



Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad

Contextos Urbanos

Análisis de Integralidad del Transporte Público
y su impacto en los niveles de sostenibilidad presentes
en la movilidad de la ciudad de Hermosillo, Sonora

**Tesis que para optar por el grado de
Maestría en Ciencias de la Sostenibilidad**

Presenta

Marco Antonio Rosas Pulido

Tutores principales

Dr. Carlos Gershenson García

Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas

Dr. Gustavo Carreón Vázquez

Instituto de Investigaciones Económicas

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., junio de 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CGEP/PCS/132/2023
Asunto: Asignación de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su sesión 90 del 18 de abril del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, del alumno **Rosas Pulido Marco Antonio** con número de cuenta **81051946**, con la tesis titulada “Análisis de Integralidad del Transporte Público y su impacto en los niveles de sostenibilidad presentes en la movilidad de la ciudad de Hermosillo, Sonora”, bajo la dirección del Dr. Carlos Gershenson García y el Dr. Gustavo Carreón Vázquez.

PRESIDENTA: DRA. LOUISE GUIBRUNET
VOCAL: MTRO. ANTONIO SUAREZ BONILLA
SECRETARIA: DRA. EMILIA ELENA DE LA SIENRA SERVÍN
VOCAL: DR. JESÚS MARIO SIQUEIROS GARCÍA
VOCAL: DR. MANUEL SUÁREZ LASTRA

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE,

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 25 de mayo de 2023.



Dr. Alonso Aguilar Ibarra
Coordinador
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, institución admirable por su gran labor hacia la sociedad, y en donde tuve el privilegio de formarme profesionalmente.

Al Posgrado de Ciencias de la Sostenibilidad, a sus profesores y autoridades que conforman un entorno académico de gran nivel, por permitirme desarrollar conocimiento en esta disciplina para contribuir de manera activa al mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

A mi comité tutorial y en especial, con toda mi admiración, al Dr. Carlos Gershenson García, por haberme abierto las puertas a un lugar en donde se genera y respira conocimiento y que, con su apoyo e impulso invaluable, he podido conseguir metas como esta.

Al Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM, y en especial al Dr. Alejandro Frank, por todo su apoyo y por los momentos en los que, compartiendo ideas, se ampliaron considerablemente mis habilidades y mi visión en el área del conocimiento científico.

Al Instituto de Movilidad y Transporte del Estado de Sonora (IMTES), por su apoyo con el suministro de datos e información y por su disposición a compartir espacios de tiempo para la discusión y ejecución de este trabajo.

A la Mtra. Ma. Elena Pigenutt Galindo por su labor editorial durante la última fase de este trabajo.

Agradezco profundamente a mi padre, Marco A. Rosas Nieves, por todo el apoyo incondicional que me ha brindado a lo largo de mi vida.

Con mucho cariño, agradezco a mis hermanos, Rosaura, Mario y Eduardo, los mejores hermanos que se pueden tener.

Dedicatoria

A la memoria de mi *madre*, María de la Luz Pulido Soto, quién, a muy temprana edad, y tal vez de manera inconsciente para ambos, sembró en mi la semilla del gusto por la ciencia.

A mi hija, *Regina*, quién es el motor de mi vida y el centro de mis aspiraciones en todos mis emprendimientos, desde los cotidianos hasta los de gran envergadura.

Tabla de contenido

Resumen	13
Summary	15
Introducción	17
Justificación	17
Pregunta de investigación	23
Objetivo general	23
Objetivos específicos	24
Antecedentes	25
Sostenibilidad	25
Ciudad	31
Movilidad	38
Marco teórico	47
Métodos	53
Análisis de frecuencia total de rutas	56
Análisis de frecuencia de paradas	59
Resultados	67
Caracterización del sistema de Transporte Público (TP)	67
Datos GPS	70
Resultados de la distribución de probabilidad Gamma de frecuencias de las rutas La Manga y Periférico (04)	72
Análisis de frecuencias por paradas	80
Análisis puntual de la interacción entre modos de transporte	82
Análisis puntual ASV 7. UNISON – Hospital General	88
Análisis puntual ASV 1. Blvd. Encinas – Av. Rosales	95
Análisis puntual ASV 3. Monterrey – Vicente Guerrero	96
Análisis puntual ASV 6. Calle de la Plata	97
Conclusiones	103
Referencias bibliográficas	107

Resumen

Objetivo. Construir un modelo que permite analizar de manera integral y con visión sostenible el sistema de movilidad de la ciudad de Hermosillo, utilizando como eje de análisis el sistema de Transporte Público y su conectividad con otros modos de transporte para encontrar su nivel de sostenibilidad como parte del sistema de la ciudad en su conjunto.

Métodos. Inicialmente se gestionó con el Instituto de Movilidad y Transportes del Estado de Sonora (IMTES) el acceso a la información digitalizada de la operación de sistema de transporte público (TP). Con esta información se caracterizó el sistema de transporte público de Hermosillo, posteriormente, de todas las rutas que componen el sistema se seleccionaron dos, tratando de tomar las rutas más importantes para el sistema por su cobertura y su conectividad regional. Las rutas seleccionadas fueron La Manga y Periférico (O4). Esas dos rutas seleccionadas cubren de este a oeste y de norte a sur la ciudad.

Posteriormente, utilizando los datos de GPS de estas rutas, se obtuvieron las frecuencias para cada día de la semana seleccionada (del jueves 1º. al jueves 8 de septiembre del 2022) para cada ruta. Estas frecuencias fueron analizadas por medio de una distribución de probabilidad Gamma. La distribución de probabilidad Gamma permite observar los lapsos de tiempo (minutos) entre un autobús y el siguiente, así como los lapsos de tiempo (frecuencias) mayores y menores que se presentan durante el día en cada uno de los ocho días seleccionados durante la operación programada por el IMTES.

Además, para observar la interacción del TP con los otros modos de transporte, se realizó un análisis espacial en una plataforma SIG en 4 sitios de estudio en lo que se llevaron a cabo auditorías de seguridad vial (ASV) por parte de la autoridad de movilidad de la ciudad, correlacionando ambas capas, los 4 sitios de auditoría y la capa de caracterización de la operación del sistema de transporte público, construida con las frecuencias las dos rutas seleccionadas incluyendo las paradas cercanas a los sitios de las ASV.

Resultados. En este trabajo, la caracterización de la operación del TP de la ciudad de Hermosillo permitió observar una buena cobertura, aunque también se observó que la redundancia en las rutas está desbalanceada, siendo el centro de la ciudad la zona con un exceso de redundancia. Jun-tando estos hallazgos a la información puntual (análisis de la operación del TP y auditorías viales), se encontró que la gran congestión de las rutas de transporte público en la zona centro de ciudad forma parte importante del problema. Compite de manera exhaustiva por el espacio con los demás modos de transporte. En el análisis de frecuencias, se encontraron lapsos de tiempo muy pequeños (menos de tres minutos) y muy grandes (más de 35 minutos), esto no afectan de manera considerable la eficiencia del sistema dado que fueron muy pocos para cada día. Pero si impacta en la percepción de los usuarios.

Conclusión. En conclusión, al modelar la integralidad del sistema de TP más su conectividad multimodal, pensando en la movilidad como un servicio, y con fundamentos de sostenibilidad, pudo encontrar qué problemas hay que resolver, evitar o mitigar, así como los pros y contras en cada decisión que se tome. Para mejorar la movilidad en una ciudad no basta con hacerlo más rápido o aumentar la infraestructura o la capacidad, debemos considerar todos los modos de transporte y las interacciones entre ellos. No se puede considerar que una acción aislada para mejorar a un modo de transporte tendrá un impacto en la sostenibilidad del sistema de movilidad de toda la ciudad, incluso no tendría un impacto en la sostenibilidad del sitio, como se mostró en el resultado de la integración del análisis de auditoría del sitio junto con la operación del transporte público en el mismo lugar. Además, este trabajo mostró que, con base en la *Fórmula 1*, es posible asignar valores cuantitativos a cada una de sus variables (*Cuadro 15*) en lugar de valores cualitativos como se proponía originalmente en esa Fórmula. Esto permite construir escalas de sostenibilidad a partir de análisis comparativos entre ciudades. En una ciudad sostenible, todos los modos de transporte tienen que coexistir, complementarse y no competir entre sí.

Summary

Objective. To build a comprehensive model to analyze the sustainability of Hermosillo city mobility system. The analysis is focuses on the Public Transport System (PTS) operation and its connectivity with other transport modes. With these two components, we determine the sustainability level of the mobility system in the city.

Methods. To begin with, access to digitalized information on the operation of the Public Transport system (PTS) was negotiated with the Sonora State Institute of Mobility and Transportation (IMTES). With this information, PTS of Hermosillo was characterized. Two of the most important routes for the system due to their coverage and regional connectivity were selected. The selected routes were La Manga and Periférico (04). The selected routes cover the city, from east to west and from north to south.

Subsequently, using the GPS data of these routes, the frequency for each day of the selected week (from Thursday September 1st to Thursday September 8th of 2022) were obtained for each route. These frequencies were analyzed by means of a gamma probability distribution. The Gamma probability distribution allows observing the time lapses (frequencies in minutes) between one bus and the next one, as well as the greater and lesser frequencies that occur during the day, on each of the eight days selected during the operation programmed by IMTES.

In addition, to observe the interaction of the PTS with the other transport modes, a spatial analysis was carried out on a Geographical Information System (GIS) platform in four study sites in which road safety audits (RSA) were carried out by the mobility city authority, correlating both layers, the RSA sites, and the characterization layer of the operation of the public transport system, built with the frequencies of the two selected routes, including the stops nearby the RSA sites.

Results. The characterization of the operation of the public transport system of Hermosillo city shows that there is a good coverage, but the redundancy in the routes is unbalanced, with an excess redundancy in the

city center while suburban areas are somewhat vulnerable in this regard. However, although very small (less than three minutes) and very large (more than 35 minutes) frequencies were found, they do not significantly affect the efficiency of the system since they are very few. But these are relevant, insofar as they have an impact on the perception of users since there may be times when they must wait longer. In general, the frequencies are between 10 and 20 minutes. Small frequencies may be indicators of “bunching” of buses on the same route.

Integrating these findings with specific information (analysis of the PTS operation and on-site RSA), we found that the great congestion of PTS routes in the downtown area is an important part of the problem. There is exhaustive competition for space with other modes of transport. This leads to tension and friction between people, increasing the possibility of vehicular congestion and road incidents.

Conclusion. By modeling the PTS and its multimodal connectivity, allows to identify what problems must be solved, avoid, or mitigate, as well as of different policies. To improve mobility in a city, it is not enough to only focus on its speed or increase capacity, we must consider all the transport modes and their interactions. An isolated action to improve a single transport mode may not impact the sustainability whole city mobility system, let alone the sustainability of the site. This was shown in the result of the integration of site audit analysis with the operation of PTS. Besides, this work showed that, based on **Formula 1**, it is possible to assign quantitative values to each of its variables (**Table 15**) instead those qualitative values as originally proposed in that Formula. This makes it possible to build sustainability scales based on comparative analyzes between cities. In a sustainable city, all transport modes must coexist, complement, instead compete with each other.

Introducción

Justificación

El crecimiento sin precedentes de la urbanización a nivel mundial ha evidenciado la necesidad de entender el desarrollo urbano desde una perspectiva integral, teniendo como base el paradigma del desarrollo sostenible.

La aparición de asentamientos humanos y el desarrollo de las ciudades cambió radical e irreversiblemente a partir de la revolución industrial. Las implicaciones de tener opciones para moverse no solo a pie o a caballo fueron determinantes para la definición del tamaño de estos asentamientos.

La aparición del automóvil y del elevador propiciaron al desarrollo horizontal y vertical de los asentamientos urbanos primero, y, posteriormente el de las ciudades. Así, se generaron dos patrones en el crecimiento de las ciudades, la expansión y la concentración. Aunque ambos patrones han sido muy estudiados por separado, al estudiarlos en conjunto se encontraron patrones oscilantes entre ambos, (Krafta, R., et al. 2020). Así, los asentamientos periurbanos son incorporados a las ciudades en temporalidades cada vez menores y la densificación crea presión para la expansión en un ciclo de expansión-densificación con dinámicas complejas.

La densificación es un crecimiento constante del volumen y la expansión es un crecimiento que se da en periodos de tiempo aumentando el área de la ciudad.

Las ciudades pueden describirse de manera útil como sistemas complejos, ya que sus componentes interactúan y codeterminan su futuro (Gershenson, C. 2013). Dentro de este paradigma, las situaciones de crisis en las ciudades han sido interpretadas como fallas de los sistemas por causas exógenas como desastres naturales, guerras o capitalismo y, endógenas, como la expresión misma de la dinámica no lineal y la inestabilidad de un sistema complejo. La complejidad implica que los componentes de un sistema no son separables. Esta falta de separabilidad se debe a las interacciones relevantes entre los componentes: el estado futuro de los componentes está codeterminado por interacciones, que no se pueden enumerar, ordenar ni predecir. Por lo tanto, la predicción a partir de las condiciones iniciales y de contorno es limitada.

Las explicaciones a esta situación las ha proporcionado, básicamente, la geografía de la distancia y la microeconomía. La primera describe a la distancia, como un efecto inevitable de la distribución de fragmentos de formas y actividades construidas en el suelo, y da lugar a jerarquías espaciales, es decir, privilegios de ubicación y distribuciones espaciales desiguales.

Crisis como la congestión del tráfico o el desarrollo de alta densidad se vinculan fácilmente con la jerarquía.

Por otro lado, la microeconomía, explica cómo se atribuyen valores monetarios a la distancia y todas sus consecuencias para la estructura interna de las ciudades. Los gradientes de valor de la tierra, la competencia por la ubicación y la concentración de actividades son algunas de las consecuencias.

La buena urbanización y el desarrollo que plantea la Nueva Agenda Urbana, adoptada por México en la Conferencia Hábitat III, celebrada en Quito Ecuador en 2016, pone de manifiesto la necesidad de profundizar en los alcances de la política nacional de desarrollo urbano.

En primer lugar, cada vez son más los que consideran que el espacio público es un elemento clave de la interacción y la inclusión social, la salud y el bienestar, los intercambios económicos, las expresiones culturales y el diálogo en las zonas urbanas. Asumir el compromiso de promover los espacios públicos seguros, inclusivos, accesibles, ecológicos y de calidad en las ciudades y pueblos puede transformar por completo la manera en que interactuamos con nuestro entorno urbano.

Si bien la urbanización puede contribuir a los desafíos del mundo, las ciudades tienen un inmenso potencial para promover las innovaciones necesarias para abordar o revertir muchos de ellos.

En la Resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 23 de diciembre de 2016 referente a la Conferencia Habitat III, la movilidad y el transporte en el entorno del desarrollo urbano sostenible, presenta una gran relevancia apareciendo en 22 de sus resoluciones: resolución 13 incisos a) y f); resoluciones 36, 50, 54, 66, 68, 113, 114; resolución 114 incisos a), c) y d); resoluciones 115, 116, 117, 118, 121, 123 y 141.

Los temas abordados en estas resoluciones referentes a la movilidad y el transporte van desde cuestiones generales hasta puntos muy específicos; destaca, la integración de la movilidad a la visión de desarrollo en la agenda, teniendo como punto de partida, el acceso de todos a los bienes públicos y a los servicios de calidad.

Así, se promueve la planificación basada en la edad y el género, las inversiones para una movilidad urbana sostenible, segura y accesible para todos, se promueven también, medidas adecuadas en las ciudades y los asentamientos

humanos como aquellos implementados para facilitar el acceso de las personas con discapacidad, generando igualdad de condiciones. Se promueve también la inversión al entorno físico de las ciudades, en particular a los espacios públicos, el transporte público, la vivienda, la educación, los servicios de salud, la información pública y las comunicaciones (incluidas las tecnologías y sistemas de la información).

Dichas intervenciones, plantean alentar la interacción y la conectividad entre las zonas urbanas y rurales mediante el fortalecimiento de la movilidad, el transporte sostenibles y las redes e infraestructura de tecnología y comunicaciones, se plantea sobre una base de instrumentos de planificación fundados en un enfoque urbano y territorial integrado, a fin de aprovechar al máximo el potencial de esos sectores para mejorar la productividad, la cohesión social, económica y territorial, y la seguridad y sostenibilidad ambiental.

Al promover la planificación, se adquiere el compromiso de generar y utilizar energía renovable y asequible, servicios e infraestructuras de transporte sostenibles y eficaces -en la medida de lo posible- de manera que se aprovechen las ventajas de la conectividad y se reduzcan los costos financieros, ambientales y de salud pública provocados por una movilidad ineficiente. Esto implica, prestar especial atención a las necesidades de energía y transporte de toda la población, en particular de la población con bajos ingresos y, las personas que viven en asentamientos informales.

En estas resoluciones se plantea adoptar un enfoque de ciudades inteligentes en el que se aprovechen las oportunidades de la digitalización, las energías y las tecnologías no contaminantes, así como las tecnologías de transporte innovadoras, de manera que los habitantes dispongan de opciones para tomar decisiones más inocuas para el medio ambiente e impulsar el crecimiento económico sostenible con miras a que las ciudades mejoren su prestación de servicios.

También estas resoluciones ponen énfasis en la importancia de los proveedores de ecosistemas, como los espacios públicos y las áreas verdes, que proporcionan importantes recursos para el transporte, la seguridad alimentaria, la prosperidad económica, los servicios de los ecosistemas y la resiliencia de los entornos urbanos. Para esto se plantea la necesidad de generar compromisos para integrar las medidas necesarias en la planificación y el desarrollo urbano y territorial con visión sostenible.

En conjunto se busca adoptar medidas para mejorar la seguridad vial, la integración de la planificación y el diseño de infraestructuras sostenibles de movilidad y transporte.

Una de las resoluciones más importantes de la Conferencia Hábitat III en cuanto a movilidad, es la 114, ya que se promueve el acceso a sistemas de transporte terrestre y marítimo y de movilidad urbana que sean seguros, asequibles, accesibles y sostenibles y tengan en cuenta las cuestiones de edad y género, que hagan posible una participación significativa en las actividades sociales y económicas en las ciudades y los asentamientos humanos, mediante la integración de los planes de transporte y movilidad en las planificaciones urbanas y territoriales y la promoción de una amplia gama de opciones de transporte y movilidad, en particular mediante el apoyo a: Un crecimiento significativo de las infraestructuras de transporte público accesibles, seguras, eficientes, asequibles y sostenibles, así como opciones no motorizadas como la circulación peatonal y en bicicleta, a las que se dará prioridad frente al transporte motorizado privado; b) Un “desarrollo orientado al tránsito” equitativo que reduzca al mínimo los desplazamientos, en particular los de los pobres, y prime la vivienda asequible para grupos de ingresos mixtos y una combinación de empleos y servicios.

A partir del compromiso 115 se acoge la visión de gobernanza para la movilidad adoptando medidas para desarrollar mecanismos y marcos comunes en los planos nacional, subnacional y local para evaluar los beneficios generales de los sistemas de transporte urbano y metropolitano, incluidos los efectos en el medio ambiente, la economía, la cohesión social, la calidad de vida, la accesibilidad, la seguridad vial, la salud pública y las actividades relacionadas con el cambio climático, entre otras cosas.

En el compromiso 116, se propone apoyar el desarrollo de esos mecanismos y marcos, sobre la base de políticas nacionales de movilidad y transporte urbano sostenibles, para que la reglamentación y la licitación de servicios de movilidad y transporte en las zonas urbanas y metropolitanas sean sostenibles, abiertas y transparentes, con inclusión de nuevas tecnologías que hagan posibles los servicios de movilidad compartida. El compromiso 117, plantea apoyar una mejor coordinación entre el transporte y los departamentos de planificación urbana y territorial, en la comprensión mutua de los marcos normativos y de planificación, en los planos nacional, subnacional y local.

El 118, alienta a los gobiernos nacionales, subnacionales y locales a que desarrollen y amplíen los instrumentos de financiación, permitiéndoles mejorar su infraestructura y sistemas de transporte y movilidad, como los sistemas de transporte público rápido y los sistemas integrados de transporte.

El compromiso 121 busca garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos mediante la promoción de la eficiencia energética y las energías renovables sostenibles, a usuarios finales como edificios residenciales, comerciales e industriales, la industria, el transporte, los desechos y el saneamiento.

En la Agenda también se considera la posibilidad de establecer infraestructuras de transporte urbano y territorial y fondos de servicios a nivel nacional, sobre la base de diversas fuentes de financiación que abarcan desde subvenciones públicas hasta contribuciones de otras entidades públicas y del sector privado. En este panorama de desarrollo urbano global, las ciudades y, por ende la movilidad urbana, tienen un rol importante dadas sus externalidades, tanto positivas como negativas siendo factor determinante en la visión global del desarrollo sostenible.

En resumen, referente a la movilidad, esta agenda está construida con la visión de incorporar:

- Accesibilidad
- Equidad e igualdad
- Desarrollo social y territorial
- Salud
- Energía
- Tecnología e innovación

El crecimiento urbano se ve reflejado en mayor grado en las ciudades medianas y pequeñas, esto sucede porque las megaciudades son pocas y su crecimiento porcentual y absoluto es menor en comparación con las de menor tamaño. La ciudad de Hermosillo, en el Estado de Sonora, México es un buen ejemplo.

El municipio de Hermosillo se localiza en la región noroeste de la República Mexicana. Geográficamente se ubica en la parte central del estado de Sonora, a unos 280 km de la frontera con Estados Unidos y a poco menos de 110 km del golfo de California (Figura 1). Colinda al norte con Pitiquito y Carbó, el este con San Miguel Horcasitas, Ures, Mazatán y La Colorada; al sur con Guaymas y el golfo de California y al oriente también con el golfo de California.

Como capital de Sonora, Hermosillo es la ciudad más grande del estado, así como el principal centro económico de la región. En el 2015, la ciudad tenía una población de 812,229 habitantes, lo que la situaba en el número 16 de las ciudades más grandes de México.

Gran parte de su crecimiento económico se debe a su creciente industrialización, especialmente en el rubro automotriz. Así, para 2013, Hermosillo fue clasi-

ficada como una de las cinco mejores ciudades para vivir en México, y para 2016, se ubicó como la séptima ciudad más competitiva del país según el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), basado en su ubicación geográfica, instituciones educativas de alta calidad, capacidad gubernamental, la adopción de la innovación y las relaciones internacionales. Su reputación en este sentido se basó en evaluaciones anteriores, incluida una evaluación de Standard & Poor's de 2017 que calificó al municipio de Hermosillo como clase A/estable, gracias a sus prácticas administrativas, flexibilidad y riesgos financieros limitados, (Bermudez, T. 2019, p. 47).



Figura 1. Municipio de Hermosillo, Sonora.

Fuente: CITY PROSPERITY INDEX, CPI 2018. (Landsat 8, 2015.)

En 2015, Hermosillo tenía una superficie aproximada de 16,927 km², con una tasa de crecimiento anual de viviendas 3:8 %. En la actualidad, alberga a poco más de 884,000 habitantes, y aunque muestra una tendencia a la estabilización de su crecimiento demográfico, se estima que para 2030 su población llegue a 1,360,472 habitantes, con una tasa de crecimiento de 1:1 %.

Hermosillo tiene una superficie urbana de 165.9 km², que representan 0.9 % de su territorio total, área en la que se concentra 96% de su población, lo que caracteriza al municipio como predominantemente urbano. Esto se refleja en su densidad general de 51 hab/km², mientras que la urbana es de 5,047 hab/km² y la habitacional de 1,553 viv/km².

La población ocupada se concentra en el sector terciario (70:2 %), donde destaca el comercio y servicios, ya que cuenta con la mayor proporción de establecimientos comerciales de venta al por mayor y al menudeo; adicionalmente, su estatus como capital del estado y su localización geográfica le permiten ser el centro de acopio y distribución de mercancías e insumos desde y hacia otras zonas de la entidad (Lara et al., 2007). También cabe mencionar que el sector secundario concentra más de la cuarta parte de la PEA (23:8 %).

El grado de marginación de Hermosillo es muy bajo, aunque cerca de la quinta parte de su población (20 %) percibe menos de 2 veces el salario mínimo, con una tasa de desempleo abierto de 3:7 %; no obstante, tiene una tasa de ocupación económica superior a 96:3 % (Barrios, D., et al. 2018).

En materia ambiental, Hermosillo enfrenta retos derivados de la ocupación creciente y desproporcionada de suelo para usos urbanos, y si el patrón de urbanización continúa, los problemas de movilidad y contaminación incrementarán, con una pérdida irreversible de terrenos con valor natural y productivo, además de un encarecimiento en la operación de las infraestructuras y servicios urbanos, de manera que cada vez será más difícil llevarlos a todos los sectores de la población (IMPLAN, 2014).

Pregunta de investigación

¿Cómo se puede establecer el grado de sostenibilidad del sistema de la movilidad de la ciudad de Hermosillo de manera integral, tomando como base su Transporte Público?

Objetivo general

Desarrollar un modelo que integre en una visión sostenible, la movilidad de una ciudad tomando como eje central el Transporte Público de la ciudad de Her-

mosillo, Sonora, considerando la interacción espacial y funcional de este modo de transporte respecto de los demás modos de transporte en la ciudad.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la operación del sistema de Transporte Público (TP) en la ciudad de Hermosillo, Sonora y medir su grado de eficiencia.
2. Establecer dos rutas críticas del sistema de TP para un análisis puntual (paradas) con los modos de transporte peatonal, bicicleta y auto particular.
3. Establecer la sostenibilidad del TP basado en la forma y el grado de interacción del TP con los demás modos de transporte en los puntos críticos seleccionados.

Antecedentes

El presente trabajo integra los conceptos de Ciudad, de Movilidad y de Sostenibilidad. Así, estos tres conceptos se han tomado como base para la revisión de trabajos previos; se ha buscado cada uno de estos conceptos en artículos que los relacionen, al menos uno con otro, dado que la integración de los tres, tomando como eje central la movilidad, no es común que se encuentre en la literatura.

El concepto de Movilidad normalmente es tratado de manera técnica (hacia la eficiencia), mientras que el de Ciudad de manera teórica (en diferentes escalas sociales); en contraste, el de Sostenibilidad se aborda en forma integral, interdisciplinaria e incluso, transdisciplinaria (incluye a todos los actores). La Movilidad, integrada a estos dos conceptos, se trata de manera muy tangencial en la bibliografía o viceversa, en los artículos especializados en Movilidad, los conceptos de Ciudad y de Sostenibilidad son tratados con poca profundidad. Como puede observarse, cada uno de estos tres conceptos (movilidad, ciudad y sostenibilidad) generalmente se abordan desde una perspectiva distinta y en forma desarticulada. Por esto es relevante estudiarlos con un enfoque sistémico dentro del marco de los sistemas complejos.

Sostenibilidad

La concepción de tres pilares de la sostenibilidad (social, económica y ambiental), comúnmente representada por tres círculos con intersecciones, embebidos o anidados con la sostenibilidad general en el centro, se ha vuelto omnipresente.

A pesar de la relativa escasez de literatura que pruebe la “sostenibilidad” o el “desarrollo sostenible” conceptualmente, esta visión, la de los “tres pilares” ha ganado mucha fuerza. Esto, generalmente se esquematiza como el equilibrio de compensaciones entre objetivos que en apariencia son igualmente deseables dentro de estas tres categorizaciones, aunque los usos y las prioridades varían según el contexto y la temporalidad. Sin embargo, una faceta problemática de esta conceptualización es su falta de desarrollo teórico ya que no parece haber un texto original del que se derive, pues parece que solo lo encontramos en la literatura y comúnmente se toma al pie de la letra. Ya en 2001, este enfoque se presentó como una “visión común” del desarrollo sostenible (Giddings et al. 2002), tan común que parece no requerir una referencia.

También, los orígenes del paradigma de los ‘tres pilares’ se ha atribuido de diversas maneras al Informe Brundtland, a la Agenda 21 y a la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de 2002 (Moldan et al. 2012), pero en ninguno de estos documentos hay un marco claro o teórico de fondo como hecho explícito.

Dentro de este concepto de los tres pilares, la parte social es la que más dificultades presenta al momento de integrarlas a las otras dos, pero los riesgos sociales empiezan a complementar los estudios basados en este concepto en New Earth (2013). A pesar de la ventaja de una compilación tan amplia de datos sociales y la cuantificación sectorial de los valores de riesgo, las diversas Bases de Datos usadas para estas evaluaciones y estudios también enfrentan algunas limitaciones, como datos faltantes para algunos países y sectores, datos obsoletos para algunos indicadores sociales o incertidumbres relacionadas con la recopilación de datos o su conversión a datos cuantitativos o valores (Franze, 2013).

Con el fin de identificar la génesis y los fundamentos teóricos de esta concepción, esto es discutido en la literatura histórica relevante sobre sostenibilidad (Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. 2019). A partir de esto se encuentra que no existe un único punto de origen de esta concepción de tres pilares, sino más bien un surgimiento gradual de varias críticas en la literatura académica temprana del status quo económico desde las perspectivas social y ecológica, por un lado, y la búsqueda de conciliar el crecimiento económico como una solución a los problemas sociales y ecológicos por parte de las Naciones Unidas.

Low (2003) define los tres pilares de la siguiente manera:

Medio ambiente: la dimensión ambiental o ecológica considera los impactos de las actividades y desarrollos humanos en los cambiantes entornos locales y globales.

Social: La dimensión social es para los riesgos sociales involucrados en todos los sectores económicos.

Economía: el desarrollo económico es el proceso de crecimiento o progreso de una comunidad hacia objetivos económicos, como el aumento de la riqueza, el empleo, la productividad o, en última instancia, el bienestar.

Así, con esta idea de tres pilares, se trata de entender como se pueden satisfacer las necesidades humanas fundamentales mientras se preservan los sistemas de soporte vital del planeta Tierra, que es la esencia del desarrollo sostenible, y que es una idea que surgió a principios de la década de 1980 desde perspectivas científicas sobre la relación entre la naturaleza y la sociedad.

Sin embargo, durante finales de los 80 y principios de los 90, gran parte de la comunidad científica y tecnológica se alejó cada vez más de los procesos predominantemente sociales y políticos que estaban dando forma a la agenda del de-

sarrollo sostenible. Esto ahora está cambiando a medida que surgen esfuerzos para promover una transición hacia la sostenibilidad de los programas científicos internacionales, las academias científicas del mundo y las redes independientes de científicos.

