

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



Mejora de los indicadores de tráfico y satisfacción de los viajeros en horas de congestión vehicular mediante el diseño de una red de ciclovías con programación matemática en Lima Metropolitana

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE OPERACIONES

AUTOR

Miguel Ángel Rodríguez Anticona

ASESOR

Mg. Jonatán Edward Rojas Polo

Lima, 4 Diciembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor Jonatán Rojas por aconsejarme a ingresar a la Maestría de Ingeniería Industrial y al Grupo de Investigación de Operaciones Aplicadas (GIOPA) que me abrió sus puertas, lo que me permitió aprender mucho de ellos.



DEDICATORIA

Se la dedico a Dios Jehová, a mi abuelita y a mi padre que está en el cielo. A toda mi familia y amigos que siempre confían en mi: Muchas Gracias.

También dedico esta investigación a todas las generaciones eco-amigables del pasado y del futuro que luchan por un mundo en armonía con el ser humano.



Resumen

En Lima según un estudio de solo el 35% de sus habitantes se encuentra satisfecho con su ciudad; entre las principales causas de la insatisfacción están la inseguridad ciudadana y el transporte público con 75% y 51% respectivamente. Adicionalmente el 80% de limeños estiman que la principal causa de la contaminación ambiental de su ciudad se debe a la contaminación atmosférica y no les falta razón, en un reporte del se indicó a Lima como la capital sudamericana con peor calidad de aire por tener los mayores índices de PM2.5 Y PM10. Es relevante mencionar que el 70% de dicha contaminación atmosférica se debe al parque automotor, el cual presenta un alto crecimiento en Lima, por ejemplo, del 2010 al 2015 creció en un 66,2% lo que seguirá ocasionando mayor congestión vehicular, insatisfacción de los usuarios y mayores niveles de contaminación atmosférica. Adicionalmente un limeño pasa en promedio aproximadamente 4 horas en el tráfico diariamente.

En consecuencia, surge la necesidad de proponer nuevos sistemas de transporte que sean eficientes y ecoamigables, uno de ellos es la movilidad en bicicleta tan promovida en Europa por ser más rápida en trayectos urbanos de puerta a puerta en distancias de 5 kilómetros e incluso más si aumenta la congestión como lo demuestra al tiempo que promueve la salud, reduce los niveles contaminación atmosférica y sonora, reduce el costo de transporte para los usuarios, y disminuye el consumo energético, etc. Para el caso de Lima, a pesar de algunos esfuerzos aislados de construir ciclovías en distritos como San Isidro o San Borja, según el porcentaje de ciclistas urbanos se está reduciendo; en el año 2010 eran el 1.10% los ciclistas en la ciudad, cifra que para el año 2017 se redujo al 0.82% frente a los diferentes tipos de medios de transporte, donde los principales modos de transporte en Lima son el bus y las combis, con un aumento de buses en los últimos años en detrimento de las custers o combis.

En el análisis realizado en esta investigación se encontró cuáles son los factores más importantes para la elección de ruta en bicicleta, la distancia promedio de viaje y las diferencias entre género y frecuencia de uso. Adicionalmente se encontró que hay lugares en Lima donde hay una frecuencia importante de viajes en bicicleta a pesar de que no tiene una ciclovía construida. Definiendo los parámetros con el análisis que se acaba detallar se realizó un modelo matemático para proponer una red de ciclovías que cumplan con la meta del año 2021 de 200 km de ciclovías construidas en Lima. El

modelo matemático fue basado en una programación lineal y se resolvió usando el software CPLEX con el lenguaje de programación AMPL y que tuvo un tiempo de procesamiento de 35 horas. En conclusión, este estudio pretende más allá de la formulación matemática modelo una metodología para una inteligente planificación de diseño de una red de ciclovías que podría usarse tanto en Lima como en cualquier otra ciudad del Perú o el mundo.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1 Investigación de Operaciones	2
1.1.1 Programación Lineal	6
1.1.2 Heurísticas	11
1.2 Analytics e Investigación de Operaciones	16
1.3 GIS.....	18
1.4 Ciclovías.	24
CAPÍTULO 2. CASOS DE ESTUDIO	31
2.1 Caso 1: Planeamiento de ciclovías basado en GIS – MCDA: Un caso de estudio en Singapur	31
2.2 Caso 2: Propuesta de diseño de Ciclovías en Lima Metropolitana mediante la optimización de flujo de redes.....	41
2.3 Caso 3: Método o Marco de trabajo de optimización en el diseño de red de ciclovías.....	45
2.4 Caso 4: Diseño de red de ciclovías: modelo y algoritmo de solución.....	51
CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DE LA RED DE CICLOVÍAS EN LIMA	56
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL MODELO.....	83
CAPITULO 5. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS	92
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nueve Factores para la evaluación del problema de ciclovías en Singapur.	33
Tabla 2. Tipos de problemas intermedios: minimización del input.....	48
Tabla 3. Notación del caso 4.....	53
Tabla 4. Variables de regresión múltiple para encontrar una relación del nivel de uso de bicicleta.....	57
Tabla 5. Kilómetros de infraestructura ciclística y porcentajes de viajes realizados en bici en las principales ciudades Latinoamericanas.....	59
Tabla 6. Intervalos de confianza de los factores.....	77
Tabla 7. Matriz de Comparaciones Pareadas.....	77
Tabla 8. Matriz Normalizada.....	78
Tabla 9. Pesos por cada factor.....	78
Tabla 10. Clúster de distritos por seguridad.....	84
Tabla 11. Rutas a evaluar.....	88
Tabla 12. Ciclovías actuales vs propuestas.....	97
Tabla 13. Potenciales Beneficiados.....	98
Tabla 14. Potencial reducción del parque automotor.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Los siete puentes de Konnigsberg.	3
Figura 2. Niveles de abstracción en el desarrollo de un modelo.	5
Figura 3. Algoritmo genético general.	14
Figura 4. Algoritmo del recocido general.	15
Figura 5. Proceso de analítica	18
Figura 6. Mantenimiento y mejora de vías recreativas, una aplicación de GIS.	22
Figura 7. Mapa de México con datos multivariados de textura de suelo.	23
Figura 8. Cuatro tipos de ciclista en Portland.	24
Figura 9. Recomendaciones técnicas de una bike line.	27
Figura 10. Recomendaciones técnicas de una cycle track.	29
Figura 11. Mapa de Woodlands.	32
Figura 12. Importancia de los factores por stakeholder.	34
Figura 13. Mapas sobre donde construir ciclovías por factor.	35
Figura 14. Mapas de calor de la ubicación de ciclovías por stakeholder.	36
Figura 15. Mapa de las veredas dentro del mapa de la figura 4d.	37
Figura 16. Comparación de las preferencias por Stakeholders.	38
Figura 17. Ubicación de ciclovías en dos escenarios diferentes.	39
Figura 18. Red de ciclovías por stakeholders.	40
Figura 19. Mapa de los tres sectores del análisis.	43
Figura 20. Los 3 sectores con las rutas óptimas entre los nodos principales.	44
Figura 21. Mapa de las veredas dentro del mapa de la figura 4d.	47
Figura 22. Red de ciclovías para varios coeficientes de máxima longitud de viaje por la distancia más corta a) 100%, b) 110%, c) 120%, d) 130%.	50
Figura 23. Red propuesta de ciclovías. a) Sin penalidad por discontinuidad, b) Con penalidad por discontinuidad.	55
Figura 24. Diferentes modalidades de transporte en Lima.	58
Figura 25. Mapa de la red de ciclovías actual.	60
Figura 26. Automóviles estacionados en ciclovías de San Isidro y San Borja.	61
Figura 27. Ciclovía en Villa El Salvador convertido en basural.	61
Figura 28. Satisfacción sobre las ciclovías por región de Lima en 2017.	62
Figura 29. Característica de ciclovía en Mariano Cornejo	65
Figura 30. Característica de ciclovía cerca a Larcomar.	66
Figura 31. Mapa de calor de los viajes realizados por los usuarios de Strava.	68
Figura 32. Encuesta realizada.	69

Figura 33. Características de los encuestados.....	70
Figura 34. Frecuencia de llenado de encuesta.....	71
Figura 35. Características de los encuestados.....	72
Figura 36. Nube de palabras de las respuestas a la pregunta ¿Qué otro factor consideras importante para la elección de tu ruta?	73
Figura 37. Importancia de los factores para la elección de ruta por género y por frecuencia de uso semanal.	74
Figura 38. Reporte anova por cada factor.....	75
Figura 39. Reporte Duncan del factor “Cantidad de buses”.....	76
Figura 40. 5 Por qué de bajo ratio de ciclistas urbanos en Lima	79
Figura 41. Ejemplo de ruta en Strava que se compartió en encuesta	80
Figura 42. Ruta de ciclista ploteada en QGIS desde Strava.....	81
Figura 43. Rutas más frecuentes de ciclismo.....	81
Figura 44. Mapa de calor por rutas más frecuentes en Lima.....	82
Figura 45. Mapa de tráfico en Lima 6 a 9 a.m.....	85
Figura 46. Cálculo de ancho de vía.....	86
Figura 47. Nodos a evaluar.....	87
Figura 48. Nodos de extremos de rutas	88
Figura 49. Flujograma de método usado en la propuesta de red de ciclovías	91
Figura 51. Archivo.run del modelo de red de ciclovías.....	95
Figura 52. Ciclovías propuestas con el mapa de Lima.....	96
Figura 53. Ruta Centro de Lima a Parque Kennedy.....	99

INTRODUCCIÓN

El objetivo de la presente tesis es aumentar la satisfacción de los viajeros en Lima mediante una red de ciclovías en Lima. El foco son los viajeros que se transportan al trabajo, escuela o universidad, lo que en inglés se llama *commuter*. Actualmente la insatisfacción en Lima sobre el transporte público es del 51% (Lima, como vamos 2017)

En el capítulo del marco teórico se presentará las definiciones de investigación de operaciones y de GIS que en sus siglas en inglés significan Sistemas de información Georeferenciada. Dentro de la investigación de operaciones se enfatizará sobre la programación lineal.

En el capítulo llamado estudio de casos se describen los resultados de la búsqueda en la literatura académica de propuestas de modelo para el diseño de redes ciclovías, algunas solo teóricas y otras aplicadas como en Singapur.

