y restringir ciertas maniobras, por ejemplo, no se puede volar recorridos programados en forma autónoma (DAN 151.103 c + e + f).
- La altura máxima de vuelo de 130m (DAN 151.103g) limita el área de vigilancia a aproximadamente 1.5 x 1.5 cuadrados (ver Figura 5). No obstante, un vuelo a mayor altura no siempre es ventajoso, ya que puede dificultar la detección y seguimiento de vehículos y personas.
- Hay que considerar en la planificación de los vuelos las condiciones meteorológicas, como vientos, precipitaciones, niebla y temperatura del aire, las cuales no solo pueden afectar el vuelo, sino que también la visión que se tenga de la aeronave (ver también DAN 151.103c). Esto significa que los planes de vuelo deben ser flexibles, pero en ciertas zonas o temporadas pueden ser impracticables.

Considerando las limitaciones dadas por las normas DAN de la DGAC parece ser difícil ejecutar vuelos para estudiar el tráfico sin aporte profesional o de una institución pública. A esto hay que agregar los puntos ya mencionado por otros autores con respecto a privacidad e implicaciones éticas (Barmounakis et al., 2016; Park y Ewing, 2018). Por ejemplo, en el estudio de San Eugenio se informó días antes a la unidad vecinal que se efectuarían vuelos con un dron. Sin embargo, de igual forma durante el vuelo se acercaron personas preguntando por curiosidad y desconfianza la presencia de la aeronave. Esto hizo necesario que el piloto tuviera un acompañante para responder preguntas y así evitar ser distraído.

3.3. Beneficios de uso de UAV

Pasando a los beneficios de la captura de observaciones con un dron en el estudio del tráfico, se puede resumir lo siguiente:

- Los videos a 130m de altura dan una perspectiva única, pero limitada para observar con precisión todas las actividades viales.
- Los videos tomados permitieron contar flujos (aunque por limitado tiempo) para diferentes modos de tráfico, incluso modos motorizados y no-motorizados.
- Una evaluación preliminar y de forma visual de los videos grabados, es decir sin hacer el ejercicio de cálculo, indica que otras características del tráfico pueden ser obtenidos desde los videos, para luego usar estos en herramientas de simulación. Además de los flujos por modo ya mencionados, parece factible extraer: (i) tiempos de viajes, (ii) velocidades por tipo de vehículo, (iii) velocidades por pista, (iv) larga de cola en semáforos, (v) orígenes y destinos en cruces, (vi) porcentaje de virajes, (vii) ocupación por pista, (viii) tiempos de detención de buses en paradas, y (ix) porcentaje de cambios de pistas. Algunos de estos parámetros fueron calculados con software en el trabajo de Bernal-Giraldo (2016).
- La posibilidad de desplazar el dron fácilmente de un punto a otro permite observar distintas áreas en la misma zona de forma prácticamente simultánea. Es decir, se puede tener una evaluación cualitativa del tráfico en múltiples cruces o tramos de calles en un tiempo limitado.
- Si se cuenta con los permisos respectivos, el costo-tiempo de planificación y ejecución de vuelo es razonable, siendo este cercano a tres días para la planificación y un día para el vuelo aplicado, siendo ejecutado por dos personas.

4. RECOMENDACIONES

Basado en la experiencia de observar flujos de tráfico con un UAV en un sector urbano poblado, concluimos que esta metodología permita acceder a diagnósticos iniciales gruesos sobre el uso del espacio en el tiempo (velocidad, tiempos de viajes, etc.). Generar estadísticas más detalladas requiere una observación continua, lo que parece ser complicado por las limitaciones en el tiempo de vuelo. Para ejecutar una campaña de observación, se recomienda contratar un servicio profesional. Es necesario considerar que un servicio especializado en vuelos con UAV tiene pericia, equipamiento y documentos al día para volar en áreas urbanas.