Está surgiendo un nuevo campo de la ciencia de la sostenibilidad que busca comprender el carácter fundamental de las interacciones entre la naturaleza y la sociedad. Tal comprensión debe abarcar la interacción de los procesos globales con las características ecológicas y sociales de lugares y sectores particulares. El carácter regional de gran parte de lo que la ciencia de la sostenibilidad está tratando de explicar es relevante, ya que la investigación tendrá que integrar los efectos de los procesos clave en toda la gama de escalas, desde la local hasta la global. También requerirá avances fundamentales en nuestra capacidad para abordar cuestiones tales como el comportamiento de sistemas complejos de autoorganización, así como las respuestas, algunas irreversibles, del sistema naturaleza-sociedad a tensiones múltiples e interactivas. La combinación de diferentes formas de conocer y aprender permitirá que diferentes actores sociales trabajen en conjunto, aún incluso con incertidumbre e información limitada.

Sin embargo, los orígenes conceptuales de esta descripción así como el punto en el que surgió en la corriente principal están lejos de ser claros, a esto se suma que su significado exacto es motivo de controversia. Como dice Thompson, “gran parte del [...] discurso sobre la sustentabilidad [...] se organiza en torno a [...] la rúbrica de los tres círculos sin mucha reflexión disciplinada sobre cómo se traduce y cómo no se traduce en una comprensión más integral de la sustentabilidad”. Y observa que este análisis de la sostenibilidad, se ha convertido en una idea dominante dentro de los estudios ambientales y la filosofía política agraria. (Thompson, P. B. 2017).

Como puede observarse, los conceptos de desarrollo sostenible han experimentado un éxito extraordinario desde su aparición en la década de 1980. Ahora son una parte integral de la agenda de los gobiernos y las corporaciones, y sus objetivos se han convertido en el centro de la misión de los laboratorios de investigación y las universidades de todo el mundo. Sin embargo, aún no está claro cuánto ha progresado el campo como disciplina científica, especialmente dada su ambiciosa agenda de integración de teoría, ciencia aplicada y política, su relevancia para el desarrollo a nivel mundial y la generación de una nueva síntesis interdisciplinaria en todos los campos.

Así, la descomposición en disciplinas tradicionales revela un énfasis en la gestión de los sistemas humanos, sociales y ecológicos vistos principalmente desde una perspectiva de ingeniería y política. Podemos entonces afirmar que la integración de estas perspectivas está basada en un componente muy impor-

tante de colaboración científica, por lo que este este nuevo campo se ha creado sólo en los últimos años.

Este desarrollo demuestra así, la existencia de un creciente campo científico de la ciencia de la sostenibilidad como una práctica científica inusual, inclusiva y ubicua y es un buen augurio para su impacto continuo y longevidad (Betten-court et al, 2011).

Kates et al. (2001) plantean una serie de preguntas sobre la sostenibilidad como ciencia. Con estas preguntas plasman un concepto que me parece de mucha trascendencia, plantean la visión de proceso y no de un estado estático al observar la sostenibilidad, y con esto poder determinar trayectorias hacia la sostenibilidad o hacia la insostenibilidad. Estas preguntas son:

“¿Cómo se pueden incorporar mejor las interacciones dinámicas entre la naturaleza y la sociedad, incluidos los retrasos y la inercia, en modelos y conceptualizaciones emergentes que integran el sistema terrestre, el desarrollo humano y la sostenibilidad?

¿De qué manera las tendencias a largo plazo en el medio ambiente y el desarrollo, incluidos el consumo y la población, remodelan las interacciones naturaleza-sociedad de manera relevante para la sostenibilidad?

¿Qué determina la vulnerabilidad o resiliencia del sistema naturaleza-sociedad en tipos particulares de lugares y para tipos particulares de ecosistemas y medios de vida humanos?

¿Pueden definirse “límites” o “fronteras” científicamente significativos que proporcionen una advertencia efectiva de las condiciones más allá de las cuales los sistemas naturaleza-sociedad incurren en un riesgo significativamente mayor de degradación grave?

¿Qué sistemas de estructuras de incentivos, incluidos los mercados, las reglas, las normas y la información científica, pueden mejorar de manera más efectiva la capacidad social para guiar las interacciones entre la naturaleza y la sociedad hacia trayectorias más sostenibles?

¿Cómo se pueden integrar o ampliar los sistemas operativos actuales para monitorear y reportar las condiciones ambientales y sociales para brindar una guía más útil para los esfuerzos por transitar hacia la sostenibilidad?

¿Cómo se pueden integrar mejor las actividades relativamente independientes de hoy en día de planificación de la investigación, seguimiento, evaluación y apoyo a la toma de decisiones en los sistemas para la gestión adaptativa y el aprendizaje social?”

Es especialmente urgente generar la capacidad científica y el apoyo institucional adecuados para los países en desarrollo, ya que son los más vulnerables a las múltiples tensiones que surgen de los cambios rápidos y simultáneos en los sistemas sociales y ambientales. Los esfuerzos para aumentar la capacidad científica se llevarán a cabo en un contexto de patrones de financiamiento muy diferentes (que involucran fundaciones filantrópicas, empresas y organismos gubernamentales e intergubernamentales), preocupaciones ambientales y orientaciones de investigación. Las dificultades de la situación se ven agravadas por las diferencias de recursos y conocimientos aplicados, así como una brecha digital cada vez más profunda. Sin embargo, la oportunidad de cerrar esta brecha de información rápidamente y compartir conocimientos y nuevas tecnologías, incluso con las comunidades más remotas y desfavorecidas, puede materializarse en las próximas décadas.

La ciencia de la sostenibilidad que es necesaria para abordar estas preguntas difiere en un grado considerable en estructura, métodos y contenido de la ciencia tal como la conocemos. En particular, la ciencia de la sostenibilidad, dadas estas diferencias, deberá tener en consideración lo siguiente:

1. abarcar el rango de escalas espaciales entre fenómenos tan diversos como la globalización económica y las prácticas agrícolas locales,
2. dar cuenta tanto de la inercia temporal como de la urgencia de procesos como el agotamiento del ozono,
3. abordar la complejidad funcional, tal como se evidencia en análisis recientes de la degradación ambiental resultante de múltiples tensiones; y
4. reconocer la amplia gama de puntos de vista con respecto a lo que hace que el conocimiento sea utilizable tanto en la ciencia como en la sociedad.

Las acciones pertinentes no están ordenadas linealmente en la secuencia familiar de la investigación científica, donde la acción se encuentra fuera del dominio de la investigación. En áreas como el cambio climático, la exploración científica y la aplicación práctica deben ocurrir simultáneamente. Tienden a influirse y enredarse entre sí, CHANGE, I. P. O. C. (1995).

En este mismo documento se empiezan a abordar con mucho detalle temas como el valor de una mejor información sobre los procesos, los impactos y las respuestas al cambio climático. El análisis de los problemas económicos y socia-

les relacionados con el cambio climático, especialmente en los países en desarrollo, es una alta prioridad para la investigación. Se requiere más análisis sobre los efectos de las opciones de respuesta en el empleo, la inflación, el comercio, la competitividad y otros asuntos públicos.

Otra área de estudio conocida como Metabolismo Urbano, que aunque fue concebida hace ya algunas décadas, ha mostrado un gran desarrollo dada su capacidad de relacionar procesos y funciones con estructuras como la infraestructura de movilidad. Este concepto, concebido por Wolman en 1965, es fundamental para tratar de entender, desde un punto de vista cuantitativo, el desarrollo de ciudades y comunidades sostenibles (Kennedy et al., 2005). El metabolismo urbano puede definirse como “la suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, que dan como resultado el crecimiento, la producción de energía y la eliminación de desechos”.

Las cuatro grandes actividades urbanas: nutrir y recuperar, limpiar, residir y trabajar, y transportar y comunicar; según lo identificado por Baccini y Brunner (1991) se evalúan en términos de cuatro componentes principales del metabolismo urbano: agua, alimentos (biomasa), materiales de construcción y energía. Varios ejemplos demuestran parcialmente la integración de las perspectivas morfológica y fisiológica.

Recientemente se ha tratado de evaluar, cuantitativamente, elementos que normalmente son medidos de forma cualitativa como el bienestar de las personas (véase, entre otros Ness, B. et al, 2007). Esto tiene la finalidad de completar los estudios de sostenibilidad.

Así, la movilidad tiene un rol muy importante en esta visión dada su gran demanda de energía y relevancia en el crecimiento y desarrollo de las ciudades. También, se ha tomado como un aspecto determinante en la medición de calidad de vida de las personas por su impacto en la salud (calidad del aire), en los tiempos que se usan para esta actividad y que podría ser usados para el esparcimiento y por último, el confort, dado que es una actividad fundamental en la vida cotidiana de las personas que habitan en las ciudades.

Los debates recientes sobre el papel de las ciudades en la mitigación del cambio climático han desencadenado nuevos intentos de comprender conceptual y metodológicamente la interacción intersectorial y entre niveles de los actores inscritos. Dentro de estos debates, los geógrafos urbanos y económicos han adoptado cada vez más enfoques coevolutivos como los estudios sociales de la tecnología (SST o “estudios de transición”). Su petición de una mayor sensibilidad espacial del enfoque de transición ha dado lugar a propuestas prometedoras para adaptar las perspectivas geográficas a los estudios de casos sobre sostenibilidad urbana. Affolderbach, J. y Schulz, C. (2016).

Ciudad

El segundo concepto relevante para la concepción del presente trabajo es el de Ciudad. Este concepto es de gran importancia desde el punto de vista de las Ciencias de la Sostenibilidad, pero también es muy amplio y complejo.

Las áreas urbanas juegan un papel particularmente relevante, es ahí donde la demanda de recursos es mayor e impulsa la producción en todas partes del mundo.

La urbanización o crecimiento urbano, en número y tamaño de las ciudades, es clave para entender procesos asociados a la sostenibilidad a nivel global, pero con mucho énfasis en el ámbito local, llegando a constituir una heterogeneidad importante de diferenciación local dentro de una misma ciudad.

Las tendencias demográficas aumentan la presión de las ciudades sobre los recursos naturales. Las ciudades ya albergan a más de la mitad de la población mundial. Para 2030, se prevé que esa cifra alcance el 60 %, y los residentes urbanos representen el 91% del crecimiento del consumo mundial. Una mayor densidad de población significa una mayor demanda de transporte; eso podría conducir a mayores emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y agravar la contaminación.

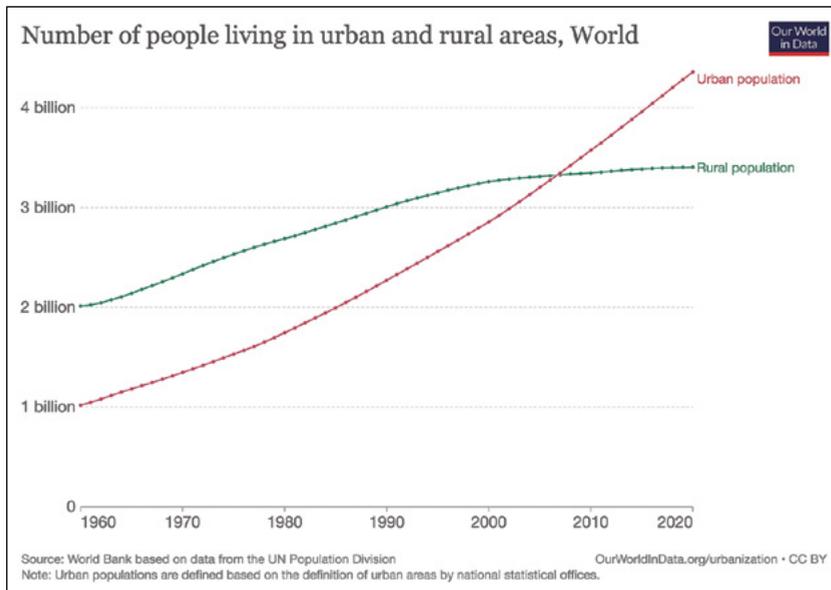


Figura 2. Tendencia de crecimiento de la población y su urbanización.

World population growth. Our world in data (2020).

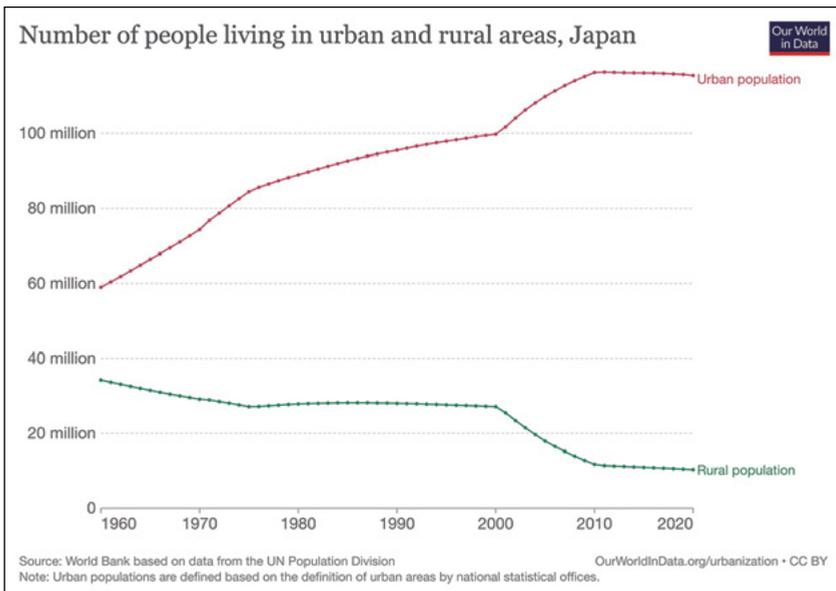
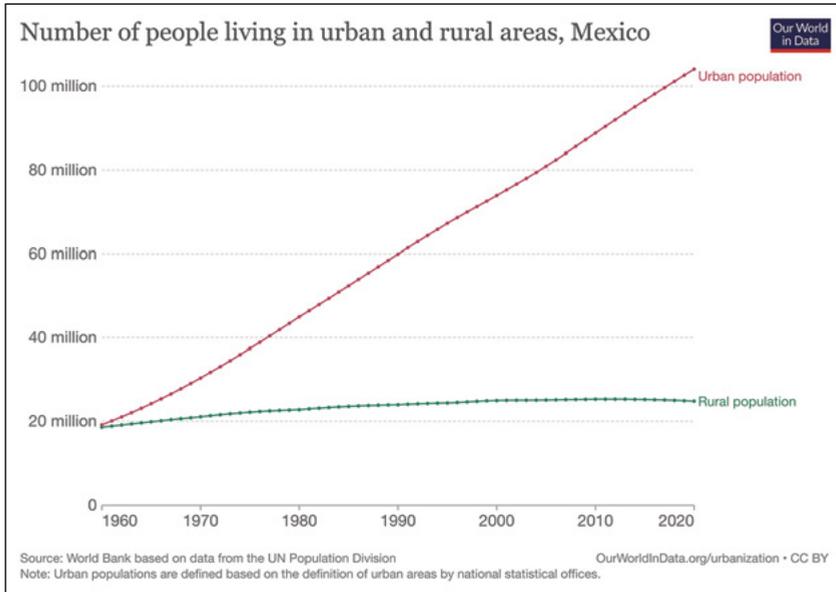


Figura 3. Población urbana de Japón y México.
World population growth. Our world in data (2020).

No se trata solo de mover personas. El comercio electrónico también está creciendo rápidamente (en un 85 % proyectado entre 2015 y 2020), lo que se suma a la demanda de transporte comercial urbano.

En la figura 4, se presenta una descripción general del proceso de la urbanización en todo el mundo; se extiende desde el pasado lejano hasta el presente y muestra las proyecciones de tendencias futuras.

La importancia de las ciudades en la lucha contra el cambio climático es reconocida tanto por organismos multilaterales (Comisión Europea y ONU Hábitat, 2016; Unión Europea, 2016; IEA, 2016; Banco Mundial, 2016) como por la comunidad científica (IPCC, 2016; Petit-Boix et al., 2017; Wright et al., 2011). En 2008, en la 14^a Conferencia de las Partes (COP14, Poznan, Polonia), la Red de Gobiernos Regionales por el Desarrollo Sostenible (nrg4sd), a través de una propuesta de la Delegación Catalana (la denominada “Enmienda Catalana”), solicitó a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para reconocer el papel de la escala subnacional en la lucha contra el cambio climático.

Las ciudades tienen un gran impacto al medio ambiente y la inequidad social urbanas mucho mayor que en las comunidades rurales. Aún considerando a las ciudades un sistema socioecológico, genera carencias e inequidad acentuando el impacto de cualquier conflicto socioecológico como sucede en muchas partes del mundo.

Para el desarrollo de las ciudades es importante diferenciar los conceptos de espacio y territorio, dado que tienen implicaciones diferentes al abordar algún tema en particular. Al hablar de territorio se consideran límites, en su mayoría imaginarios dado que estos son de índole administrativo. Por otra parte, el espacio, es considerado el lugar en donde suceden las cosas, puede ser de naturaleza biofísica o social.

Estas condiciones, pueden ser mejor entendidas partiendo de la definición del espacio, como lugar en dónde suceden cosas (lo social). El espacio no se configura de manera natural, sino que es el producto de relaciones políticas, económicas y sociales concretas. Ahora bien, el espacio no es únicamente producto, sino que forma parte del proceso de producción. Es así como, para H. Lefebvre (1974), existe un desarrollo paralelo entre la hegemonía del capitalismo y la producción del “espacio abstracto”. Al igual que el espacio abstracto, el capitalismo crea homogenización, jerarquización y fragmentación social. Lo que genera las escalas y los niveles en los que puede ser definido o caracterizado un espacio. Introduce la abstracción y fragmentación del territorio como un proceso lineal a diferencia de Foucault, que define el proceso como cíclico (Foucault, M. 2011).

Esta visión de Foucault de los procesos como cíclicos, propone que es ahí en donde se crea, se destruye se resignifica el espacio como parte de estos procesos cíclicos. La historia como proceso en la definición de un territorio es determinante debido a que, durante el paso del tiempo, definido y parametrizado por la escala temporal, se crea la base de la que parten los cambios o la permanencia (evolución) de lo que sucede en el espacio o el territorio.

La dinámica de patrones cíclicos de densificación y crecimiento horizontal (zonas periurbanas) recientemente ha cobrado gran para entender las ciudades como sistemas complejos entendiendo esta dinámica como de criticalidad basada en autoorganización (Krafta, R., & da Silva, 2020).

Desde esta visión, la ubicación ya no es la clave para explicar cómo funcionan las ciudades, sino las interacciones. Este es un mensaje antiguo, ya estaba en la agenda cuando comenzó la ciencia regional, Alonso, W. (1968). En el influyente libro de Mitchell y Rapkin (1954) titulado "Urban Traffic: A Function of Land Use", las redes y los flujos son el centro de atención. Estos argumentos han sido retomados recientemente por Batty, M. (2013).

El estudio de la evolución de las formas urbanas examina la relación entre la expansión urbana (la ampliación de un área urbana) y la densificación (el aumento en el volumen de la forma construida). La densificación involucra acreciones dispersas infinitesimalmente pequeñas, mientras que la expansión de la superficie urbana involucra la incorporación de grandes áreas, algunas veces en un entorno de informalidad, en los límites de una ciudad. Como resultado, la densidad de la forma construida crece constantemente hasta el momento preciso en que se agrega un suelo urbano, cuando cae repentinamente, solo para crecer nuevamente hasta que ocurre una eucatástrofe. El tamaño y la duración de las acumulaciones de suelo urbano exhiben distribuciones de ley de potencia tanto para el tamaño como para la duración, y que los puntos de quiebre que ocurren cuando la densidad cae debido a la acumulación de nuevo suelo urbano son predecibles. Estos resultados proporcionan evidencia adicional de que los sistemas urbanos se caracterizan por una criticidad autoorganizada, Krafta, R. et al 2020. La teoría SOC (Self-Organized Critically, por sus siglas en inglés) representa procesos dinámicos en los que una variable evoluciona hacia un punto crítico cuando, una vez alcanzado, pasa por un cambio cualitativo, una especie de catástrofe, volviendo a una posición detrás del punto de quiebre y reiniciando todo de nuevo. Bak P. (1996) En este mismo trabajo también se asume que el sistema de movilidad de las ciudades tiene un rol importante en esta dinámica, incluso en la criticidad de esta. Las puntuaciones de los indicadores alométricos y SOC refuerzan la idea de que las ciudades, al ser sistemas tanto espaciales como sociales, no son radicalmente diferentes de otros sistemas físicos.

Es probable que, para el estudio de la complejidad de las ciudades, basada en su criticalidad, sea necesario integrar en un mismo análisis los componentes espaciales, estructurales y funcionales, normalmente dejándolos implícitos o asumidos si tener los límites claros entre uno y otro. Estos límites son igualmente determinantes, desde mi punto de vista, para establecer la criticalidad de la ciudad como sistema; así como del sistema de movilidad de la ciudad en sí mismo.

Una ciudad es un sistema complejo compuesto a su vez por subsistemas igualmente complejos, desde un ladrillo hasta un distrito. El protocolo de la ciudad define la anatomía urbana distintiva de los ciclos en cualquier ciudad: agua, materia, energía, movilidad e información (City Protocol, 2015). Además, los cambios en el uso del suelo deben tenerse en cuenta en la etapa de evaluación de impacto Reap et al., (2008).

Todos los flujos que suceden en una ciudad contribuyen a lograr la función de la ciudad. Otro tema será cómo definir el límite de la ciudad (administrativo, geográfico, funcional, etc.).

Existen diferentes corrientes de conocimiento que intentan medir, en primer instancia, y evaluar el desempeño de una ciudad en cuanto a su sostenibilidad. Uno es el Análisis de Ciclo de Vida y otro es el Metabolismo Urbano. Ambos se enfocan tanto en consumo de recursos como en emisiones, ya que el desarrollo diario de las ciudades hacia una forma más sostenible podría ser cuantitativamente significativo para reflejarse en los indicadores globales, IEA, (2016).

Como herramienta de evaluación, el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) por sus siglas en inglés ha demostrado ser un buen instrumento para el diagnóstico de problemas ambientales. LCA es una herramienta holística que mide y evalúa, a través de un procedimiento paso a paso, diferentes impactos ambientales del sistema de estudio. Conociendo estas dos realidades, Alberti, J. (2019) plantea una pregunta: ¿por qué no ha habido desarrollos en la metodología LCA para adaptarla en la contribución a la evaluación y mejora del comportamiento ambiental de las ciudades y ayudar a los tomadores de decisiones a tomar acción a nivel de ciudad?

Un ejemplo para mostrar la importancia LCA es la electromovilidad. Si en el ciclo de vida (producción, uso y deshecho) de un vehículo eléctrico se elevan las emisiones de GYCEI en las fases de producción y de deshecho, no importa que en la fase de uso se pueda llegar a cero emisiones. Lo que se reduce en un lado se produce en otras fases de su ciclo de vida o la reducción en una fase no es lo suficientemente alta para compensar las demás fases y puede representar un costo mayor.

Probablemente, las complejidades tanto del método de evaluación como del sistema en estudio han sido un obstáculo para la realización de LCA de ciudad.

Algunos trabajos intentan allanar el camino para la futura aplicación de LCA de la ciudad definiendo los conceptos necesarios para desarrollar cualquier LCA como se describe en ISO 14044 (2006b) o ISO 14072 (2014). Se supone que la familia ISO 14040 y 14044 están orientadas al producto, sin embargo, el procedimiento establecido en estas normas ISO puede ser útil para manejar el desarrollo de LCA de sistemas complejos como las ciudades, (Alberti J. 2019).

Los métodos de evaluación de la sostenibilidad de las ciudades como metodologías de evaluación cuantitativa se utilizan cada vez más para establecer criterios para reducir los impactos ambientales y para implementar el ecodiseño o la ecoinnovación en diferentes tipos de sistemas.

En cuanto a los impactos, el foco se pone especialmente en las emisiones de CO₂ equivalente (CO₂-eq) Alberti et al., (2017); CDP (Carbon Disclosure Project), 2016; Cellura et al., 2018; Mirabella y Allacker, 2017; PAS 2070, 2014; WRI et al., 2014), que tienen relevancia a nivel mundial y sobre el uso del agua.

No obstante, otros impactos, como la acidificación, la eutrofización, el agotamiento abiótico, la toxicidad humana, etc. pueden tener una importante relevancia regional o local, tal y como indican diferentes iniciativas o normas (EN, 2011; Comisión Europea, 2012; ISO, 2017). LCA y Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) por sus siglas en inglés, Life Cycle Sustainability Assessment, son herramientas efectivas que evalúan diferentes sectores y coberturas geográficas a través de una perspectiva holística que evita el cambio de impacto ambiental (Ness et al., 2007). La generación de nuevos métodos desde una perspectiva de LCA para evaluar nuevos sistemas con una contribución de impacto significativa (por ejemplo, ciudades) mejoraría el papel de LCA en las evaluaciones de sostenibilidad (Petit-Boix et al., 2017) y en el desarrollo sostenible (Rebitzer et al., 2004). LCA se centra principalmente, en el aspecto ambiental de la sostenibilidad, mientras que los aspectos sociales y económicos rara vez se abordan especialmente debido a la etapa temprana de desarrollo de la Evaluación del ciclo de vida social (S-LCA) (Hellweg y Milà i Canals, 2014).

El LCA se acepta como útil en evaluaciones de sostenibilidad (Bare, 2014) y, en concreto, como un método exhaustivo para la evaluación ambiental de edificios (Cabeza et al., 2014) y barrios (Lotteau et al., 2015a). Es importante tener en cuenta que el LCA es útil no solo en los sistemas de edificación sino también en el sector de la construcción en general (incluida la ingeniería civil) (Cabeza et al., 2014). Desafortunadamente, el proceso de evaluación de los niveles superiores dentro del entorno construido (desde los productos de construcción hasta las áreas urbanas) es complejo y, en el caso de las evaluaciones urbanas, la literatura aún es escasa (Alberti et al., 2017; Mirabella y Allacker, 2017; Petit-Boix et al., 2017; Soust-Verdagner et al., 2016).

Estas herramientas, LCA y Metabolismo Urbano son muy útiles al momento de evaluar cuantitativamente el desempeño de una ciudad en cuanto a su sostenibilidad, pero las ciudades, como sociedades humanas, requieren más que eso para comprenderlas científicamente y gestionarlas en la práctica yendo más allá de las limitaciones de estas herramientas de evaluación cuantitativa. Las mayores dificultades para cualquier enfoque científico de las ciudades han resultado de sus muchas facetas interdependientes, como sistemas complejos sociales, económicos, de infraestructura y espaciales que existen en formas similares pero cambiantes en una amplia gama de escalas. Se deben de entender las propiedades sociales, espaciales y de infraestructura promedio de las ciudades como un conjunto de relaciones de escala que se aplican a todos los sistemas urbanos. Las medidas de eficiencia urbana, que capturan el equilibrio entre los resultados socioeconómicos y los costos de infraestructura, son independientes del tamaño de la ciudad y pueden ser un medio útil para evaluar las estrategias de planificación urbana. (Bettencourt, L. M. 2013).

Otro aspecto, estructural, que aporta al entendimiento de los procesos funcionales que suceden en el sistema de la ciudad, son las escalas. Entender las escalas para poder usarlas como herramienta para revelar la dinámica y la estructura subyacentes ha sido fundamental para comprender los problemas en todo el espectro de la ciencia y la tecnología. Este enfoque se ha aplicado recientemente a una amplia gama de fenómenos biológicos que conducen a una imagen cuantitativa unificadora de su organización, estructura y dinámica.

Los organismos como motores metabólicos, caracterizados por tasas de consumo de energía, tasas de crecimiento, tamaño corporal y tiempos de comportamiento, tienen una clara contrapartida en los sistemas sociales Levine, D. N. (1995).

Las ciudades como consumidoras de energía y recursos y productoras de artefactos, información y desechos a menudo se han comparado con entidades biológicas, tanto en estudios clásicos de sociología urbana como los de Levine, D. N. (1995), como en investigaciones recientes relacionadas con los ecosistemas urbanos y el desarrollo sostenible. Las analogías recientes incluyen ciudades como “sistemas vivos” u “organismos” y nociones de “ecosistemas” urbanos y “metabolismo” urbano ¿Son estos términos solo metáforas cualitativas, o hay sustancia cuantitativa y predictiva en la implicación de que las organizaciones sociales son extensiones de la biología, que satisfacen principios y restricciones similares? (Bettencourt, L. M. 2013).

Existe una gran complejidad y diversidad del comportamiento humano, la mayoría de estos indicadores se ocupan de los procesos temporales asociados con la dimensión social de las ciudades como espacios de intensa interacción en las actividades humanas. En términos de estos patrones cíclicos, se puede decir

que las ciudades son organizaciones auto-similares, lo que indica una universalidad de la dinámica social humana, a pesar de la enorme variabilidad en la forma urbana. Estos hallazgos proporcionan fundamentos cuantitativos para las teorías sociales del “urbanismo como forma de vida” (Bettencourt, L. M. 2013).

En términos de los enfoques de sostenibilidad urbana, estas dinámicas encontradas en las ciudades se amplían o estructuran junto con otra gama de temas, como la infraestructura y la movilidad, la construcción ecológica y la planificación de barrios, o la naturaleza urbana y los servicios ecológicos. Estos conceptos, han atraído el interés de los académicos durante más de tres décadas y más recientemente se ha hecho un gran esfuerzo por comprenderlas de una manera más integral procurando no aislarlas una de la otra.

Así, los debates recientes sobre el papel de las ciudades en la mitigación del cambio climático han desencadenado nuevos intentos de comprender conceptual y metodológicamente la interacción intersectorial y entre niveles de los actores inscritos. Dentro de estos debates, los geógrafos urbanos y económicos han adoptado cada vez más, enfoques coevolutivos como los estudios sociales de la tecnología (SST o “estudios de transición”). Su petición de una mayor sensibilidad espacial del enfoque de transición ha dado lugar a propuestas prometedoras para adaptar las perspectivas geográficas a los estudios de casos sobre sostenibilidad urbana. (Affolderbach, J. y Schulz, C. 2016).