En el capítulo sobre la descripción y diagnóstico de las ciclovías en Lima se relatará el decrecimiento de viajeros en bicicleta en Lima, se describirá el análisis realizado sobre una encuesta a limeños sobre los factores que más consideran para viajar en bicicleta. Todo lo anterior nos ayudará a encontrar los factores más importantes en el contexto limeño que se incluirán en el modelo del capítulo siguiente.

En el capítulo sobre el diseño del modelo se presentarán el mundo real supuesto para a partir de ahí empezar a desarrollar la formulación del modelo matemático con el objetivo de minimizar el riesgo de los viajeros a transportarse en las ciclovías a implementarse. Esta función de riesgo estará basada en un estudio basado en una encuesta a diferentes perfiles de ciclistas. Posteriormente se realizará la explicación al detalle de sus variables, de sus restricciones de demanda, capacidad, disponibilidad, continuidad de la red y de la función objetivo.

Finalmente, en los dos últimos capítulos se presentará los resultados del modelo propuesto, es decir la red de ciclovías propuesta, cuál es la cantidad potencial de personas beneficiadas y la potencial reducción del parque automotor y las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentará una breve definición de la investigación de operaciones con énfasis en programación lineal, en heurísticas y la relación de la analítica con la investigación de operaciones; posteriormente se describirá la definición GIS (Geographic Information System) y las clasificaciones de ciclovías que se implementan actualmente.

1.1 Investigación de Operaciones

Al realizar una síntesis sobre las definiciones de investigación de operaciones según [Hillier y Lieberman, 2015](#) y [Winston, 2005](#) “se define a la investigación de operaciones como un enfoque científico en la toma de decisiones a partir de un análisis sistémico de problemas determinísticos” en cualquier tipo de organización, donde se conoce con certeza toda la información necesaria para su resolución o en problemas estocásticos, en los cuales la información necesaria para resolver el problema no se conoce con certeza y se comporta de manera probabilística. En esencia, la naturaleza de la organización es irrelevante, por la cual la investigación de operaciones ha sido aplicada de manera extensa en áreas tan diversas entre sí como manufactura, transporte, construcción telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, fuerzas armadas, servicios públicos, etc.

Desde el siglo XVII, notables precursores de la investigación de operaciones como los matemáticos Huygens y Pascal, trabajaron en intentar resolver problemas relacionados con decisiones complejas mediante el uso del cálculo de la probabilidad. Charles Babbage nacido también en ese mismo siglo, realizó investigaciones sobre las operaciones de la industria postal, específicamente en el transporte, pricing y la clasificación de los correos; su trabajo llevó a Sir Rowland Hill a presentar "Penny Post" a toda Inglaterra. Por esta contribución algunos llaman a Babbage el padre de la investigación de operaciones ([INFORMS, 2007](#)).

Otro precursor de la investigación de operaciones a considerar es Euler, quien tiene el crédito de haber formulado la teoría de grafos con su problema sobre si es posible cruzar los siete puentes de la ciudad de Königsberg sin cruzar alguno de los puentes dos veces más de dos veces ([Gass y Assad, 2005](#)). Euler demuestra que matemáticamente que no era posible tal proeza. En la figura 1 se muestra la configuración de los puentes desarrollada por este matemático.

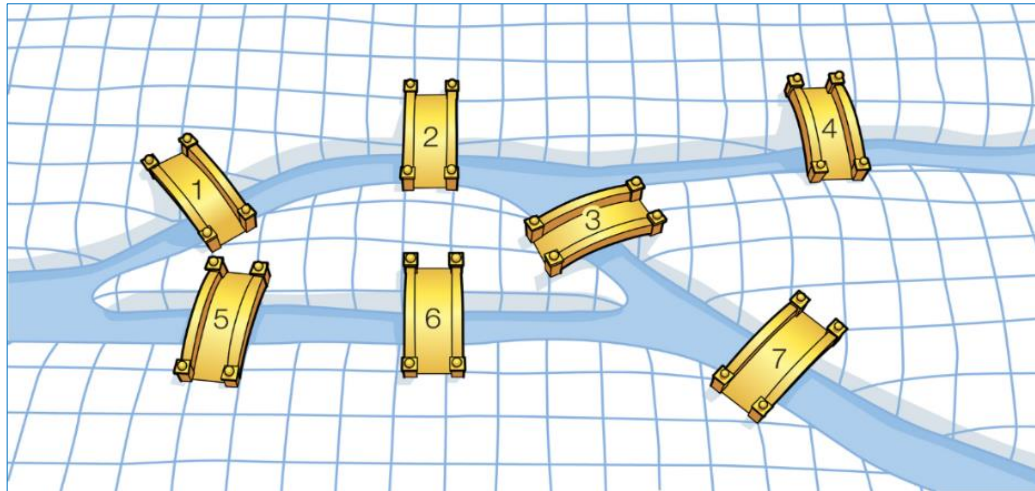


Figura 1. Los siete puentes de Königsberg.

Fuente: [Encyclopedia Britannica, 2010.](#)

Según las investigaciones de [Kirby, 1989](#) en su destacado libro sobre la utilización del área de investigación de operaciones desde la década de los años 30 hasta los 70, las primeras actividades formales de la investigación de operaciones se dieron en Gran Bretaña durante la Segunda Guerra Mundial cuando se encargó a un equipo de científicos ingleses, liderados por el distinguido físico británico Patrick Blackett, la mejor utilización de recursos bélicos, que en ese tiempo eran escasos.

Ellos tuvieron que analizar la situación de Gran Bretaña al introducir el sistema de convoyes, los cuales están compuestos por una flota de buques mercantes escoltados por buques de guerra con el objetivo de reducir las pérdidas de suministros ocasionados por los ataques de los submarinos alemanes, pero no estaba claro si era mejor que los convoyes fueran grandes o pequeños.

Una peculiaridad del convoy era que viajaba a la velocidad del miembro más lento, razón por la que se dedujo que un convoy pequeño necesariamente iba a viajar más rápido, llevando a argumentar que los convoyes pequeños serían más difíciles de detectar para los submarinos alemanes; mientras que, por otro lado, con un convoy grande se podían desplegar más buques de guerra contra su agresor.

Partiendo de este punto, el equipo de Blackett demostró que las pérdidas sufridas por los convoyes dependían en gran medida del número de buques de escolta presentes más que del tamaño total del convoy; su conclusión fue que un número reducido de convoyes grandes son más defendibles que muchos convoyes pequeños. Otra estrategia propuesta por el equipo de Blackett fue el cambio de activación de las cargas de profundidad de 30 metros a 6 metros, con lo cual su mortalidad subiría.

La razón expuesta por el equipo de científicos era que, si un submarino veía un avión poco antes de su llegada, las cargas de profundidad no tendrían efecto relevante ya que el submarino no habría tenido tiempo para descender hasta los 30 metros, y si divisaba al avión con bastante anticipación tendría tiempo para alterar su curso bajo el agua, por lo que las posibilidades de que las cargas de profundidad le hicieran daño eran menores.

Finalmente se demostró que era más eficiente atacar a los submarinos cerca de la superficie cuando las ubicaciones de los objetivos eran mejor conocidos que intentar su destrucción a mayor profundidad cuando sus posiciones sólo se podían pronosticar. Antes del cambio de configuración de 30 metros a 6 metros, el 1% de los submarinos sumergidos se hundía y el 14% se dañaba; después del cambio, el 11% de los submarinos fueron hundidos y 15% dañados. Blackett dijo que "hay pocos casos donde una gran ganancia operativa había sido obtenida por cambios tan pequeños y simples en las tácticas".

Los autores [Hillier y Lieberman, 2015](#) relatan cómo al finalizar la Segunda Guerra Mundial el uso de la investigación de operaciones se expandió más allá del campo militar, para incluir tanto a empresas privadas como a otras organizaciones no gubernamentales, al percatarse de que los mismos problemas que sufrieron las diferentes fuerzas armadas durante la guerra eran similares a las que estos afrontaban a pesar de estar en otro contexto.

De esta forma, muchas de las herramientas que caracterizan a la investigación de operaciones como la programación lineal, la programación dinámica, la teoría de colas y la teoría de inventarios habían sido desarrolladas casi por completo antes del término de la década de los años cincuenta. La industria petroquímica fue de las primeras industrias, según las investigaciones históricas de [Kirby, 1989](#), en utilizar ampliamente la investigación de operaciones para mejorar su eficiencia y su productividad.

La investigación operativa según [Taha, 2012](#), depende no solo de la capacidad analítica sino también de la creatividad y la experiencia, al saber, por ejemplo el cuándo y cómo usar determinada técnica.

De acuerdo con [Winston, 2005](#) las fases principales del proceso de la investigación de operaciones son:

1. Plantear el problema
2. Observar el sistema

3. Formular un modelo matemático del problema
4. Solucionar el modelo y usar el modelo para predecir
5. Elegir la alternativa más adecuada
6. Presentar los resultados y la conclusión del estudio a la empresa
7. Poner en marcha y evaluar las recomendaciones.

Es importante resaltar que todos los teóricos de la investigación de operaciones están de acuerdo con que el elemento principal de la investigación de operaciones es el modelado matemático.

Taha, 2012 define el proceso de modelamiento matemático empezando por delimitar el mundo real supuesto que se abstrae del mundo real, enfocándose en las variables más importantes que puedan explicar el sistema del mundo real. Posteriormente el modelo se origina como abstracción de las relaciones matemáticas del mundo real supuesto, dicho proceso se aprecia de forma esquemática en la figura 2.

Un modelo que no alcanza a predecir lo que ocurrirá en el mundo real supuesto debe descartarse, pero analizar sus fallas posibilita el perfeccionamiento del siguiente modelo, no hay que pasar por alto que algunos de los adelantos más importantes de la ciencia han resultado de la falla de un modelo en particular. La solución del modelo matemático establece una base para tomar una decisión, pero siempre se debe tener en cuenta factores intangibles o no cuantificables como, por ejemplo, el comportamiento humano para poder llegar a una decisión final.

