

Modelo de optimización combinatoria para bioflujos del transporte. Área metropolitana de La Paz y El Alto

Vania Susana Calle Quispe

Universidad Mayor de San Andrés UMSA-FAADU
Universidad Pública de El Alto UPEA (Bolivia)

En la coyuntura actual, la resolución a los problemas urbanos y territoriales se lleva a cabo a través de planteamientos y metodologías que priorizan el uso de suelo y la ocupación del territorio². Estos enfoques proponen la formulación de planes urbanos a través de un diagnóstico, evaluación, propuesta y estrategias de intervención a escala urbana que parten de los espacios construidos como lugares centrales de desarrollo de capacidades y de la priorización de la regulación de uso y ocupación. Sin embargo, existe una disociación entre los hechos construidos y los actores que viven el propio espacio. Teniendo en cuenta lo anterior y de acuerdo a lo afirmado por Hugo Arrillaga y su equipo de investigación:

El enfoque del planeamiento físico, tanto la visión económica como la visión social del desarrollo, no ocupan el lugar de elementos explicativos, [...]. En este enfoque, se reconoce en los elementos del espacio construido una capacidad para determinar o facilitar las tendencias de desarrollo urbano y territorial. [...] Por consiguiente, se apunta a ordenar el territorio en función de las tendencias de crecimiento y de desarrollo³.

Este enfoque reproduce una visión tradicional, en la que todo el proceso de planificación y su desarrollo posterior dependen del estado o de gobiernos municipales como los principales actores en la toma de decisiones. Su orientación pone el énfasis en una necesidad de sistematización y homogeneización de prácticas, de tal modo que el concepto de desarrollo se reduce a una búsqueda por mantener o elevar el PIB (Producto Interno Bruto). Resulta evidente que esta perspectiva da cabida a los modelos clásicos en la consideración de lo urbano, los cuales

tienden a expresar una concepción del futuro como un estado de situación estático y definido, cuya concreción depende de la realización de las acciones previstas [...]. Esto implica, [...] supuestos implícitos, de los cuales destacaremos tres: el primero, que es posible conocer y controlar la totalidad de los factores, y de los actores, de cuya acción depende el logro de los objetivos de la planificación [...];

el segundo, que la totalidad de las consecuencias de la acción son predecibles y controlables; y el tercero, que el futuro como estado de situación es, por lo tanto, predecible. Por lo cual es comprensible que, desde los enfoques clásicos, el futuro se conciba como algo posible de ser construido a partir la acción basada en el saber técnico y en el poder centralizado del Estado⁴.

Estos tres supuestos mencionados recaen en el paradigma positivista, que centra su interés en la búsqueda de predicciones generalizadas al margen del contexto y tiempo bajo una lógica de causa-efecto. Siendo así, el investigador apoya su trabajo en las ciencias empíricas⁵, creyendo tener la facultad de controlar y predecir hechos futuros desde una mirada externa al propio objeto de estudio, despojada de subjetividades y en un supuesto plano de neutralidad. Ante este escenario, pese a que las metodologías de planificación territorial han ido cayendo recurrentemente en modelos de visión tradicional con resultados simplificadores, es preciso considerar, no obstante, que las ciencias de la física, las ciencias de la biología y las ciencias de la complejidad han demostrado la existencia de un nuevo paradigma en el que se valoriza lo heterogéneo y se entiende la realidad desde una idea de transdisciplinariedad que deriva de las interacciones y bifurcaciones dinámicas espacio-temporales. En consecuencia, la problemática de la planificación urbana descansa en la discusión de los mecanismos que hacen posible su participación en el espacio. Es en este punto donde nos preguntamos si es posible un nuevo paradigma que supere la visión tradicional, frente a los desafíos medioambientales, sociales, económicos, tecnológicos y de gestión que depara el futuro.

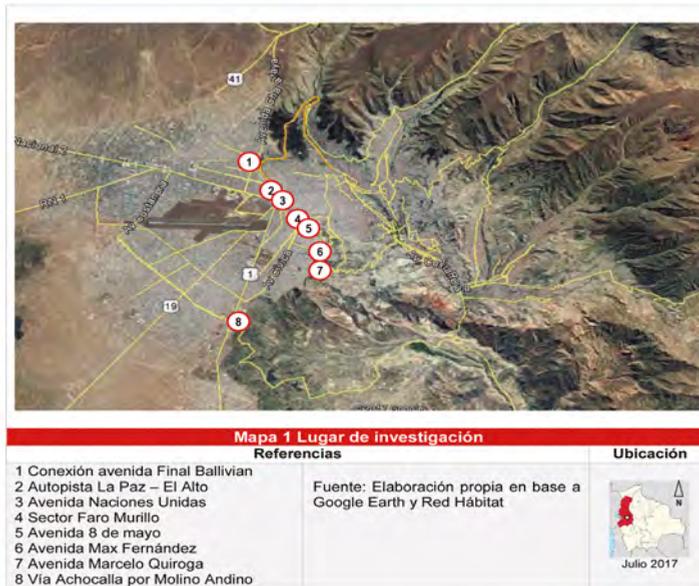
En este sentido y en relación con los problemas centrales concretos que se están produciendo a este respecto en los Municipios de La Paz y El Alto (Bolivia), las recientes políticas públicas relativas al sistema vial y de transporte, han dado como resultado la implementación de buses y rutas de operación a escala urbana, teniendo en cuenta que un 74% de los viajes se realizan en transporte público⁶, lo que da lugar a un total de 25.000⁷ viajes de pasajeros en transporte (en horas punta), entre las ciudades de La Paz y El Alto. Desde este punto de vista, estudios como el informe final del año 2015 sobre el Bus Sariri⁸ de El Alto elaborado por la Fundación *Swisscontact* hacen hincapié en la apertura y el recorrido de rutas para el desplazamiento del bus. Asimismo, la implementación del Bus Puma Katarí en la Ciudad de La Paz pretende expandir, en un futuro, su recorrido a fin de conformar un Sistema BRT (*Bus de Tránsito Rápido*) en las principales vías de la ciudad de La Paz. Ante esta estrategia, resulta necesario diferenciar dos elementos desde una perspectiva basada en la complejidad: la planificación territorial tradicional concentra sus esfuerzos en el tipo de transporte, aspecto éste que no ha contribuido a una disminución del problema de congestión vehicular ni ha aumentado la demanda de la población de este servicio. Por estas razones, se considera que el problema central no es únicamente el transporte. La resolución