Movilidad

Previo a que la sostenibilidad se convirtiera en un tema de discusión común a fines de la década de 1980, la necesidad de abordar una variedad de impactos de los sistemas de transporte era un componente clave de la planificación del transporte. Por ejemplo, Manheim (1979) escribió sobre la visualización de los sistemas de transporte como entidades holísticas, con un enfoque en soluciones multimodales que toman en cuenta consideraciones sociales, económicas, políticas, ambientales y de otro tipo. Schiller et al. (2010) sugieren que la aplicación y definición de sostenibilidad va más allá de la progresión técnica. El desarrollo del transporte sostenible involucra a la sociedad en general, incluidos aspectos de planificación, política, economía y participación ciudadana.

Banister et al. (2008), describen un paradigma de transporte sostenible compuesto por cuatro aspectos:

1. Acciones para reducir la necesidad de viajar;
2. Fomento del cambio modal;
3. Viajes cortos;
4. Mayor eficiencia.

En este mismo trabajo, Banister y colegas (2008) mencionan una posible aproximación a la movilidad sostenible basado en considerar a las calles como un espacio compartido que usan las personas para ir de un lugar a otro, sin importar si van en un vehículo, motorizado o no, o si van a pie. El espacio debe ser compartido y pensando siempre en tiempos de traslado razonablemente cortos según el modo de transporte. Incorporan en esta visión las ideas de ciudad con su dimensión social incluida. Y, por último, hacen énfasis en las jerarquías de los modos de transporte, poniendo a la movilidad peatonal y ciclista en la jerarquía más alta y al automóvil en la más baja.

Este marco puede aplicarse para clasificar políticas o proyectos en función de cómo promueven y apoyan el transporte sostenible. El transporte sostenible se define como un problema urbano crítico que se cruza con problemas globales complejos, como el cambio climático, así como con problemas locales como la salud humana (Kennedy et. al, 2015). Diversos trabajos enmarcan el transporte público sostenible como un equilibrio entre la economía, el medio ambiente y la sociedad, sin embargo, la diferencia está en cómo se desarrolla este equilibrio. Kennedy et al. (2005) sugiere cuatro pilares del transporte sostenible:

1. Gobernanza: “el establecimiento de organismos efectivos para la planificación integrada del transporte y del uso del suelo”;
2. Financiamiento: “la creación de mecanismos de financiamiento justos, eficientes y estables”;
3. Infraestructura: “inversión estratégica en grandes infraestructuras”
4. Barrios: “el apoyo a las inversiones a través del diseño local”.

La evolución del paradigma de desarrollo sostenible hacia la enumeración integrada de las áreas económicas, sociales y ambientales, las cuales en su conjunto impactan sobre la calidad de la vida humana, facilita una mejor articulación entre el desempeño económico, social y ambiental del sector transporte y el progreso hacia el desarrollo sostenible. En la actualidad, más que continuar sosteniendo y justificar el vínculo general entre transporte y desarrollo, hace falta identificar de manera concreta cómo y bajo cuáles condiciones el sector de transporte puede brindar una contribución necesaria al logro de los objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, Krueger, R., & Gibbs, D. (Eds.). (2007).

Una reciente propuesta de lineamientos para una movilidad urbana sostenible prioriza a peatones, ciclistas y transporte público dentro de las políticas públicas y hace énfasis en que los usuarios de automóviles deben de asumir el costo del daño ambiental y social del uso de estos (ITDP, 2012).

Por otro lado, existen trabajos como el de C. McKerracher (2016) con una perspectiva integral en la movilidad a futuro en donde se exploran tendencias socia-

les, económicas y tecnológicas y cómo trabajarán en conjunto para disrumpir la movilidad a nivel local. Las ciudades tomarán diferentes decisiones y rumbos basadas en sus condiciones locales. El desarrollo de las tecnologías de la información abre la puerta a múltiples plataformas de movilidad compartida que, a pesar de mostrar un crecimiento lento, tienen un gran potencial para intentar suavizar el problema de la congestión vehicular, Litman, T. (2000).

Actualmente pocas ciudades cuentan con una movilidad eficiente como Estocolmo y Ámsterdam con diferente énfasis en privilegiar el transporte público, el uso de la bicicleta y la peatonalización de vialidades. Otras ciudades están tomando direcciones diferentes en cuanto al equilibrio de estos tres componentes, Cohen, B., & Kietzmann, J. (2014).

Si se observa la movilidad desde la perspectiva de la ciudad es determinante considerar la conectividad, en principio entre los modos de transporte y posteriormente de estos con las estructuras sociales y económicas. Para analizar esta conectividad desde un punto de vista sostenible se debe de considerar la movilidad peatonal como punto de partida en ambos sentidos, hacia los demás modos de transporte y hacia los elementos sociales y económicos que conforman a la ciudad, Brenner, N., & Schmid, C. (2015). Entonces, partiendo del modo peatonal, y ponderando su conectividad hacia los otros modos de transporte considerados como sostenibles.

Existen dos factores determinantes para evaluar la conexión del TP, la distancia hasta la parada y los tiempos de espera, que normalmente son la mayor causa de incertidumbre y además son acumulables al tiempo de traslado del origen al destino. Stanesby, O., et al (2021), muestran que la mayoría de los pasajeros de autobús caminan hasta su parada, pero aproximadamente la mitad de los pasajeros de autobús estaban dispuestos a caminar más hasta su parada de autobús habitual si se mejorara la frecuencia, que en la realidad mejoraría los tiempos de espera y la certidumbre en cuanto al tiempo global del traslado, lo que permitiría una planeación más eficiente de los traslados. Esto también es muestra del importante potencial de salud pública como fuente de actividad física. Este mismo trabajo revela que los pasajeros estaban dispuestos a caminar un promedio de 265 m (aproximadamente 4 minutos de caminata) más hasta su parada de autobús si se mejoraba la frecuencia del servicio de autobús. En promedio, entre todos los pasajeros de autobús, la distancia adicional que los pasajeros podrían estar dispuestos a caminar hasta su parada de autobús puede contribuir a 26 minutos adicionales de actividad física de intensidad baja a moderada por semana por pasajero. Si bien ésta es una pequeña cantidad de actividad física absoluta, este aumento representa el 17 % a las cantidades recomendadas de actividad física semanal.

Igualmente, el estudio proporciona algunas ideas sobre quién puede estar dispuesto a realizar más actividad física relacionada con el transporte público, un comportamiento que se comprende relativamente poco. Los diferentes roles, responsabilidades y prioridades en las diferentes etapas de la vida pueden presentar barreras diferentes, y quizás mayores, para el uso del transporte público para los adultos mayores.

Por otro lado, al analizar a los peatones desde la perspectiva de su interacción con la infraestructura de movilidad en una ciudad, Gershenson, C., & Helbing, D. (2015) mencionan que pueden definirse dos tipos de peatones: pacientes y agresivos. Los peatones agresivos podrían obligar a un vehículo a reducir la velocidad, mientras que los peatones pacientes no lo harían, es decir, esperarían a que hubiera un espacio mayor. Sorprendentemente, si todos los peatones fueran del tipo paciente, en promedio, tendrían que esperar un período de tiempo más corto.

Cuando un peatón insistente reduce la velocidad de un vehículo, otros peatones que llegan también pasarán por la vialidad, y pasa mucho tiempo hasta que no llegan más peatones y los automóviles detenidos pueden acelerar de nuevo. Durante el tiempo de espera, sin embargo, se ha formado una larga cola de vehículos, de modo que no se produce un espacio lo suficientemente grande para cruzar la carretera entre los vehículos hasta que se haya disuelto toda la cola de vehículos. En consecuencia, los peatones tendrán que esperar mucho tiempo hasta que puedan volver a cruzar. En conjunto, es mejor si los peatones esperan a que haya espacios lo suficientemente grandes. A este fenómeno se le conoce como efecto “Lento es más rápido” SIF por sus siglas en inglés (Slow is Faster). Quizás el primer estudio formal del efecto SIF estuvo relacionado con los flujos de peatones, aunque puede aplicarse al comportamiento al manejar, en donde, un estado ordenado podría generar mayor fluidez de tráfico en las calles mitigando las aglomeraciones o congestiones de tráfico. Este fenómeno también puede ser aplicado al TP en dónde este orden repercutiría en una mejor estabilidad en las frecuencias de las rutas. Aplicado este modelando a multitudes, como partículas autodirigidas con “fuerzas sociales” interactuando entre ellas, se ha demostrado que cuando las personas intentan evacuar una habitación demasiado rápido, provocan obstrucciones intermitentes y un flujo de salida reducido en comparación con una evacuación más tranquila.

Como se mencionó anteriormente, en los sistemas de transporte público, es deseable tener avances iguales entre vehículos como los autobuses, es decir, lograr separaciones regulares de tiempo entre vehículos. Sin embargo, la configuración de avance igualitario es inestable. Forzar avances iguales minimiza los tiempos de espera en las estaciones. Sin embargo, el tiempo de viaje no se ve reducido con avances iguales, ya que los mismos avances implican ineficiencia

de los vehículos o dejar algunos pasajeros en las estaciones. Esto se debe a que existe una demanda diferente para cada vehículo en cada estación. Aún así, la auto organización se puede utilizar para regular los avances de forma adaptativa. Teniendo en cuenta solo la información local, los vehículos son capaces de responder de forma adaptativa a la demanda inmediata de cada estación. Con este método, también hay un efecto lento es más rápido o SIF, ya que los pasajeros esperan más tiempo en una estación, pero llegan a su destino más rápido una vez que suben a un vehículo porque no es necesario estar en ralenti para mantener los mismos avances (Gershenson, C., & Helbing, D. 2015).

De igual forma, para satisfacer la demanda del TP, aumentar el número de autobuses puede no ser la mejor opción para hacerlo de la forma más eficiente, en sí mismo o para el entorno de la movilidad y de la sostenibilidad ya que el aumento en el parque vehicular puede tener efectos negativos como mayor contaminación del aire y la generación de tráfico en la ciudad. Así, la eficiencia de la movilidad de una ciudad estará determinada no solo por la eficiencia del sistema de transporte público, sino por la eficiencia del conjunto de sistemas y modos de transporte de la movilidad urbana y su entorno.

El problema de tener una inestabilidad uniforme es que hace que el transporte sea ineficiente. Muchos vehículos se usan por debajo de su capacidad debido a la mala planeación de horarios y frecuencias y solamente agregar más vehículos no mejora la situación, ya que simplemente se genera congestión. Esto conduce a grandes desperdicios de infraestructura, tiempo y combustible, (Gershenson, C., & Pineda, L. A. 2009).

Para ello, pueden utilizarse herramientas que optimizan la oferta, optimizan la demanda de movilidad y mejoran la sostenibilidad, así como una amplia gama de modelos de negocio, innovaciones y tecnologías.

En este enfoque, los límites entre el transporte privado, compartido y público se desdibujan, y los viajeros tienen una variedad de formas limpias, económicas y flexibles para ir del punto A al punto B. La movilidad fluida podría ser más limpia, más conveniente y más eficiente que las opciones actuales, acomodando hasta un 30 por ciento más de tráfico y reduciendo los tiempos de viaje en un 10 por ciento. Se han identificado cinco indicadores para evaluar los sistemas de movilidad: disponibilidad, asequibilidad, eficiencia, comodidad y sostenibilidad. La movilidad fluida mejora los cinco. Las ciudades tienen la oportunidad de marcar la dirección hacia una movilidad fluida.

Incluso en ciudades donde las redes de transporte público están bien desarrolladas, los automóviles proporcionan una proporción significativa de pasajeros-kilómetro, a menudo más que los servicios de tren y autobús combinados. (Bouton, S., et al. 2017)

En este sentido, desde la sostenibilidad y los sistemas complejos, la criticidad de un sistema urbano, su sistema de movilidad, como una necesidad humana fundamental y un facilitador esencial de la prosperidad y dado que su paradigma actual no es sostenible, puede resultar clave para la mitigación de esta insostenibilidad. Los viajes en automóvil causan millones de muertes cada año, una cantidad significativa de emisiones de gases de efecto invernadero están relacionadas con el transporte y la congestión causa grandes pérdidas financieras. Sin embargo, hay esperanza en el horizonte: el sistema de movilidad global se encuentra en las primeras etapas de una transformación masiva, ya que las nuevas tecnologías permiten negocios relacionados innovadores y los legisladores buscan formas de fomentar una movilidad que sea más inteligente, más limpia e inclusiva.

El transporte es una parte esencial del desarrollo económico, social y sostenible de una ciudad que puede producir efectos tanto positivos como negativos sobre el medio ambiente y la calidad de vida dependiendo del nivel de desarrollo y las preferencias indicadas. Las interpretaciones modernas del desarrollo urbano sostenible requieren reducir el uso de automóviles privados mediante la mejora de la calidad de los servicios de transporte público. Por lo tanto, identificar las ineficiencias del sistema de transporte público ayudará a mejorar la gestión del servicio, ampliar la cobertura y aumentar el atractivo (confort-certidumbre) de los servicios de transporte público. Existe un acuerdo general de que un excelente servicio al cliente es una fuente de ventaja competitiva. La clave para brindar un servicio al cliente efectivo es la determinación precisa de las necesidades del cliente y la respuesta a ellas de manera consistente para asegurar su satisfacción, Susniene, D. (2012). El modelo SERQUAL, que mide la calidad del servicio, mediante las expectativas y percepciones de los clientes, en base a cinco dimensiones, que son; dimensión de fiabilidad, sensibilidad, seguridad, empatía, y elementos tangibles. El enfoque SERQUAL, en el caso de que la calidad del servicio se defina y se mida como la diferencia entre expectativas y percepciones, es el principal punto de partida de los intentos anteriores de encontrar posibles soluciones para mejorar los servicios de transporte público, Matsumoto Nishizawa, R. (2014).

La investigación y mejora de la definición de sostenibilidad que facilita el desarrollo sostenible del sistema de transporte requiere tomar en cuenta una gran cantidad de factores. Mantener la sostenibilidad del sistema de transporte

requiere desarrollar procedimientos de control del sistema de transporte, así como herramientas sólidas de medición y toma de decisiones. Hay una gran cantidad de estudios de transporte de pasajeros realizados recientemente en las ciudades europeas en un sentido amplio, desde comportamientos de los pasajeros hasta soluciones técnicas e implementación de dispositivos electrotécnicos, (Patlins, A. 2017). El análisis y la comparación de los sistemas de transporte en diferentes ciudades y países, así como el análisis de los requisitos futuros del sistema de transporte es el tema de muchas investigaciones en varios proyectos europeos.

Hay muchas definiciones de sostenibilidad, pero están dispersas en diferentes fuentes de información. No está completamente definido en la literatura principios del desarrollo sostenible del sistema de transporte público.

Las investigaciones modernas muestran que no es fácil encontrar una definición perfecta de sostenibilidad, especialmente para facilitar el desarrollo sostenible del sistema de transporte. La definición debe analizarse y mejorarse, así como formalizarse si es posible.

Los aspectos relacionados del desarrollo de los sistemas de transporte urbano con los Sistemas de tecnología de la Información están bien discutidos en la literatura, pero no desde el punto de vista del desarrollo sostenible. Tampoco hay una opinión común sobre los sistemas de seguridad del transporte público de la ciudad y el control del sistema de transporte público en su conjunto.

Es principalmente a través de la sostenibilidad y la eficiencia energética que es posible reducir la contaminación. Un objetivo clave es mejorar nuestra comprensión de cómo entender mejor la sostenibilidad y el desarrollo sostenible de los sistemas de transporte en la academia y la sociedad, independientemente de la parte tecnológica. ¿De qué manera se domina la sostenibilidad y cómo se puede lograr que este proceso sea más efectivo para todos y cada uno de los ciudadanos?

El desarrollo sostenible del sistema de transporte público es un aspecto de la sostenibilidad global. El sistema de transporte público puede ser sostenible debido al tipo de impacto que tiene sobre el medio ambiente y la sociedad. También puede ser un medio para ayudar a lograr la sostenibilidad en otros aspectos de la vida humana. La sostenibilidad del sistema de transporte público debe de ser evaluada desde los mismos ejes fundamentales de la sostenibilidad y sus tres componentes: medio ambiente, sociedad y economía.

Entonces, es posible representar la sostenibilidad del sistema de transporte público de la siguiente forma, Patlins, A. (2017):

PTSSD(ΔT) = < E1, Qs, E2, G > (ΔT) fórmula (1)

Donde:

PTSSD(ΔT) - desarrollo sostenible del sistema de transporte público en un período de tiempo (ΔT);

E1 - Sostenibilidad ambiental;

Qs - Calidad de servicio para los pasajeros, incluyendo nivel de seguridad, protección y comodidad.

E2 - Aspectos de sostenibilidad económica del transporte;

G - Influencia de la Gobernanza;

(ΔT) - Período de tiempo.

Como se mencionó anteriormente, en la práctica mundial, no se encuentra una solución analítica general de sistemas no lineales, por lo que es posible utilizar el método de intervalos, como unidad de medida para cada parámetro utilizando una evaluación subjetiva de los niveles.

Por ejemplo, la escala de evaluación se puede definir como una escala de 5 niveles. Para cada criterio del sistema descritos anteriormente:

1. las mejores condiciones;
2. buen estado;
3. estado normal;
4. mal, pero aún adecuado estado, la situación mejoraría;
5. muy mal estado; La situación mejoraría inmediatamente.

La gestión centralizada del transporte urbano de viajeros supone hacer un uso más eficaz de los recursos de transporte para proporcionar un mayor nivel de servicio a los pasajeros. El uso de tecnologías modernas de monitoreo y control de transporte integrado en el sistema de transporte inteligente ha recibido gran popularidad en todo el mundo. Tales sistemas son los medios de la reducción considerable de los gastos improductivos por el transporte y los aumentos de la productividad total del sistema de transporte global. El control del sistema de transporte público podría realizarse de acuerdo con el control automático; El esquema funcional de control del sistema de transporte se muestra en la figura 4:

Este tipo de control puede permitir planificar el funcionamiento sostenible del sistema de transporte de manera más competente, por supuesto, deben utilizarse los métodos de gestión correspondientes y el sistema debe funcionar de manera más efectiva.

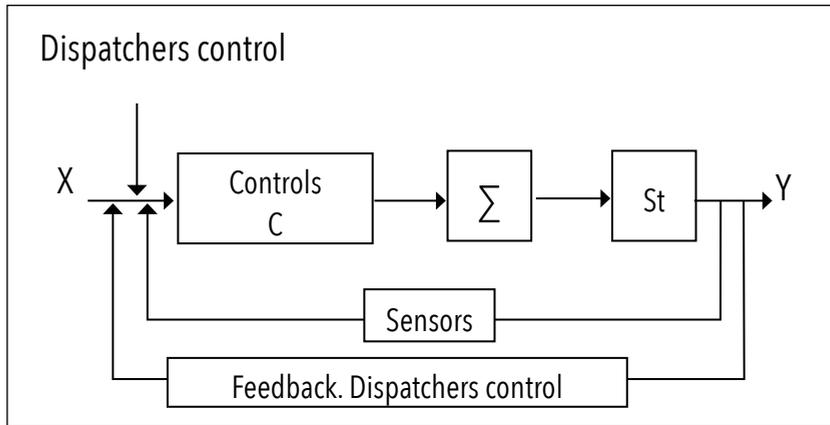


Figura 4. Un ejemplo del esquema funcional del desempeño del control del sistema de transporte para su sostenibilidad. Patlins, A. (2017).

A diferencia de las evaluaciones de sostenibilidad de sistemas de transporte completos (todos los modos), la evaluación de la sostenibilidad del transporte público generalmente requiere un enfoque más específico en los elementos que son relevantes para el transporte público, al tiempo que garantiza que se aborden los aspectos ambientales, sociales y económicos. Más adelante se presentan tres tablas de los indicadores propuestos en la literatura para la evaluación de la sostenibilidad del transporte público, Miller et al. (2016). Esto incluye indicadores que reflejan consideraciones de resultados triples (ambientales, sociales y económicos), además de indicadores de "efectividad del sistema" (que describen qué tan efectivo es un sistema de transporte público en términos de elementos específicos del transporte público). Se identifican un total de 7 indicadores ambientales, que abarcan aspectos como la energía, los contaminantes, el ruido y la ocupación del suelo. También hay 10 indicadores sociales (que cubren la accesibilidad, la asequibilidad y la seguridad), 8 indicadores económicos (que cubren los costos del sistema y del usuario, los subsidios y el tiempo de viaje) y 4 indicadores de efectividad del sistema (que cubren la ocupación del vehículo, la confiabilidad, las tasas de viaje y el modo). Si bien se identifica un número relativamente grande de indicadores en la literatura para evaluar la sostenibilidad del transporte público, las limitaciones tanto en la confiabilidad como en la disponibilidad de los datos pueden afectar la selección de indicadores en la práctica.

Marco teórico

Comprender fenómenos socioecológicos o sociotecnológicos del mundo real, requiere un punto de vista interdisciplinario, procesos transdisciplinarios de resolución de problemas y un aprendizaje autorregulado y autorresponsable. En consecuencia, para entender el tema de la movilidad en una ciudad, más allá de las capacidades analíticas y la planificación determinista de procesos, abordar el complejo problema desde la perspectiva del desarrollo sostenible requiere creatividad, competencias sociales y habilidades de comunicación específicas, para hacer frente al cambio dinámico que caracterizan los desarrollos en la mayoría de las facetas de la sociedad, la economía y la naturaleza en un entorno de ciudad.

La discusión sobre nuevos conceptos de movilidad se suele llevar a cabo desde una perspectiva muy técnica. Sin embargo, cuando nos enfrentamos a procesos de transformación complejos de sistemas socio técnicos, como el sistema de transporte, no solo nos enfrentamos a desafíos técnicos, sino también a cuestiones de aceptación del usuario, que incluyen la voluntad y la capacidad de los usuarios para cambiar patrones de comportamiento establecidos desde hace mucho tiempo.

En general, existen dos visiones para estructurar y entender los problemas. Una va de lo general a lo particular, de arriba hacia abajo, y la otra de lo particular a lo general, de abajo hacia arriba. Brake et al. 2012, sugirió que “es probable que se logren servicios de transporte flexibles más exitosos mediante el enfoque de consulta (de abajo hacia arriba) en un área amplia, lo que lleva a ajustes sustanciales en la red de servicios de transporte”. En consecuencia, la participación temprana de los usuarios y otras partes interesadas podría facilitar el desarrollo de sistemas que satisfagan las necesidades de los usuarios, así como fortalecer la disposición de los usuarios a cambiar y adaptarse al progreso técnico.

La construcción del marco teórico del presente trabajo concibe a la movilidad como un sistema dentro de otro sistema que es la ciudad. La integración de este subsistema dentro del sistema mayor se lleva a cabo en dos etapas: primero, la de la visión de las ciencias de la sostenibilidad y posteriormente, usado como soporte o complemento teórico, el de los sistemas complejos.

Para crear este modelo integral de movilidad dentro de estas etapas, se propone hacer uso de datos generados por diferentes plataformas tecnológicas y

de operación de los distintos sistemas de transporte que dan servicio en la ciudad para lo cual, se cuenta con colaboraciones con empresas como waze y del Instituto Estatal de Movilidad y Transporte del Gobierno del Estado de Sonora.

De la misma forma, se pretende hacer uso de estudios y documentos que son caracterizaciones de la infraestructura, la percepción (encuestas), la oferta y la demanda de los sistemas de transporte en las Ciudades y Zonas Urbanas. Esta información será integrada en una matriz que permita la creación de índices e indicadores para la evaluación del estado de la Sostenibilidad de la Ciudad con la posibilidad de hacer un comparativo contra otras ciudades.

Una de las bases en las que se fundamenta la visión de sostenibilidad de la movilidad de la ciudad es la presentada en la Resolución aprobada por la Asamblea General el 23 de diciembre de 2016 referente a la conferencia Habitat III y que hace a referencia a la movilidad en más de veinte acuerdos como un factor importante en el desarrollo urbano sostenible.

Con estas bases y considerando a los sistemas de movilidad urbana como un claro ejemplo de un sistema complejo -ya que tienen componentes muy diversos en diferentes escalas y niveles- debido a la conectividad operativa y de conducta humana que establece vínculos entre variables generando grandes volúmenes de información emergente, esta información debe tomarse en consideración como la influencia de la morfología urbana y el comportamiento humano en la demanda de transporte y espacio público y la oferta de opciones. Esta oferta debe tomar en cuenta la conectividad, con lo que se conoce como tramos de primera y última milla con el fin de tener la alternativa de la movilidad activa y que ésta tome relevancia en el estado de la sostenibilidad de la movilidad en una ciudad y así, promover la integración territorial.

Un aspecto determinante en la evaluación del sistema de transporte público desde el punto de vista de los sistemas complejos y con la visión de la sostenibilidad es tratar de entender o definir su robustez. Se puede decir que un sistema es robusto si continúa funcionando frente a las perturbaciones. La robustez, también llamada resiliencia, prevalece en los sistemas vivos y se desea en la tecnología, ya que complementa la adaptación al permitir que un sistema “sobreviva” a los cambios en el entorno antes de que pueda adaptarse a ellos. La robustez y la adaptación están profundamente interrelacionadas, ya que son formas diferentes de hacer frente a entornos impredecibles. La robustez es pasiva (el sistema resiste los cambios), mientras que la adaptación es activa (los cambios provocan una reacción en el sistema). La robustez puede promoverse mediante diferentes propiedades, como la modularidad, la degeneración y la redundancia, C. Gershenson, (2013). La modularidad y la redundancia son fenómenos, hasta cierto punto, fácilmente identificables en un sistema de transporte público.

Otra visión de sostenibilidad de relevancia para un sistema de transporte público es la gobernanza. La gobernanza, por medio de la transdisciplina, puede estar encaminada a la autonomía del sistema de TP que implica una cierta independencia del sistema a su entorno a través de una estructura transversal de su administración y de su operación, en este caso, incluye los aspectos político, administrativo y económico. La adaptación y la robustez son requisitos para la autonomía, ya que permiten que un sistema resista perturbaciones. Además, la autonomía de un sistema implica cierto grado de control sobre su propia producción y comportamiento.

Dentro de este marco, se establece la preponderancia del Transporte Público (TP) dentro del sistema total de movilidad de la ciudad partiendo de su eficiencia hacia la interacción con los otros modos de movilidad de la ciudad como el peatonal, la bicicleta y el auto particular.

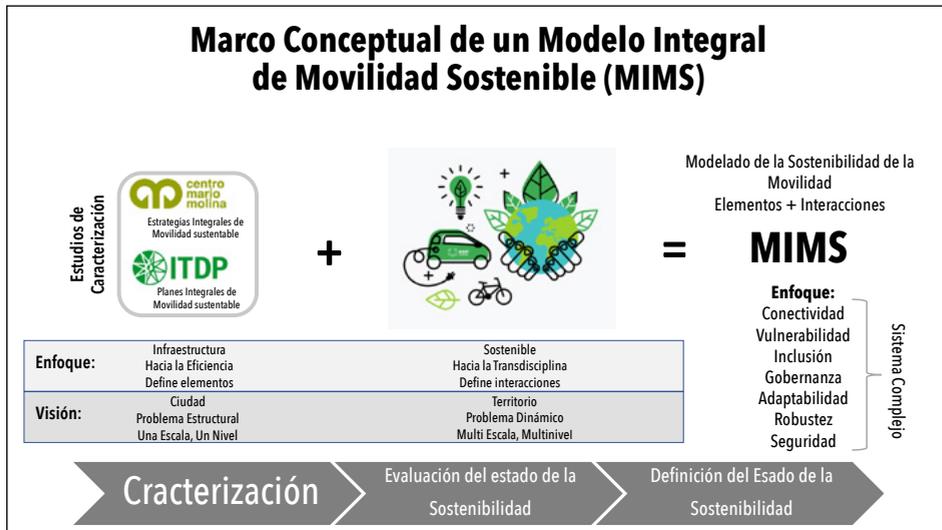


Figura 5. Marco conceptual del Modelado general de la movilidad y su sostenibilidad.

En primer lugar, es necesario entender el nivel de eficiencia del TP para que posteriormente, con esta información se logre integrar una visión holística de la movilidad en la ciudad tomando en cuenta este nivel de eficiencia para poder establecer las formas y los niveles de interacción del TP con los demás como se muestra en la Figura 6. La frecuencia en una ruta de TP se define como el intervalo de tiempo desde el paso de un autobús hasta el paso del siguiente en un lugar determinado (generalmente una parada).

Los viajes en transporte público tienen cuatro etapas o componentes que podemos ver en la siguiente tabla:

Tabla 1. Componentes del Transporte Público y factores para su análisis			
Etapa	Componente	Factor por considerar	Unidad de medida
1.	Recorrido del origen del viaje a la parada	ACCESIBILIDAD Distancia para recorrer en un modo complementario (normalmente a pie)	Metros/kilómetros Isócronas
2.	Tiempo de espera en parada	CONFORT Dependiente de la sincronización entre la llegada del usuario y el autobús a la parada de origen	Minutos. Frecuencias.
3.	Recorrido a bordo del TP de la parada origen a la para destino	SERVICIO Distancia a recorrer de la parada origen a la para destino	Kilómetros
4.	Recorrido de la parada destino al sitio final del viaje	COBERTURA Distancia para recorrer en un modo complementario (normalmente a pie)	Metros/kilómetros Isócronas

De las cuatro etapas del viaje en transporte público, la segunda (tiempo de espera) es la que tiene más incidencia en los usuarios debido a que es la de mayor incertidumbre. Las otras, para un usuario habitual se pueden considerar bastante estables dado que factores como el tráfico y la semaforización, de acuerdo con la hora del día pueden considerarse estables. Factores como accidentes y descomposturas siendo aleatorios, son de baja frecuencia.