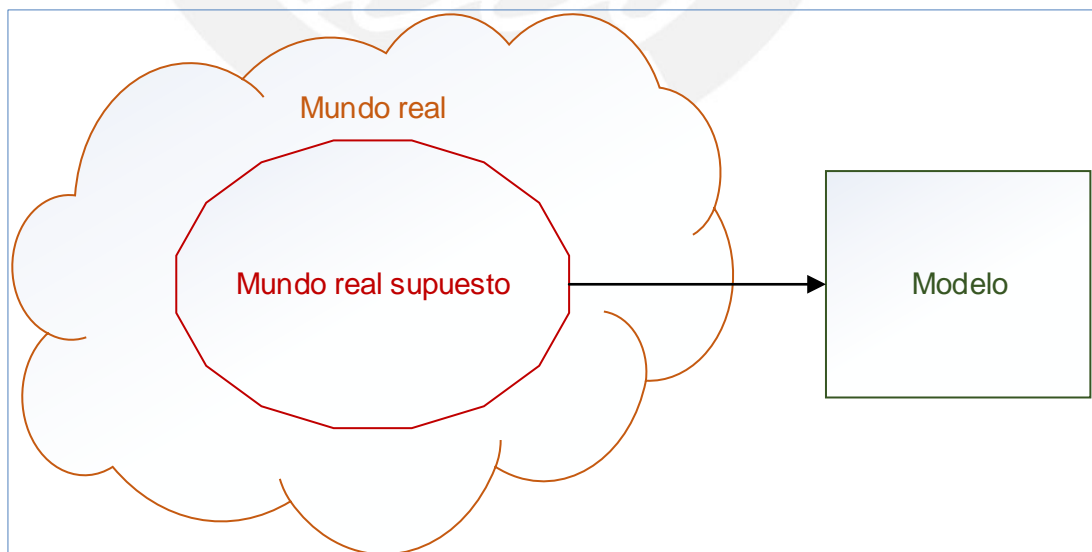


Figura 2. Niveles de abstracción en el desarrollo de un modelo.

Fuente: Taha, 2012

1.1.1 Programación Lineal

Los problemas determinísticos se subdividen en varias clasificaciones, una de ellas es la programación lineal que ha sido clasificada como uno de los más importantes logros científicos del siglo XX. Los fundadores de esta técnica son Leonid Kantorovich quien diseñó un programa lineal para modular un problema de naturaleza económica, George Dantzig quien diseñó el algoritmo simplex en 1947 y John von Neumann quien desarrolló la teoría de la dualidad en el mismo año.

La programación lineal es una herramienta establecida bajo modelos matemáticos utilizada para resolver problemas de optimización basados principalmente en una función objetivo y restricciones que son lineales, es decir, todas las variables están en la primera potencia. Según [Arreola, 2003](#) es “una técnica matemática que se utiliza para la solución de diferentes tipos de problemas, tanto teóricos como prácticos, en diversas áreas del conocimiento”. El éxito en su aplicación a problemas reales, sofisticados y complejos es avalado por una gran cantidad de instituciones de bienes y servicios en muchos países y por cientos de artículos académicos publicados.

De acuerdo con [Alvarado, 2009](#) en cualquier fenómeno que intervengan un número determinado de variables no negativas o iguales a cero, “que se pueden ligar entre sí mediante relaciones de desigualdad o igualdad y que reflejen las limitaciones o restricciones que el fenómeno presenta con miras a optimizar un objetivo, puede ser formulado como un modelo de programación matemática. Si tanto las restricciones como la función objetivo se pueden enunciar mediante expresiones lineales, estamos frente a un campo particular de la programación matemática denominada “programación lineal”; que busca principalmente planear las actividades que van a permitir obtener un resultado óptimo, es decir, el resultado que mejor alcance el objetivo entre las alternativas de solución.

De esta forma, el autor explica que la programación lineal tiene como objetivo optimizar un resultado partiendo de la selección de los valores de un conjunto de variables de decisión, en el cual se deben respetar restricciones que obedecen a la disponibilidad de recursos, especificaciones técnicas y demás condiciones que pudieran limitar la libertad de elección.

Es importante mencionar que la programación lineal permite representar un sistema de producción por medio de un modelo o matriz en el que se incluyen primero, los costos e ingresos generados por unidad de actividad, es decir, la función objetivo; segundo, los aportes y requerimientos de productos e insumos por unidad de cada actividad considerada, es decir, los coeficientes insumo/producto; y tercero, la

disponibilidad de los recursos, especificaciones técnicas y empresariales a respetar, que son los valores del lado derecho de las restricciones.

Alvarado, 2009 sugiere que en términos generales se puede entender la programación lineal como un medio para “determinar la mejor manera de distribuir una cantidad de recursos limitados en procura de lograr un objetivo expresable en maximizar o minimizar una determinada cantidad”.

Hablar de la programación lineal implica mencionar las suposiciones básicas como lo son la suposición de proporción, el supuesto de adición, la suposición de divisibilidad, el supuesto de certeza y el supuesto de no negatividad, que se abordarán a continuación.

Suposición de proporción. Este supuesto tiene que ver con la forma lineal de las funciones así, por ejemplo, producir dos veces más de un artículo, significará dos veces más de ganancias.

Supuesto de adición. Esto implica que la contribución de cada variable a la función objetivo es independiente de las demás variables.

Suposición de divisibilidad. Esto significa que la solución puede tomar como valor cualquier fracción, sin embargo, en muchos problemas de la vida real necesitamos encontrar soluciones enteras, de ahí surge la programación lineal entera.

Supuesto de certeza. Esto tiene que ver con la característica determinística, o sea, que se conoce con certeza toda la información necesaria para plantear el problema como las variables, los costos, la contribución, etc.

Supuesto de no negatividad. Todas las respuestas o variables son no negativas, mayor o iguales a cero.

Desde otro punto, la formulación de la programación lineal consta de las siguientes partes:

1. **Las variables de decisión** las cuales son incógnitas y que obtendrán recién un valor en la solución y que permitan tomar decisiones sobre las causas que provocaron el planteamiento del modelo de programación lineal, por ejemplo X_1, X_2, \dots, X_N .
2. **La función objetivo** o también llamada la función lineal, es la función compuesta por las variables de decisión donde el tomador de decisión busca maximizar (usualmente ganancias o utilidades) o minimizar (usualmente reducir costos).

3. **Un conjunto de restricciones** son las relaciones entre las variables de decisión y los recursos disponibles, estas restricciones limitan los valores que tomarán las variables de decisión.
4. **Coefficientes tecnológicos** son los coeficientes que afectan a las variables de las restricciones, son llamados así porque usualmente estos coeficientes reflejan el nivel de tecnología usada para producir diferentes productos.
5. **Las restricciones de no negatividad** o también conocido como el rango de existencia, que consiste en restringir todas las variables X_N que sean mayores o iguales a cero.

Según [Kong, 2010](#), de manera genérica, se puede plantear un problema de programación lineal así:

$$\text{Max ó Min } Z = C_1 * X_1 + C_2 * X_2 + C_3 * X_3 + \dots + C_N * X_N$$

Sujeto a las condiciones o restricciones:

$$A_{11} * X_1 + A_{12} * X_2 + \dots + A_{1N} * X_N \{ \leq, =, \geq \} B_M$$

·
·
·

$$A_{M1} * X_1 + A_{M2} * X_2 + \dots + A_{MN} * X_N \{ \leq, =, \geq \} B_M$$

En donde X_1, X_2, \dots, X_N son variables

$C_1, C_2, \dots, C_N, A_{11}, A_{12}, \dots, A_{MN}, B_1, B_2, \dots, B_M$ son constantes

En cada condición se asume uno de los símbolos $\{ \leq, =, \geq \}$

Tanto la función objetivo como las restricciones son funciones lineales de las variables X_1, X_2, \dots, X_N

Se le da el nombre de región factible al conjunto de soluciones factibles donde los valores X_1, X_2, \dots, X_N cumplen todas las restricciones y se llama solución óptima a la solución factible con valores X_i que maximizan el objetivo si es que la función se indicó como maximización, o que minimizan el objetivo si es que la función se indicó como minimización.

Las restricciones con frecuencia representan el uso de recursos limitados, ya sea en forma directa o indirecta, en este caso, se puede imaginar que el lado derecho representa los límites de disponibilidad de los recursos.

Es primordial tener en cuenta que en algunas programaciones lineales las restricciones de no negatividad no podrían cumplirse para algunas de las variables de decisión.

Análisis de sensibilidad.

Las soluciones óptimas han sido encontradas bajo las suposiciones arriba descritas, entre estas suposiciones encontramos en primer lugar el supuesto de la certeza, lo que significa que los datos pueden ser, por ejemplo, que las utilidades unitarias sean fijas, en segundo lugar, que las cantidades de recursos disponibles sean conocidas, y en tercer lugar que el tiempo necesario para producir una unidad sea exacto. Sin embargo, en el mundo real las condiciones no tienden a ser estáticas sino dinámicas, para aumentar la aplicación de la programación lineal en la práctica, es necesario agregar una dimensión dinámica que investigue el impacto que tiende a hacer cambios en los parámetros del modelo (coeficientes de la función objetivo y de las restricciones) sobre la solución óptima.

Los valores del lado derecho de las restricciones a menudo representan recursos disponibles para la empresa, estos pueden ser tiempo estándar de trabajo, materiales de producción disponibles, horas de mano de obra disponibles, etc.

El precio dual de un recurso indica el valor en que la función objetivo será incrementada o disminuida debido a cambios en una unidad del recurso; sin embargo, esta propiedad se cumple solo hasta un límite; posterior a este límite la función objetivo puede cambiar, pero por un valor diferente al precio dual.

En los casos en que una solución óptima es no degenerada y tiene una variable de decisión cuyo valor óptimo es cero, se puede afirmar que el coeficiente de estas variables en la función objetivo debe ser modificado por lo menos en el costo reducido (y posiblemente en más), con el objeto de que haya una solución óptima en la que la variable aparezca con un valor positivo.

Programación lineal entera.

La programación lineal entera según [Hillier y Lieberman, 2015](#) es una variación de la programación lineal en la cual las variables de decisión están restringidas a tomar valores enteros o discretos en la solución, porque las variables de decisión solo tienen sentido real si su valor es entero; por ejemplo, cuando es necesario asignar a las actividades cantidades enteras de personas, máquinas o vehículos. Una aplicación de ellos son los problemas binarios de programación entera que tienen

variables que solo pueden tomar valores 0 o 1. Las variables binarias en esencia se plantean en situaciones del tipo todo o nada, o hacerlo o no hacerlo.