del congestionamiento y tráfico vehicular en el área metropolitana de La Paz y El Alto, debe considerar las necesidades inherentes de los habitantes que desarrollan sus actividades. En consecuencia, el problema central radica en un inexistente plan de área metropolitana que analice los bioflujos de desplazamiento y, con ello, la conexión de las membranas físicas y mentales de ambas ciudades. Este aspecto es esencial ya que, según Antoni Gutiérrez Rubí,

las ciudades [...] del siglo XXI ya no son solo un territorio, un espacio delimitado, definido por sus límites administrativos. Por este motivo, ya no podemos gobernar únicamente con mapas [...]: hay que ver todas las capas de la realidad si queremos transformarla. Las capas de relaciones, flujos, datos, vínculos y causalidades que generan la actividad de las personas y su dinámica composición organizativa. Las administraciones locales y metropolitanas ya no pueden limitarse a su actuación sobre la dimensión física, si desean gobernar el bien común y ampliar el espacio de lo público. Un mundo de regulaciones (del tráfico o del suelo, por ejemplo) es imprescindible, aunque no suficiente, para embridar el desarrollo autónomo de la actividad humana, que tiende siempre al desorden que hipoteca el futuro o divide el presente de los más desfavorecidos⁹.

En consecuencia, el área metropolitana de La Paz y El Alto se encuentra articulada por flujos vehiculares que responden a múltiples intereses de los conductores. Pero las intervenciones llevadas a cabo por parte de los gobiernos municipales y la gobernación de La Paz se han limitado a proyectos de mantenimiento o ampliación vial en el sector de la autopista, dejando de lado la planificación de flujos complejos que tejen ambas ciudades. Por otro lado y de acuerdo al artículo 298 de la CPE, se señala que, entre las competencias privativas del Estado, se encuentra la creación, control y administración de las empresas públicas estratégicas, aspecto éste que sirvió de base para la implantación de dos líneas de teleférico que articulan La Paz y El Alto. Esta intervención sobrepasa la administración municipal de ambas ciudades, así como también la propia delimitación de límites. Sin embargo, es una intervención pensada para el área metropolitana.

En este sentido, la presente investigación abordó la problemática de articulación y congestionamiento vehicular entre las ciudades de La Paz y El Alto a través del modelo de planteamiento y planificación de los bioflujos que articulan ambas ciudades. Este estudio se centró en ocho puntos de conexión e interrelación (ver mapa 1) y su objetivo central ha sido el de contribuir, desde una perspectiva urbana y teniendo en cuenta la plasticidad, la innovación y los nuevos elementos de análisis para geografía alternativa aportados por el sistema basado en bioflujos, a la profundización de la democracia territorial. Asimismo, este estudio introduce elementos de análisis en la discusión sobre un modelo finito de optimización combinatoria, con una prospectiva a largo plazo, orientado a dicha área metropolitana.



Mapa 1. Lugar de investigación: municipios de La Paz y El Alto



Foto 1. Congestionamiento vehicular: ciudad de El Alto
Fuente: Vania Calle (2017).

Materiales y Métodos

Los materiales y métodos empleados en la investigación se basaron en la recogida de datos cualitativos y cuantitativos a través de la realización de encuestas y entrevistas a los conductores de movibilidades interciudad. De igual manera, se realizó una prospección de información existente en las dependencias encargadas del transporte de las ciudades de La Paz y El Alto.

Tipo de investigación

El tipo de investigación, es de carácter prospectivo¹⁰, esto es, un enfoque con una visión global, sistémica, dinámica y abierta que explica los posibles futuros, no sólo apoyándose en los datos del pasado, sino teniendo en cuenta también las evoluciones futuras de las variables cuantitativas y cualitativas, así como los comportamientos de los actores implicados. De esta manera, se trata de reducir la incertidumbre, aclarar la acción del presente y aportar mecanismos que conduzcan hacia un futuro aceptable, conveniente o deseado.

Muestra

Se diseñó cuatro preguntas de carácter abierto que fueron formuladas a los conductores de transporte interciudad. Dichas preguntas fueron las siguientes: 1. ¿Usted considera que aumentó el congestionamiento vehicular en comparación con hace 5 años?; 2. ¿En su sindicato de transporte, cuantos nuevos afiliados se han incorporado en los últimos 5 años?; 3. ¿Cuántos recorridos realiza al día?, ¿ha disminuido el número de recorridos en comparación con los últimos 5 años?, ¿ha notado una pérdida económica por el congestionamiento vehicular?; 4. Si tuviera que hacer menor recorrido en su trayecto, con mayor carga de pasajeros por hora ¿aceptaría un cambio?

De acuerdo a las respuestas obtenidas se obtuvieron los siguientes datos. En primer lugar, el 100% de los entrevistados considera que el congestionamiento vehicular aumentó en estos últimos 5 años debido a las siguientes razones: aumentaron nuevas líneas de transporte provenientes de las juntas vecinales, no existen rutas alternativas para superar los congestionamientos, la aduana autoriza el ingreso de vehículos en grandes cantidades, el parque automotor no responde a la infraestructura vial, los vehículos interciudad provenientes de municipios como Laja y Viacha congestionan la red vial, los micros se ven afectados por la presencia de minibuses en las horas punta, el congestionamiento vehicular aumentó debido a la presencia de los comerciantes que se asientan en aceras y áreas de circulación vehicular.