Por ejemplo, se podría asumir que las frecuencias de todas las paradas de una ruta deberían de presentar una distribución normal, tomando en cuenta que los despachadores manden un autobús a recorrer la ruta cada periodo de tiempo igual. En la teoría, la frecuencia en todas las paradas debería estar muy cercana al promedio de todas las frecuencias de la ruta. Aún así, aunque se despachen autobuses en las mismas frecuencias de tiempo, existen factores que pueden afectar estas frecuencias en las diferentes paradas de la ruta, como puede ser el tráfico, la alta demanda de usuarios en una parada determinada, la forma de manejar del conductor entre otras. Esta variabilidad de la frecuencia podría ser relevante para entender y evaluar el rendimiento de la ruta en general, Yang, Y. et al, (2013). Esto se podría evaluar usando esta metodología, comparando la distribución de probabilidades de frecuencias de sistemas de transporte público de una ciudad o comparando esta distribución en diferentes ciudades del mundo.

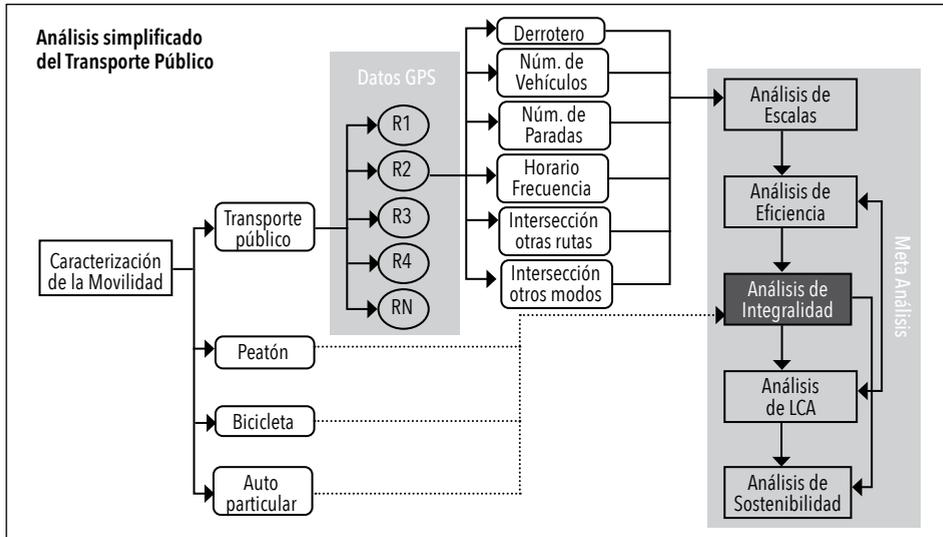


Figura 6. Modelo general de análisis. En este diagrama del análisis se ubican los diferentes componentes que serán considerados de acuerdo y dependiendo de la disponibilidad de la información para cada uno de los componentes.

A partir de la conceptualización operativa del sistema de movilidad de una ciudad, se lleva a cabo la construcción de un árbol de causa efecto del problema que representa la insostenibilidad del transporte público en una ciudad y ayuda a entender y visualizar las posibilidades de mitigación del problema de manera concreta y tangible, ayudando a que la intervenciones en el sistema y su infraestructura sean más eficientes en cuanto a su costo-beneficio pero con la efectividad en una visión de sostenibilidad.

Esta construcción es una primera aproximación al problema que se va a abordar. Esta metodología, usada por Martínez, R., & Fernández, A. (2008) para temas sociales, permite desde un principio, ubicar los componentes que podrían estar causando el problema (causas). Posteriormente, las consecuencias del problema se relacionan a estas causas, incluso en varios niveles, lo permite tener siempre visible el posible origen de una consecuencia, aunque se encuentre a dos o tres niveles de la causa origen. Este árbol, al final, después del análisis permitirá, por medio de un árbol de soluciones, identificar acciones concretas a cada una de las causas y evaluar el efecto en cada nivel de consecuencias Hernández-Hernández, N., & Garnica-González, J. (2015).

En la siguiente página se presenta una aproximación usando la construcción de un árbol de problema.

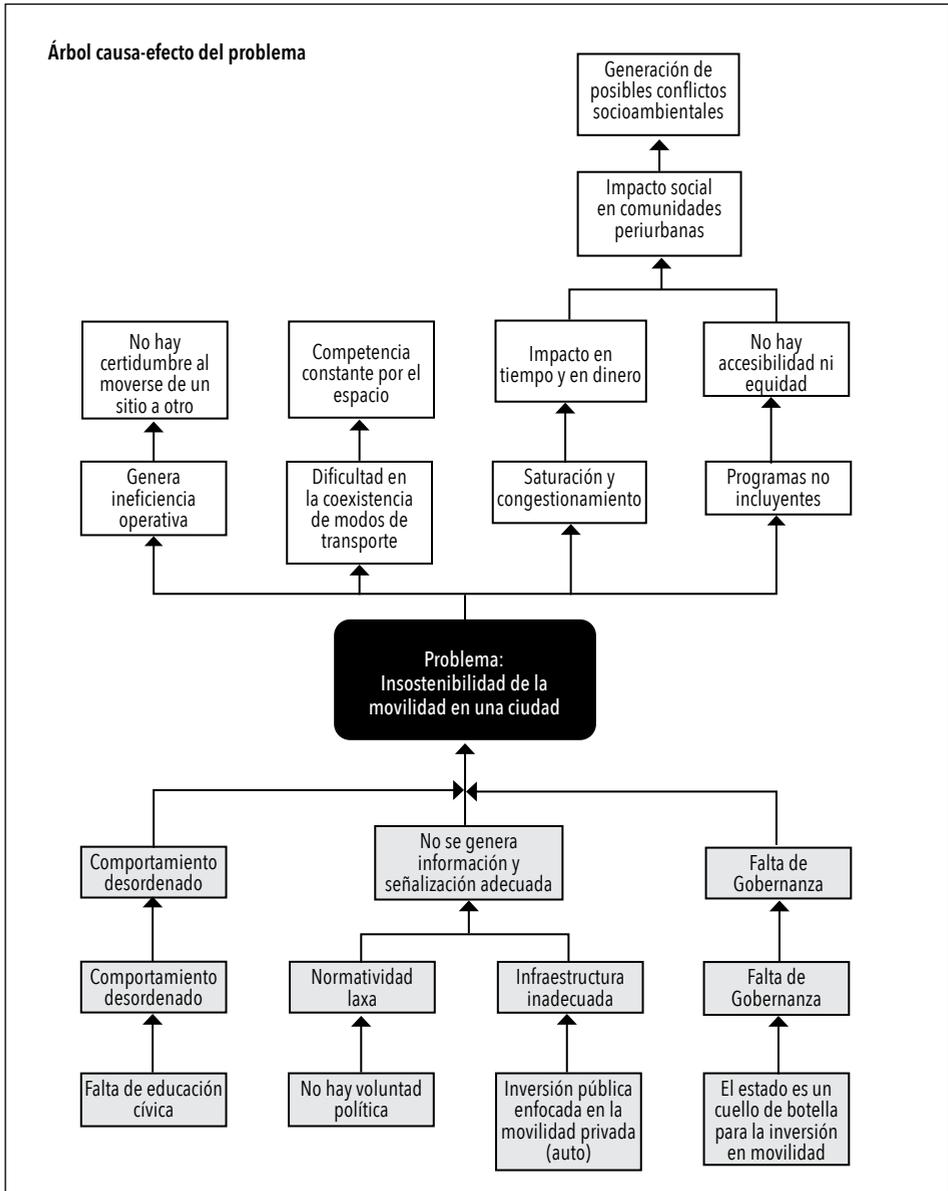


Figura 7. Árbol de problema. Este árbol consta de tres niveles, tanto para las causas como para las consecuencias.

Métodos

La metodología propuesta es cuantitativa y se basa en datos de posicionamiento global (GPS) de los autobuses del sistema de TP de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Estos datos se generan en un sistema de operación y monitoreo complementado por la aplicación móvil (APP) UNE para los usuarios del transporte como un servicio adicional. Estos datos fueron proporcionados por el Instituto de Transporte y Movilidad del Estado de Sonora (IMTES).

Aunque la metodología, como lo refiere el marco teórico, tiene una visión “de arriba hacia abajo”, (top-down) debido a que lo que se busca es conocer la integralidad de la movilidad de la ciudad basado en la operación del TP, también se podría abordar con una visión de “abajo para arriba” (bottom-up) partiendo de la participación de actores como los usuarios, los operadores y la administración gubernamental. Esto podría ser de mucho interés pensando en la continuidad del trabajo en otro periodo de estudio distinto, con metodologías cualitativas basadas en la transdisciplina.

A continuación, se describen los seis pasos de la metodología que se llevaron a cabo en la investigación:

1. El primer paso es llevar a cabo la minería de datos de los archivos recibidos.
2. El segundo paso es seleccionar el periodo de tiempo para el análisis de los datos con el fin de homogenizar los datos de los diferentes archivos en este mismo periodo. En este caso se seleccionó el periodo de tiempo del jueves 1º de septiembre del 2022 al 8 de septiembre del mismo año. Se seleccionó este periodo de tiempo para poder visualizar la dimensión del impacto en el sistema de TP del regreso a clases.
3. El tercer paso es seleccionar dos rutas, que por su configuración y cobertura tuvieran un rol importante en el funcionamiento del sistema de TP de la ciudad. Se seleccionaron en primer lugar la ruta La Manga, esta ruta cruza toda la ciudad de oriente a poniente. En segundo lugar la ruta Periférico (04), esta ruta cruza toda la ciudad con un recorrido de norte a sur. Ambas rutas, como la mayoría, pasan por el centro de la ciudad.
4. El cuarto paso, teniendo los datos de estas dos rutas en los archivos con un formato y estructura que nos permitiera calcular las frecuencias por ruta y por día se procedió al cálculo de frecuencia definida como el in-

- tervalo de tiempo desde el paso de autobús hasta es paso del siguiente que llega a un lugar determinado (generalmente una parada).
5. El quinto paso es analizar las frecuencias por medio de una Distribución de Probabilidad Gamma.
 6. Con este resultado, se hace un análisis puntual utilizando auditorías de seguridad vial realizadas en el último año por el IMTES para observar el comportamiento de los diversos modos de transporte y su correlación en estos sitios en particular.

Teniendo estos pasos se pueden cubrir los análisis del meta análisis que se propone en el Modelo presentado en la Figura 6 (Análisis de Escalas, Análisis Eficiencia, Análisis de Integralidad, Análisis de LCA y Análisis de Sostenibilidad). Para el Análisis de LCA se propone usar el resultado del Análisis de Eficiencia y para el de Sostenibilidad se propone utilizar la Fórmula 1 asignando, en la medida de lo posible valores cuantitativos a cada variable.

Existen diversos trabajos sobre movilidad basados en datos de GPS para analizar el rendimiento del sistema de transporte público, como el de Yang, Y. et al, (2013). En este estudio se hace un ajuste de una familia de distribuciones gamma de tres parámetros para los avances en las paradas a lo largo de una línea de autobús. La evolución de los parámetros demuestra puntos críticos en la línea donde el agrupamiento de autobuses aumenta significativamente. Además, este análisis permite diferenciar los problemas asociados con la variación de la demanda de pasajeros de las incertidumbres asociadas con las condiciones del tráfico.

También Byon, Y.-J., et al, (2011) en donde abordan el fenómeno de amontonamiento de autobuses en un sistema de transporte público (bunching) que se refiere a una situación en la que varios autobuses consecutivos se agrupan con intervalos de tiempo cortos entre ellos, lo que resulta en tiempos de espera más altos para los pasajeros. Además, si los autobuses llegan a las paradas de autobús con intervalos variables, incluso si no hay una acumulación significativa de autobuses consecutivos, los tiempos de espera de los pasajeros pueden aumentar debido a la variación de los intervalos. Por otro lado, Cortés CE, et al (2011) propone un marco en dónde se pueda evaluar el desempeño a cada ruta de autobús como un todo, así como a segmentos de longitud arbitraria, y se puede dividir en intervalos de tiempo de duración arbitraria, todo usando datos de GPS de los autobuses.

Usando los conceptos de los tres trabajos mencionados anteriormente, se hace un análisis de configuración de todas las rutas para poder determinar, con datos GPS las frecuencias de cada una y posteriormente de las paradas que componen a las rutas.

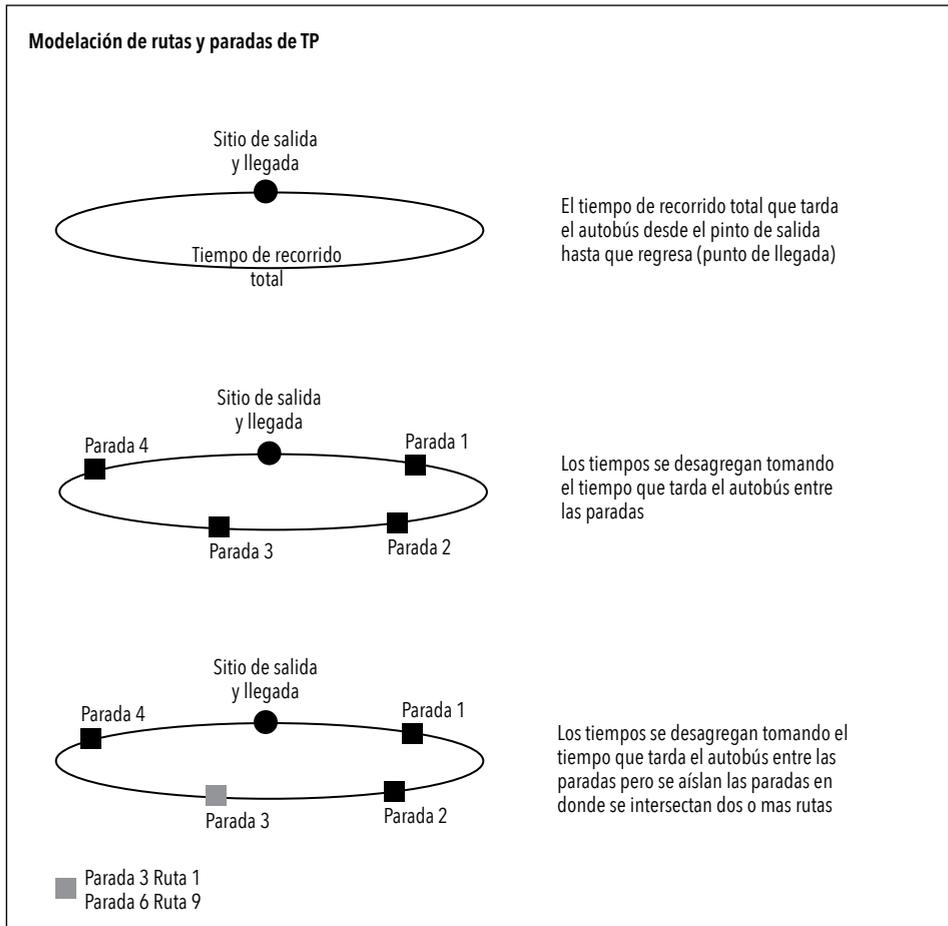


Figura 8. Modelado de rutas de Transporte Público.

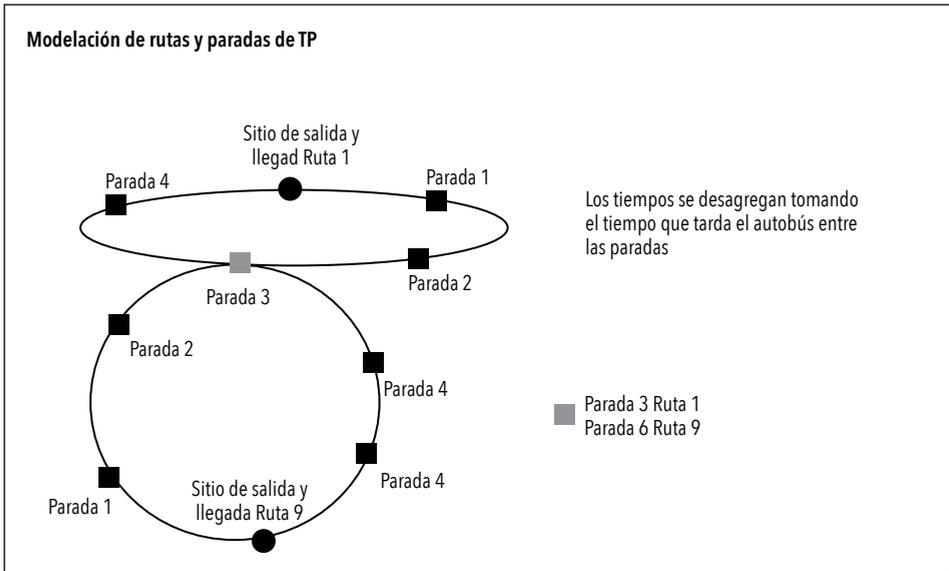


Figura 9. En estas paradas, en donde se interseccionan dos o más rutas, las frecuencias se consideran para cada ruta. En caso de tener el dato de asignación de rutas para cada vehículo se separan. En caso de que no exista dicha información se hará una división lineal.

$$F = V/T/N$$

N=número de rutas que pasan por esa parada.

Se seleccionaron dos rutas de transporte público, que por su cobertura se consideran las de mayor influencia en la ciudad: la ruta de La Manga con 45.9 Kms y la ruta Periférico-04 con 53.7 Kms (dirección norte-sur y oriente-poniente).

Análisis de frecuencia total de rutas

Para este análisis se toma como punto de partida que las frecuencias totales de la ruta presentan una distribución normal. En la realidad esto no sucede, ya que ni los sistemas de transporte público más estrictos en cuanto a horarios y frecuencias no presentan este comportamiento, pero lo que se ha encontrado en diversos sistemas de transporte público como en la ciudad de Boston (Yang, Y. et al 2013) y China (Langfang, Jining, y Dalian), (Lu, H., & Shi, Y. 2007), es que presentan un comportamiento de distribución de probabilidad Gamma.

Para esto se tomó el archivo BusGeneralReport.csv para la primera semana de septiembre de 2021 (del 1 al 8 de septiembre).

En estos datos se detectaron anomalías que generan variabilidad con implicaciones en el análisis porque desde la perspectiva del IMTES, la programación de frecuencias tiene poco orden. Estas anomalías de datos que requirieron ajustes manuales como:

- Datos perdidos. El autobús funcionó, pero no se registró ya sea por error humano o falla del equipo de transmisión.
- Servicio cancelado. El autobús no funcionó debido a la indisponibilidad del conductor o del autobús.
- Averías. El autobús no llegó al punto de medición.
- Adelantamiento. Un autobús o varios autobuses llegaron fuera de la secuencia programada.
- Es muy importante hacer estos ajustes para evitar que esas anomalías se vean reflejadas como anomalías en los resultados, Trompet, M., et al (2011)
- Este archivo, es de los que fueron proporcionados por el IMTES y contiene datos de hora de salida, hora de llegada y tiempo total de recorrido (HH:MM:SS), así como la ruta y el número del autobús que hizo el recorrido.

Tabla 2. Campos de la Tabla original

BUS
RUTA
SERVICIO
RUTA
INICIO
SUB.ANT.S/SERV S/RUTA
SUB.ANT.S/RUTA
PI1 hora
PI1 SUBIDA
PI1 VEL.km/h
PI1 PASAJ.
PI2 hora
PI2 SUBIDA
PI2 VEL.km/h
PI2 PASAJ.
PI3 hora
PI3 SUBIDA
PI3 VEL.km/h
PI3 PASAJ.
PI4 hora
PI4 SUBIDA
PI4 VEL.km/h
PI4 PASAJ.
FIN
TIEMPO
KM
TRANF
SUBIDAS
PASAJ.MAXI
TPO PARO
VEL.MAX
VEL.MEDIA

Tabla 3. Campos seleccionados de la tabla previa (en verde) y campos adicionales para cálculo de frecuencias (en amarillo)		
Campo	Nombre	Descripción
1	ID	Se llena con el número consecutivo de los registros de la tabla con la función (RowId)
2	ID_2	Se llena con el campo ID - 1
3	Bus	Número único del Autobús
4	Ruta	Nombre de la Ruta
5	Servicio	Ida o vuelta
6	RutaN	Número de Ruta
7	Inicio	Hora de inicio del recorrido
8	Fin	Hora de fin de servicio
9	Tiempo	Tiempo de recorrido
10	Kilómetros	Kilómetros recorridos
11	Vel Max	Velocidad máxima
12	Vel Media	Velocidad promedio
13	TM1	Tiempo de salida del primer autobús
14	TM2	Tiempo de salida del siguiente autobús.
15	FrecuenciaM	Frecuencia en minutos $F = TM2 - TM1$

Usando el campo **INICIO** se ordenó la tabla de manera cronológica. Una vez ordenada de esta manera se llenó el campo **ID** con el consecutivo de los registros usando la función RowId. Posteriormente se llenó el campo **ID_2** con la operación aritmética $ID - 1$. Co este desfase entre los dos campos ID e ID_2, se pudo hacer el cálculo de la diferencia de tiempo entre las salidas consecutivas de los autobuses.

Bus	Id	Id_2	TM1	TM2	Frec TM2-TM1
23	1	2	23	32	9
2	2	3	32	37	5
45	3	4	37	41	4
1	4	5	41	52	11
28	5	6	52	58	6

Figura 10. Procedimiento para cálculo de frecuencias en minutos

Con el procedimiento anterior se generó el campo Frecuencia (TM2 – TM1 en minutos). Con los datos de este campo se calcularon para cada ruta, de Ida y Regreso por separado, y para cada día. Con estos valores se calculó la Distribución de probabilidad Normal y de Distribución de probabilidad Gamma. Así, se calculó para cada día y para cada ruta, ida y vuelta por separado, los datos de:

- μ Media
- σ Desviación Estándar
- α Forma
- β Escala
- Γ Distribución

Función de densidad de probabilidad Gamma **fórmula (2)**

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

Función de densidad de probabilidad Gamma Estándar **fórmula (3)**

$$f(x, \alpha,) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x}}{\Gamma(\alpha)}$$

Análisis de frecuencia de paradas

Se crea un buffer (polígono) de 15 metros de radio en estas dos rutas para seleccionar las paradas que se cubren con los recorridos y posteriormente se seleccionan los puntos (coordenadas x,y) de GPS que estén dentro de estos buffers para tener solamente los registros de la cobertura de estas paradas. Dichos registros de GPS serán los que se consideren para el análisis de frecuencias de estas dos rutas.

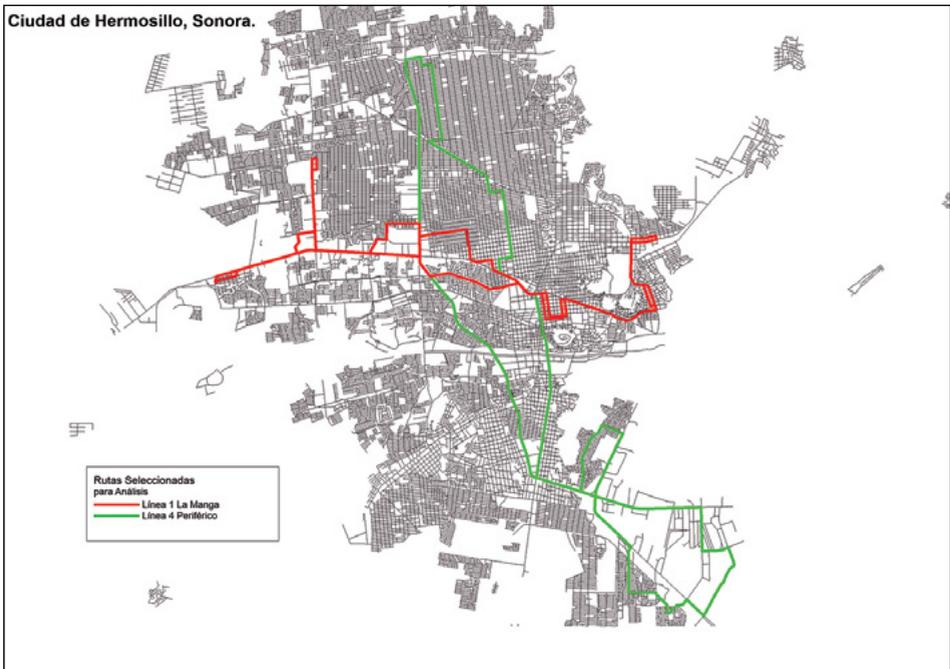


Figura 11. Cobertura de las rutas seleccionadas para análisis de interacción del TP con otros modos de transporte.

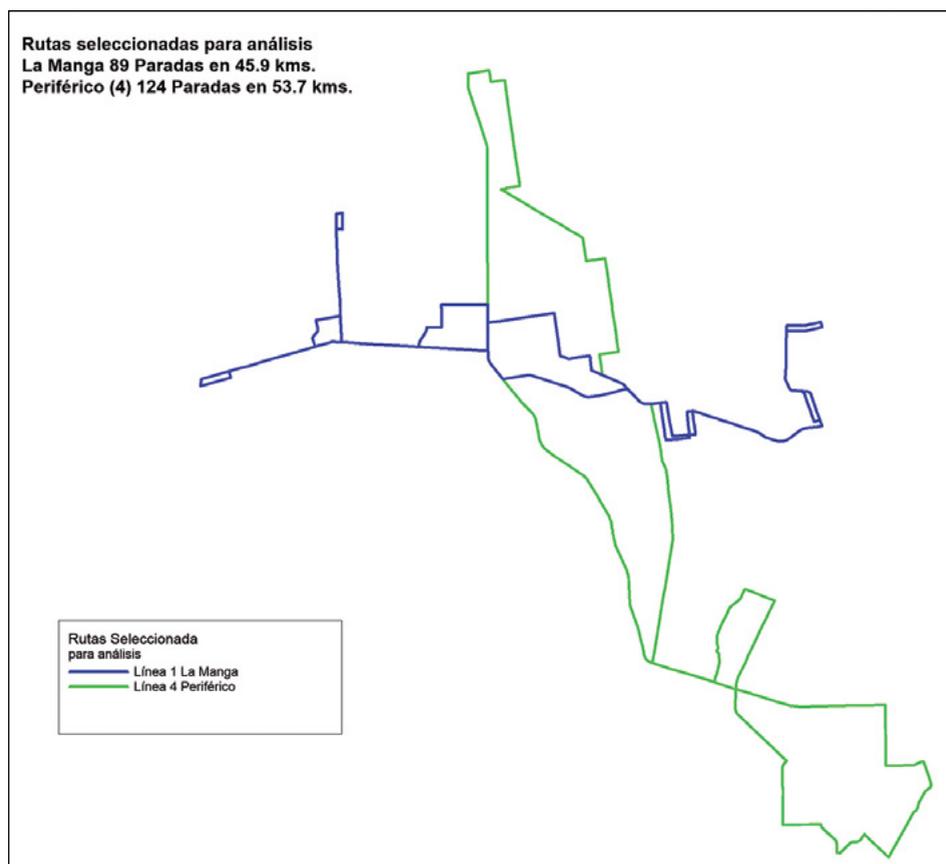


Figura 12. Rutas seleccionadas para análisis de frecuencias. La Manga y Periférico (04)

De estas rutas se tomaron una serie de paradas para hacer los análisis puntuales de interacción del transporte público con los demás modos de transporte, que en este caso son: automóvil privado o particular (AP), transporte no motorizado que incluye al peatón y a la bicicleta (PB).

Al no existir paradas fijas o establecidas, el ITMES marca una serie de paradas arbitrarias según datos obtenidos en campo. Las paradas registradas son muy cercanas ya que depende del conductor detenerse a recoger pasaje en el sitio en donde se le solicita, independientemente del lugar del recorrido en dónde se encuentre. Para tener un parámetro relativamente homogéneo, se seleccionaron paradas a distancias que van de 200 a 500 metros de distancia, que dependían del trazo de la red vial. Así, en la zona centro de la ciudad las distancias entre paradas son las más cortas y en la periferia de la ciudad son más largas. Este comportamiento también se observa en la distribución de las paradas “oficiales” incluidas en el sistema del ITMES.

Una vez seleccionas las paradas, se creó un radio de 17 metros, medida que permite observar la llegada y salida de un autobús a un sitio determinado. Estos radios son utilizados para seleccionar los datos GPS de los autobuses que llegan y salen a cada una de estas paradas.

Así, de los 2,184,242 registros de GPS para la semana de estudio, tomamos únicamente 26,103 registros para la Ruta La Manga y 36,639 para la Ruta Periférico (04) ubicados dentro de los radios de las paradas en cada ruta. Esta información se incluyó en el análisis de frecuencias.

Campos Tabla GPS
Parent fleet
Plate No.
Serial No.
Speed(KM/H)
Latitude
Longitude
Altitude(M)
Direction
Report time
Server time

Con esta información es posible conocer las frecuencias en cada parada mediante la siguiente fórmula (5):

<p>t_A Tiempo de llegada del bus i a la parada t_S Tiempo de salida del bus i de la parada ΔT Tiempo del Bus en parada</p> <p style="text-align: center;">$t_S - t_A = \Delta T$ fórmula (4)</p> <p style="text-align: center;">$f(R) = \sum_{t=1}^{\infty} (tA_{i+1} - tS_i) + \Delta T$ fórmula (5)</p> <ul style="list-style-type: none"> • $t_{A_{i+1}}$ = Tiempo de arribo del Bus 2 a la parada • t_{S_i} = Tiempo de salida del Bus 1 a la parada

Estas frecuencias asociadas a cada parada se comparan con la frecuencia promedio total de la ruta. Se esperaría que los promedios de cada parada sean muy similares al de la ruta total. En caso de que el promedio de una parada difiera en dos o más desviaciones estándar del promedio total, se marcarían como paradas críticas con muy mal servicio. Posteriormente se mapean para observar el comportamiento del servicio durante todo el recorrido de la ruta, tratando de identificar zonas del recorrido con diferentes niveles de servicio.

Se hace una evaluación del nivel de servicio mediante la observación de la desviación normal Z que mide las desviaciones estándar a las que se encuentra una observación respecto de la media, en este caso la observación en la frecuencia en una Parada (P_n).

- $\mu F(R_i)$ - Promedio de la frecuencia total de la ruta
- $F(P_n)$ - Frecuencia en la Parada n
- $\mu(P_t)$ - Promedio de la frecuencia de todas las paradas de la Ruta
- σ - Desviación estándar de la frecuencia de las paradas
- Z - Nivel de servicio en la parada n (P_n)

$$Z = \frac{FP_n - \mu FP_t}{\sigma} \dots \dots \dots \text{fórmula (6)} \quad \text{fórmula (6)}$$

En este seguimiento de paradas se consideran variables para definir la interacción de estos modos con el transporte público como la seguridad, el tráfico, el espacio y el servicio en cada una de las paradas seleccionadas para el análisis.