Un problema puro de programación con enteros es aquel en el que todas las variables toman valores enteros, por ejemplo:

$$\text{Max } Z = 7X_1 + 4X_2,$$

Sujeto a:

$$X_1 + X_2 < 9$$

$$X_1, X_2 \geq 0 \text{ y enteros}$$

Un problema combinado de programación lineal con variables continuas y enteras llamada programación mixta es aquel en el que solo algunas de las variables tienen que ser números enteros.

$$\text{Max } Z = 9X_1 + 10X_2,$$

Sujeto a:

$$X_1 + X_2 < 6$$

$$X_1, X_1 \geq 0, X_2 \text{ entero}$$

En este caso se requiere que X_2 sea entero, pero no necesariamente X_1 por lo tanto, tiene más rango de factibilidad que un problema puro de programación lineal entera como la detallada anteriormente, pero tiene menos factibilidad que un problema de programación lineal de variables reales.

Un problema de programación binaria es un problema de programación entera en el cual los valores que pueden tomar las variables de decisión son solamente ceros y unos.

$$\text{Max } Z = 7X_1 + 3X_2,$$

Sujeto a:

$$X_1 + X_2 < 8$$

$$X_1, X_1 = 0 \text{ ó bien } 1$$

Programación por metas.

Los modelos de programación lineal pueden tener una sola función objetivo que se intentará maximizar o minimizar, o varias funciones objetivas en la cual se busca minimizar las desviaciones de las metas especificadas. [Winston, 2005](#) detalla

magistralmente la naturaleza de las metas “si existen metas múltiples, puede especificarse una jerarquía ordinal o prioridades, y el proceso de solución de programación por metas opera de tal manera que se satisface la meta con mayor prioridad antes de considerar las metas de prioridad inferior”. En contraste, la programación lineal busca identificar la solución óptima de entre un conjunto de soluciones factibles.

La programación por metas produce lo que se suele llamar solución eficiente, porque tal vez no sea óptima con respecto a todos los objetivos contrapuestos del problema, pero halla los valores que satisfacen mejor el conjunto de metas de un problema.

Aquí encontramos tres tipos de problemas, el problema de objetivos múltiples sin prioridades, donde se busca satisfacer a todas las metas por igual; el problema de objetivos múltiples con prioridades, donde los coeficientes de prioridad se aplican en la función objetivo para establecer un orden preferencial de optimización de las metas ya jerarquizadas; y finalmente, el problema de objetivos con prioridades ponderadas, donde el ideal es asignar a las metas que tienen la misma prioridad mayor importancia a unas que a otras. Si se tratase de este caso, se recurre a un peso diferencial que refleje la diferencia en relevancia dentro del mismo nivel de prioridad.

1.1.2 Heurísticas

Algunos de los problemas que son de alta complejidad no pueden ser resueltos aplicando algoritmos y modelos ya existentes, por esta razón se recurre a los algoritmos heurísticos que a comparación con los métodos exactos suministran una “buena” solución al problema, pero no necesariamente una solución óptima. Sin embargo, [Hillier y Lieberman, 2015](#) recalcan que en esta “buena” solución no hay garantía acerca de la calidad de la solución que se obtiene, pero si el algoritmo heurístico está bien diseñado puede proporcionar una solución que al menos esté cerca de ser óptima o concluir, en su defecto, que no existen soluciones. Los algoritmos heurísticos son algoritmos iterativos, donde cada iteración implica la realización de una búsqueda, de una nueva solución que podría ser mejor que la solución que se encontró con anterioridad.

Las heurísticas clásicas son las formas convencionales de actuar cuando necesitamos resultados rápidos para un problema de optimización combinatoria. Sin embargo, cuando se necesita una mayor precisión y se cuenta con suficiente capacidad computacional para resolver los problemas, las metaheurísticas permiten buscar mejores soluciones.

La metaheurística es la evolución de un análisis más profundo de la heurística, por lo que posibilitan encontrar soluciones de buena calidad comenzando por obtener una solución inicial o un conjunto inicial de soluciones, para después evitar estancarse en un óptimo local y reiniciar una búsqueda de mejores soluciones guiadas por estrategias de alto nivel.

A continuación, se describen algunas de las metaheurísticas más utilizadas en los problemas de corte unidimensional los cuales se detallarán a profundidad más adelante.

- **El Recocido Simulado.**

[Hillier y Lieberman, 2015](#) sustentan que el algoritmo de recocido simulado fue una de las primeras metaheurísticas diseñadas, nombrado de esta forma debido a su analogía con el proceso físico de recocido de metales y cristales, en el cual se someten a un proceso donde son llevados a temperaturas altas y luego a través de un programa de enfriamiento lento es llevado a una estructura cristalina perfecta, es decir, su estado mínimo de energía, generando un cristal libre de defectos. Si el enfriamiento es lo suficientemente lento, la estructura final será la de un sólido con integridad estructural superior. El algoritmo de recocido simulado establece la conexión entre este tipo comportamiento termodinámico y la búsqueda de un óptimo global en un proceso de optimización.

Este algoritmo inicia el proceso con un estado inicial, un cambio aleatorio que es propuesto para este estado y un cambio de energía que se genera, ΔE , es calculado. Si el nuevo estado tiene un nivel más bajo de energía que el estado anterior, $\Delta E \leq 0$, el nuevo estado es tomado para la siguiente iteración. Sin embargo, si el nuevo estado tiene un nivel de energía más alto que el anterior, este es aceptado con una probabilidad que depende de un parámetro temperatura, la cual es normalmente disminuida con cada iteración del algoritmo.

Esta característica establece que se puedan aceptar con algún grado de probabilidad empeoramientos en la función objetivo y de esta forma escapar de óptimos locales, lo que le hace ser diferente a los algoritmos de búsqueda local. Como el parámetro temperatura decrece, los movimientos de empeoramiento ocurren con menor frecuencia.

La analogía con un problema de optimización en la forma de minimización se encuentra en que el nivel de energía de la sustancia en el estado actual del

sistema corresponde al valor de la función objetivo. El objetivo de que la sustancia alcance un nivel estable con un nivel de energía tan pequeño como sea posible, corresponde al problema de llegar a una solución factible con un valor de la función objetivo tan mínimo como se pueda.

La distribución de soluciones asociadas con la cadena no homogénea de Markov que modela el comportamiento de convergencia del algoritmo es llevada a una forma en la cual toda la probabilidad se concentra en el conjunto de soluciones óptimas globales, siempre que el algoritmo sea convergente; de lo contrario el algoritmo convergerá a un óptimo local, el cual puede ser o no óptimo global.

La disminución de la temperatura es crucial para el éxito del algoritmo, si se configura inteligentemente el enfriamiento, el algoritmo puede escapar de óptimos locales tempranamente y explorar profundamente otras regiones prometedoras.

ΔE = Diferencia entre el valor objetivo de la solución inicial S y el valor objetivo de la solución vecina

T = Parámetro del algoritmo llamado temperatura

- **Algoritmos Genéticos.**

Los algoritmos genéticos fueron diseñados en los años setenta por John Holland, son algoritmos de optimización matemática inspirados por los mecanismos de selección natural y la genética. Un algoritmo genético típico consiste en un conjunto o una población de posibles soluciones al problema, es una manera de calcular qué tan buena es cada una de estas soluciones, un método para combinar dichas soluciones que permite crear nuevas y mejores soluciones, y un operador de mutación que evita la pérdida permanente de diversidad entre las soluciones.

Adicionalmente, un algoritmo genético es un método de búsqueda dirigida basada en probabilidad.

Bajo la condición que el algoritmo guarde siempre al mejor elemento de la población sin hacerle ningún cambio, se puede demostrar que el algoritmo converge al óptimo.

- **Algoritmo GRASP.**

El algoritmo GRASP es otra metaheurística muy empleada que consiste en iniciar la búsqueda desde diferentes puntos de arranque para que la búsqueda sea más global. En su versión más básica, cada iteración consta de dos partes, una primera fase en la que se busca una solución buena, aunque no sea la óptima local y una segunda fase en la que dentro del entorno de esa solución se buscan su óptimo local; este procedimiento se repite hasta que se alcanza un criterio de fin.

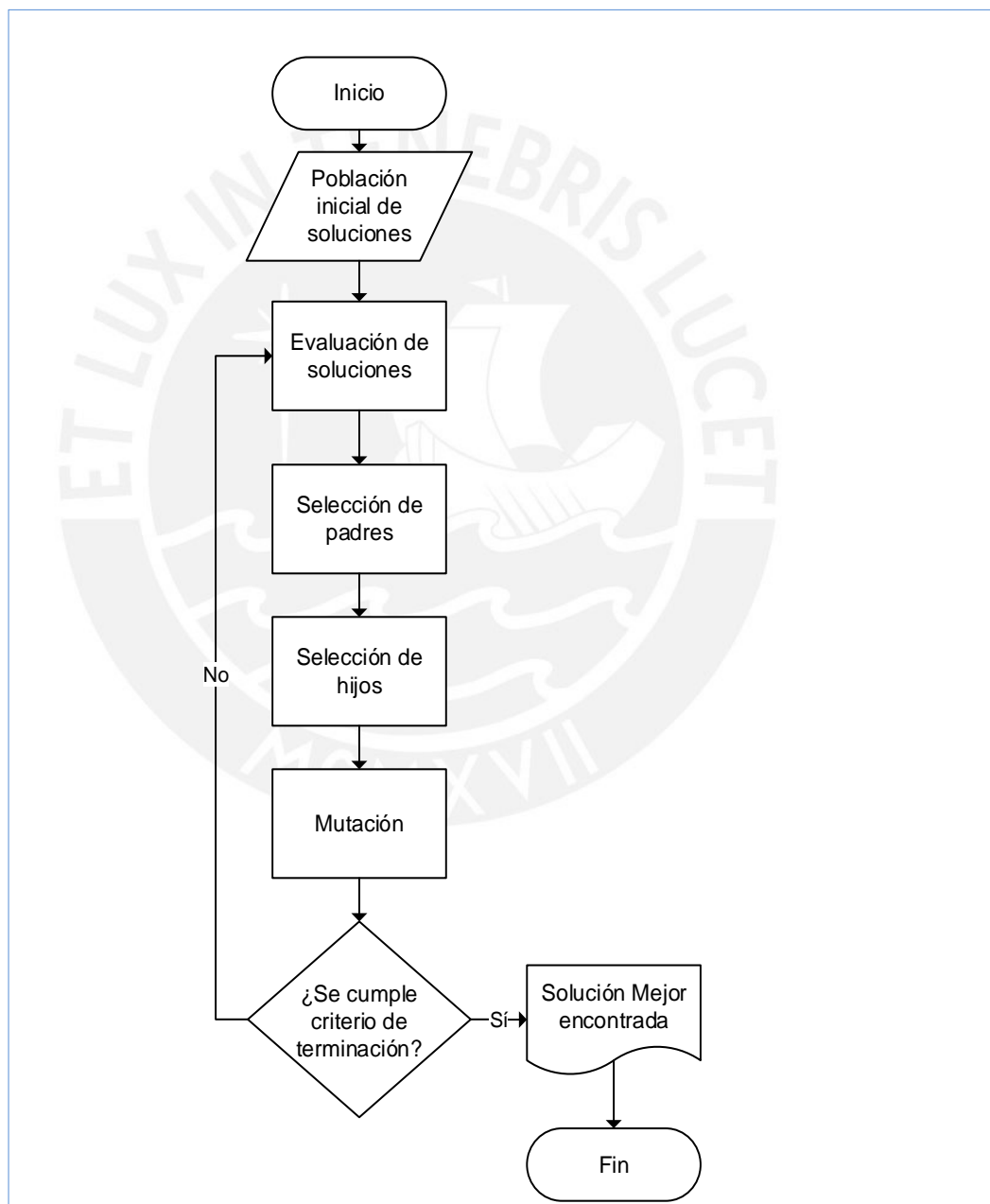


Figura 3. Algoritmo genético general.