A pesar de lo anterior, el uso de UAV presenta varias ventajas comparativas con respecto a los métodos tradicionales. En primer lugar, es menos intensivo en el uso de mano de obra, lo que demanda altos recursos económicos. En segundo lugar, reduce los posibles errores, o incluso eventualmente la falsificación de información, de los conteos manuales. Finalmente, puede ser muy apropiado para el monitoreo de sectores eventualmente inseguros de la ciudad, en los que los(a)s encuestadores(a) puedan ser objeto de algún tipo de acoso o amenaza a su seguridad. Es el caso, por ejemplo, de muchos barrios marginales o pericentrales de Chile.

5. DISPONIBILIDAD DE DATOS

Videos ejemplares están disponible por solicitud al autor principal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los miembros de la Unidad de Política y Práctica (UPP) CEDEUS para establecer los vínculos con la municipalidad y los vecinos. En particular se valora el apoyo de Roxanna Ríos en la planificación de los vuelos, a Martín Cruz, como piloto de UAV, y a Diego Brieve por analizar los videos. Esta investigación fue financiado por el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) (ANID/Fondap/1522A0002).

REFERENCIAS

- Ahmed, A., D. Ngoduy, M. Adnan y M. A. U. Baig (2021) On the fundamental diagram and driving behavior modeling of heterogeneous traffic flow using UAV-based data. **Transportation Research Part A**, 148, 100–115.
- Barmounakis, E. N., E. I. Vlahogianni y J. C. Golias (2016) Unmanned aerial aircraft systems for transportation engineering: Current practice and future challenges. **International Journal of Transportation Science and Technology**, 5(3), 111-122.
- Barmounakis, E. N., E. I. Vlahogianni y J. C. Golias (2018) Identifying predictable patterns in the unconventional overtaking decisions of PTW for cooperative ITS. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, 3, 102–111.
- Barmounakis, E. N., E. I. Vlahogianni, J. C. Golias y A. Babinec (2019) How accurate are small drones for measuring microscopic traffic parameters? **Transportation Letters**, 11, 332–340.
- Bernal-Giraldo, M. A. (2016) Metodología para calcular parámetros de tránsito a partir de información recogida por medio de nuevas tecnologías (drones), y su comprobación en la función flujo demora Akcelik. Thesis, Universidad de los Andes, Colombia.

Butilă, E. V., y R. G. Boboc (2022) Urban traffic monitoring and analysis using unmanned aerial vehicles (UAVs): A systematic literature review. **Remote Sensing**, 14(3), 620.

CEDEUS (2019) **Diagnóstico y propuestas participativas para el re-diseño Barrio San Eugenio**. Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, Santiago, Chile.

Chen, P., W. Zeng, y G. Yu (2019) Assessing right-turning vehicle-pedestrian conflicts at intersections using an integrated microscopic simulation model. **Accident Analysis & Prevention**, 129, 211–224.

De Candia, C., E. Kopacz y N. Raggio (2018) Uso de tecnología de drones para el relevamiento de información del tránsito. **ACTAS-Jornadas de Investigación**, 1660-1669.

De la Torre-Molina, A.R. (2021) Drones y movilidad segura y conectada. **Ingeniería Civil - Revista Digital Del Cedex**, 197, 12-23.

DGAC (2023a) **DAN 151**. Dirección General Aeronáutica Civil, Santiago de Chile, Chile. Disponible por: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1105778>

DGAC (2023b) **DAN 91**. Dirección General Aeronáutica Civil, Santiago de Chile, Chile. Disponible por: <https://www.dgac.gob.cl/normativa/reglamentacion-aeronautica/normas-dan/>

DGAC (2023c) **Actualización sobre el registro de nuevos RPA y la regularización de los registros provisorios de RPAS o drones**. Dirección General Aeronáutica Civil, Santiago de Chile, Chile. Disponible por: <https://www.dgac.gob.cl/actualizacion-sobre-el-registro-de-nuevos-rpa-y-la-regularizacion-de-los-registros-provisorio-de-rpas-o-drones/>

Eisenbeiss, H. (2004) A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. **International Archives of Photogrammetry**. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (5/W1), 1-7.