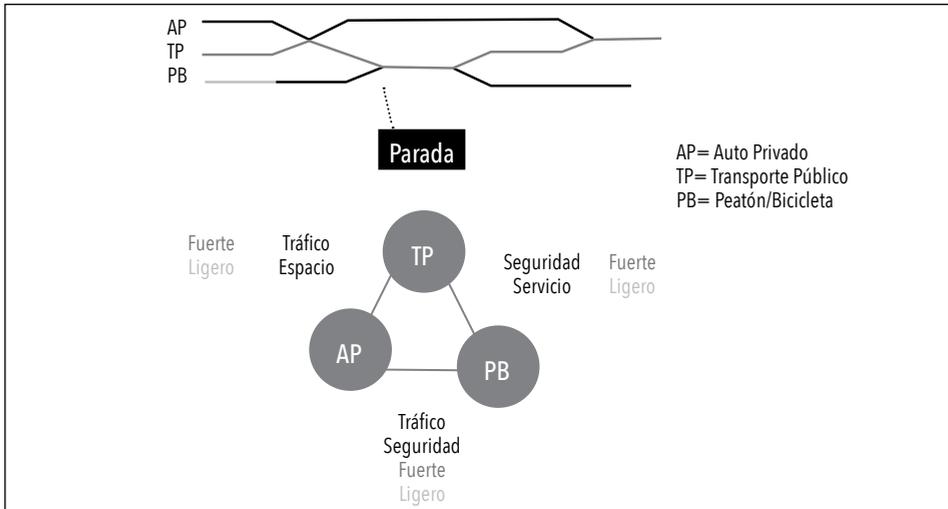


Figura 15. Análisis puntual de interacción del transporte público con el auto particular en la **parada 1**.

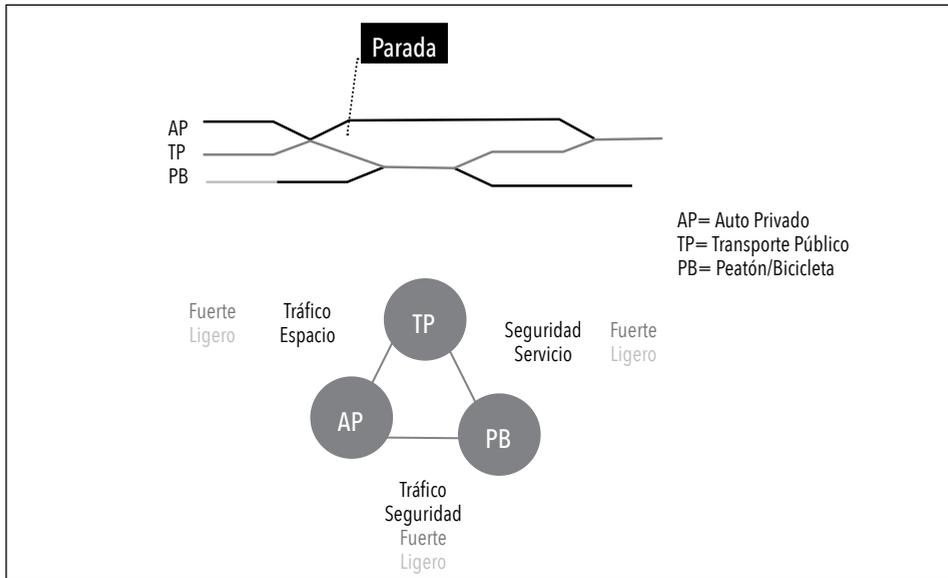


Figura 16. Análisis puntual de interacción del transporte público con peatones y bicicletas en la **parada 2**.

De la misma forma, para cada variable se establecen dos escalas, Fuerte y Ligero, con el fin de determinar la predominancia de cada variable en la intersección y poder crear una tabla comparativa por paradas de cada ruta de transporte.

Resultados

Caracterización del sistema de Transporte Público (TP)

Los datos de localización vía GPS brindan la oportunidad de diagnosticar el desempeño del servicio de Transporte Público de una ciudad. Las medidas usuales de la calidad del servicio se relacionan fuertemente con las variaciones de la frecuencia, el tiempo de viaje y la variabilidad del tiempo de viaje que se pueden estructurar en etapas del viaje (Tabla 1).

Los operadores de los servicios de TP normalmente están enfocados en optimizar los indicadores sobre la base de estos componentes y que incluyen elementos que no están bajo su influencia o control, como las condiciones del tráfico y las fluctuaciones de la demanda. En esta sección se muestra que el conjunto de datos de localización GPS proporcionados por el IMTES permite extraer información útil sobre los tres componentes de la medición de la calidad del servicio.

Para iniciar este proceso se creó una malla de hexágonos de 100 metros de diámetro para cubrir toda la mancha urbana de la ciudad de Hermosillo en una capa (layer) de MapInfo con la única variable de identificador único. A esta malla se le agregaron, a cada uno de estos hexágonos, valores de número de automóviles por manzana, número de bicicletas por manzana y número de rutas. Los datos de autos y bicicletas por manzana se tomaron del Censo 2020 de INEGI utilizando la suma proporcional de polígonos de hexágono y manzanas. Para el caso del número de rutas, dado que son una geometría vectorial, se hizo un conteo del número de rutas (vectores) que pasan sobre cada uno de estos hexágonos.

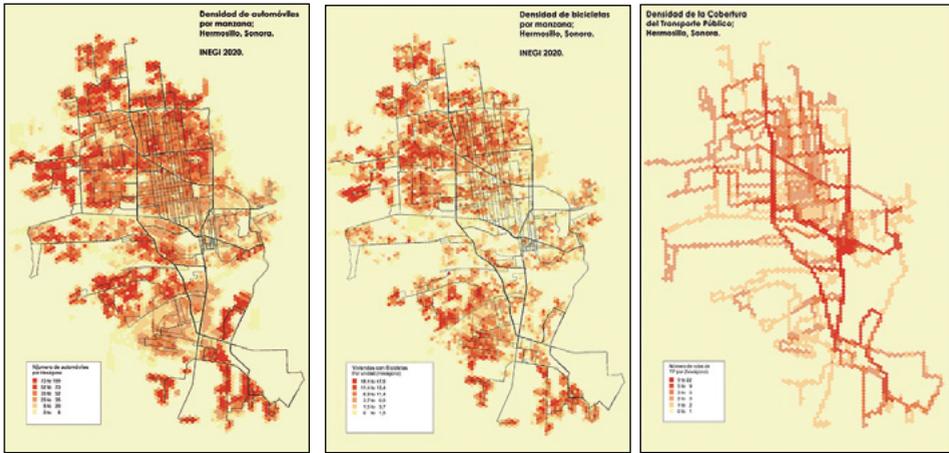


Figura 17. Caracterización de la cobertura de la movilidad en la ciudad de Hermosillo (Autos, Bicicletas y TP)

Utilizando los vectores de las dos rutas seleccionadas para el análisis se crearon buffers de 150, 250, 500 y 750 metros. Estos buffers se superpusieron a la capa de hexágonos para poner la distancia a la que se encontraban del derrotero de la ruta analizada. Posteriormente se eliminaron los hexágonos con valores cero, quedando únicamente hexágonos con valores de 150, 250, 500 y 750. Con los datos en esta capa se crean los mapas de accesibilidad o cobertura de cada una de las rutas en la ciudad. A continuación, se muestran estos mapas (Figura 18 y Figura 19).

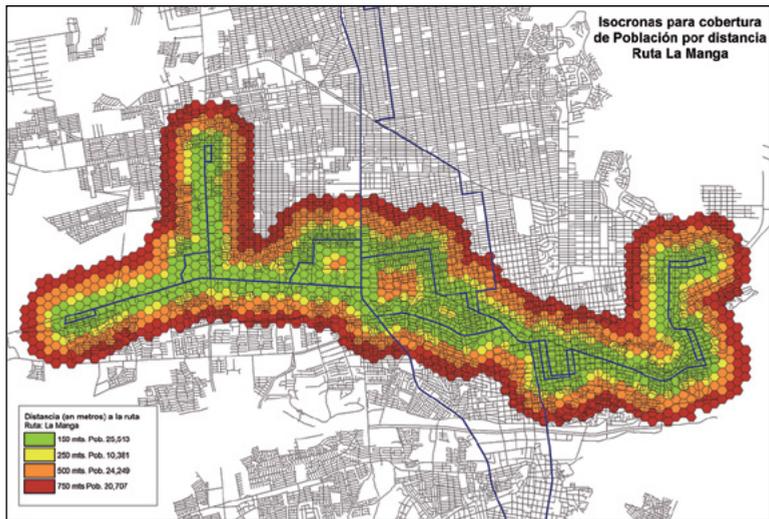


Figura 18. Mapa de Distancias al trazo de la Ruta La Manga y su cobertura de población



Figura 19. Mapa de Distancias al trazo de la Ruta Periférico (4)

Datos GPS

Como se mencionó anteriormente, el IMTES proporcionó para el presente trabajo los datos de localización GPS de los autobuses que operan en el sistema de Transporte Público. Los datos recibidos corresponden al mes de septiembre del 2022. Los datos de estos archivos tienen su origen en el sistema de monitoreo y operación del transporte público de Hermosillo conocido como UNE (Sistema de Transporte Integral del Estado de Sonora). El contenido de datos por día se presenta en la Tabla 5:

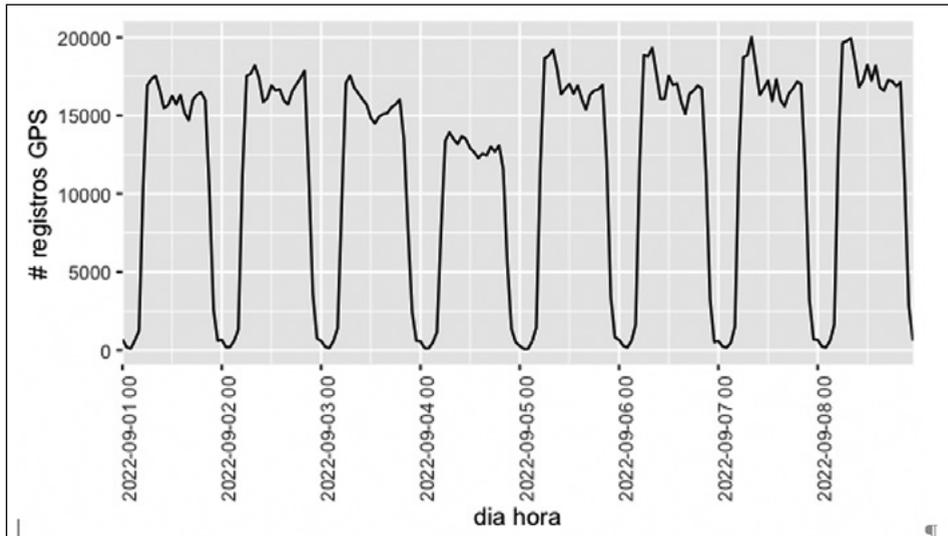
	Fecha	Número de registros por día
Jueves	1 de septiembre del 2022	269,337
Viernes	2 de septiembre del 2022	283,426
Sábado	3 de septiembre del 2022	258,172
Domingo	4 de septiembre del 2022	212,026
Lunes	5 de septiembre del 2022	286,912
Martes	6 de septiembre del 2022	286,714
Miércoles	7 de septiembre del 2022	289,267
Jueves	8 de septiembre del 2022	298,388
	Total de la semana	2,184,242

Fuente: IMTES 2022.

En este conjunto de datos se encuentran registros de GPS para 297 autobuses diferentes en esa semana (1 al 8 de septiembre de 2022).

En principio, se seleccionaron los datos GPS de la primera semana, del día 1º al día 8 de septiembre; este rango de datos fue acordado con la Dirección de Movilidad del Instituto de Movilidad y Transporte del Estado de Sonora para que el análisis se hiciera con base en los datos de los últimos días del periodo vacacional y los primeros días del regreso a clases. Cabe señalar que en ese periodo iniciaron las clases presenciales en todos los niveles educativos que se imparten en la ciudad de Hermosillo.

Los datos fueron agrupados por hora y su composición temporal se muestra en la siguiente gráfica (Gráfica 1).



Gráfica 1. Distribución por día y hora de la flota vehicular del TP de Hermosillo, Sonora. Total de la muestra de los ocho días, inicia jueves 1 de septiembre al jueves 8 de septiembre (24 horas por día).

Posteriormente, de estos registros, por medio de los buffers creados para las paradas de las rutas seleccionadas mencionadas en el apartado de metodología, se separaron los registros incluidos únicamente en estos buffers.

De esa muestra se tomaron los datos de dos rutas, Ruta La Manga y Ruta Periférico (04). Los datos resultantes de esa separación fueron:

Número de paradas 2,926 en total y 664 en el buffer de las dos paradas. Después de la estandarización de distancias entre paradas se obtuvieron 84 paradas para la ruta de La Manga (01) y 122 paradas para la ruta de Periférico (04). En la ruta La Manga, en sus 84 paradas se obtuvieron 24,162 registros del GPS. A estos registros se les agregó un campo con el número consecutivo de las paradas. Estos registros se analizan con los campos de número de placa, fecha, hora y consecutivo para poder determinar la ruta y sus frecuencias. Para la ruta Periférico (04), en sus 122 paradas se obtuvieron 34,336 registros del GPS. Al igual que para la ruta de La Manga, a estos registros se les agregó un campo con el número consecutivo de la parada correspondiente y también se analizaron con el número de placa, fecha y hora para obtener sus frecuencias.

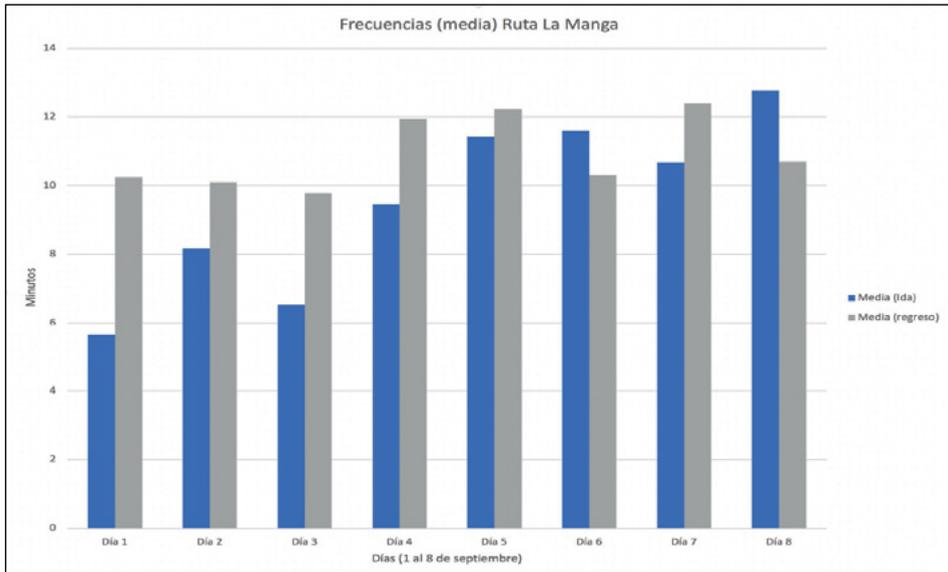
Tabla 6. Datos para proceso de análisis de frecuencias			
Ruta	Paradas	Registros GPS en paradas	Distancia de recorrido
La Manga	84	24,162	45.95 Kms.
Periférico (04)	122	34,336	53.71 Kms.

Para la ruta La Manga, en promedio es atendida por 7 autobuses que dan 6 vueltas durante el día, en suma, se completa el circuito 41 veces por día en promedio. Para la ruta Periférico (04) el promedio es de 16 autobuses que dan 7 vueltas al día en promedio cada uno, en suma, en esta ruta se completa el circuito 112 veces al día en promedio.

Resultados de la distribución de probabilidad Gamma de frecuencias de las rutas La Manga y Periférico (04)

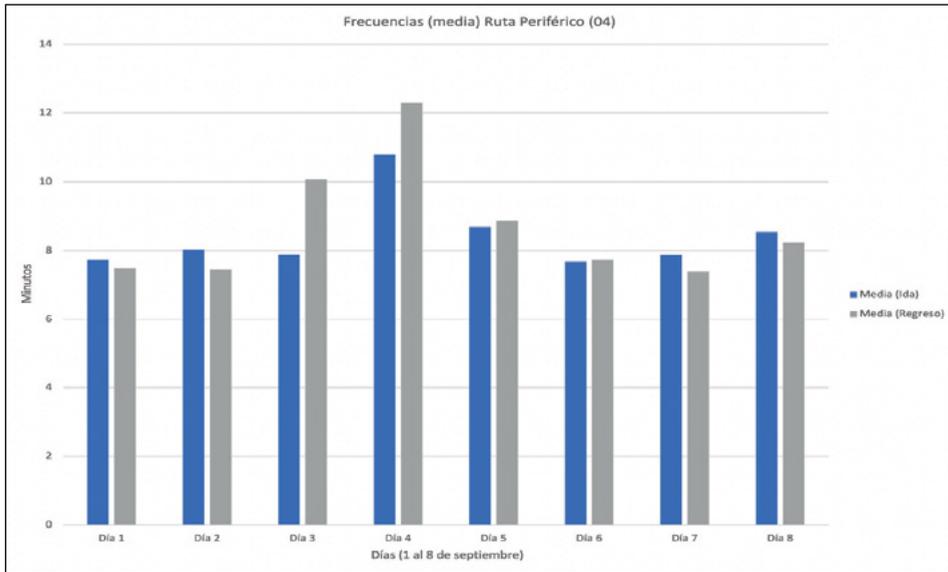
Para la ruta La Manga se encontraron frecuencias bajas, aunque también se encontraron desviaciones estándar altas lo que implica que hay datos de frecuencias muy altas y muy bajas. Esto implica que, con las frecuencias bajas, que hay acumulación de autobuses y con las frecuencias altas, los tiempos de espera son poco aceptables en cuanto a servicio al usuario.

Tabla 7. Medias y desviación estándar de las frecuencias de la ruta La Manga en la semana del 1° al 8 de septiembre				
Ruta La Manga				
	Ida		Regreso	
	Media (Ida)	Desviación Estándar	Media (regreso)	Desviación Estándar
Día 1	5.64	11.81	10.24	8.57
Día 2	8.18	4.57	10.1	8.01
Día 3	6.53	2.8	9.79	6.23
Día 4	9.46	8.51	11.95	11.22
Día 5	11.42	10.87	12.24	10.78
Día 6	11.59	10.32	10.3	7.55
Día 7	10.68	8.95	12.4	10.98
Día 8	12.77	10.79	10.7	8.07



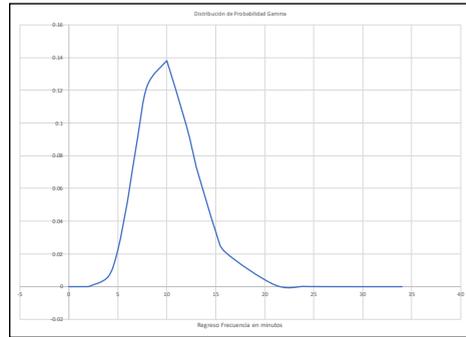
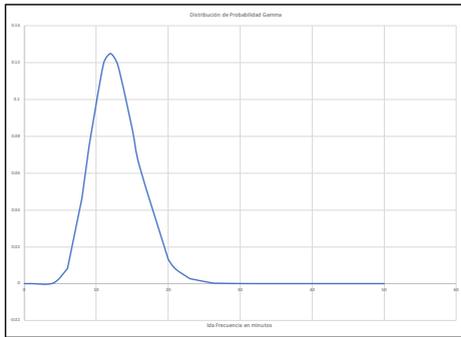
Gráfica 2. Media en minutos de frecuencias (ida y regreso) de la semana del jueves 1° de septiembre al 8 de septiembre. Ruta La Manga.

Tabla 8. Medias y desviación estándar de las frecuencias de la ruta Periférico (04) en la semana del 1° al 8 de septiembre				
Ruta Periférico				
	Ida		Regreso	
	Media (Ida)	Desviación Estándar	Media (Regreso)	Desviación Estándar
Día 1	7.74	6.69	7.5	6
Día 2	8.03	6.85	7.45	6.87
Día 3	7.89	6.16	10.08	7.88
Día 4	10.79	7.62	12.31	8.93
Día 5	8.69	8.15	8.87	7.82
Día 6	7.68	6.48	7.74	6.48
Día 7	7.88	6.26	7.39	6.79
Día 8	8.54	7.77	8.25	8.04

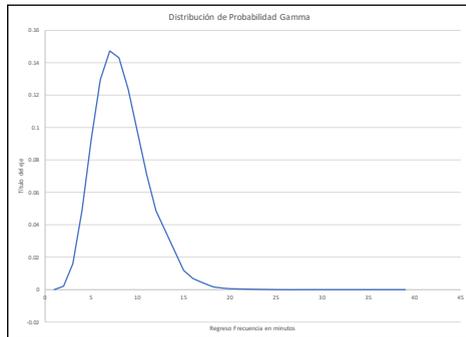
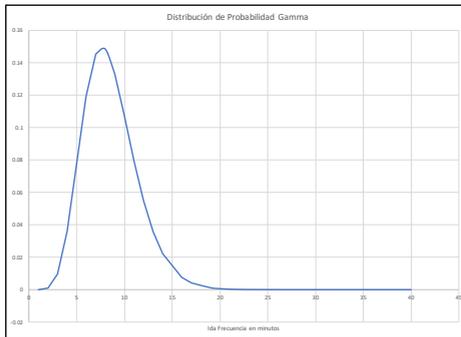


Gráfica 3. Media en minutos de frecuencias (ida y regreso) de la semana del jueves 1º de septiembre al 8 de septiembre. Ruta Periférico (04)

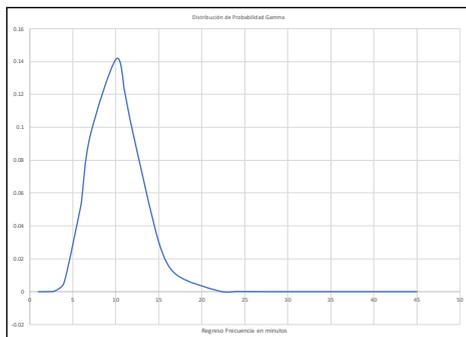
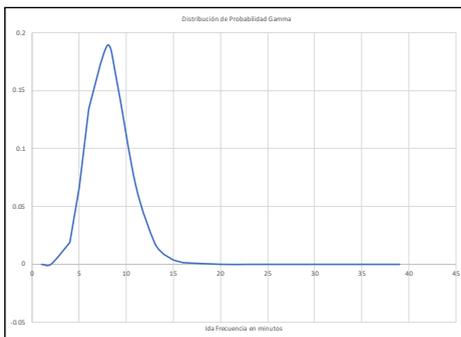
Con estos datos se calcularon las distribuciones de probabilidad Gamma para cada día y para la ida y el regreso. La desviación de frecuencias se define como la diferencia entre la frecuencia real y la frecuencia programada. Se usa la Distribución de Probabilidad Gamma de tres parámetros debido a que es la que estadísticamente mejor se ajusta en comparación con la exponencial, de Erlang y la distribución normal (Gentile, G., et al. 2005), también es la recomendada por el manual de ingeniería de tráfico. En las gráficas de Distribución de Probabilidad Gamma se puede observar las frecuencias con mayor representación (área inferior de la gráfica) en contraste con las frecuencias muy grandes y muy pequeñas, que usualmente son pocos, pero en este caso, importantes por la dimensión en minutos tan grande. Los datos utilizados para el análisis se tomaron de un archivo proporcionado por el IMTES (bus-general-report.csv) el cual está dividido por día y cada día en dos secciones, “Ida” y “Regreso”. A continuación, se presentan las gráficas por día/Ida y Regreso para la ruta La Manga en los 8 días de los datos analizados:



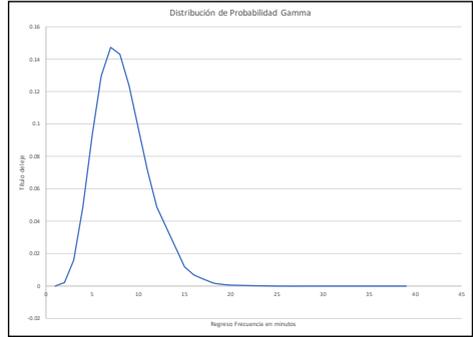
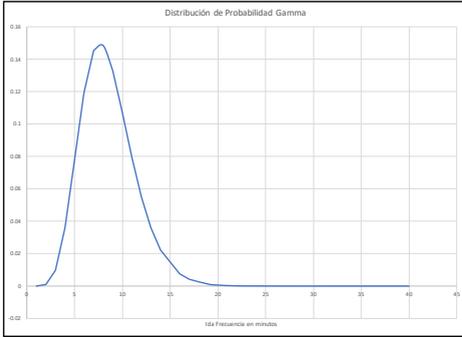
Gráficas 4 y 5. Distribución de Probabilidad Gamma *La Manga. Ida y Regreso Jueves 01-09*



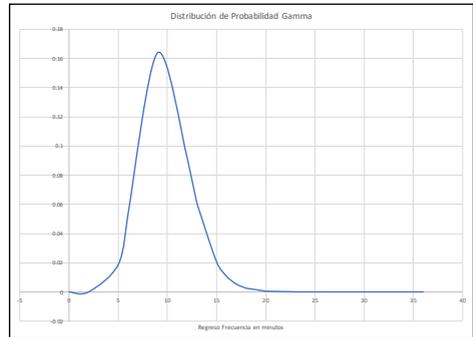
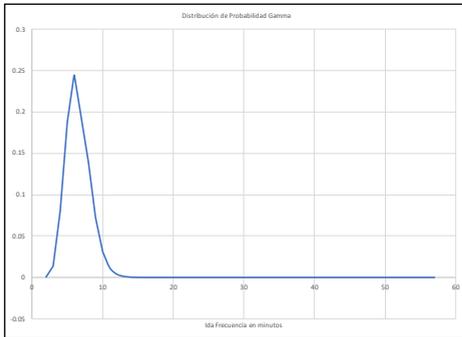
Gráficas 6 y 7. Distribución de Probabilidad Gamma Periférico (04). *Ida y Regreso Jueves 01-09*



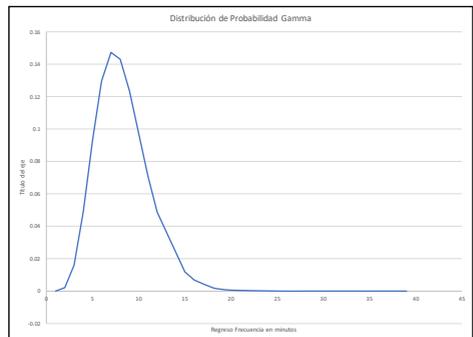
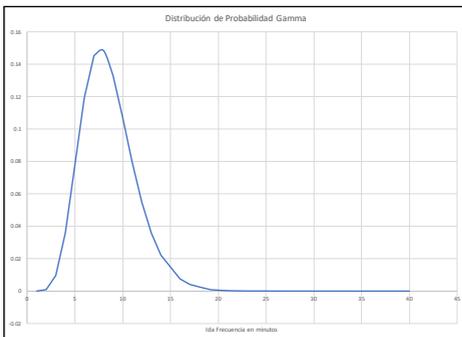
Gráficas 8 y 9. Distribución de Probabilidad Gamma *La Manga. Ida y Regreso Viernes 02-09*



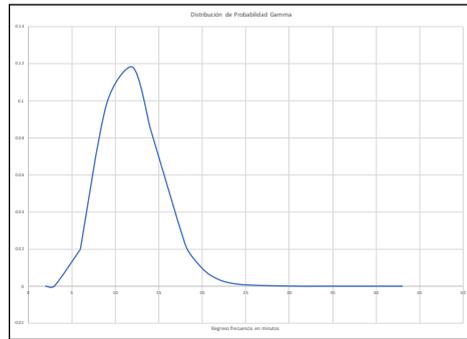
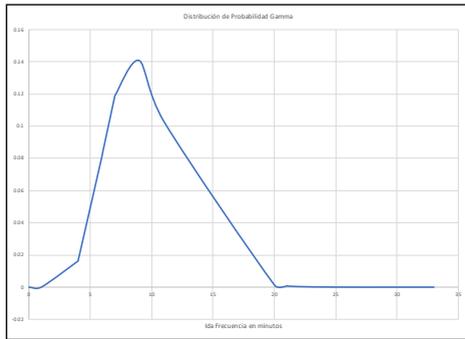
Gráficas 10 y 11. Distribución de Probabilidad Gamma *Periférico (04). Ida y Regreso Viernes 02-09*



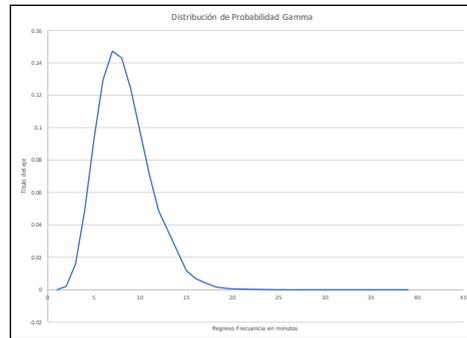
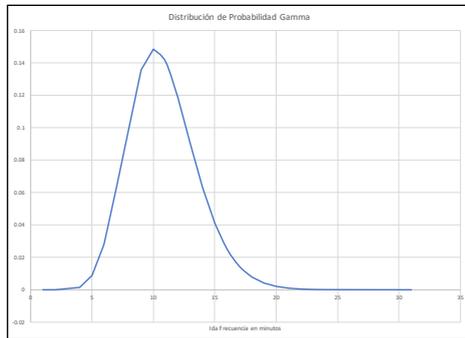
Gráficas 12 y 13. Distribución de Probabilidad Gamma *La Manga. Ida y Regreso Sábado 03-09*