Elaboración propia

- **Algoritmos meméticos.**

Los algoritmos meméticos son técnicas de optimización que combinan aspectos de otras metaheurísticas, como son el uso de poblaciones en los algoritmos evolutivos y la mejora local utilizada en el Recocido Simulado.

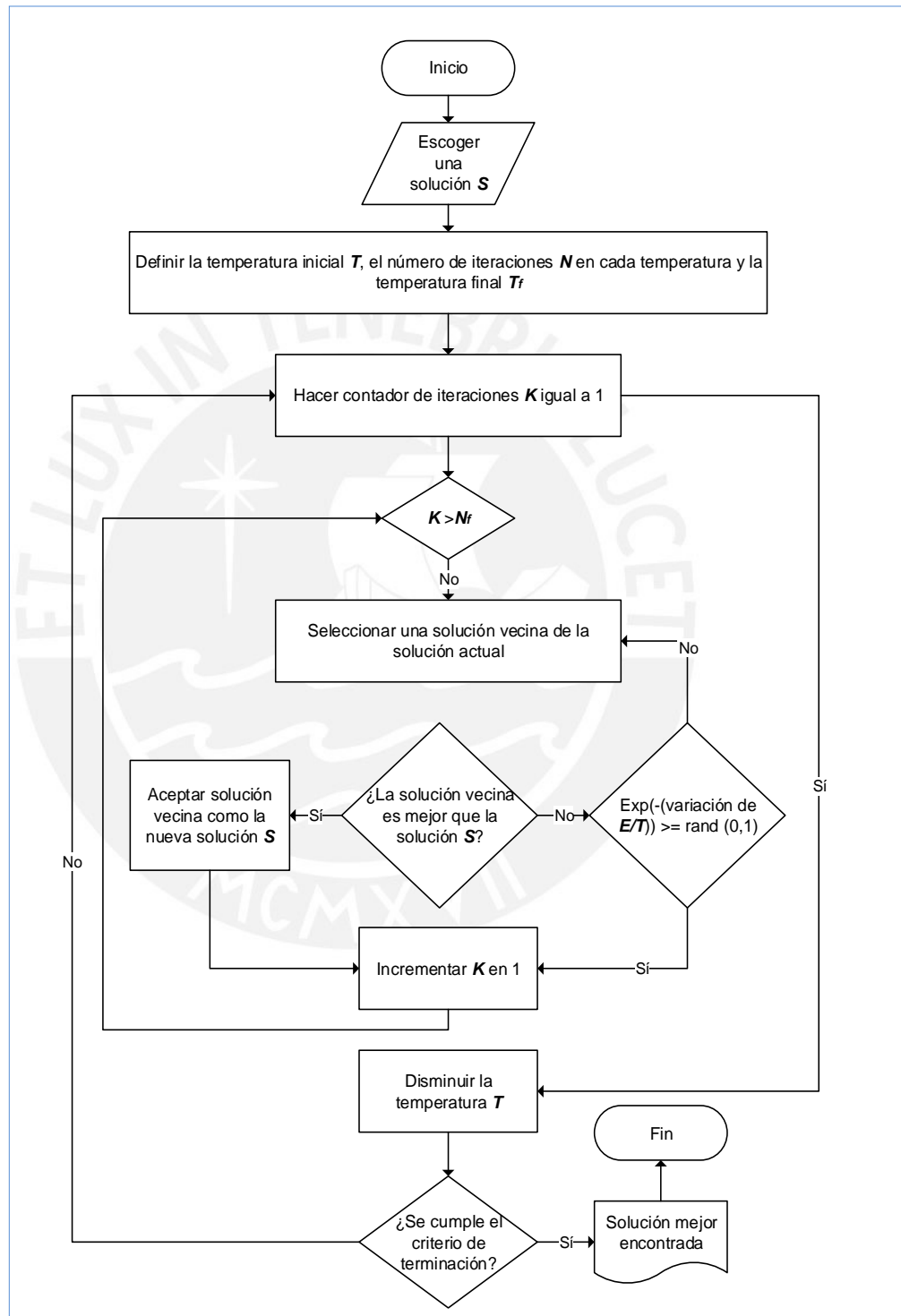


Figura 4. Algoritmo del recocido general.

Elaboración propia

En la figura 3 se representan los detalles generales del algoritmo genético y en la figura 4 los pasos del algoritmo de recocido general, para una mejor comprensión sobre estas metaheurísticas muy usadas en el campo de investigación de operaciones.

1.2 Analytics e Investigación de Operaciones

En los últimos años ha habido un gran revuelo en el mundo de los negocios por algo llamado analítica y la importancia de incorporar la analítica en la toma de decisiones administrativas (Hillier y Lieberman, 2015), debido a que a menudo los tomadores de decisiones empresariales no están satisfechos con tomar decisiones basándose solamente en la intuición o el instinto, por el contrario, requieren datos que soporten medidas a ejecutar. Un ejemplo es, Gary Loveman, quien fue CEO de Harrah, y acuñó la siguiente frase: ¿Creemos que esto es cierto o lo sabemos? (Davenport, 2006).

Esta revolución de analytics se debe gracias a la explosión de la recopilación, almacenamiento y bajo costo de procesamiento de datos que tienen a su disposición las empresas actuales. Entonces, ¿Qué es la analítica?, ¿Cuál es su diferencia o su relación con la investigación de operaciones?

Para responder a la primera pregunta se hará referencia a la siguiente definición: “es el uso extensivo de data, análisis estadísticos y cuantitativos, modelos explicativos y predictivos, y en gestión basada en hechos para impulsar decisiones y acciones” (Davenport y Harris, 2007).

La analítica se puede dividir en tres categorías no excluyentes: analítica descriptiva, analítica predictiva y analítica prescriptiva (Hillier y Lieberman, 2015) inmersas en un proceso analítico que se muestra en la figura 5, donde se visualiza que se comienza en la recolección de data.

Las empresas recopilan y almacenan datos internos y externos para fines tales como el mantenimiento de registros y el cumplimiento normativo, por lo tanto, la mayoría de los datos no se recopilan y organizan en un formato que pueda utilizarse fácilmente para el análisis. La extracción y la transformación son necesarias para la sustracción de los datos relevantes de varias fuentes de datos y reorganizarlos de tal manera que se puedan realizar análisis adicionales (Liberatore y Luo, 2010). En la etapa de análisis se puede emplear una variedad de enfoques y técnicas analíticas para explorar y evaluar la data, generalmente se dividen en tres categorías; la visualización, los modelos predictivos y la optimización.

Por un lado, la visualización de datos puede presentar datos multidimensionales y resultados estadísticos en una interfaz gráfica integrada que permite ver los datos desde diferentes perspectivas y en diferentes formatos.

Por otro lado, las técnicas de modelado predictivo intentan estimar tendencias, validar relaciones y establecer clasificaciones basadas en un conjunto de datos de entrada; incluyendo muchos métodos estadísticos (como, por ejemplo, regresiones logísticas y lineales, pronósticos y análisis de conglomerados), modelos de investigación de operaciones (por ejemplo, modelos estocásticos y de simulación) y técnicas de inteligencia artificial (IA) (por ejemplo, redes neuronales).

Finalmente, los modelos de optimización buscan encontrar la solución óptima dado un conjunto de supuestos y restricciones; ejemplos de tales modelos incluyen varios modelos de programación matemática y heurística de IA, como algoritmos genéticos.

Los enfoques y técnicas analíticas en cada categoría pueden ofrecer a los tomadores de decisiones diferentes tipos de ideas; las herramientas de visualización a menudo se utilizan para presentar información sobre lo que ocurrió en el pasado, es decir, un análisis descriptivo que permite a los encargados de la toma de decisiones comparar medidas clave de rendimiento basadas en diferentes dimensiones e identificar problemas existentes y descubrir las causas fundamentales de los problemas.

Las técnicas de modelado predictivo se centran en pronosticar lo que sucedería si una tendencia continúa o se cumplen ciertas condiciones, posibilita a los tomadores de decisiones mirar hacia el futuro en función del pasado o eventos similares; las mejores soluciones proporcionadas por los modelos de optimización sugieren lo que debería suceder en un conjunto de circunstancias, que es en sí, en lo que consiste el análisis prescriptivo ([Liberatore y Luo, 2010](#)).

Por lo tanto, se podría decir que la investigación de operaciones se enfoca en modelos predictivos y prescriptivos y no tanto en la descriptiva, por lo que algunos definen a la investigación de operaciones como analítica avanzada ([Hillier y Lieberman, 2015](#)).

Sin embargo, a pesar de la gran adherencia de las compañías por la analítica, muy pocas están incorporando en sus análisis los modelos de optimización, por lo cual hay una oportunidad muy grande de aplicar las herramientas de investigación de operaciones en la actualidad.