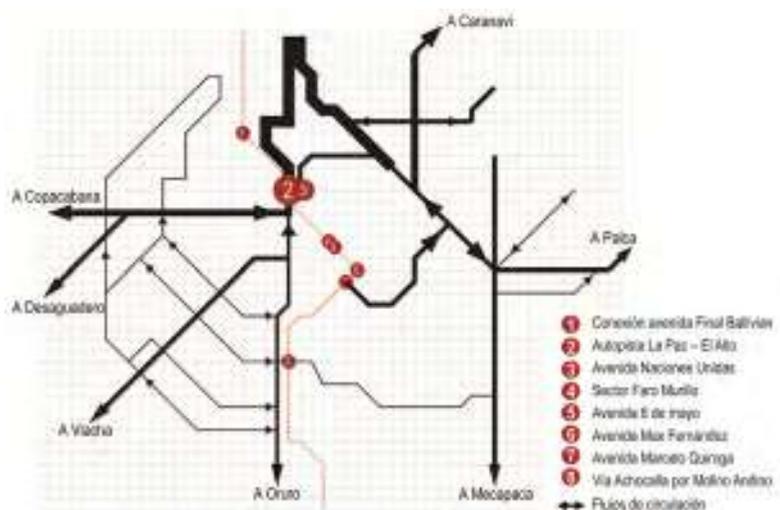
Por otra parte y de acuerdo a los resultados de la encuesta, el ingreso de nuevos afiliados en algunos sindicatos es muy restrictivo (siendo 10 el número más bajo), mientras que en otros casos existe una variación notable de nuevos integrantes, oscilando entre 45, 241 y hasta 758 nuevos afiliados. A su vez, los conductores indicaron que realizan entre 2 (como mínimo), 6 y hasta 15 recorridos al día por las siguientes razones: tienen que hacer fila y esperar el turno de cada movilidad para liberar la calle ocupada, existe un gasto económico de gasolina en puntos de congestión vehicular, existen también minibuses parados que ocupan el espacio de las vías. En comparación con años anteriores, han disminuido los recorridos hasta llegar a la mitad, pero el costo de mantenimiento de vehículos ha aumentado en comparación con años pasados (una llanta costaba 300 bolivianos y ahora cuesta 700 bolivianos). En tal sentido, el 60% de los entrevistados estaría de acuerdo con un cambio en el diseño de rutas (tienen la perspectiva de que podría mejorar su situación), mientras que el 40% de los conductores todavía teme grandes cambios ya que consideran que no sería beneficioso para su sector.

Resultados

Modelo actual de circulación del transporte en el área metropolitana de La Paz y El Alto

De acuerdo a los datos, desplazamientos y direcciones vehiculares, el modelo actual de flujos del transporte sigue una estructura centralizada, siendo los nodos de la autopista La Paz-El Alto y la Avenida Naciones Unidas las de mayor carga de pasajeros (alcanzando un promedio de 1383 minibuses de intercambio, lo que representa un total de 19.362 pasajeros en hora punta)¹¹. El actual modelo centralizado de circulación vehicular en el área metropolitana de La Paz y El Alto se compone de dos nodos centrales. Este hecho genera un impacto significativo a nivel metropolitano, regional y nacional, debido a que la vía de la autopista La Paz-El Alto se encuentra catalogada, por parte de la *Administradora Boliviana de Carreteras* (ABC), como parte de la red vial fundamental.

De entre los fenómenos que se producen en el modelo centralizado de flujos vehiculares cabe destacar los siguientes: concentración del poder de control del espacio público por parte de algunos sindicatos, se restringe el paso al transporte privado, poca efectividad de las políticas públicas, inequidad social e inequidad territorial, elevación de los costos sociales y económicos, pérdida económica en los conductores de transporte público, pérdida económica para los productores, inseguridad social y alta concentración de contaminación ambiental.



Esquema 1. Modelo actual de circulación del transporte en el área metropolitana de La Paz y El Alto. Fuente: Elaboración propia

Modelo Prospectivo para el Sistema de Bioflujos del Transporte

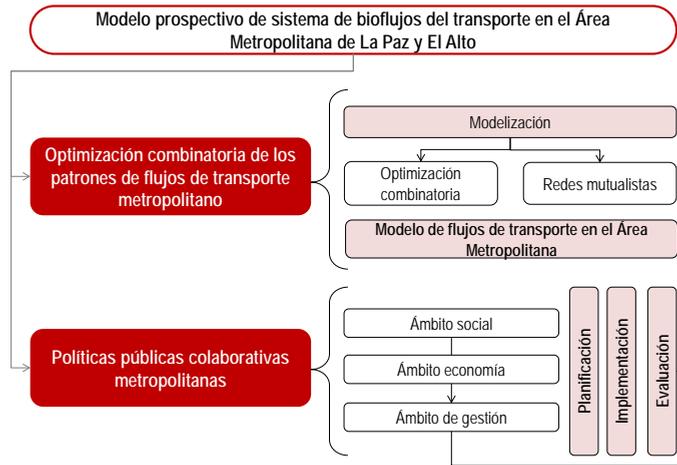
El Modelo Prospectivo para el *Sistema de Bioflujos del Transporte* contempla dos aspectos centrales que se describen a continuación:

A) *Optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano.* Se refiere a la modelización a partir de los algoritmos que constituyen el flujo de desplazamientos, teniendo en cuenta, además, su optimización combinatoria y las redes mutualistas que se derivan de la bioinspiración.

B) *Políticas públicas colaborativas metropolitanas de los sistemas de transporte y actividades.*

Tiene que ver con el diseño de los ejes de actuación a nivel social, económico y de gestión para la adecuada planificación, implementación y evaluación de los sistemas de actividades y el transporte.

Este planteamiento, en definitiva, responde a la necesidad de poder contribuir a una adecuada reproducción social y económica en el área metropolitana de La Paz y El Alto. Por lo tanto, se propone la siguiente estrategia de actuación:



Esquema 2. Modelo prospectivo para para bioflujos del transporte
Fuente: Elaboración propia

La propuesta contempla el concepto de sistema de bioflujos, cuya composición se articula con base en factores de complejidad que se encuentran sujetos, por un lado, a las acciones sociales de los actores que intervienen en el territorio y, por otro lado, a las actuaciones de los gobiernos municipales que administran el territorio. Por tanto, es importante que las políticas públicas y la resolución de los problemas existentes se planifiquen de forma consensuada.

Optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano

Al haber elegido como estructura el modelo matemático de optimización, tenemos que elegir variables de decisión de tal forma que maximicen o minimicen la función objetivo, ya que estará sujeta a posibles restricciones que puedan surgir en el proceso. Para poder definir el modelo matemático, se debe contemplar el modo en que se modificaría la solución ante un cambio en los valores de los parámetros. De esta manera, se realizaron modelaciones con el software *grafos*, que trabaja con algoritmos de funciones combinatorias para hacer posible el análisis de caminos mínimos, arboles de recorridos máximos y mínimos, revisión de flujos y rutas, etc. En lo que se refiere al lugar concreto de la investigación, se procedió a la modelización en dos escenarios, uno, el actual, y otro, el prospectivo. Para tal fin se trabajó con las vías primarias que articulan las ciudades de La Paz y El Alto.