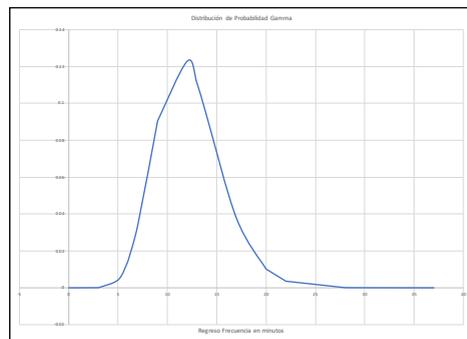
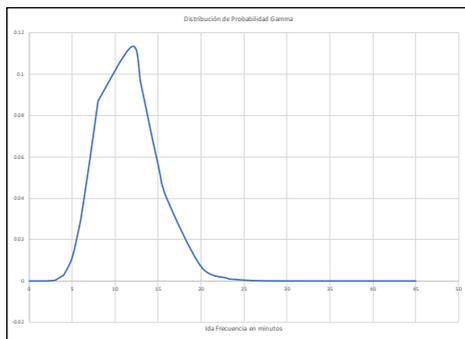
Gráficas 14 y 15. Distribución de Probabilidad Gamma *Periférico (04). Ida y Regreso Sábado 03-09*



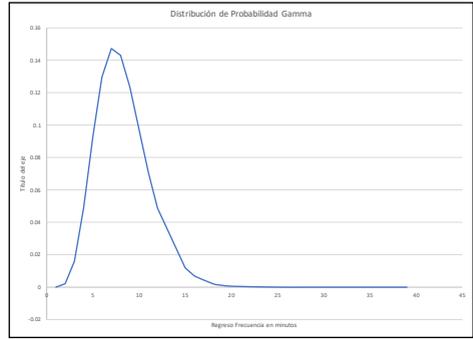
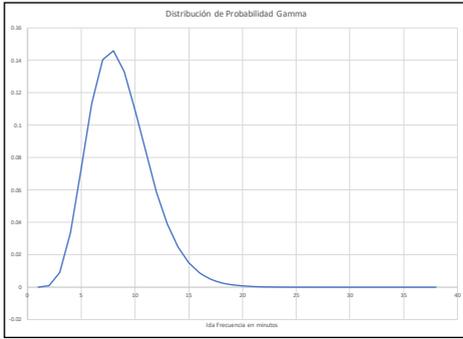
Gráficas 16 y 17. Distribución de Probabilidad Gamma *La Manga. Ida y Regreso Domingo 04-09*



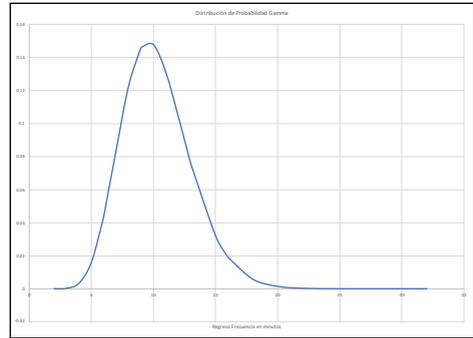
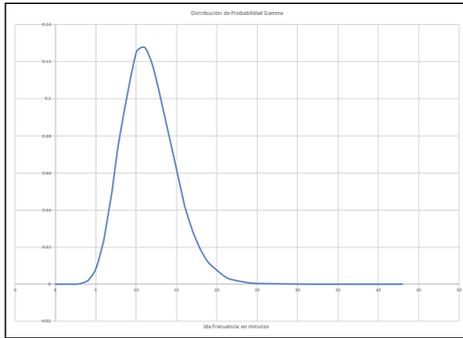
Gráficas 18 y 19. Distribución de Probabilidad Gamma *Periférico (04). Ida y Regreso Domingo 04-0*



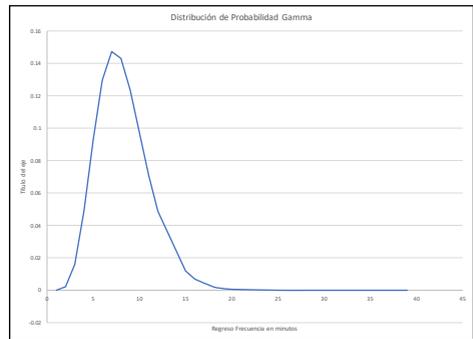
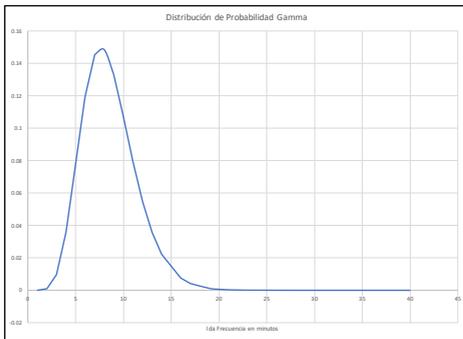
Gráficas 20 y 21. Distribución de Probabilidad Gamma *La Manga. Ida y Regreso Lunes 05-09*



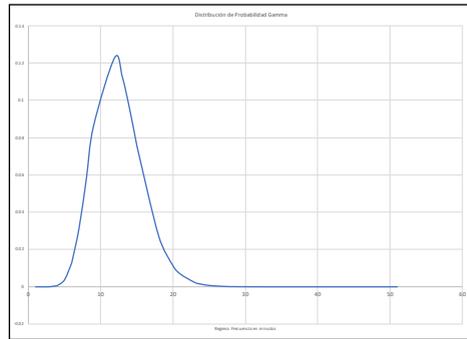
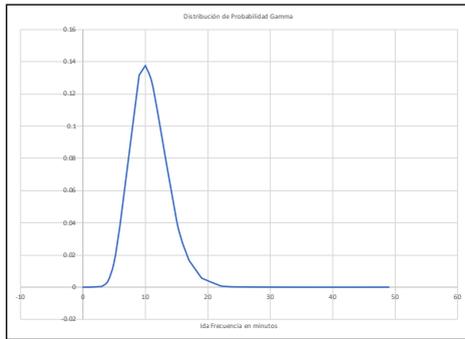
Gráficas 22 y 23. Distribución de Probabilidad Gamma **Periférico (04). Ida y Regreso Lunes 05-09**



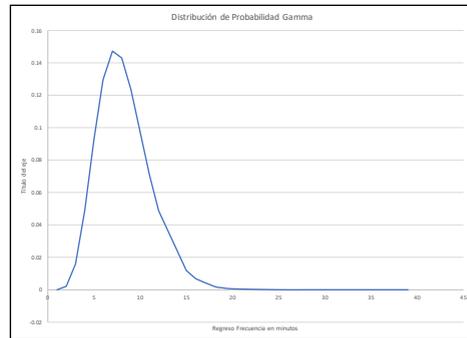
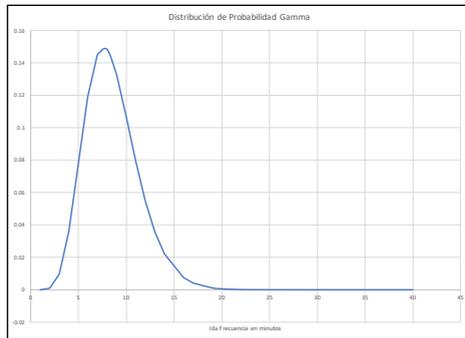
Gráficas 24 y 25. Distribución de Probabilidad Gamma **La Manga. Ida y Regreso Martes 06-09**



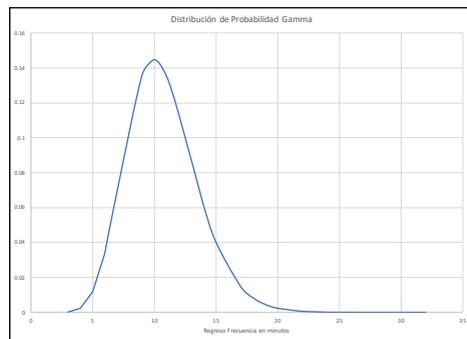
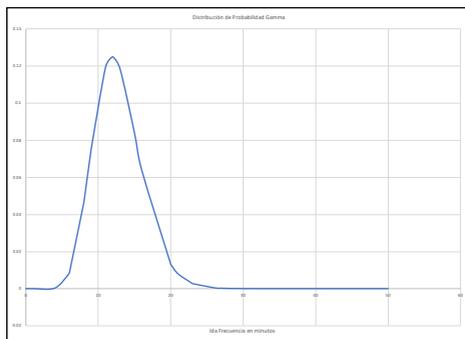
Gráficas 26 y 27. Distribución de Probabilidad Gamma **Periférico (04). Ida y Regreso Martes 06-09**



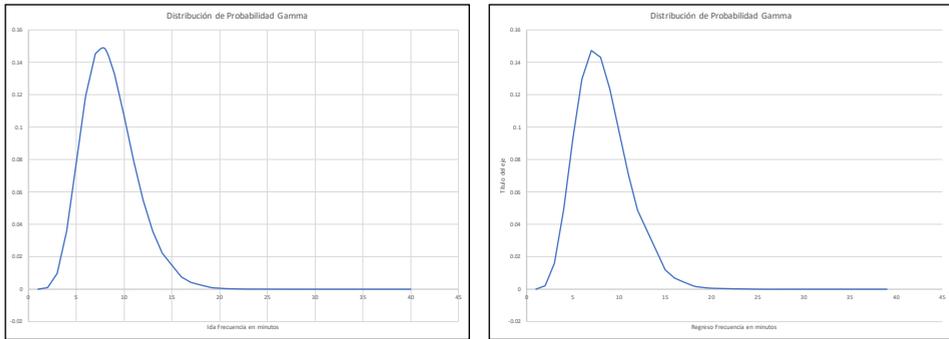
Gráficas 28 y 29. Distribución de Probabilidad Gamma *La Manga. Ida y Regreso Miércoles 07-09*



Gráficas 30 y 31. Distribución de Probabilidad Gamma *Periférico (04). Ida y Regreso Miércoles 07-09*



Gráficas 32 y 33. Distribución de Probabilidad Gamma *La Manga. Ida y Regreso Jueves 08-09*



Gráficas 34 y 35. Distribución de Probabilidad Gamma *Periférico (04). Ida y Regreso Jueves 08-09*

Análisis de frecuencias por paradas

La distribución de las paradas en los derroteros de las rutas en el sistema de TP de Hermosillo no está establecida de manera formal, aunque existe infraestructura en algunas paradas, éstas son muy pocas. Por esta razón, los conductores deben hacer paradas en donde el usuario se los requiera. Para poder llevar a cabo el análisis como se tenía contemplado originalmente fue necesario homogenizar la estructura de las paradas en las rutas seleccionadas. Lo que se hizo fue establecer una distribución equidistante. De esta manera es posible incluir de manera óptima los datos de GPS en cada parada y así, poder calcular las frecuencias de manera puntual en cada parada (Paradas La Manga, Figura 13 y Paradas Periférico, Figura 14). Para este análisis se trabajó con los datos GPS descritos en la Tabla 1, los cuales fueron aislados por medio de buffers circulares individuales de 30 metros de diámetro en cada una de las paradas. Se encontró que había mucha deficiencia y pérdida de datos, no cumpliendo con la calidad requerida para este análisis. Esto se debió principalmente a que el envío de la posición del autobús por el dispositivo GPS se hace únicamente en el momento en que el autobús inicia su movimiento. Existen diferentes metodologías para el análisis de datos de GPS, pudiendo analizar frecuencias bajas (mayores a un minuto) y frecuencias altas (menores a treinta segundos). Pero al no contar con esta configuración no es posible establecer de manera eficiente las frecuencias en paradas de manera puntual con la configuración de los buffers originalmente planeada (círculos de 30 metros de diámetro).

Se probó con una configuración alternativa de buffers para poder identificar las frecuencias de manera puntual en las paradas seleccionadas para el análisis en sitio. Se hizo una extensión de los buffers circulares a buffer elongados con

dimensiones de 25 metros de ancho por 250 metros de largo para cada lado de la avenida, dado que por esta avenida circulan las dos rutas seleccionadas, tanto de ida como de vuelta. El resultado se muestra en la siguiente figura (Figura 20):

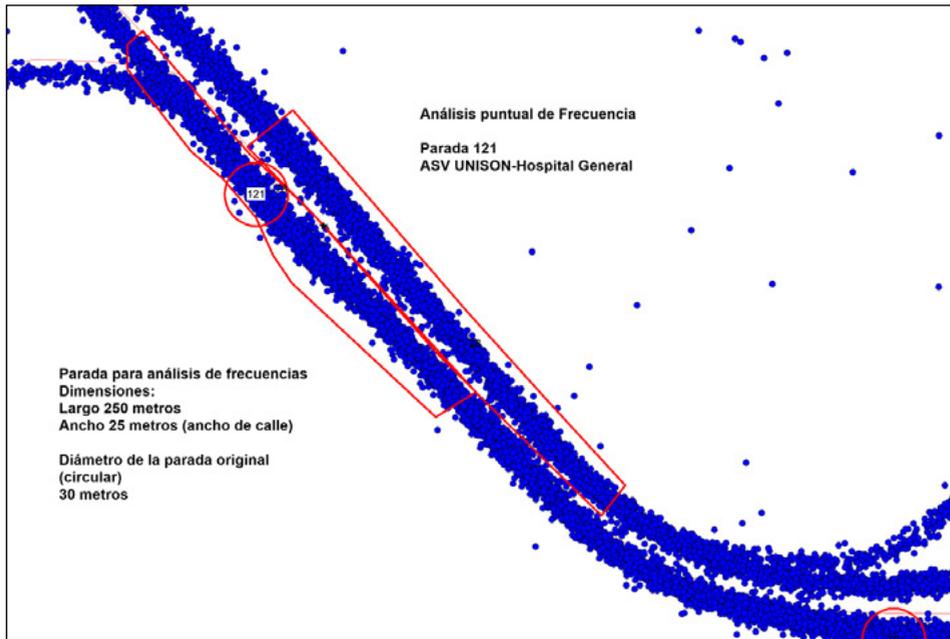


Figura 20. Mapa de ubicación de buffer de paradas para la selección de datos GPS para cálculo de frecuencias puntuales. Paradas de rutas La Manga y Periférico (04) cercanas a la ASV UNISON-HG.

En esta imagen se puede observar la diferencia entre ambas configuraciones de buffers (circular y elongado) y la diferencia en cuanto a cantidad de registros encontrados en el interior de cada uno de ellos. Los registros que se encuentran en el interior de los buffers elongados (250 metros de largo) fueron seleccionados para el análisis de frecuencias puntuales en el sitio de la ASV UNISON-HG.

Análisis puntual de la interacción entre modos de transporte

Las redes de transporte público constan de dos elementos, rutas de autobús y estaciones de autobús. Una ruta está formada por una serie de estaciones de autobús. En circunstancias normales, los pasajeros pueden viajar de la estación de autobuses A a la estación de autobuses B a lo largo de una ruta determinada y, también viajar de la estación de autobuses B a la estación de autobuses A, a lo largo de la misma ruta. Por lo tanto, las redes de transporte público suelen tratarse como grafos no dirigidos.

Las redes de transporte público generalmente exhiben propiedades de crecimiento y unión preferencial. A medida que la ciudad se expande y las condiciones del tráfico mejoran, el crecimiento de la red de transporte público es inevitable. Sin embargo, el crecimiento no es ilimitado y el proceso de crecimiento incluye cambios, adiciones y eliminación de rutas y estaciones de autobús. En las redes de transporte público urbano, hay algunos centros determinados, y debido a su papel clave en las redes de transporte público, es más fácil conectar nuevas estaciones de autobuses a estos centros principales, pero esta vinculación preferencial no es simplemente lineal. Aún así, pueden presentarse áreas de oportunidad para la conectividad entre el TP y los otros modos de transporte, incluido el peatonal. Lo mismo sucede cuando el sistema de TP se expande.

Sobre esta conectividad del TP y movilidad peatonal, existe documentación sobre auditorías de seguridad vial (ASV) que fueron realizadas durante el último año (IMTES, 2022) y cuyo objetivo fue identificar los componentes de la infraestructura vial que representen un riesgo real y potencial para todas las personas usuarias de la vía en cuestión o de la intersección, en especial las y los peatones. Las ASV son reconocidas como una herramienta en la mejora de la infraestructura a nivel local y en favor de las y los usuarios más vulnerables (Secretaría de Salud y Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes, 2019). En esto último, la jerarquía de la movilidad coloca a las personas peatonas como prioridad, en especial aquellas con algún tipo de discapacidad y movilidad limitada (Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, 2022, art. 6).

En este ámbito, este trabajo integra las ASVs realizadas (IMTES, 2022) y (Armenta R. 2020) al análisis de la operación del TP de la ciudad de Hermosillo con el objetivo de entender la relación que guardan todos los modos de transporte en un sitio determinado. Estos sitios se ubican en los puntos de estudio de estas ASVs y se relacionan a las paradas de las dos rutas seleccionadas cercanas a este punto. Así es posible analizar, con diferentes perspectivas, las interacciones

de todos los modos de transporte en un punto determinado. A continuación, se presentan los mapas de ubicación de las ASVs y su relación con las rutas de TP seleccionadas y sus paradas correspondientes (Figuras 21 y 22):

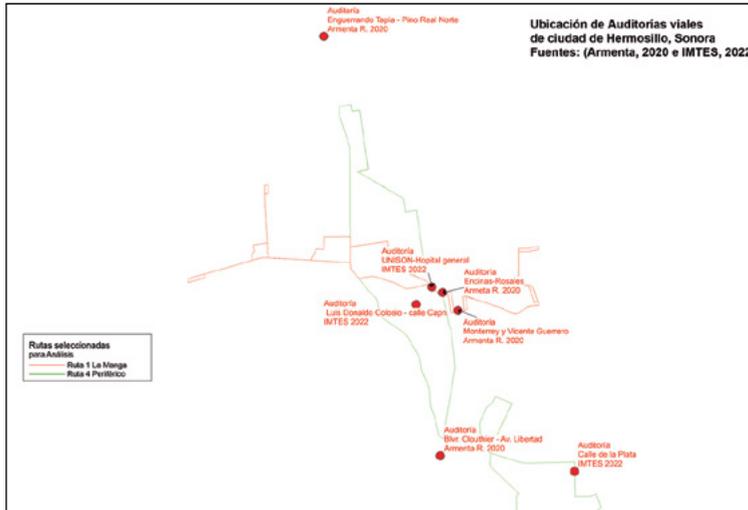


Figura 21. Mapa de ubicación de ASVs con referencia a las rutas de TP seleccionadas para análisis (La Manga y Periférico (04))

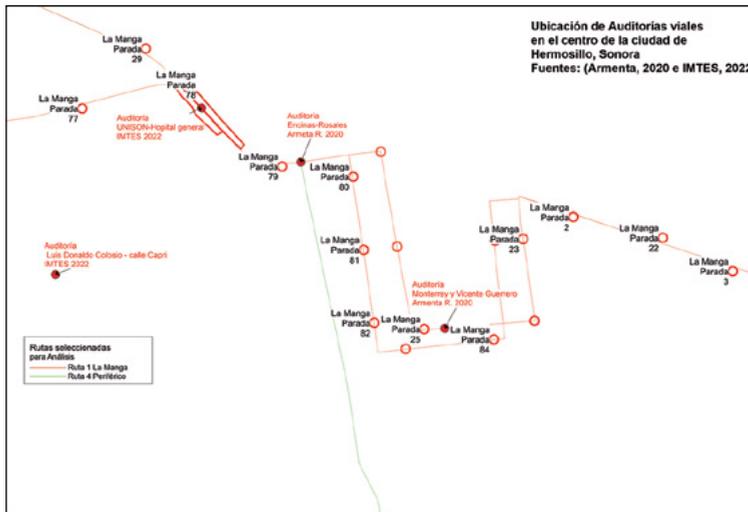
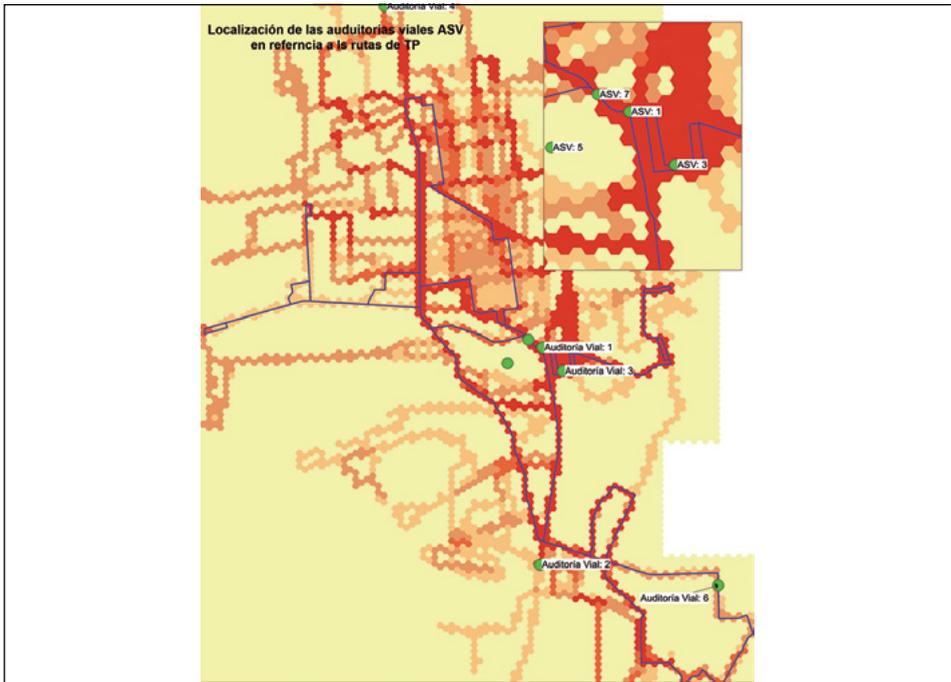


Figura 22. Mapa de acercamiento a la zona centro de la ciudad de Hermosillo y la ubicación de ASVs en referencia a las rutas de TP seleccionadas para análisis.

Como se puede observar en los mapas anteriores, de las siete auditorías realizadas en los dos últimos años, solo cuatro se localizan en puntos con interacción con paradas de TP de las rutas analizadas en el presente trabajo. Estas ASVs son:

- ASV 7 UNISON – Hospital General
- ASV 1 Boulevard Encinas – Av. Rosales
- ASV 3 Monterrey - Vicente Guerrero
- ASV 6 Calle Plata – Carretera Sahuaripa



ID	Ubicación	Nombre	Fuente
1	Blvd. Encinas- Av. Rosales	Encinas-Rosales	Armenta R. 2020
2	Blvd. Clouthier-Av. Libertad	Blvd. Clouthier-Av. Libertad	Armenta R. 2020
3	Monterrey y Vicente Guerrero	Monterrey y Vicente Guerrero	Armenta R. 2020
4	Blvd. Enguerrando Tapia-Pino Real Norte	Blvd. Enguerrando Tapia-Pino Real Norte	Armenta R. 2020
5	Av. Luis Donaldo Colosio- Calle Capri	Luis Donaldo Colosio- Calle Capri	IMTES 2022
6	Calle de la Plata entre carretera Sahuaripa y calle lo	Calle de la Plata	IMTES 2022
7	Blvd. Encinas entre J.N.	UNISON-Hospital General	IMTES 2022

Figura 23. Mapa de ubicación de auditorías viales (ASV) con referencia a la cobertura del TP en la ciudad de Hermosillo.

La ubicación de la ASV 7 (UNISON-HG) se encuentra en una zona que podría ser considerada como un centro determinante para el sistema de transporte público y, en particular para las dos rutas seleccionadas para el análisis. Por esta razón, se determinó hacer los ajustes de buffers en este sitio para llevar a cabo el análisis de conectividad a profundidad y así poder entender la interacción entre modos del transporte.

80	Autobús	SIT-0379	0060041C5A	15	29.086078	-110.96289	0	Southeast	02/09/22 11:11	02/09/22 11:11	02/09/22	11:11:11	104	11	11	11	671
81	Autobús	SIT-0048	00600378D4	50	29.08655	-110.96339	0	Southeast	02/09/22 11:21	02/09/22 11:11	02/09/22	11:21:33	105	11	21	33	681
82	Autobús	SIT-0011	60037675	16	29.086491	-110.96325	0	Southeast	02/09/22 11:42	02/09/22 11:11	02/09/22	11:42:15	106	11	42	15	702
83	Autobús	SIT-0072	0060037AAD	39	29.08542	-110.96213	0	Southeast	02/09/22 11:49	02/09/22 11:11	02/09/22	11:49:44	108	11	49	44	709
84	Autobús	SIT-0139	60037670	20	29.086546	-110.96339	0	Southeast	02/09/22 12:39	02/09/22 11:11	02/09/22	12:39:11	109	12	39	11	759
85	Autobús	SIT-0019	60037758	18	29.085996	-110.9629	0	Southeast	02/09/22 12:42	02/09/22 11:11	02/09/22	12:42:10	111	12	42	10	762
86	Autobús	SIT-0012	0060037A9B	14	29.085825	-110.96265	0	Southeast	02/09/22 12:49	02/09/22 11:11	02/09/22	12:49:37	112	12	49	37	769
87	Autobús	SIT-0378	0060037B20	18	29.086616	-110.96345	0	Southeast	02/09/22 14:01	02/09/22 13:01	02/09/22	13:01:58	121	13	1	58	781
88	Autobús	SIT-0378	0060037B20	19	29.085341	-110.96203	0	Southeast	02/09/22 14:03	02/09/22 13:03	02/09/22	13:03:28	122	13	3	28	783
89	Autobús	SIT-0010	006003FFF1	40	29.086298	-110.96314	0	Southeast	02/09/22 13:11	02/09/22 13:11	02/09/22	13:11:42	113	13	11	42	791
90	Autobús	SIT-0010	006003FFF1	26	29.08559	-110.96237	0	Southeast	02/09/22 13:13	02/09/22 13:13	02/09/22	13:13:12	114	13	13	12	793
91	Autobús	SIT-0001	60041334	9	29.08668	-110.96351	0	Southeast	02/09/22 13:13	02/09/22 13:13	02/09/22	13:13:08	115	13	13	8	793
92	Autobús	SIT-0016	60037914	43	29.0863	-110.96316	0	Southeast	02/09/22 13:25	02/09/22 13:25	02/09/22	13:25:40	116	13	25	40	805
93	Autobús	SIT-0016	60037914	24	29.085416	-110.96217	0	Southeast	02/09/22 13:26	02/09/22 13:26	02/09/22	13:26:40	117	13	26	40	806
94	Autobús	SIT-0048	00600378D4	40	29.086921	-110.96374	0	Southeast	02/09/22 13:38	02/09/22 13:38	02/09/22	13:38:03	118	13	38	3	818
95	Autobús	SIT-0048	00600378D4	11	29.086058	-110.96292	0	Southeast	02/09/22 13:39	02/09/22 13:39	02/09/22	13:39:03	119	13	39	3	819

Figura 24. Tabla de datos crudos de GPS en la ubicación de la ASV UNISON-HG. Los datos se ordenan cronológicamente para hacer el análisis de frecuencias.

Al extenderse el área en las paradas de un buffer circular con un diámetro de 30 metros a uno que se extiende a lo largo de la avenida por 250 metros, se generaron registros GPS del mismo vehículo, como pudimos observar la frecuencia de señal de los equipos en promedio va de 30 segundos a un minuto (Figura 20). En la imagen anterior (Figura 24) se muestra el caso del autobús placa SIT-378 que tiene un registro a las 13:01:58 y el siguiente a las 13:03:28. Esto demuestra

que estuvo en la zona por más de dos minutos. La causa pudo ser la alta demanda, congestión de tráfico o ambas. La limpieza de esta información se hizo de manera manual, lo permitió observar fenómenos como este en el sitio, estos se presentaron de manera común a lo largo de toda la semana.

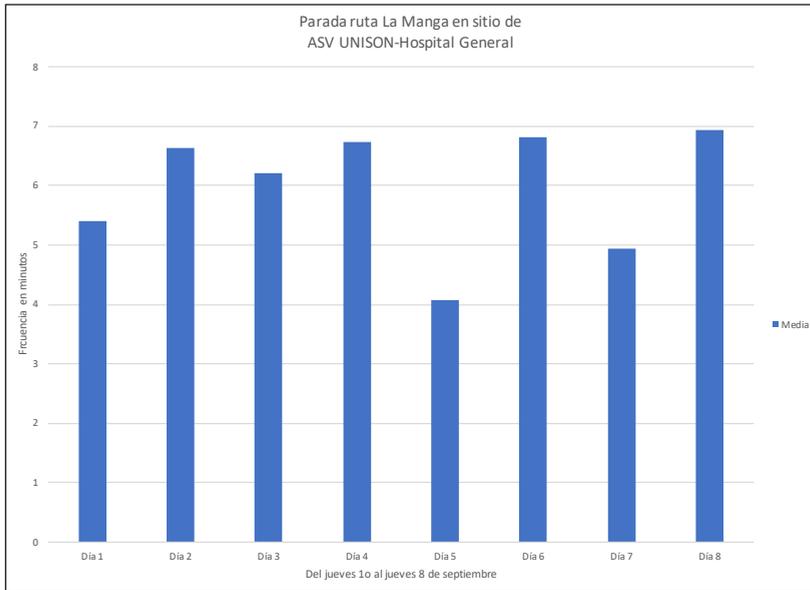
De las cuatro ASVs, que debido a que se encuentran cercanas a paradas de las dos rutas seleccionadas, y que se revisaron con mucho detalle, se optó por seleccionar la ASV UNISON-HG para un análisis profundo por su gran diversidad y dinámica en las interacciones entre modos de transporte y usuarios. A continuación, se presentan las tablas y las gráficas de las frecuencias promedio que se obtuvieron puntualmente en las paradas cercanas a la ASV UNISON-HG en comparación con las frecuencias globales de toda la ruta, tanto para La Manga como para Periférico (04).