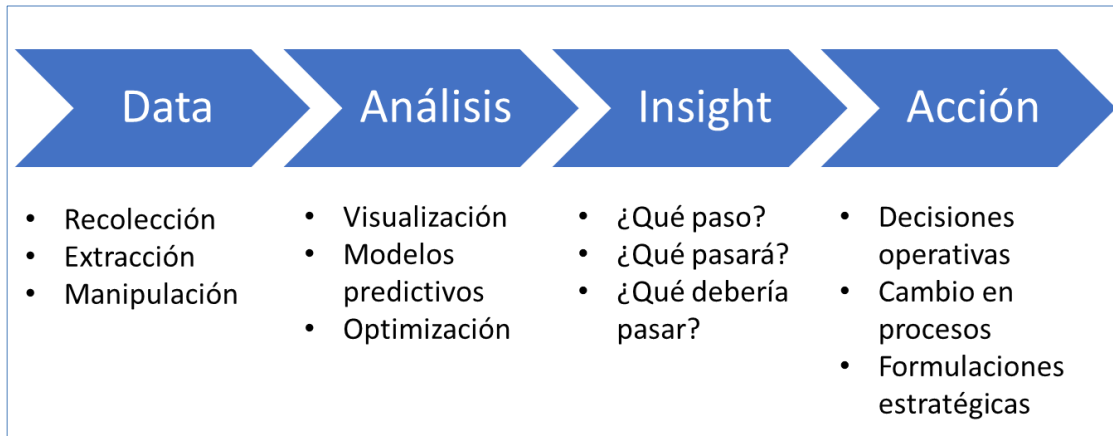


Figura 5. Proceso de analítica

Fuente: [Liberatore y Luo, 2010](#)

La analítica tiene mucho en común con la Investigación de Operaciones; no obstante, la analítica tiende a enfocarse en problemas que abarcan funciones organizacionales y abordan las necesidades de múltiples usuarios y, a menudo, proporciona soluciones integradas en la infraestructura de TI. Por lo tanto, los profesionales de investigación de operaciones deben adquirir o fortalecer sus habilidades técnicas y de gestión para tener éxito en el nuevo entorno analítico, pasando de ser solucionadores de problemas "únicos" a proveedores de soluciones ([Liberatore y Luo, 2010](#)).

Debido al rápido surgimiento de la analítica, INFORMS, el instituto estadounidense de investigación de operaciones y ciencias administrativas incluye una conferencia anual sobre Analítica de Negocios e Investigación de Operaciones entre sus principales actividades. INFORMS también es el primer instituto en ofrecer un certificado profesional en analítica llamado CAP después de cumplir ciertos requisitos de experiencia profesional y de aprobar un examen ([INFORMS, 2019](#)). Para algunos autores es probable que el nombre "analítica" que se ha convertido en moda, llegue a sustituir al nombre de "investigación de operaciones" como nombre común de esta disciplina integrada ([Hillier y Lieberman, 2015](#)).

1.3 GIS

Un sistema de información geográfica (GIS en inglés o SIG en español) es un sistema diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar, administrar y presentar datos espaciales o geográficos. Las aplicaciones GIS son herramientas que permiten

a los usuarios crear consultas interactivas, analizar información espacial, editar datos en mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones ([Maliene et al, 2011](#)).

Los mapas son una de las herramientas más importantes para comunicar información geoespacial entre productores y receptores. Los datos geoespaciales, las herramientas, las contribuciones en ciencias geoespaciales y la comunicación de la información y la transmisión del conocimiento son una cuestión de investigación cartográfica en curso. Por lo tanto, cubre un área amplia de diferentes niveles de información y conocimiento, y abarca desde un enfoque técnico y de ingeniería hasta una abstracción científica. Esto se aplica a todos los temas y objetos ubicados en la Tierra o en cualquier otro cuerpo de nuestro Sistema Solar. En ciencia planetaria, cartografía ([Hargitai, 2019](#))

A pesar de que el GIS propiamente dicho tiene sus inicios en el siglo XIX, donde varias de las técnicas analíticas eran usadas ávidamente por arquitectos y urbanistas, en el siglo XX se vuelve mucho más popular con los avances computacionales que logra computarizar un GIS.

Los geógrafos e ingenieros de transporte de la Universidad de Washington, EE. UU., pueden ser considerados como los padres fundadores de GIS en América del Norte por su trabajo después de la Segunda Guerra Mundial, que desarrolla las bases cuantitativas del análisis espacial geográfico, situación parecida a la Investigación de Operaciones que alcanza su apogeo después de la Segunda Guerra Mundial.

La aparición de plataformas electrónicas cambió el significado de lo que es fundamentalmente un mapa. Hoy, vemos una transición clara de hojas de mapas compuestas estéticamente a archivos de datos georreferenciados. Estos últimos se pueden usar directamente para el análisis cuantitativo y combinarse ([Hargitai, 2019](#)) con otros mapas (como "capas") en varias plataformas GIS. Estos incluyen mosaicos de imágenes con referencia espacial en archivos de imagen de una sola banda descargables completos, cubos de imágenes multibanda y servicios de mosaico de mapas web en línea ([Hare et al. 2017](#)). Las capas de mapa dentro de los servicios de mapeo web van desde escalas globales a escalas locales e incluyen ráster temático o capas vectoriales. Sin embargo, es discutible si tales capas de datos pueden considerarse como "mapas" completos o simplemente productos de datos espaciales intermedios. Sin embargo, si estos productos se separan en capas temáticas en formato compatible con GIS, incluyen metadatos, identificación digital

permanente y acceso perpetuo en repositorios en línea, similares a los mapas en papel almacenados en archivos y bibliotecas, estos productos son útiles para análisis posteriores. En un entorno de investigación basado en GIS, un mapa impreso e incluso un archivo de imagen digital simple como un jpeg, o un .pdf de una capa, es un producto estático, donde los datos se fusionan inseparablemente en una vista final e inmutable. Los mapas estáticos complejos son documentación cartográfica visual y estéticamente valiosa a largo plazo de los esfuerzos de mapeo anteriores. Las copias impresas proporcionan una descripción general "análoga" compleja del área mapeada que no se puede experimentar en una pantalla, pero no se pueden usar directamente para un análisis posterior por computadora, porque eso requiere capas de datos temáticos integrables. Si bien la integridad bien compuesta se consideró el atributo del producto de más alto nivel, hoy en día un producto de imagen de mapa final (no importable) tiene un uso limitado. Los entornos digitales interactivos deberían facilitar la colocación de diferentes tipos de datos espaciales en la plataforma del mapa como lo desee el usuario.

Podría decirse que el primer hito significativo en la historia del GIS contemporáneo fue el desarrollo del Sistema Canadiense de Información Geográfica (CGIS) en 1963, en un proyecto que abarcó la década y acuñó el término 'Sistema de Información Geográfica' por primera vez en 1966. El sistema CGIS fue diseñado para permitir a la Administración Federal y Provincial de Canadá llevar a cabo un proyecto de inventario de tierras y mapear la ubicación de los recursos naturales del Estado. El CGIS incluyó la funcionalidad para los cálculos de área automatizados y la información estadística espacial resumida; también innovó en la generación de datos vectoriales (puntos, líneas y polígonos) a partir de imágenes rasterizadas y permitió que sus atributos fueran referenciados.

Un segundo hito importante en la historia de GIS tuvo lugar en 1970, cuando se utilizó la tecnología GIS para analizar el censo de población de EE. UU. La innovación clave aquí fue el software *Dual Independent Map Encoding*, desarrollado a finales de la década del 60, que permitió la digitalización de registros de todas las calles en los Estados Unidos para que los datos de población pudieran conectarse a una ubicación geográfica particular y luego agregarse. Esta tecnología se combinó más tarde con soluciones CGIS, lo que permitió que se creara el primer SIG de uso general en el Laboratorio de Harvard para Gráficos por Computadora y Análisis Espacial, que había sido pionero.

Un tercer hito, más reciente, ocurrió en 1995, cuando el Reino Unido se convirtió en el primer país en cubrir su territorio con mapas digitales de escala estándar (Longleat al, 2015).

A lo largo de su historia, la aplicación de las tecnologías de GIS se ha caracterizado por la diversidad de usos: la planificación urbana, la arquitectura urbana, la protección del medio ambiente, el transporte y la logística, las redes de ingeniería, la planificación de bienes inmuebles y la planificación militar son las áreas donde se aplica con mayor frecuencia el GIS (Longley et al, 2015).

Los siguientes son ejemplos que pueden ser aplicados con GIS:

- Las autoridades de transporte seleccionan rutas para nuevas autopistas y anticipan sus impactos.
- Los minoristas evalúan el desempeño de sus puntos de venta y recomiendan cómo expandir o racionalizar las redes de tiendas.
- Las empresas forestales determinan cuál es la mejor forma de gestionar los bosques, dónde cortar árboles, dónde ubicar carreteras y dónde plantar nuevos árboles.
- Las autoridades de los parques nacionales programan la creación, el mantenimiento y la mejora de rutas recreativas, ver figura 4.
- Los gobiernos deciden cómo asignar fondos para la construcción de defensas marinas.
- Los viajeros/turistas dan y reciben indicaciones para llegar en automóvil, seleccionan hoteles en ciudades desconocidas y exploran los parques temáticos.
- Los agricultores pueden tomar mejores decisiones sobre las cantidades de fertilizantes y pesticidas que se aplican a diferentes partes de sus campos.

Desde 1960, se han producido y publicado más de dos mil mapas planetarios durante varios programas y proyectos marco diferentes. Allí, existen diferentes esfuerzos de mapeo, ya sea a nivel nacional o como colaboración entre grupos que participan como investigadores en misiones de mapeo. Sin embargo, la coordinación de tales tareas no termina con la compilación y publicación de un conjunto de mapas. La coordinación solo puede considerarse exitosa cuando los productos de mapeo se

conservan para las próximas generaciones de investigadores y mapeadores para permitir una reutilización eficiente en nuevas bases de datos sostenibles. Este puede ser el objetivo final de los mapas geológicos planetarios u otros mapas temáticos producidos por diferentes grupos. Por lo tanto, deben usar principios comparables en la recopilación, análisis y visualización de datos ([Tambassi, 2019](#)).