Hardin, P. J., y M. W. Jackson (2005) An unmanned aerial vehicle for rangeland photography. **Rangeland Ecology & Management**, 58(4), 439-442.

Harris, J. M., J. A. Nelson, G. Rieucan y W. P. Broussard III (2019) Use of drones in fishery science. **Transactions of the American Fisheries Society**, 148(4), 687-697.

INE (2018) **Censo de Población y Vivienda 2017**. Instituto Nacional de Estadística, Santiago de Chile, Chile.

Kanistras, K., G. Martins, M.J. Rutherford y K. P. Valavanis (2013). A survey of unmanned aerial vehicles (UAVs) for traffic monitoring. In **2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)**, IEEE, 221-234.

- Lucieer, A., Robinson, S. A., y D. Turner (2010) **Using an unmanned aerial vehicle (UAV) for ultra-high resolution mapping of Antarctic moss beds**. University of Wollongong, Disponible por <https://ro.uow.edu.au/scipapers/438>
- Madaan, R., N. Gyde, S. Vemprala, M. Brown, K. Nagami, T. Taubner, et al.. y A. Kapoor (2020) Airsim drone racing lab. In **Neurips 2019 competition and demonstration track**, PMLR, 177-191.
- Mademlis, I., V. Mygdalis, N. Nikolaidis, M. Montagnuolo, F. Negro, A. Messina y I. Pitas (2019) High-level multiple-UAV cinematography tools for covering outdoor events. **IEEE Transactions on Broadcasting**, 65(3), 627-635.
- Nex, F., y F. Remondino (2014) UAV for 3D mapping applications: a review. **Applied Geomatics**, 6, 1-15.
- Orduna, M. B., C. de Candia y N. Raggio (2019) Uso de imágenes de drones para el análisis de la infraestructura de la movilidad urbana peatonal. **ACTAS-Jornadas de Investigación**, 2393-2405.
- Park, K., y R. Ewing (2018) The usability of unmanned aerial vehicles (UAVs) for pedestrian observation. **Journal of Planning Education and Research**, 42(3), 206-217.
- Parra-Ovalle, D., C. Miralles-Guasch y O. Marquet (2023) Pedestrian street behavior mapping using unmanned aerial vehicles. a case study in Santiago de Chile. **PLoS One**, 18(3), e0282024.
- Puri, A. (2005) **A survey of unmanned aerial vehicles (UAV) for traffic surveillance**. Department of Computer Science and Engineering, University of South Florida, 1-29.
- Sagaris, L., I. Tiznado-Aitken y S. Steiniger (2017) Exploring the social and spatial potential of an intermodal approach to transport planning. **International Journal of Sustainable Transportation**, 11(10), 721-736.
- Salvo, G., L. Caruso y A. Scordo (2014) Urban traffic analysis through an UAV. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, 111, 1083-1091.
- SECTRA - Secretaría de Planificación de Transporte (2013) **Manual de Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana**. SECTRA, Santiago de Chile, Chile. Disponible por: <http://www.sectra.gob.cl/metodologias/mespivu.htm>
- Steiniger, S., C. Fuentes, D. Flores, B. Castillo, G. Vecchio, J. Walker y J. A. Carrasco (2022) STRIDE-una aplicación Android para recolectar experiencias de peatones para apoyar a las intervenciones con un foco en la caminabilidad. **Estudios de Transporte**, 23(2), 1-20.
- Vecchio, G., B. Castillo, B., y S. Steiniger (2020) Movilidad urbana y personas mayores en Santiago de Chile: el valor de integrar métodos de análisis, un estudio en el barrio San Eugenio. **Revista de Urbanismo**, (43), 26-45.

Wallace, L., A. Lucieer, C. Watson y D. Turner (2012) Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. **Remote Sensing**, 4(6), 1519-1543.

Wan, M., G. Gu, W. Qian, K. Ren, X. Maldague y Q. Chen (2019) Unmanned Aerial Vehicle Video-Based Target Tracking Algorithm Using Sparse Representation. **IEEE Internet of Things Journal**, 6, 9689–9706.