Tabla 9. Frecuencias puntuales en paradas de la ruta La Manga cercanas a las ASV UNISON-HG

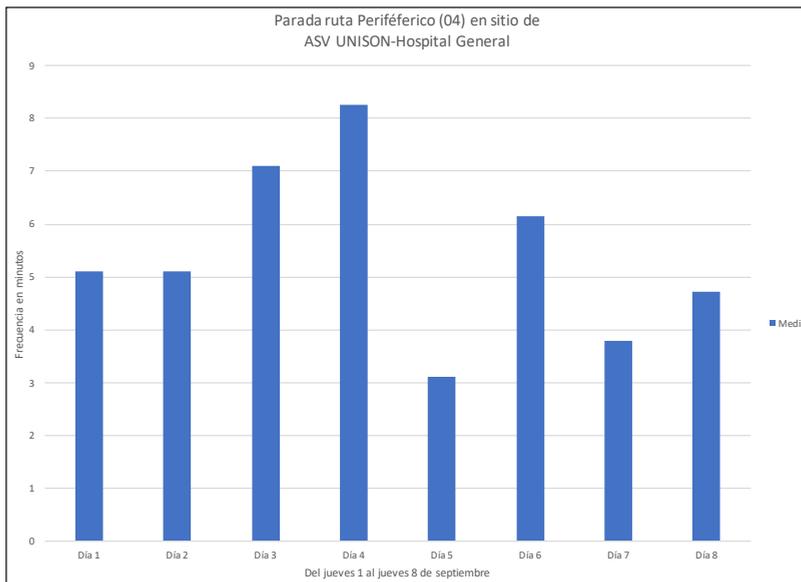
Día de la semana	Frecuencia promedio (En Parada)	Frecuencia promedio (Toda la Ruta)
Jueves 1	5.41	7.74
Viernes 2	6.63	8.03
Sábado 3	6.21	7.89
Domingo 4	6.73	10.79
Lunes 5	4.08	8.69
Martes 6	6.81	7.68
Miércoles 7	4.94	7.88
Jueves 8	6.93	8.54

Tabla 10. Frecuencias puntuales en paradas de la ruta Periférico cercanas a las ASV UNISON-HG

Día de la semana	Frecuencia promedio (En Parada)	Frecuencia promedio (Toda la Ruta)
Jueves 1	5.1	7.74
Viernes 2	5.11	8.03
Sábado 3	7.11	7.89
Domingo 4	8.26	10.79
Lunes 5	3.1	8.69
Martes 6	6.15	7.68
Miércoles 7	3.79	7.88
Jueves 8	7.71	8.54



Gráficas 36. Frecuencias en minutos de la ruta La Manga en la parada ubicada en la cercanía del sitio de estudio de la ASV UNISON-HOSPITAL GENERAL



Gráficas 37. Frecuencias en minutos de la ruta Periférico (04) en la parada ubicada en la cercanía del sitio de estudio de la ASV UNISON-HOSPITAL GENERAL

Análisis puntual ASV 7. UNISON – Hospital General

Uno de los puntos intervenidos con estas auditorías se encuentra en el cruce ubicado en boulevard Luis Encinas Johnson entre boulevard Juan Navarrete y Guerrero, y calle Gral. Bernardo Reyes, en Hermosillo, Sonora (Figura 25).

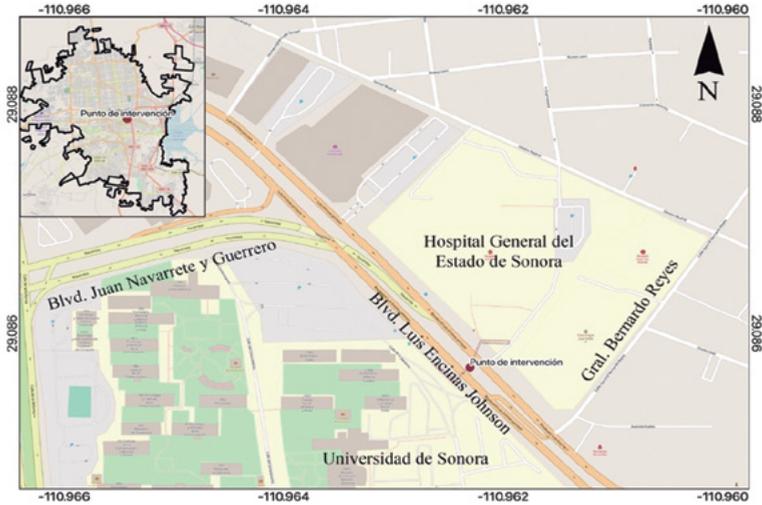


Figura 25. Ubicación del Sitio de intervención. Fuente: IMTES 2022.



Figura 26. Imagen aérea del Sitio de intervención. Fuente: IMTES 2022.

En el documento de la ASV de este sitio se presentan diversas imágenes del estado actual de la infraestructura, en particular la peatonal. Las siguientes imágenes muestran algunos de sus hallazgos.



Figura 27. Estado actual de la infraestructura peatonal y vial del sitio de intervención de la ASV. Fuente IMTES, 2022.

También en esta auditoría se hace una propuesta de intervención.



Figura 28. Se realizó un mapa con el estado del servicio del Transporte Público en el sitio de intervención de la ASV. Fuente: IMTES, 2022.

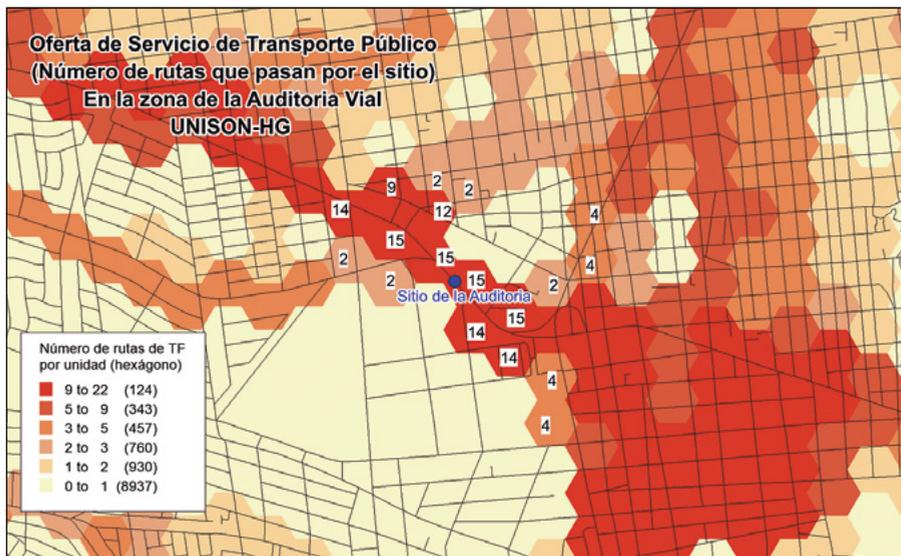
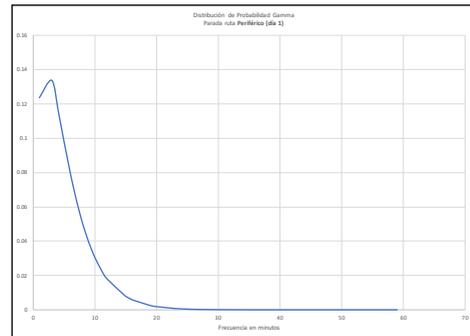
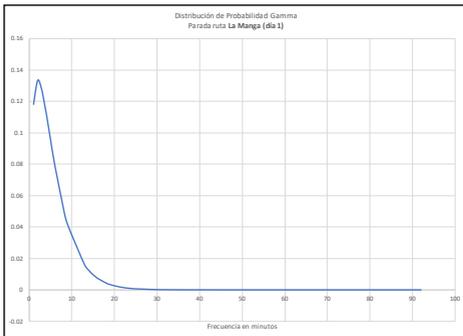


Figura 29. Servicio (número de rutas por hexágono) del transporte público en el sitio de intervención ASV 7.

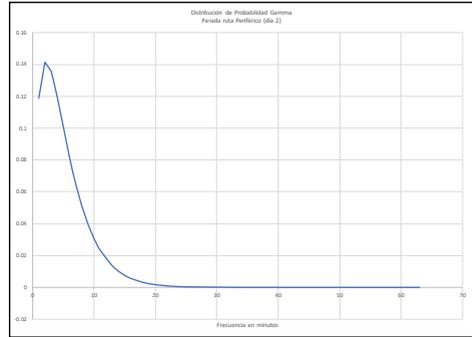
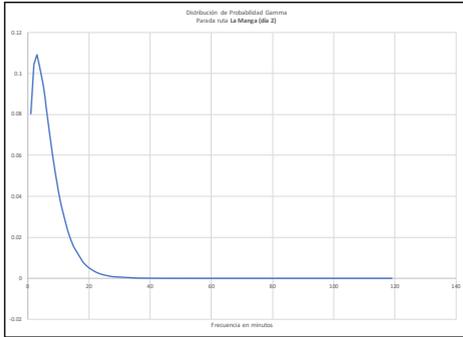
Se puede observar que el sitio tiene gran concurrencia de rutas de transporte público y si se analiza la propuesta de intervención de la auditoría, se puede observar que el carril destinado a los ciclistas es compartido con el del transporte público dejando 4 carriles para los autos particulares. Aunque los carriles y la ciclovía no están confinados, el diseño implica una fuerte competencia por el espacio entre autobuses y ciclistas.

Los datos de GPS considerados para el análisis del sitio del Hospital General corresponden a tres paradas una para la Ruta La Manga (P1), con dirección centro-norte y otras dos (P2 y P3), una para la ruta periférico (P3) y otra para la ruta La Manga (P2), con dirección norte-centro. De acuerdo con estos datos GPS de los 8 días del análisis, llegaron al lugar de la parada P1 141 autobuses diferentes (de todas las rutas), a la parada P2, llegaron 131, y finalmente por la parada P3, se detectaron 165 autobuses. Para todos estos casos, los autobuses corresponden a todas las rutas del servicio de TP, esto debido a su cercanía con el centro de la Ciudad. En la siguiente tabla se muestran más datos de estas tres paradas:

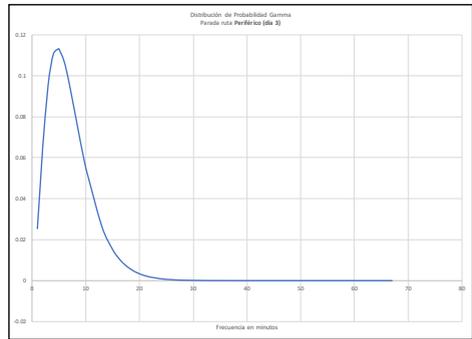
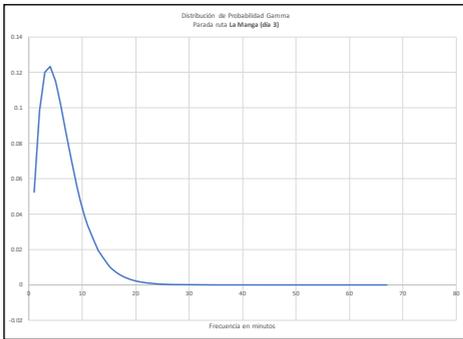
Parada	No. de autobuses	Velocidad promedio	Velocidad máxima	Velocidad mínima
P1	141	34.26 km/hr.	77 km/hr.	6 km/hr.
P2	131	48.33 km/hr.	73 km/hr.	4 km/hr.
P3	165	30.06 km/hr.	69 km/hr.	6 km/hr.



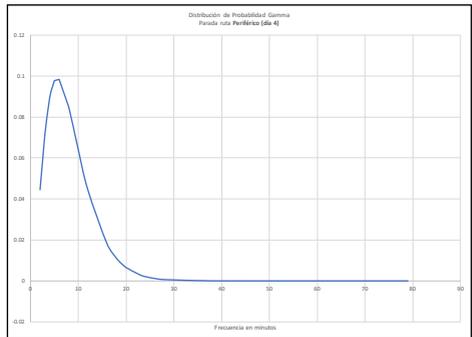
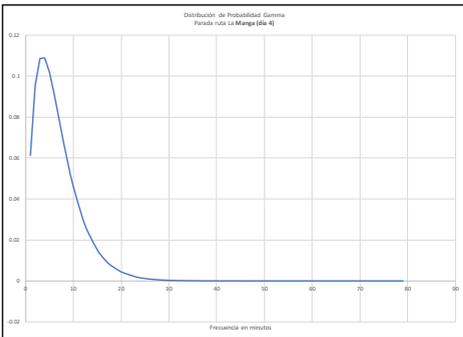
Gráficas 38 y 39. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04). Jueves 01-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG



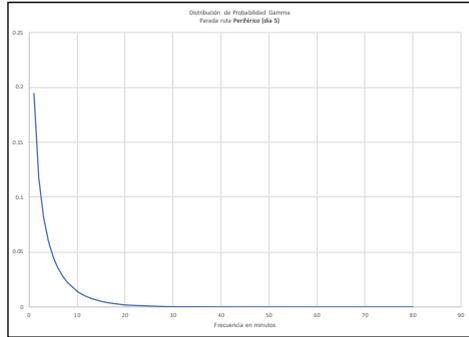
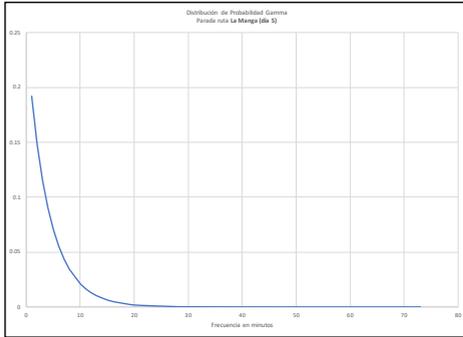
Gráficas 40 y 41. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04). Viernes 02-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG



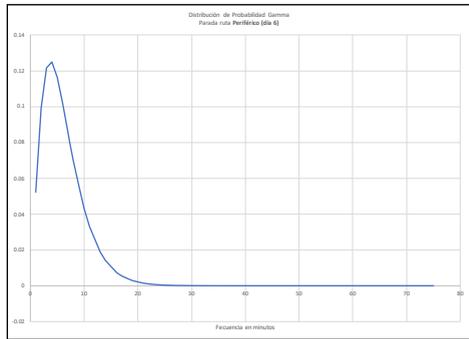
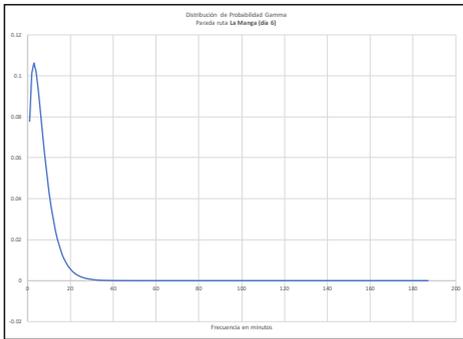
Gráficas 42 y 43. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04). Sábado 03-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG.



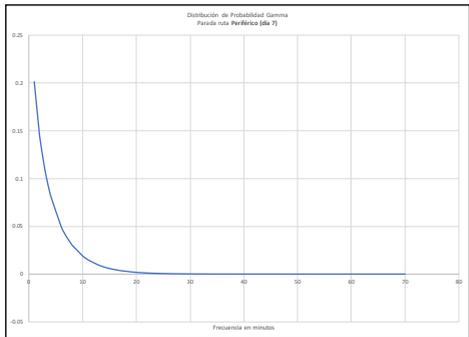
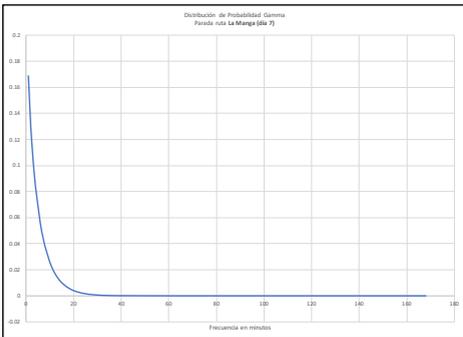
Gráficas 44 y 45. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04) Domingo 04-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG



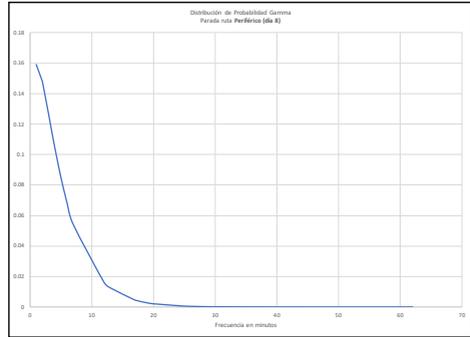
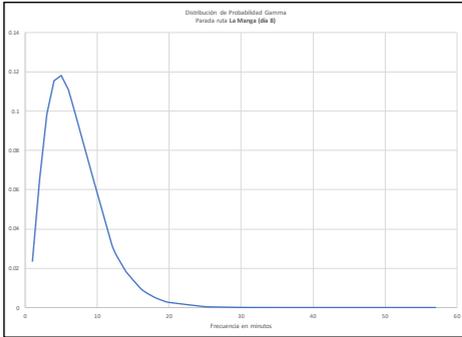
Gráficas 46 y 47. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04). Lunes 05-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG



Gráficas 48 y 49. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04). Martes 06-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG



Gráficas 50 y 51. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04). Miércoles 07-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG



Gráficas 52 y 53. Distribución de Probabilidad Gamma rutas La Manga y Periférico (04). Jueves 08-09 en la parada cercana a la ASV UNISON-HG

Retomando la propuesta de análisis puntual en las figuras 15 y 16, la interacción entre los diferentes modos de transporte, Transporte Público-Auto Particular, (TP-AP); Transporte Público-Patón y Bicicleta, (TP-PB); y Auto Particular-Peaton y Bicicleta, (AP-PB) se representa de la siguiente manera:



Definición de espacios para peatones y bicicletas

- Seguridad
- Confort
- Conectividad con TP

Definición de espacios para paradas de TP

- Seguridad
- Servicio
- Confort
- Conectividad con Peatones y Bicicletas

Análisis puntual ASV 1. Blvd. Encinas – Av. Rosales

El análisis de sitio para esta ASV y la operación del transporte Público en la zona es muy similar al de la ASV 7 (UNISON-HG) dado que se encuentran muy cercanas una de la otra, y el volumen de rutas de transporte público que circulan por la zona es bastante considerable. Las interacciones entre los modos de transporte TP-PB, TP-AP Y AP-PB son menos intensas debido a que el espacio disponible para los peatones es mucho mayor, cuenta con semaforización para peatones y tiene espacio suficiente para crear una ciclovía, incluso confinada. Las velocidades promedio en el sitio de las rutas analizadas es de entre 20 y 27 Km/h. Aunque se detectaron, vía datos de GPS, velocidades hasta de 68 Km/h de los autobuses (Tabla 10).

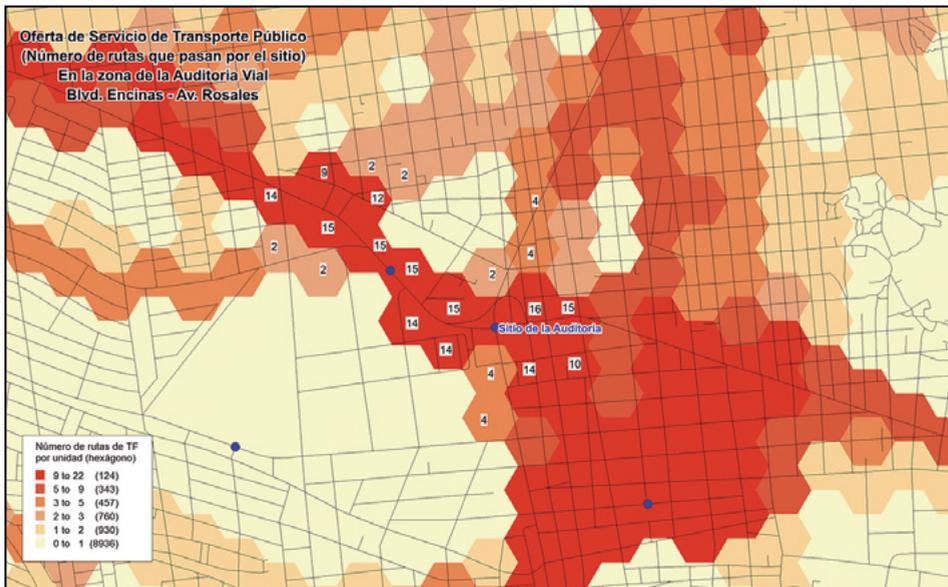


Figura 30. Servicio (número de rutas por hexágono) del transporte público en el sitio de intervención ASV 1.

Tabla 12. Actividad del TP en el sitio de ASV1. Encinas - Rosales				
Parada	No. de autobuses	Velocidad promedio	Velocidad máxima	Velocidad mínima
Periférico P122	28	20.62 km/hr.	48 km/hr.	6 km/hr.
La Manga P79	63	27.63 km/hr.	68 km/hr.	4 km/hr.

Análisis puntual ASV 3. Monterrey – Vicente Guerrero

El sitio de esta ASV solo interactúa con paradas de la ruta La Manga, la ruta Periférico no pasa por el lugar. Las velocidades promedio de los autobuses en el sitio es de 17 Km/h. lo cual es bastante buena, incluso las velocidades máximas de autobuses en el sitio son de 45 km/h. igualmente aceptable (Tabla 11). Las bajas velocidades pueden deberse a que el espacio en el sitio es muy poco. Y, dado existe un número considerable de rutas que pasan por el sitio, el poco espacio disponible genera una gran competencia por el espacio generando tráfico e inseguridad para los peatones.

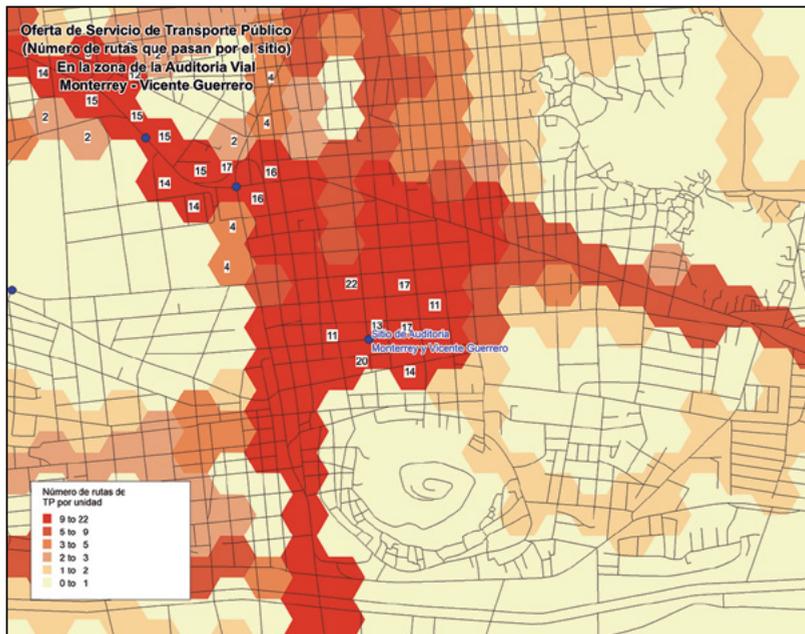


Figura 31. Servicio (número de rutas por hexágono) del transporte público en el sitio de intervención ASV 3.

Tabla 13. Actividad del TP en el sitio de ASV3. Monterrey - Vicente Guerrero				
Parada	No. de autobuses	Velocidad promedio	Velocidad máxima	Velocidad mínima
La Manga P24	45	16.9 km/hr.	43 km/hr.	4 km/hr.
La Manga P25	49	16.9 km/hr.	45 km/hr.	4 km/hr.

Análisis puntual ASV 6. Calle de la Plata

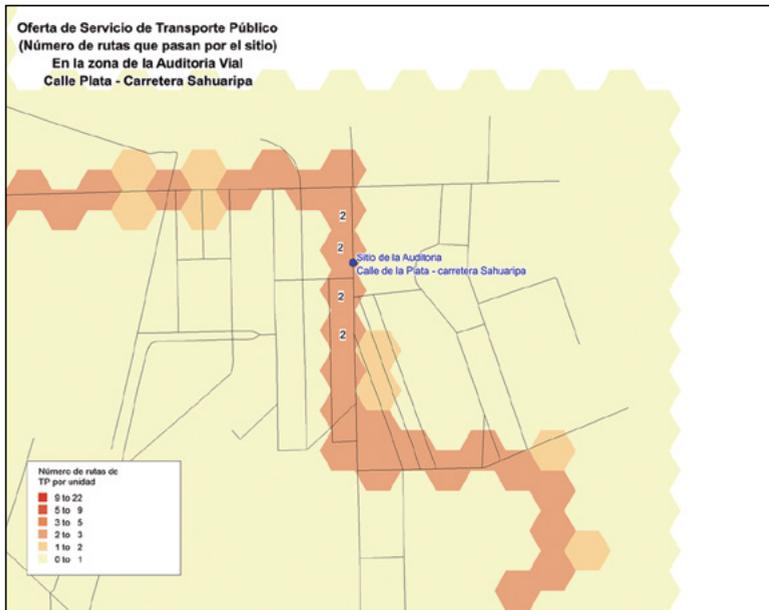


Figura 32. Servicio (número de rutas por hexágono) del transporte público en el sitio de intervención ASV 6.

Tabla 14. Actividad del TP en el sitio de ASV6. Calle Plata				
Parada	No. de autobuses	Velocidad promedio	Velocidad máxima	Velocidad mínima
Periférico P37	25	24.9 km/hr.	42 km/hr.	7 km/hr.
Periférico P38	23	12.12 km/hr.	30 km/hr.	6 km/hr.

Se realizaron auditorías en otros dos sitios, una en el Tramo calle De la Plata entre carretera a Sahuaripa y calle De los Nogales, parque Industrial en Hermosillo, Sonora y otra en intersección, avenida Luis Donaldo Colosio y calle Capri.

En el caso de la auditoría del tramo de la calle De la Plata, se encuentra en una zona escolar y es muy importante observar la interacción entre el transporte público, los peatones y las bicicletas, tanto en función de la seguridad como en la de servicio. En cuanto a servicio, es un buen punto para que por medio de infraestructura ciclista y peatonal se optimice la conectividad entre estos tres modos de transporte impactando en la promoción de estos tres modos de transporte en los jóvenes. Esto tendría un impacto de largo plazo en la sostenibilidad de la movilidad en Hermosillo, ya que se están promoviendo los modos de transporte más sostenibles en una población básicamente joven y que está creando hábitos de movilidad.

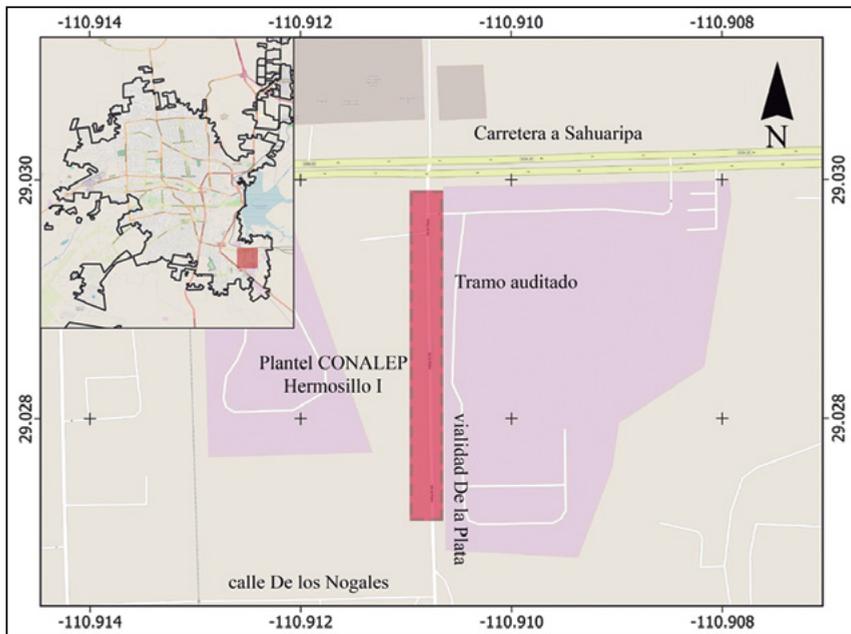


Figura 33. Ubicación del Sitio de intervención de la ASV Tramo calle De la plata entre carretera a Sahuaripa y calle De los nogales. Fuente: IMTES 2022.

Para el caso de la ASV 5, Luis Donaldo Colosio y calle Capri no se realizó análisis puntual debido a que ninguna de las paradas de las dos rutas seleccionadas para el análisis interactúa en este sitio de auditoría.

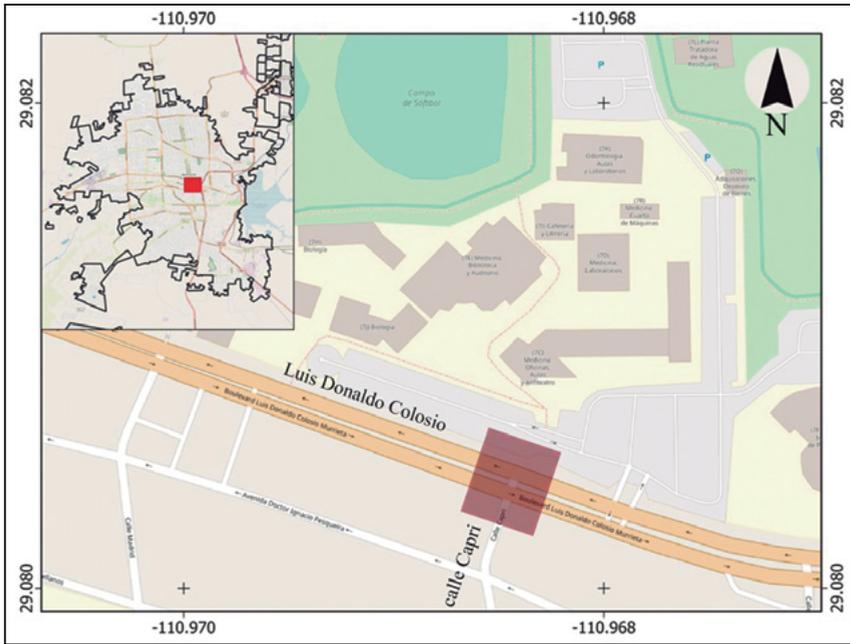


Figura 34. Ubicación del Sitio de intervención de la ASV Intersección avenida Luis Donaldo Colosio y calle Capri, en Hermosillo, Sonora. Fuente: IMTES 2022.