La estandarización de los métodos cartográficos y los productos de datos es fundamental para un análisis preciso y la presentación de informes científicos. Esto es más relevante hoy que nunca, ya que los investigadores tienen un acceso relativamente fácil a una amplia variedad de datos digitales, así como a las herramientas para procesar y analizar estos diversos productos, y los centros de mapeo planetario ahora se distribuyen globalmente. El ciclo de vida de los productos cartográficos puede ser corto y se necesitan descripciones estandarizadas para realizar un seguimiento de los diferentes desarrollos. Uno de nuestros objetivos aquí fue subdividir los procesos de cartografía planetaria y definir, describir y presentar el proceso de mapeo general a través de sus segmentos sucesivos

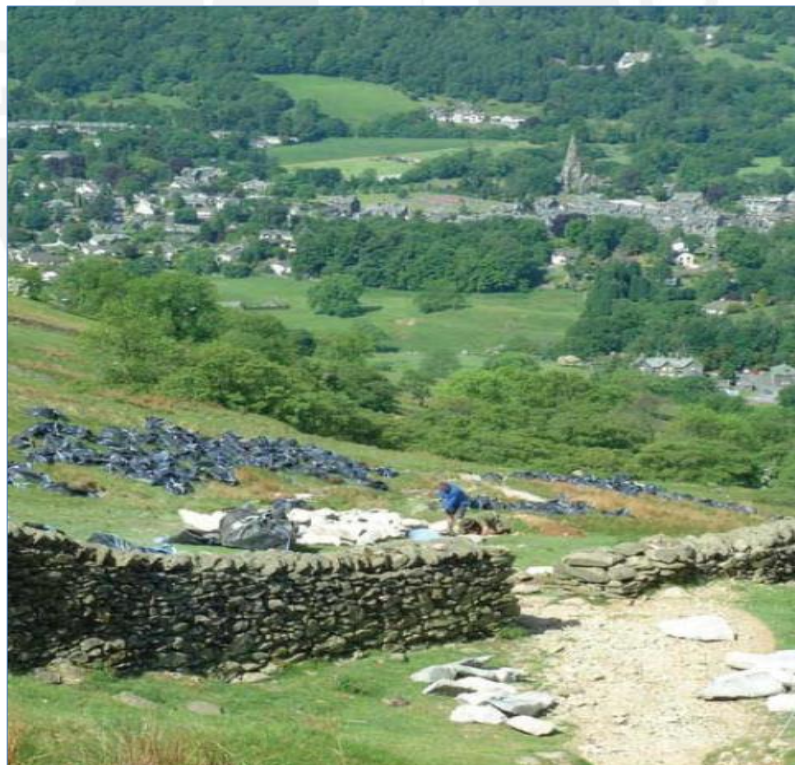


Figura 6. Mantenimiento y mejora de vías recreativas, una aplicación de GIS.

Fuente: [Longley et al, 2015](#)

El software, el hardware y las bases de datos GIS modernos están cada vez más disponibles para los usuarios particulares, aunque la complejidad de las aplicaciones más potentes significa que la accesibilidad sigue siendo un problema. Sin embargo, la aceptación generalizada de la tecnología GIS, no solamente en dispositivos informáticos portátiles, ha establecido su relevancia más amplia para el análisis de la ciudad contemporánea.

En la figura 7 se muestra un ejemplo visual de analítica con GIS, en el cual se pueden mostrar datos multivariados en un mapa de área sombreada. En este mapa de textura del suelo de México, se muestran tres variables simultáneamente, como se indica en la leyenda, utilizando variaciones de color para mostrar combinaciones de porcentaje de arena (base), limo (derecha) y arcilla (izquierda).

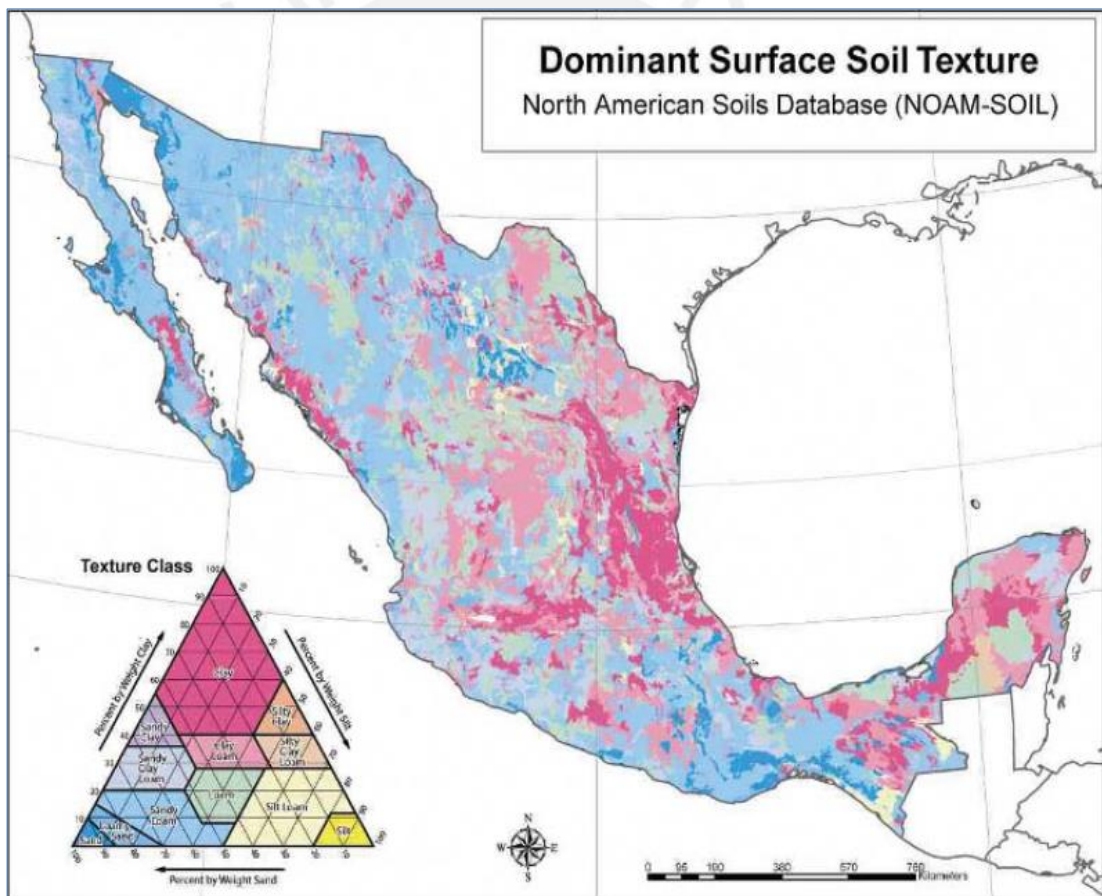


Figura 7. Mapa de México con datos multivariados de textura de suelo.

Fuente: Longley et al, 2015.

1.4 Ciclovías.

En el momento de plantearse la construcción de ciclovías hay que preguntarse a por las características de los usuarios a quien están enfocadas, y para responder este interrogante debemos saber que existen cuatro tipos de ciclistas según [Portland Bureau of Transportation, 2019](#); Fuerte y sin miedo, Entusiasta y confiado, Interesado pero preocupado y No hay manera, tal como se puede apreciar en la figura 8.

- **Fuerte y sin miedo.**

Estos ciclistas viajarán independientemente de las instalaciones, para ellos la distancia no es tan importante. Se estima que haya menos del 1% de este tipo de ciclista en las ciudades.

- **Entusiasta y confiado.**

Estas personas no montarían bicicleta en ausencia de instalaciones para bicicletas, lo harían si se les provee de un carril-bicicleta convencional en una calle colectora. Este grupo y el anterior podrían bordear el 15% de potenciales ciclistas.

- **Interesado pero preocupado.**

Este grupo podría abarcar la mayor parte de la población, en un rango del 50-60% que montaría bicicleta en condiciones muy seguras.

- **No hay manera.**

Este grupo de personas nunca se animaría a montar bicicleta a pesar de que las condiciones sean muy seguras, se estima que son un 30% de la población.

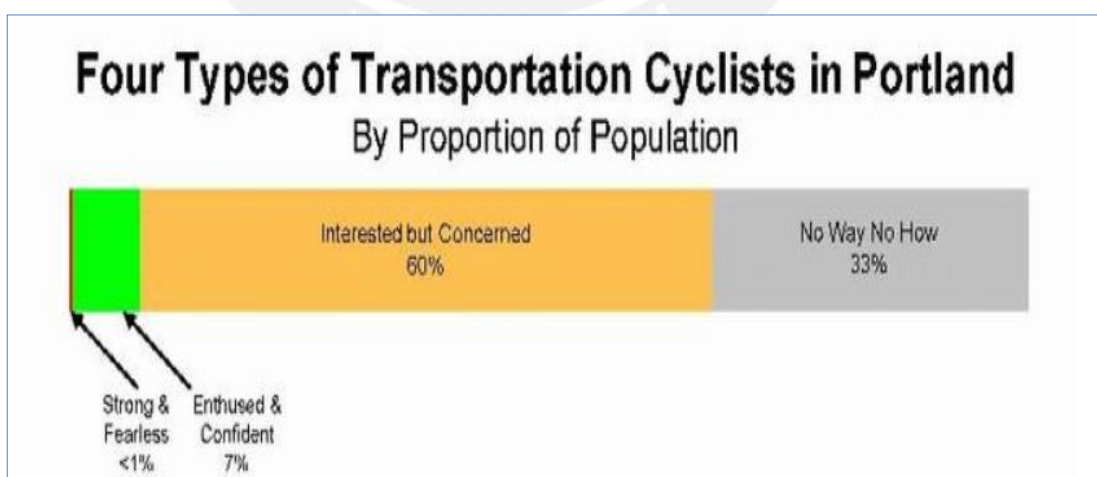


Figura 8. Cuatro tipos de ciclista en Portland.

Fuente: [Portland Bureau of Transportation, 2019](#).

Revisemos ahora los diferentes tipos de ciclovías existentes, entre ellas las principales son:

- **Vías reservadas:** Donde se comparte el uso con peatones en áreas verdes y parques.
- **Vías segregadas:** Son una porción de espacio que se enfoca exclusivamente para el transporte de bicicletas, teniendo a su costado vehículos con motor o pedestres.
- **Vías integradas:** Son vías donde se comparte el camino con los vehículos con motor, pero se debe restringir la velocidad de los vehículos a un máximo de 30kmph, este sistema se implementó exitosamente en Canadá.

Dentro de ellas, las que más se usan en las ciudades son las vías segregadas, debido a que ofrecen mayor seguridad a los ciclistas, lo que podría abarcar el 15% de los ciudadanos actuales; estas vías segregadas se clasifican en bike lanes y cycle tracks.

La mayoría de los estudios sugieren una relación positiva entre la red de ciclovías por sus características y los niveles de ciclismo, estos estudios indican que existe una predilección entre ciclistas y no ciclistas, por los *bike lanes* o *cycle tracks* sobre el ciclismo en vías segregadas (Buehler and Dill, 2015).