Los resultados de la optimización se obtuvieron a partir de la relación de menor recorrido y menor tiempo de distancia, identificándose el punto de conexión de equilibrio (29), en la Av. 8 de mayo, la cual se articula desde la Av. Cívica y Av. Panorámica en El Alto y con la Av. Julio Téllez en la Ciudad de La Paz. Este punto

se encuentra a una distancia de 732 metros de la estación del Teleférico Amarillo Parque Mirador. Según los resultados obtenidos por el algoritmo de Dijkstra, se ha comprobado que el recorrido vehicular entre las ciudades de La Paz y el Alto por la Autopista y Av. Naciones Unidas no es óptimo, debido a que se emplea mayor distancia y tiempo y, al mismo tiempo, los costos económicos, sociales y medioambientales son mayores.

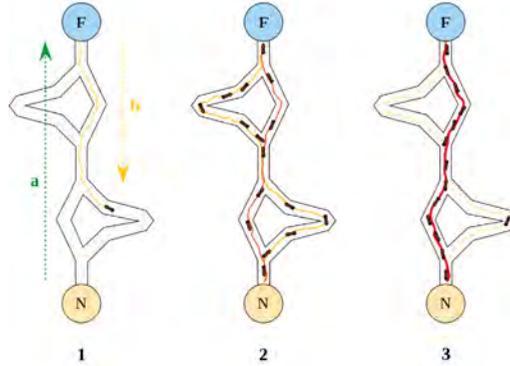
De igual modo, se encontró un segundo punto de conexión (31), en la Av. Marcelo Quiroga, que está conectada con la Av. Max Fernández en la Ciudad de La Paz y con la Av. Circunvalación en El Alto. Este punto es estratégico porque permite una articulación con la Av. Buenos Aires, que conecta con el Centro y Villa Fátima. También puede articularse con la Av. Los Sargentos que conecta con la Zona Sur y Mallasa.

Es importante destacar que la optimización será eficaz siempre y cuando la distancia y tiempo de recorrido vehicular se correspondan con las articulaciones viales. Por lo tanto, para despejar el sector de la Ceja de El Alto, se plantea la recomendación de establecer un puente de articulación desde la Av. Juan Pablo II hasta la Av. Panorámica. Esta conexión permitiría reducir la cantidad de vehículos que se concentran en la Ceja de El Alto, además de democratizar el espacio que se extiende por el sur de la frontera entre La Paz y El Alto.

Algoritmo de colonia de hormigas

La *Optimización por Colonia de Hormigas*, *Ant Colony Optimization* (ACO), es una metaheurística que pertenece a la rama de la *Inteligencia de Enjambres*, *Swarm Intelligence*. Fue propuesta por Marco Dorigo en 1992¹², quien analizó el comportamiento comunicativo de las hormigas que se guían por las feromonas para buscar de alimento. Estas sustancias bioquímicas van señalando los caminos por donde se desplazan las hormigas. De tal modo que, a mayor cantidad de feromonas mayor será la cantidad de hormigas que atraviesen un determinado sector y, en consecuencia, menor camino recorrido. Este mecanismo particular se conoce como *stigmergia*¹³, concepto planteado en 1959 por el biólogo francés Pierre-Paul Grassé, y que proveniente del término stigma, esto es aquello que deja marcas y signos químicos en el ambiente para coordinar el trabajo ergon.

Si tenemos en cuenta un punto de inicio F, y un punto de alimento de nutrientes final para las hormigas N, este enfoque analiza el recorrido que realiza una hormiga mientras libera feromonas o marcas durante su recorrido. Cuando la cantidad de hormigas aumenta se va haciendo más fuerte la concentración de feromonas a lo largo del camino más corto, lo que posibilita que el resto de hormigas caminen en el camino marcado. Véase al respecto el siguiente esquema:



Esquema 3. Optimización por colonia de hormigas

Fuente: Ideas sobre la estigmergia humana (2010).

<https://pseudopodo.wordpress.com/2010/09/30/ideas-sobre-la-estigmergia-humana/>

El algoritmo¹⁴ tiene tres fórmulas claves: la probabilidad de ir de un punto x a un punto y, la actualización de feromonas y el depósito de feromonas. Véase al respecto las siguientes fórmulas:

Probabilidad de ir de x a y:

$$p_{xy}^k = \frac{(t_{xy}^\alpha)(n_{xy}^\beta)}{\sum (t_{xy}^\alpha)(n_{xy}^\beta)}$$

Donde:

p_{xy}^k = Probabilidad de que la hormiga k recorra la distancia entre x-y del lugar L que no se ha visitado

(t_{xy}^α) = Feromona

(n_{xy}^β) = Distancia, costo

La distancia entre ciudades se obtiene por: $n_{xy} = \frac{1}{d_{xy}}$

Actualización de feromonas:

$$t_{xy} \rightarrow (1 - \rho)t_{xy} + \sum_k \Delta t_{xy}^k$$

Donde:

t_{xy} = Actualización de feromona total

$(1 - \rho)t_{xy}$ = Evaporación de feromona (se asigna un número entre 0 y 1 que es la tasa de evaporación)

$\sum_k \Delta t_{xy}^k$ = Depósito, activo de feromona, k= cantidad de hormigas total

Depósito de feromona

$$\Delta t_{xy}^k = \begin{cases} Q \setminus L_k \\ 0 \end{cases}$$

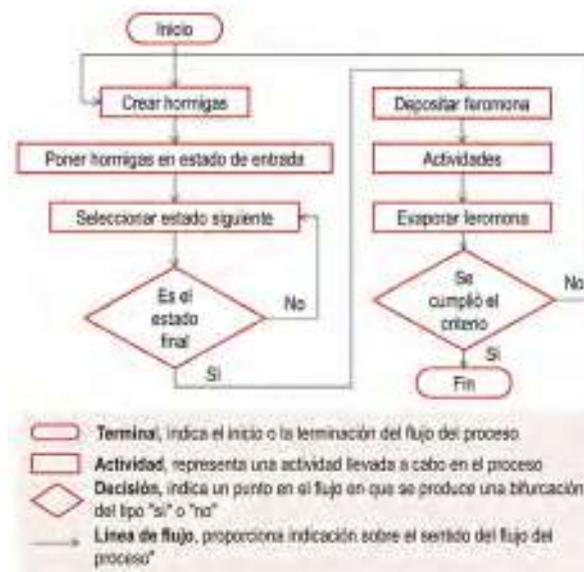
Donde:

Δt_{xy}^k = Depósito de feromona

Q = Constante que se fija por el investigador

L_k = Es la longitud del recorrido en los nodos por la hormiga¹⁵

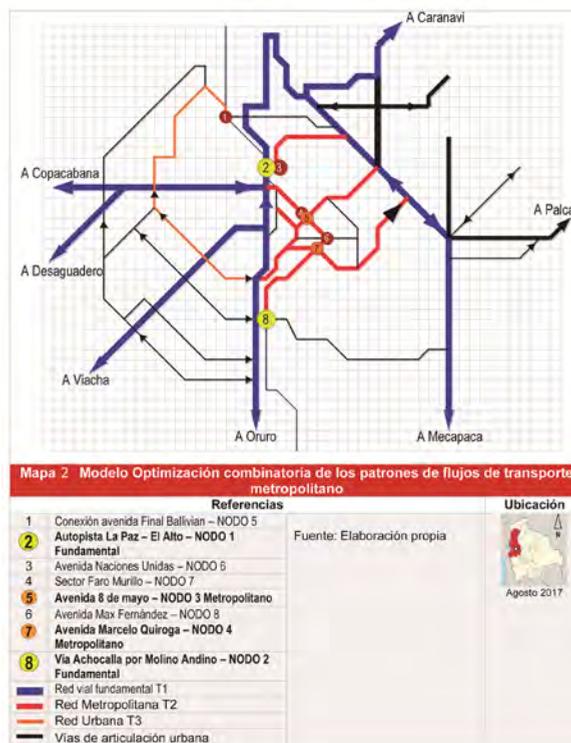
En consecuencia, el diseño del algoritmo sería el siguiente:



Esquema 4. Diagrama de flujo del algoritmo de colonia de hormigas
 Fuente: Elaboración propia con base en <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=71>

Para el cálculo de algoritmo de colonia de hormigas se aplicaron las tres fórmulas claves, es decir, la probabilidad de ir de un punto x a un punto y, la actualización de feromonas y el depósito de feromonas. Para hacer efectivo los recorridos se hizo uso del algoritmo de simulación de hormigas *java fx: Ant Algorithm Simulation*¹⁶.

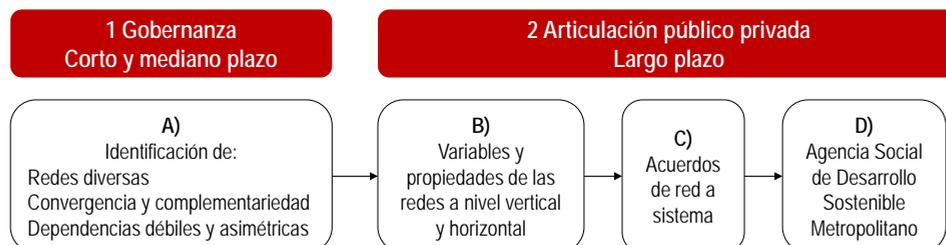
Basándonos en los estudios previos, se procedió a analizar los flujos de recorrido vehicular entre las ciudades de La Paz y El Alto tomando en consideración las rutas de mayor circulación. De esta forma, se ratifica que la menor distancia entre el punto A y el punto B se localiza en el nodo de la 8 de mayo. Se da la circunstancia añadida que ese punto es, precisamente, el de mayor preferencia por parte de las hormigas confirmando, de esta forma, los resultados del *algoritmo de Dijkstra*. Por tanto, resulta de gran importancia orientar los flujos de transporte a partir de un diseño específico de los nodos de articulación, de manera que puedan descongestionarse, a su vez, los nodos más concurridos. En este contexto, se proponen las siguientes jerarquías de nodos para los bioflujos de transporte metropolitano de acuerdo al modelo de optimización combinatoria.



Mapa 2. Modelo Optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano

*Redes mutualistas*¹⁷

Los actores sociales que presentan mayor cantidad de interacción son los gobiernos municipales de La Paz y El Alto y la gobernación del departamento de La Paz. Este panorama implica que las actuaciones políticas y de gestión urbana se enmarcan en una estrategia de gobernabilidad, concepto definido como “la capacidad de gobierno” que, en este caso, remite a un desarrollo territorial jerarquizado y piramidal, de arriba abajo. De esta manera, e preciso indicar que las interacciones actuales no acompañan al desarrollo del área metropolitana, debido a actuaciones particulares relacionadas con planes, programas y proyectos fraccionados y parciales puestos en práctica por cada municipio. En ese sentido, para la construcción territorial y la gobernanza del área, es importante poder generar un plan metropolitano que se encargue del diseño de políticas cuyo propósito sea articular los flujos socioeconómicos y ambientales en el área metropolitana. Para ello se propone el siguiente proceso a fin de que pueda ser asumido por los gobiernos municipales y sindicatos en primera instancia:



Esquema 5. Proceso para la construcción de gobernanza y articulación público-privada
Fuente: Elaboración propia

Gobernanza. Se plantea que se articule una estrategia de gobernanza a corto y mediano plazo cuya finalidad sea la identificación de redes diversas que sean convergentes y complementarias, además de dependientes, débiles y asimétricas. En esta etapa se deberá armar una matriz por cada tipo de articulación según corresponda. Una vez que se hayan obtenido los resultados, se deberá pasar a la articulación por parte de actores públicos y privados.

Articulación público privada. Se identificarán variables y propiedades de las redes a nivel vertical y horizontal. Las redes horizontales están referidas a la interacción entre los actores que se desarrolla en el territorio, y las redes verticales se centran en la interacción entre los diversos actores localizados en diferentes municipios

de la región.

Acuerdos de red a sistema. Los acuerdos deben llevarse a cabo en todo el proceso, con un cronograma establecido y con la participación activa de todos los actores. El resultado esperado es conseguir la conversión de las redes en sistemas vivos.

Agencia Social de Desarrollo Sostenible Metropolitano. Tras el diseño de la hipótesis y de los escenarios futuros sobre el grado de relación entre actores, se recomienda se crear la *Agencia Social de Desarrollo Sostenible Metropolitano*. Esta entidad, que generará un espacio de coparticipación conjunta entre los municipios de La Paz y El Alto, las redes y sistemas sociales, y el resto de los actores sociales, buscará consolidar su área de competencia mediante planes y programas, fortalecerá alianzas y estructurará las redes políticas públicas mediante la articulación con los actores de la región.

Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos, se confirma la hipótesis que sostiene la ineficacia del actual modelo de desplazamiento vehicular que articula las vías primarias del área metropolitana de La Paz y El Alto, a causa de los costos económicos de operación, de la contaminación y de las frecuentes demoras que tiene como efecto generar una situación de insostenibilidad, tanto para los municipios, como para los usuarios, transeúntes y conductores. Por tal razón, la modelación a través de la biomimesis, de la colonia de hormigas y redes mutualistas constituye una estrategia que permite una optimización de los flujos en las áreas urbanas y metropolitanas. De esta forma, la planificación territorial, al adoptar un enfoque crítico y complejo, adopta otra perspectiva para la resolución de problemáticas que tiene en cuenta la óptima reproducción socioeconómica de sus habitantes.

Conclusión

Las conclusiones que derivan de la presente investigación son las siguientes:

Según datos del censo 2012, el 67,3% de la población del país habita en áreas urbanas y el 32,7% en áreas rurales. Esto significa que la población en zonas urbanas ha aumentado en un 4,9% respecto al censo del 2001, motivo por el cual están surgiendo problemas urbanos que, en el caso de las ciudades de La Paz y El Alto, constituyen un freno para el desarrollo conjunto y para inversiones pri-

vadas. Uno de los problemas que identificó la encuesta realizada el año 2016 el *Observatorio La Paz como vamos*, de la *Fundación para el Periodismo*, tenía que ver con que la gente percibe como mayor problema el ordenamiento del transporte. Igualmente, en los talleres de Jornadas de investigación organizados por la UPEA, *Dirección de Ciencia y Tecnología* (DICyT), se recogieron demandas por parte de la *Federación de Juntas Vecinales El Alto* (FEJUVE), en las que se manifestaba como problema significativo el congestionamiento vehicular.

Entre las actuaciones propuestas por parte del estado y los gobiernos municipales de La Paz y El Alto para solucionar la demanda de transporte y el congestionamiento vehicular destaca la implementación del teleférico por parte del gobierno central a través de la creación de la empresa estatal *Mi Teleférico* y, por parte de los Municipios, la compra e implementación de los buses Puma Katari y Wayna Bus. No obstante, según datos del estudio de tesis de Maestría de la Ing. Micaela Álvarez, *Future Transit Network of La Paz Metropolitan Area-Bolivia* del año 2016, el 3.73% de la población utiliza el transporte del teleférico, y el 1,77% de la población usa el Bus Puma Katari. Estos datos dan cuenta de que el 71.57% de la población todavía usa el transporte público de minibuses o buses. Por tanto, las políticas adoptadas por el estado central y gobiernos municipales no ofrecen una solución en el contexto actual y menos a escala metropolitana.

De acuerdo a la nota CITE: SMM-DPTA Of. N° 103/2017 del 22 de agosto del 2017, se indica que, como medida para el descongestionamiento vehicular, desde el gobierno autónomo municipal de La Paz, “funciona el plan de restricción vehicular al centro paceño en días establecidos”. De igual modo, se señala que para articular La Paz y El Alto el teleférico y el bus Puma Katari forman parte del *Programa Integral de Transporte*. Por otro lado, según la nota CITE: SMMUS/DPMUS//UPMUS/060/2017 del 24 de julio de 2017, el gobierno autónomo municipal de El Alto pone de relevancia que en la actualidad se vienen realizando estudios centrados en los flujos de transporte. En conclusión, estas actuaciones por parte de los municipios y gobierno central, todavía no han dado resultados objetivos en tiempo y espacio. En este sentido, se considera que la visión tradicional de la planificación física del territorio sostenida por las instituciones públicas y el transporte en relación con los flujos vehiculares en el área metropolitana de La Paz y El Alto es problemática, debido a que las ciudades empiezan a tener otras dinámicas de actuación en sus ámbitos sociales, económicos y de gestión.

Como parte de las exploraciones que tratan de encontrar nuevas formas de resolución a problemáticas urbanas, se entendió adecuado asumir el pensamiento de las ciencias meta-heurísticas (más allá, encontrar) que trabajan con algoritmos. Desde este punto de vista, se considera importante integrar la visión aportada por la biomimesis como estrategia para emular el comportamiento de las colonias de hormigas y de otras redes mutualistas, en la medida en que vienen siendo un

ejemplo natural de beneficio mutuo entre plantas y animales. Estas nuevas exploraciones permitieron comprender mejor el desplazamiento más óptimo de los vehículos desde un punto origen a un punto destino.

En lo correspondiente al análisis histórico y social, se llevó a cabo una recopilación histórica sobre el desarrollo vial en el área metropolitana de La Paz y El Alto. De este estudio se pudo concluir que la autopista, realizada en 1977, fue el primer proyecto de articulación oficial entre La Paz y El Alto, a pesar de que la problemática del congestionamiento vehicular ha estado presente desde 1950 en la ciudad de La Paz. En este sentido, el modelo centralizado de distribución vial en la ciudad de El Alto se consolidó con la aparición de la autopista La Paz-El Alto, dando lugar a un fuerte flujo vehicular en el encuentro de las vías Juan Pablo II, y Av. 6 de marzo. En base a los datos recabados y a la clasificación vial, este proyecto identificó las vías de primer orden y 8 puntos de articulación vial entre La Paz y El Alto.

De igual manera, se realizó una lectura de las principales leyes a nivel nacional, departamental y municipal, referidas al transporte, al congestionamiento vehicular y a las vías. Como resultado de este análisis, cabe indicar que la gobernación de La Paz declara como prioridad y necesaria la conformación de una región metropolitana, fundamentada en la Ley de Autonomías, la Ley General del Transporte y la Ley Departamental de Régimen Tarifario del Sistema de Transporte por cable. Estos documentos normativos plantean el concepto de transporte intermunicipal como un medio de articulación, regulación, planificación y coordinación que debe existir entre dos o más ciudades. Por otro lado, el concepto de “sistema” es aplicado al transporte terrestre, por cable y de movilidad urbana, pudiendo incluirse también, a través de la gestión de convenios para la articulación con las rutas del teleférico, el transporte sindicalizado. Sin embargo, ninguna de estas leyes y decretos revisados hace mención a articulaciones intermunicipales por razones productivas o de empleo.