En la comparación de la siniestralidad en los tres sitios se encontró que en el primero (ASV del cruce ubicado en boulevard Luis Encinas Johnson entre boulevard Juan Navarrete y Guerrero, y calle General Bernardo Reyes) la siniestralidad es de 90 incidentes viales mientras que en el segundo (ASV Tramo calle De la plata entre carretera a Sahuaripa y calle De los nogales, parque Industrial en Hermosillo, Sonora, no se presentaron incidentes. En el tercer sitio (ASV cruce localizado en avenida Luis Donaldo Colosio y calle Capri) sólo se presentó uno.

En el Modelo general de análisis (Figura 6) en el bloque del meta análisis se propone analizar cinco componentes (Análisis de Escalas, Análisis de Eficiencia, Análisis de Integralidad, Análisis de LCA y Análisis de Sostenibilidad).

Cabe señalar que, de estos cinco componentes se logró analizar a cuatro, en diferentes niveles de profundidad, quedando fuera el análisis de LCA debido al tiempo con el que se cuenta para la realización de una Tesis. Existen diversas metodologías para evaluar el impacto ambiental del transporte en una ciudad, la mayoría de ellos se basan en la generación de emisiones de GEI. Una de ellas es el LCA que permite hacer análisis comparativos entre ciudades en diferentes etapas, es por eso que se menciona en la propuesta de modelo en la

Figura 6. Otro análisis, mas simple, es la estimación directa de las emisiones de GEI generadas por la operación del STP en una ciudad. Ambos componentes, en un estudio en el cuál se cuente con más tiempo, pueden ser incluidos como el componente “E1” de la ecuación presentada en la *Fórmula 1*.

Otro factor importante que se presenta en esta misma fórmula es la calidad del servicio expresado con la variable “Qs”, esta variable está asociada al bienestar de las personas dado que considera aspectos como seguridad, accesibilidad y comodidad del STP de la ciudad.

Esta variable se puede construir de forma cuantitativa con detalle con el análisis de frecuencias realizados en este trabajo.

Tabla 15. Propuesta para composición de los datos y sus respectivas medidas para determinar la integración cuantitativa de las variables para la evaluación de la Sostenibilidad de la Movilidad de la ciudad. (Fórmula 1)				
Variable	Descripción de la variable	Factor de medición	Medida	Datos necesarios para medición
E1	Sostenibilidad ambiental	Emisiones de GEI del sistema de TP	Toneladas/año	Estudios de emisiones por fuentes móviles
Qs	Servicio: Accesibilidad, seguridad, conectividad y comodidad del TP	Cobertura de horarios, frecuencias y geográfica de la red de TP. Infraestructura de accesibilidad y conectividad.	% de la red vial cubierta por la red de TP; dimensión y número de frecuencias altas. Porcentaje de unidades con infraestructura de accesibilidad. Infraestructura de conectividad multimodal.	Cartografía de la red vial de la ciudad, cartografía de las rutas de TP de la ciudad y datos de operación del TP. Levantamiento de infraestructura y señalamiento (se pueden incluir como requisitos en las ASVs). Número de espacios públicos y áreas verdes vinculados a la infraestructura del STP.
E2	Aspectos de sostenibilidad económica del transporte	Subsidio a grupos vulnerables	% de población cubierta por los subsidios	Datos de financiamiento del Gobierno del Estado a estudiantes y personas de la tercera edad.
G	Influencia de la Gobernanza	Nivel de avance en el cumplimiento de la LGMSV. Número de ONGs participantes en el proceso de diseño de soluciones para todos los modos de transporte	Cumplimiento de normas en los plazos establecidos	Informes periódicos de la comisión de movilidad del poder legislativo del Estado

En la fórmula original que se tomó como referencia, se propone una escala de medición con valores “subjetivos”, en una escala de cinco niveles. En contraparte, este trabajo muestra la factibilidad de la construcción de valores cuanti-

tativos para estas mismas variables, en particular, para la variable Q_s como se muestra en la *Tabla 13*.

De esta forma, se tiene la posibilidad de establecer análisis comparativos entre ciudades, ya sea entre ciudades de México o entre ciudades de diversos países de manera tangible.

También, con estos valores es posible establecer una línea base que permita evaluar las intervenciones de sostenibilidad de la movilidad en una ciudad revisando si hubo algún cambio en algún componente de la *Fórmula 1* utilizando la variable temporal (ΔT) que se incluye en la fórmula y posterior a la intervención evaluada. Los valores de las demás variables se pueden construir con relativa facilidad, pero con mucho trabajo, o se pueden tomar de trabajos previos para la ciudad de Hermosillo.

Siempre se ha reconocido a la movilidad multimodal como un recurso importante de complementariedad del servicio de transporte en una ciudad. La eficiencia de la operación del TP, la disponibilidad y calidad de la infraestructura peatonal o ciclista y, por supuesto, los niveles de congestión de la red vial por el uso de automóviles privados, por sí solos no son determinantes para la sostenibilidad del sistema de movilidad, y mucho menos para la sostenibilidad de la ciudad en una visión multinivel. En resumen, los resultados del presente trabajo, tomando como referencia los seis pasos principales de la metodología y el Modelo general de análisis (Figura 6) son:

1. El análisis de escalas se pudo llevar a cabo basado en la caracterización, tanto geográfica como estadística del STP de la ciudad de Hermosillo tal como se muestra en las figuras (11, 12, 17, 18 y 19) y en la Gráfica 1.
2. El análisis de integralidad se basó en la integración de los análisis de Escalas y análisis de Eficiencia con los datos de las ASVs. Esto hizo posible tener la visión del estado de la conectividad entre modos de transporte en un sitio de relevancia para la ciudad (ASV 7, UNISON-Hospital General). Las interacciones entre modos de transporte que definen la conectividad en este sitio son:
 - a. La velocidad a la que circulan los vehículos del STP (tomado directamente de los datos GPS del sitio),
 - b. El número de paradas y rutas que circulan por el sitio (caracterización del STP),
 - c. El espacio disponible que se comparte entre peatones y bicicletas con los autos y el STP, y el diseño de la infraestructura, actual y proyectada (en la propuesta de la ASV).

De manera que, existe la posibilidad de hacer una evaluación cuantitativa de este análisis.

3. El análisis de Sostenibilidad, basado en asignación u obtención de datos cuantitativos para las variables de la *Fórmula 1* y que se presentan en la *Tabla 13*, permite hacer análisis comparativo y evaluar intervenciones de sostenibilidad en el tiempo.

La integración de diversas metodologías, con el objetivo de entender el estado (la Sostenibilidad) de un sistema (la Movilidad) y generar la posibilidad de escalarlo a un nivel superior (la Ciudad) resultó ser un reto muy importante de pensamiento sistémico, análisis, síntesis, creatividad y trabajo.

En cuanto a los datos colectados, destaca el amplio volumen y la contaminación con información no necesaria, su limpieza y procesamiento riguroso es determinante. Lo anterior, derivó en el establecimiento de procesos rigurosos de purificación. En relación al análisis de los datos, fue relevante el uso de fórmulas para poder visualizar los patrones y las tendencias; así como el comportamiento del sistema en su operación diaria.

En la siguiente etapa, con un análisis más profundo, la estandarización de la información (frecuencias) generada con estos datos, permitió establecer el grado de servicio en las dos escalas, las rutas y las paradas.

Por último, el análisis puntual de interacción entre los modos de transporte, con datos concretos, mostró la viabilidad o inviabilidad de propuestas concretas de intervención en un sitio relevante (ASVs) para la dinámica de la movilidad de la ciudad.

Conclusiones

Evaluar el grado de la sostenibilidad en cualquier ámbito urbano representa un reto importante, pero de relevancia en el entorno actual de la dinámica del desarrollo de las ciudades, Gershenson, C. (2013).

En el presente trabajo se logró la integración de diversas perspectivas con sus respectivas metodologías, proporcionando así, información relevante sobre los aspectos que conforman el concepto de sostenibilidad (social, económico y ambiental) aplicado al sistema de movilidad de la Ciudad de Hermosillo, Sonora. Lo anterior, generó la posibilidad de conjuntar valores en dos escalas (ciudad y sistema TP) de forma cuantitativa como el impacto ambiental (emisiones de GEI), calidad del servicio (cobertura y frecuencias), y aspectos económicos (subsidios a personas en estado de vulnerabilidad), de tal forma que, (basados en la Fórmula 1), con valores cuantitativos y a través de cálculos lógicos, es posible ranquear el estado de sostenibilidad del sistema de movilidad de una ciudad.

Conocer este estado no permitió evaluar su nivel de sostenibilidad, pero facilitó, contrastando con los mismos datos de otras ciudades, hacer un ranqueo estandarizado para comparar los resultados obtenidos (con datos y procesos similares).

En este trabajo se desarrolló un modelo que integra en una visión sostenible, de la movilidad de Hermosillo, Sonora, tomando como eje central el Transporte Público y considerando la interacción espacial y funcional de este modo de transporte respecto de los demás en la ciudad. El modelo está integrado por el estado operativo del sistema de TP y su conectividad con los demás modos de transporte en una escala puntual.

En un principio, la caracterización del sistema del TP permitió observar espacialmente su oferta y cobertura homogenizada espacialmente por celdas hexagonales. El valor cuantitativo determinante obtenido es el número de rutas y paradas por cada unidad espacial. Esto hizo posible observar que una de las problemáticas de la movilidad en la Ciudad de Hermosillo es que la redundancia del sistema está concentrada en la zona centro de la ciudad, eso genera falta de cobertura y redundancia en la periferia en dónde generalmente viven los estratos socioeconómicos más vulnerables, implicándoles mayor gasto, tanto en tiempo como en dinero. Aun así, con una gran oferta en la zona centro de la ciudad, la operación del sistema se ve comprometida por los altos volúmenes de vehículos que circulan en un espacio tan reducido provocando tráfico vehicular

y aglomeramiento de personas. Esto también implica, como se pudo observar, una gran competencia por el espacio entre los diferentes modos de transporte, incrementando el riesgo de accidentes y disminuyendo la calidad del servicio. Esto resultó evidente al analizar las distribuciones de probabilidad de las frecuencias en dos escalas, las frecuencias de las rutas completas y las frecuencias en el sitio de una parada.

Combinar dos tipos de datos, los de la operación de TP (GPS) y los de auditorías de seguridad vial (ASVs), generados en dos estudios diferentes permitió observar a detalle la interacción entre los modos de transporte. La observación directa de los datos de velocidad de los autobuses en el sitio y momento preciso de ocurrencia tomados con los dispositivos GPS permitió establecer el riesgo de recomendar que el transporte público y las bicicletas compartan un carril.

Caracterización y análisis de cobertura: Tomar la caracterización y la información operativa del transporte público como base o eje principal del estudio de la movilidad de una ciudad es factible, debido a su relevancia en la dinámica económica y social de la ciudad, así como su presencia y cobertura regional presente en todas las ciudades del mundo.

Es así que en el presente trabajo, se obtuvieron resultados en la ciudad de Hermosillo que muestran el potencial de uso de la tecnología (ya implementada). Los datos que se generan a partir de esta tecnología y que, por ejemplo, pueden ser útiles como argumento para llevar a cabo el proyecto de rediseño de rutas. También son útiles para una visualización gráfica en tiempo y espacio pues permiten observar la dinámica en diferentes horarios, como periodos de actividades específicas como la escuela y el trabajo o días particulares de la semana (patrones de actividad en ciudades).

La transdisciplina puede ser una herramienta útil para consolidar los hallazgos de este trabajo por medio de mesas colaborativas con una visión de análisis de abajo hacia arriba, desde los usuarios hasta el sistema global de movilidad, tomando como punto de partida los resultados y su debida sustentación para que a partir de ahí se genere el codiseño del trabajo colaborativo.

Por otro lado, este trabajo presenta datos, como la cobertura, el nivel de oferta del servicio y la redundancia de rutas, que proporcionan evidencia del nivel de servicio del sistema, lo que disminuiría el efecto de la percepción en las mesas de trabajo colaborativo.

En particular, para este trabajo, caracterizar y analizar la cobertura del TP permitió, con evidencia basada en datos, la selección de las dos rutas críticas para los análisis subsecuentes planteados en el modelo general (figura 6).

Análisis de distribución de probabilidad gama: Las frecuencias del TP, al igual que los tiempos de viaje en automóvil, pueden verse afectados por factores más

allá de las distancias de recorrido. Factores como el tráfico, la semaforización, la demanda y el comportamiento de los conductores al manejar también suelen ser determinantes. Se puede decir que los problemas que afectan particularmente a las frecuencias en la operación del TP, como la informalidad de los despachadores y conductores, afecta al sistema en la misma dimensión que todos los factores antes mencionados, independientemente del rigor de la operación. El comportamiento del TP de Hermosillo, como sistema, tiene un desempeño similar (Distribución de Probabilidad Gamma) al de sistemas de transporte más sofisticados y ordenados como los de Boston en Estados Unidos o bien en otras ciudades de China, Yang, Y. et al (2013).

Esta parte resultó útil para determinar, previo al análisis de conectividad, el nivel de impacto del sistema de TP para la ciudad (en la escala de Ruta) y para un punto crítico de la ciudad previamente establecido para la realización de una ASV (Escala puntual en una parada del TP).

En ambas escalas, teniendo fuentes de datos diferentes, se encontró consistencia en la información generada para las escalas de ruta y de parada. Esta consistencia permite tener certeza en los resultados obtenidos al analizar la información que se generó.

Evaluación puntual (ASVs-TP-Peaton-Bicicletas): Es primordial enfocarse en la conectividad de los modos de transporte, sobre todo el del TP con la infraestructura peatonal, basados en el desarrollo y mejoramiento de espacios públicos y áreas verdes como nodos de conectividad entre ambos modos. En conjunto, ambos modos, representan una gran oportunidad para impactar de manera positiva y a largo plazo sobre la sostenibilidad de la movilidad y de la ciudad en general, como herramientas de mejoramiento de la salud, el bienestar de las personas y del medio ambiente.

En este trabajo, se pudo estructurar un modelo para la evaluación de la conectividad, aunque es importante mencionar que tanto la disponibilidad de la información como la estructura de datos son determinantes para una estandarización o generalización del modelo para otras ciudades. Al ser diversa la estructura y disponibilidad de la información, el reto principal queda en la creatividad para la integración y estandarización de la información disponible. Pero, el marco conceptual sirve como base para el desarrollo de una metodología de integración de datos para la evaluación de la sostenibilidad de la movilidad, de acuerdo con las aptitudes económicas, sociales y ambientales de la ciudad en estudio.

Al integrar los resultados sobre frecuencias obtenidos, con la información de las auditorías viales en los puntos evaluados, podemos observar que en particular en la ASV estudiada, la concentración de rutas y vehículos genera una

problemática que solo puede ser mitigada si se aborda de manera integral. Por ejemplo, si se distribuyen las paradas por grupos de rutas por manzana en las zonas conflictivas, se evitarían aglomeraciones, tanto de autobuses como de personas en espera en las paradas, aunque ello implique que algunas personas tuvieran que caminar más, dado que esta medida ayudaría a disipar el aglomeramiento, el costo no es representativo en función al beneficio.

Además, si estas intervenciones son acompañadas con el mejoramiento de la infraestructura peatonal, incorporando acciones de modernización de espacios públicos y áreas verdes, el impacto sería positivo en términos de seguridad, salud y bienestar de los peatones. Esto se aplica a la fórmula 1, Patlins, A. (2017) que en su variable Qs, propone la evaluación cualitativa de la Calidad de servicio para los pasajeros, incluyendo el nivel de seguridad, protección y comodidad. En este caso se probó la factibilidad de pasar de datos cualitativos a datos cuantitativos para esta variable.

En términos generales, con los resultados obtenidos, es posible concluir que es factible integrar los conceptos de Sostenibilidad, Ciudad y Movilidad pues que a pesar de la dificultad de integrar valores cualitativos (bienestar y confort) y cuantitativos (emisiones de GEI y frecuencias) como lo plantea Albertí, 2017, y que se tienen en diferentes escalas, por medio de un análisis secuencial (Modelo general de análisis, Figura 6) esto es posible.

Para poder construir alternativas a la problemática de la movilidad en las ciudades, y derivar hacia un estado de mejora en la sostenibilidad, se sugiere utilizar un enfoque donde se garantice la coexistencia de los diferentes modos de transporte (TP, Peatonal, Bicicleta y automóvil particular), evitando en la medida de lo posible, su competencia o el uso desmedido del espacio.

La evidencia basada en datos permite que el enfoque vaya más allá de entender un problema, al mismo tiempo se van construyendo intervenciones que mejor la dinámica de la movilidad en una ciudad.

Referencias bibliográficas

- Affolderbach, J., & Schulz, C. (2016). Mobile transitions: Exploring synergies for urban sustainability research. *Urban Studies*, 53(9), 1942-1957.
- Albertí, J., Balaguera, A., Brodhag, C., & Fullana-i-Palmer, P. (2017). Towards life cycle sustainability assessment of cities. A review of background knowledge. *Science of the total environment*, 609, 1049-1063.
- Albertí, J., Brodhag, C., & Fullana-i-Palmer, P. (2019). First steps in life cycle assessments of cities with a sustainability perspective: A proposal for goal, function, functional unit, and reference flow. *Science of The Total Environment*, 646, 1516-1527.
- Alonso, W. (1968). Urban and regional imbalances in economic development. *Economic development and cultural change*, 17(1), 1-14.
- Armenta Ramirez, I. D. S. (2020). Las tipologías del accidente peatonal: análisis socioespacial a la estructura urbana de Hermosillo, Sonora, periodo 2014-2017.
- Baccini, P., & Brunner, P. H. (2012). *Metabolism of the anthroposphere: analysis, evaluation, design*. MIT Press.
- Bak, P. (1996). How nature works: The science of self-organized criticality. Berlin: Springer.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy*, 15(2), 73-80.
- Bare, J. C. (2014). Development of impact assessment methodologies for environmental sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 681-690.
- Barrios, D., Grisanti, A., Morales, J. R., Obach, J., Ramos, J., Santos, M. Á., & Tapia, J. (2018). *Si hay un futuro después de los autos: Análisis de crecimiento económico para Hermosillo*. CID Research Fellow & Graduate Student Working Paper No. 96.
- Batty, M. (2013). The new science of cities. MIT press.
- Bermudez, T., Davis, D. E., Gallego-Lizón, T., Benton, S., Blanco, A. B., Razu, D., ... & Stagno, D. (2019). City Design, Planning & Policy Innovations: The Case of Hermosillo (Vol. 670). Inter-American Development Bank.
- Bettencourt, L. M. (2013). The origins of scaling in cities. *science*, 340(6139), 1438-1441.
- Bettencourt, L. M., & Kaur, J. (2011). Evolution and structure of sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19540-19545.
- Bettencourt, L. M., & West, G. B. (2011). Bigger cities do more with less. *Scientific American*, 305(3), 52-53.
- Bouton, S., Hannon, E., Haydamous, L., Heid, B., Knupfer, S., Naucler, T., ... & Ramanaathan, S. (2017). An integrated perspective on the future of mobility, part 2: Transforming urban delivery. *Chicago: McKinsey & Company*, 48.
- Brake, K. Reurbanisierung-Interdependenzen zum Strukturwandel. In Reurbanis-

- ierung-Materialität und Diskurs in Deutschland; Brake, K., Urbanczyk, R., Eds.; *Springer VS: Wiesbaden*, Germany, 2012; pp. 22–33.
- Brenner, N., & Schmid, C. (2015). Towards a new epistemology of the urban?. *City*, 19(2-3), 151-182.
 - Byon, Y.-J., C. E. Cortés, C. F. J. Martinez, M. Munizaga, and M. Zúñiga. Transit Performance Monitoring and Analysis with Massive GPS Bus Probes of Transantiago in Santiago, Chile: Emphasis on Development of Indices for Bunching and Schedule Adherence. *Presented at 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2011.
 - Cabeza, L. F., Fernández, A. I., Boer, D., Mateu, C., Segarra, M., & Vallès, M. (2019). Análisis de las tecnologías de almacenamiento de energía térmica dentro de la economía circular. *Revista Centro Azúcar*, 46(5), 7-12.
 - Carbon Disclosure Project, CDP questionnaire 2014. <https://ecodes.org/documentos-ecodes/category/123-ecodes-informes-carbon-disclosure-project#>
 - Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., & Tumminia, G. (2018). Climate change and the building sector: Modelling and energy implications to an office building in southern Europe. *Energy for Sustainable Development*, 45, 46-65.
 - CHANGE, I. P. O. C. (1995). IPCC second assessment. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO-UNEP.
 - Cohen, B., & Kietzmann, J. (2014). Ride on! Mobility business models for the sharing economy. *Organization & Environment*, 27(3), 279-296.
 - Cortés, C. E., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M., & Zúñiga, M. (2011). Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 695-707.
 - Foucault, M. (2011). *El gobierno de sí y de los otros: Curso del Collège de France (1982-1983)* (Vol. 318). Ediciones Akal.
 - Franzé Mudanó, A. (2013). Perspectivas antropológicas y etnográficas de las políticas públicas. *E-Prints Complutense*. Universidad Complutense, Madrid.
 - Gebhardt, L., Brost, M., & König, A. (2019). An inter-and transdisciplinary approach to developing and testing a new sustainable mobility system. *Sustainability*, 11(24), 7223.
 - Gentile, G., Nguyen, S., & Pallottino, S. (2005). Route choice on transit networks with online information at stops. *Transportation science*, 39(3), 289-297.
 - Gershenson, C. (2013). Living in living cities. *Artificial life*, 19(3_4), 401-420.
 - Gershenson, C., & Helbing, D. (2015). When slower is faster. *Complexity*, 21(2), 9-15.
 - Gershenson, C., & Pineda, L. A. (2009). Why does public transport not arrive on time? The pervasiveness of equal headway instability. *PLoS one*, 4(10), e7292.

- Giddings, B., Hopwood, B., & O'brien, G. (2002). Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development. *Sustainable development*, 10(4), 187-196.
- Hábitat, O. N. U. (2018). Índice básico de las ciudades prósperas. *San Juan del Río. México: ONU Habitat, INFONAVIT*. Recuperado de: https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/2015/26030_Hermosillo.pdf
- Hannon, E., Knupfer, S., Stern, S., Summers, B., & Nijssen, J. T. (2019). An integrated perspective on the future of mobility, part 3: Setting the direction toward seamless mobility demand. *Sustainability & Resource Productivity Practice*. McKinsey&Company.
- Hellweg, S., & Milà i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), 1109-1113.
- HERMOSILLO, I. (2014). Programa de Desarrollo Urbano del centro de población de Hermosillo. *Spanish.* Accessed September, 14, 2019.
- Hernández-Hernández, N., & Garnica-González, J. (2015). Árbol de problemas del análisis al diseño y desarrollo de productos. *Conciencia tecnológica*, (50), 38-46.
- IEA 2016. World Energy Outlook <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>
- IMTES, 2022. Auditoría en seguridad vial con enfoque a usuarios más vulnerables. Cruce en blvd. Encinas Johnson entre blvd. Juan Navarrete y calle Gral. Bernardo Reyes, Hermosillo, Sonora.
- IMTES, 2022. Auditoría en seguridad vial con enfoque a usuarios más vulnerables. Intersección avenida Luis Donald Colosio y calle Capri, en Hermosillo, Sonora.
- IMTES, 2022. Auditoría en seguridad vial con enfoque a usuarios más vulnerables. Cruce en blvd. Encinas Johnson entre blvd. Juan Navarrete y calle Gral. Bernardo Reyes, Hermosillo, Sonora.
- IMTES, 2022. Auditoría en seguridad vial y propuesta de intervención con enfoque a la movilidad de las y los jóvenes. Tramo calle De la plata entre carretera a Sahuaripa y calle De los nogales, parque Industrial en Hermosillo, Sonora.
- IPCC 2016. *Methodological Choice and Identification of Key Categories*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/1_Volume1/19R_V1_Cho4_MethodChoice.pdf.
- ITDP 2012. *Planes Integrales de Movilidad: Lineamientos para una movilidad urbana sustentable*. ITDP. <https://mexico.itdp.org/download/planes-integrales-de-movilidad-lineamientos-para-una-movilidad-urbana-sustentable-2012/>
- Kates, R. W., Clark, W. C., Corell, R., Hall, J. M., Jaeger, C. C., Lowe, I., ... & Svedin, U. (2001). *Sustainability science*. *Science*, 292(5517), 641-642.
- Kennedy, C. A., Stewart, I., Facchini, A., Cersosimo, I., Mele, R., Chen, B., ... & Sahin, A. D. (2015). Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5985-5990.

- Kennedy, C., Miller, E., Shalaby, A., Maclean, H., & Coleman, J. (2005). The four pillars of sustainable urban transportation. *Transport Reviews*, 25(4), 393-414.
- Krafta, R., & da Silva, E. L. B. (2020). Self-organized Criticality and Urban Form System Dynamics with reference to a Brazilian city. *Area Development and Policy*, 5(3), 324-333.
- Krueger, R., & Gibbs, D. (2010). Competitive global city regions and 'sustainable development': An interpretive institutionalist account in the South East of England. *Environment and planning A*, 42(4), 821-837.
- Lara, B., Velásquez, L., & Rodríguez, L. I. (2007). Especialización económica en Sonora: Características y retos al inicio del nuevo milenio. *Región y sociedad*, 19(SPE), 27-49.
- Lefebvre, H. (1974). La producción del espacio. *Papers: revista de sociología*, 219-229.
- Levine, D. N. (1995). The organism metaphor in sociology. *Social Research*, 239-265.
- Litman, T. (2000). Evaluating carsharing benefits. *Transportation Research Record*, 1702(1), 31-35.
- Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufrasnes, E., & Sonnemann, G. (2015). Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment*, 93, 165-178.
- Low, S. M. (2003). Embodied space (s) anthropological theories of body, space, and culture. *Space and culture*, 6(1), 9-18.
- Lu, H., & Shi, Y. (2007). Complexity of public transport networks. *Tsinghua Science and Technology*, 12(2), 204-213.
- Manheim, M. L. (1979). *Fundamentals of Transportation systems analysis*; Volume 1: Basic concepts.
- Martínez, R., & Fernández, A. (2008). *Árbol de problema y áreas de intervención*. México: Cepal.
- Matsumoto Nishizawa, R. (2014). Development of Servqual Model for the measurement of the service quality in the publicity company Ayuda Experto. *Revista Perspectivas*, (34), 181-209.
- McKerracher, C., Orlandi, I., Wilshire, M., Tryggestad, C., Mohr, D., Hannon, E., ... & Moeller, T. (2016). An integrated perspective on the future of mobility. *McKinsey & Company and Bloomberg New Energy Finance*.
- Miller, P., de Barros, A. G., Kattan, L., & Wirasinghe, S. C. (2016). Public transportation and sustainability: A review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(3), 1076.
- Mirabella, N., & Allacker, K. (2017). The environmental footprint of cities: Insights in the steps forward to a new methodological approach. *Procedia environmental sciences*, 38, 635-642.
- Mitchell, R. B., & Rapkin, C. (1954). Urban traffic. In *Urban Traffic*. Columbia University Press.
- Moldan, B., Janoušková, S., & Hák, T. (2012). How to understand and measure environ-

- mental sustainability: Indicators and targets. *Ecological indicators*, 17, 4-13.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological economics*, 60(3), 498-508.
 - Patlins, A. (2017). Improvement of sustainability definition facilitating sustainable development of public transport system. *Procedia engineering*, 192, 659-664.
 - Petit-Boix, A., Llorach-Massana, P., Sanjuan-Delmás, D., Sierra-Pérez, J., Vinyes, E., Gabarrell, X., ... & Sanyé-Mengual, E. (2017). Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review. *Journal of cleaner production*, 166, 939-951.
 - Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability science* 14(3), 681-695
 - Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment: Part 1: goal and scope and inventory analysis. *The international journal of life cycle assessment*, 13, 290-300.
 - Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international*, 30(5), 701-720.
 - Ritchie, H., & Roser, M. (2018). World population growth, Urbanization. *Our world in data*.
 - Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our world in data*.
 - Rodríguez-Serrano, I., Caldés, N., De La Rúa, C., Lechón, Y., & Garrido, A. (2017). Using the Framework for Integrated Sustainability Assessment (FISA) to expand the Multiregional Input–Output analysis to account for the three pillars of sustainability. *Environment, Development and Sustainability*, 19, 1981-1997.
 - Roser, M., Ritchie, H., Ortiz-Ospina, E., & Rodés-Guirao, L. (2013). World population growth. *Our world in data*.
 - Schäfer, D. (2018). Mobility Studies, a Transdisciplinary Field. *Transfers*, 8(1), vii-x.
 - Schiller, P. L., Bruun, E. C., & Kenworthy, J. R. (2010). *An introduction to sustainable transportation: Policy, planning and implementation*. Earthscan.
 - Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2016). Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments. *Building and Environment*, 103, 215-227.
 - Stanesby, O., Morse, M., Magill, L., Ball, K., Blizzard, L., Harpur, S., ... & Cleland, V. (2021). Characteristics associated with willingness to walk further than necessary to the bus stop: Insights for public transport-related physical activity. *Journal of Transport & Health*, 22, 101139.
 - Thompson, P. B. (2017). *The spirit of the soil: Agriculture and environmental ethics*. Routledge.

- Trompet, M., Liu, X., & Graham, D. J. (2011). Development of key performance indicator to compare regularity of service between urban bus operators. *Transportation research record*, 2216(1), 33-41.
- UN DESA, 2018 *Revision of world urbanization prospects*, United Nations, May 16, 2018, <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>.
- WRI 2014. *Cities Work Better for Everyone*. <https://www.wri.org/top-outcomes/2014-top-outcomes>
- Wright, L. A., Kemp, S., & Williams, I. (2011). 'Carbon footprinting': towards a universally accepted definition. *Carbon management*, 2(1), 61-72.
- Yang, Y., Gerstle, D., Widhalm, P., Bauer, D., & Gonzalez, M. (2013). *Potential of low-frequency automated vehicle location data for monitoring and control of bus performance* (No. 13-4011).