Al respecto de lo anterior, se realizó también una encuesta a los conductores que operan entre las ciudades de La Paz y El Alto, quienes manifestaron, en un 100%, que el congestionamiento vehicular aumentó en estos últimos 5 años debido a que no existen rutas alternativas y a que los comerciantes o vehículos que vienen desde Laja o Viacha ocasionan congestionamiento en las vías primarias que unen las ciudades de La Paz y el Alto. Por otro lado, la cantidad de nuevos afiliados a los sindicatos ha aumentado de 10 a 758 nuevos socios y, a su vez, ha disminuido en un 50% los recorridos que hace 5 años hacían por la cantidad de horas de espera en fila. Tal circunstancia ocasiona un gasto adicional en gasolina y pérdida económica para los conductores. Ante este panorama, un 60% de los entrevistados aceptaría un cambio en la planificación de su recorrido diario que le supusiese mayor ingreso económico y menor cantidad de horas de trabajo.

En base a los datos obtenidos de la encuesta, se realizó un estudio de demanda social del transporte que tuvo en cuenta los lugares de frecuente desplazamiento y los destinos con mayor demanda. De esta forma, se encontraron 4 rutas de mayor volumen. Por otra parte, los datos del Instituto Nacional de Estadística INE, sobre “Estadísticas del Parque Automotor, 2003-2016”, reflejan que durante el año 2016 en el área metropolitana existían 388.061 vehículos. Con este dato se llevó a cabo la proyección para el año 2025, en el que habría un total de 390.188 vehículos, distribuidos en su mayoría, en un 31%, por vagonetas, seguido en un 23% por automóviles y en un 11% por motos y minibuses. Comparando este panorama con el hecho de que el 71,57% de habitantes utilizan el transporte público, se puede sacar la conclusión de que las personas están adquiriendo con mayor fuerza vehículos particulares.

Respecto al cálculo del costo social producido por la congestión vehicular, se entrevistó a los conductores que operan entre La Paz y El Alto, obteniendo de esta forma tres escenarios de análisis. Escenario 1: conductor con renta de movilidad y con voceador. Escenario 2: conductor con vehículo propio y sin voceador. Y escenario 3: conductor con vehículo propio y con voceador. Teniendo en cuenta estos datos, se calculó el gasto económico a partir del planteamiento de una fórmula que tiene como indicadores la productividad, los precios de bienes por el incremento de los costos del transporte y el gasto de combustible quemado durante el congestionamiento. Los resultados fueron para el escenario 1 una pérdida económica de 109 bolivianos por hora de congestionamiento, para el escenario 2 una pérdida de 85 bolivianos, y para el escenario 3 una pérdida de 93 bolivianos. Estas cifras se cruzaron con la cantidad de vehículos parados en congestiones el día 11 de mayo del presente año en hora punta, teniendo como resultado una pérdida económica de 1.635.821,92 bolivianos por cada hora de congestionamiento vehicular para el escenario 1. Por tanto, éste es uno de los motivos por los cuales la ciudad es inviable en términos de reproducción socioeconómica, tanto en lo que respecta a los habitantes como a los conductores. Este panorama, caracterizado por un modelo centralizado de circulación del transporte en el área metropolitana de La Paz y El Alto genera una concentración del poder de espacio público por algunos sindicatos y la elevación de costos sociales y económicos, provocando inseguridad social y una alta concentración de contaminación ambiental.

Para poder optimizar el diseño actual se propuso el concepto de Modelo Prospectivo para el Sistema de Bioflujos del Transporte, que cuenta con dos ejes de actuación: una optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano y el establecimiento de políticas públicas colaborativas, a nivel metropolitano, en materia de transporte. Se realizó, de este modo, un trabajo de modelación para la optimización combinatoria de los patrones de flujos de transporte metropolitano con el software grafos, que trabaja con el algoritmo de Dijkstra las

4 rutas más transitadas entre La Paz y El Alto. Con este sistema se localizaron otros nodos de desplazamiento que implican menor tiempo y distancia, comprobando de esta forma que las articulaciones de la Autopista y la Av. de Naciones Unidas no son óptimos para un desplazamiento más eficiente. Igualmente, se trabajó con los algoritmos de colonia de hormigas para hallar caminos más cortos y que supusiesen menor tiempo de desplazamiento. Las conclusiones fueron similares y ratificaron los resultados anteriores.

En este escenario, es importante mencionar que cabe la posibilidad de optimizar los bioflujos de transporte a partir de la jerarquización de los nodos que conectan La Paz y El alto, considerando también la conexión de la Av. Panorámica con la Av. Juan Pablo II en la Ciudad de El Alto y la jerarquización vial metropolitana para La Paz.

Para el enfoque relacionado con las redes mutualistas, se ha propuesto un modelo de articulación de actores sociales teniendo en consideración su rol, el grado de incidencia en el territorio, el grado de relación o vínculo entre los actores y su grado de intervención. Y ello con el propósito de plantear futuras movilizaciones sociales en pro de una búsqueda de alianzas que construyan una gobernanza en el ámbito del transporte y una complementación entre lo público y privado. De esta manera, a partir de una matriz de interacción de las redes mutualistas se pudo concluir que las instancias estatales se encuentran en una situación de mayor cohesión en relación con otros actores. Partiendo de esta situación, se propusieron 4 pasos para que las redes sociales actuales puedan, a largo plazo, constituirse en sistemas de actores que busquen la articulación de otros municipios en aras de lograr construir una Región Metropolitana.

NOTAS

¹ “La ocupación actual de territorio visualiza las características generales, físico-geográficas, la historia de la ocupación territorial y la jerarquización de los centros poblados de acuerdo a su magnitud”, Documento *Lineamientos Metodológicos para la Formulación de Planes Territoriales de Desarrollo Integral para Vivir Bien* (PTDI), del Ministerio de Planificación del Desarrollo -Viceministerio de Planificación y Coordinación, 2016:18.

² Hugo Arrillaga, *et.al.* 2002: 234.

³ Hugo Arrillaga, *et.al.* 2002: 250.

⁴ Las ciencias empíricas vienen del concepto “experiencia” de hechos vividos previamente.

⁵ Dato recopilado el año 2016 de la Dirección General La Paz Bus del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz.

⁶ Dato recopilado de la Dirección General La Paz Bus del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, de los años 2011 y 2012.

⁷ Ahora cambio su nombre a Wayna Bus.

⁸ https://www.weforum.org/es/agenda/2017/06/vivir-trabajar-y-pensar-en-la-era-del-big-data?utm_content=buffer4471f&utm_medium=social&utm_source=facebook.com&utm_campaign=buffer,02/07/2017.

⁹La prospectiva se articula con el paradigma sociocrítico, el cual incorpora criterios históricos, contextuales, valorativos e ideológicos para resolver la dicotomía sujeto/objeto de forma dialógica y holística, además de luchar contra el excesivo objetivismo que posee el paradigma positivista. La investigación sociocritica parte de la concepción social y de los acontecimientos que se suscitan como fundamento para su desarrollo.

¹⁰Según datos de *Reingeniería Total SRL*, 2007.

¹¹M. Dorigo. *Optimization, Learning and Natural Algorithms* (in Italian). Phd, Politecnico di Milano, Milan Italy, 1992.

¹²La estigmergia es la “colaboración a través del medio físico en sistemas descentralizados, como hacen las hormigas. Este concepto, introducido por Pierre-Paul Grassé, se ha extendido a una serie de algoritmos de la inteligencia artificial para estudio de sistemas colaborativos. Gary Greenfield genera obras de arte algorítmico con simulaciones de estos modelos matemáticos de procesos naturales. Lo hace con la morfogénesis celular, el comportamiento de un enjambre o los hormigueros de la especie *T. albipennis*. Asignando radios y colores a nidos de hormigas virtuales construye una serie de círculos con los centros en una circunferencia y tangentes entre sí que a distancia se ven con simetría y color. Estas formas litografiadas constituyen su obra *Stigmmetry*.” Estigmergia, 07-07-2017, <http://www.fotomat.es/estigmergia/>

¹³Un algoritmo es un conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problemas.

¹⁴*Optimización por Colonia de Hormigas*, Marco Antonio Castro Liera, 19-04-2016, <http://posgrado.itlp.edu.mx/mcastro/AH/aco.pdf>.

¹⁵Este programa de simulación fue creado por Numan Karaaslan.

¹⁶Es el grado de relación existente entre especies en la la naturaleza. Se extrajo este concepto de la biomimesis.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, M. (2016). *Future Transit Network of La Paz Metropolitan Area-Bolivia*. Seúl: Kyonggi University.
- APARICIO, F. *et al.* (2008). *Ingeniería del Transporte*. Madrid: CIE Inversiones Editoriales DOSSAT 2000.
- ASCHER, F. (2012). *Los nuevos principios del urbanismo*. Madrid: Alianza Editorial.
- BAR-YAM, Y. (1997). *Dynamics of complex systems*. Massachusetts: Addison Wesley Longman, Inc.
- BENYUS, J. (2012). *Biomimesis*. Barcelona: Tusquets Editorial.
- CALLE, V. (2011). *Ecosofía Andina para la Planificación en el Contexto del Cambio*. Madrid: Editorial Académica Española.
- CARO, A. (2002). El paradigma de la complejidad como salida de la crisis de la posmodernidad. *Revista internacional de semiótica y teoría literaria*, 16-17, 69-83.
- DIRECCIÓN GENERAL LA PAZ BUS. (2016). El inicio de la transformación del transporte en La Paz, Servicio de Transporte Municipal SETRAM. La Paz: Dirección General La Paz Bus.
- EARLS, J. (2011). *Introducción a la Teoría de Sistemas Complejos*. Lima: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
- LA RAZÓN (2017). Cancelan viajes al interior y a Yungas. Noticia obtenida de http://www.la-razon.com/ciudades/Paro-Fejuve-cancelan-viajes-interior-Yungas-40-puntos-bloqueos_0_2744125579.html.
- MACARIO, R. *et al.* (2013). *Algoritmo de hormigas. Proyecto final de Ingeniería de Sistemas*. Obtenido de <http://coloniadehormigas.weebly.com/blog/proyecto-final-algoritmo-colonia-de-hormigas>.
- MARQUEZ, M. (2013). Las metaheurísticas: tendencias actuales y su aplicabilidad en la ergonomía. *Universidad Nacional Experimental del Táchira*, 7, IV (12).
- MEDEL, R. *et al.* (2009). *Ecología y evolución de interacciones planta-animal*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- MIKLOS, T. & TELLO, M. E. (2007). *Planeación Prospectiva: Una estrategia para el diseño del futuro*. Mexico D. F.: Limusa.
- MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO. (2016). *Lineamientos Metodológicos para la Formulación de Planes Territoriales de Desarrollo Integral para Vivir Bien (PTDI)*. La Paz: Ministerio de Planificación del Desarrollo.
- ORTUZAR, J. (2016). *Modelos de demanda de Transporte*. Santiago de Chile: Alfaomega.
- PUCHADES, V. *et al.* (2008). Aplicación de la Teoría de Grafos para mejorar la planificación de rutas de trabajo de una empresa del sector de la distribución automática. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la empresa*, Vol. I, 6.
- RAMIREZ, I. (2013). *Apuntes de Metodología de la Investigación*. Sucre: Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca.
- RAMOS, A. *et al.* (2010). *Modelos Matemáticos de Optimización*. Madrid: Universidad Pontificia ICAI ICADE.
- Revista La Paz ¡Así Vamos!* (2016). La región metropolitana, 7, pp. 6-83.
- SAINZ, J. & PARDO, L. (2005). *Estrategia de Desarrollo Económico Local (EDEL)*, GAMEA. El Alto: Gobierno Autónomo Municipal El Alto.

- SAINZ, J. & CALLE, V. (2015). *Memorias del Primer Foro Debate Internacional sobre el Sistema Vial y de Transportes en la Región Metropolitana de La Paz*. La Paz: UMSA.
- SAINZ, J. y CALLE, V. (2017). *Metropolización en la Región de La Paz y El Alto*. La Paz: Observatorio La Paz como vamos.
- SARAVIA, J. *et al.* (1976). *Modelo de Crecimiento Ciudad de La Paz*. La Paz: HAM.
- WOLFGANG, S. (1981). *Ciudades Bolivianas*. La Paz: Editorial Los Amigos del Libro.
- SUSTAITA, B. *et al.* (2013). *Algoritmo de Optimización por Colonia de Hormigas (ACO)*. Obtenido de <http://2013sistemasadaptativos.blogspot.com/2013/09/algoritmo-de-optimizacion-por-colonia.html>.
- ZOIDO, F. *et al.* (2013). *Diccionario de urbanismo, geografía urbana y ordenación del territorio*. Madrid: Ediciones Cátedra.
- VÁSQUEZ, D., JORDANO, P., & BASCOMPTE, J. (2009). Redes complejas de interacciones mutualistas planta-animal. En Medel, R. *et al.* (Eds.). *Ecología y evolución de interacciones planta-animal*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.