Bike Lanes:

El término Bike Lanes se define como una parte de la carretera que ha sido designada por rayas, señalización y marcas en el pavimento para el uso preferencial o exclusivo de ciclistas. Estos carriles para bicicletas les permiten a sus usuarios transitar a su velocidad preferida sin la interferencia de las condiciones del tráfico predominantes, al tiempo que facilitan el comportamiento y los movimientos predecibles entre los ciclistas y los automovilistas.

Un bike lane se distingue de un cycle track en que no tiene barrera física (bolardos, medianas, bordillos elevados, etc.) que restrinja la invasión del tráfico motorizado. Los bike lanes para bicicletas convencionales, se abren en la acera cuando no hay estacionamiento, se sitúan adyacentes a los automóviles estacionados en el lado derecho de la calle o en el lado izquierdo de la calle en el tráfico específico, aunque pueden configurarse en la dirección contra flujo en corredores de poco tráfico necesarios para la conectividad de una ruta ciclista en particular (NACTO, 2014).

La configuración de un bike lane requiere una consideración exhaustiva de los niveles y comportamientos de tráfico existentes, las barreras de seguridad adecuadas para proteger a los ciclistas de los vehículos estacionados y en movimiento, y la aplicación de prohibiciones ante la invasión de vehículos motorizados y el estacionamiento doble.

Los bike lanes designan un espacio exclusivo para ciclistas mediante el uso de marcas en el pavimento y señalización, las cuales se pueden distinguir usando color, marcas de carriles y tratamientos de intersección; comúnmente está ubicado junto a los carriles de viaje de los vehículos de motor y fluyen en la misma dirección que el tráfico de vehículos motorizados.

Los carriles para bicicletas generalmente están en el lado derecho de la calle, entre el carril de circulación adyacente y el bordillo, el borde de la carretera o el carril de estacionamiento; este tipo de instalación puede estar ubicado en el lado izquierdo cuando se instala en calles de un solo sentido, o puede ser almacenado en un buffer si el espacio lo permite.

Como se mencionó anteriormente, dicha infraestructura permite a los ciclistas andar a su velocidad preferida sin la interferencia de las condiciones del tráfico predominantes. En este tipo de vías los ciclistas pueden dejar el carril bici para pasar a otros ciclistas, dar vuelta a la izquierda, evitar obstáculos o escombros y evadir otros conflictos con los usuarios de la calle.

Los carriles para bicicletas contra-flujo, son carriles para bicicletas diseñados para permitir a los ciclistas viajar en la dirección opuesta al tráfico de vehículos de motor. Convierten una calle de tráfico de sentido único en una calle de dos vías: una dirección para vehículos de motor y bicicletas, y la otra solo para bicicletas; combinando el recorrido de la bicicleta en ambos sentidos en un lado de la calle para acomodar el movimiento contra-flujo resulta en un ciclo de dos vías. Estos carriles se diferencian al estar separados por líneas de franjas centrales amarillas.

El modelo de contraflujo presenta nuevos desafíos de diseño, lo que posibilita introducir puntos de conflicto adicionales, ya que los automovilistas no pueden esperar ciclistas venideros.

Un bike lane es una instalación exclusiva para bicicletas que combina la experiencia del usuario de transitar por un camino separado con la infraestructura en la calle de un carril para bicicletas convencional; es una pista para bicicletas que está separada

físicamente del tráfico del motor y es distinta de la acera. Las pistas para bicicletas tienen diferentes formas, pero todas comparten elementos comunes como proporcionar un espacio destinado a utilizarse exclusiva o principalmente con la bicicleta, al estar separadas de las vías de circulación de vehículos automotores, las vías de estacionamiento y las aceras.

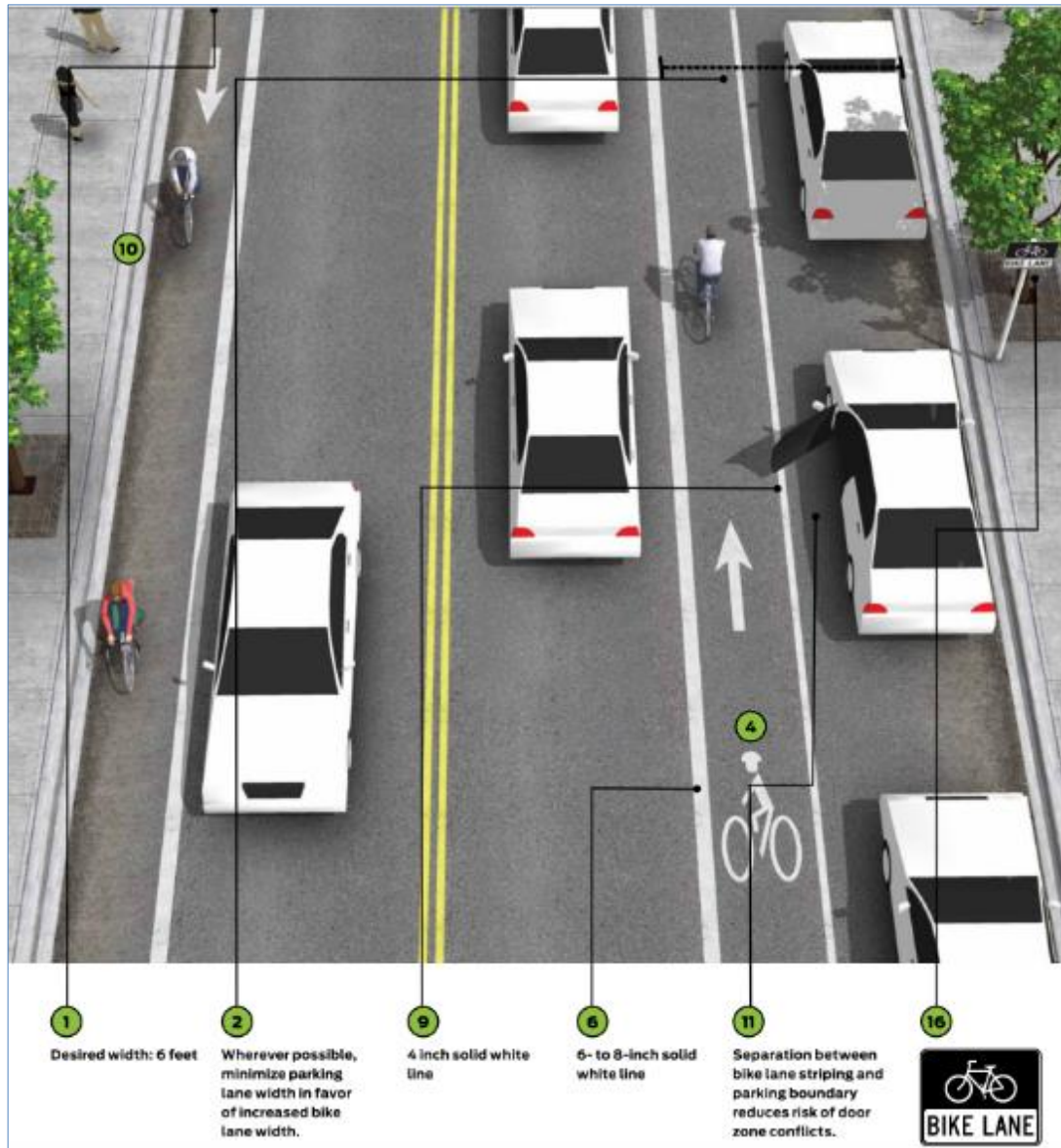


Figura 9. Recomendaciones técnicas de una bike line.

Fuente: [NACTO, 2014](#).

El ancho del carril de bicicleta deseable adyacente a un bordillo es de 6 pies, mientras la superficie deseable adyacente al borde de una calle o junta longitudinal es de 4 pies, con un ancho mínimo de 3 pies; en ciudades donde el estacionamiento ilegal

en carriles para bicicletas es una preocupación, se pueden preferir carriles para bicicletas de 5 pies de ancho.

Cuando se coloque junto a un carril de estacionamiento, el alcance deseable desde la acera hasta el borde del carril bici (incluyendo el carril de estacionamiento, el carril bici, y el buffer opcional entre ellos) es de 14,5 pies; el alcance mínimo absoluto corresponderá a 12 pies.

Un carril para bicicletas al lado de un carril de estacionamiento debe tener al menos 5 pies de ancho, a menos que haya un espacio intermedio marcado entre ellos; y siempre que sea posible, se debe minimizar el ancho del carril de estacionamiento a favor de un mayor ancho del carril para bicicletas, siendo indispensable usar una marca de línea de carril blanca sólida para separar las vías de circulación de vehículos de motor del carril para bicicletas. La mayoría de las jurisdicciones en Estados Unidos usan una línea de 6 a 8 pulgadas, como se puede apreciar en la figura 9.

Los Bike Lanes deben poder proporcionar un espacio de aproximadamente 6 pies de distancia para que los ciclistas viajen de lado a lado y con comodidad. Si existe suficiente espacio para exceder los anchos deseables, se deben implementar carriles para bicicletas con protección, con el fin de evitar la recurrencia de que los carriles para bicicletas muy anchos tienden a alentar el estacionamiento ilegal o el uso por parte de vehículos de motor de los carriles para bicicletas.

Cycle Tracks:

Las cycle tracks pueden estar constituidas por una o dos vías, comúnmente se encuentran en el nivel de la calle, en el nivel de la acera o en un nivel intermedio. En el caso de estar al nivel de la acera, un bordillo o una mediana los separa del tráfico motorizado, mientras que el color textura del pavimento separa la pista para bicicletas de la acera; si están a nivel de la calle, pueden separarse del tráfico a través de medianas elevadas, estacionamiento en la calle o bolardos. Al separar a los ciclistas del tráfico motorizado, las ciclovías pueden ofrecer un mayor nivel de seguridad que las calles y son atractivas para un espectro más amplio del público.

Las pistas para bicicletas protegidas de una vía son carriles para bicicletas que se encuentran en el nivel de la calle y utilizan una variedad de métodos para la protección física contra el tránsito. Una pista de ciclo protegido de una vía puede

combinarse con una línea de estacionamiento u otra barrera entre la pista para bicicletas y la línea de desplazamiento del vehículo motorizado; cuando una pista para bicicletas se eleva por encima del nivel de la calle, se denomina pista para bicicletas levantadas y pueden aplicarse diferentes consideraciones de diseño.

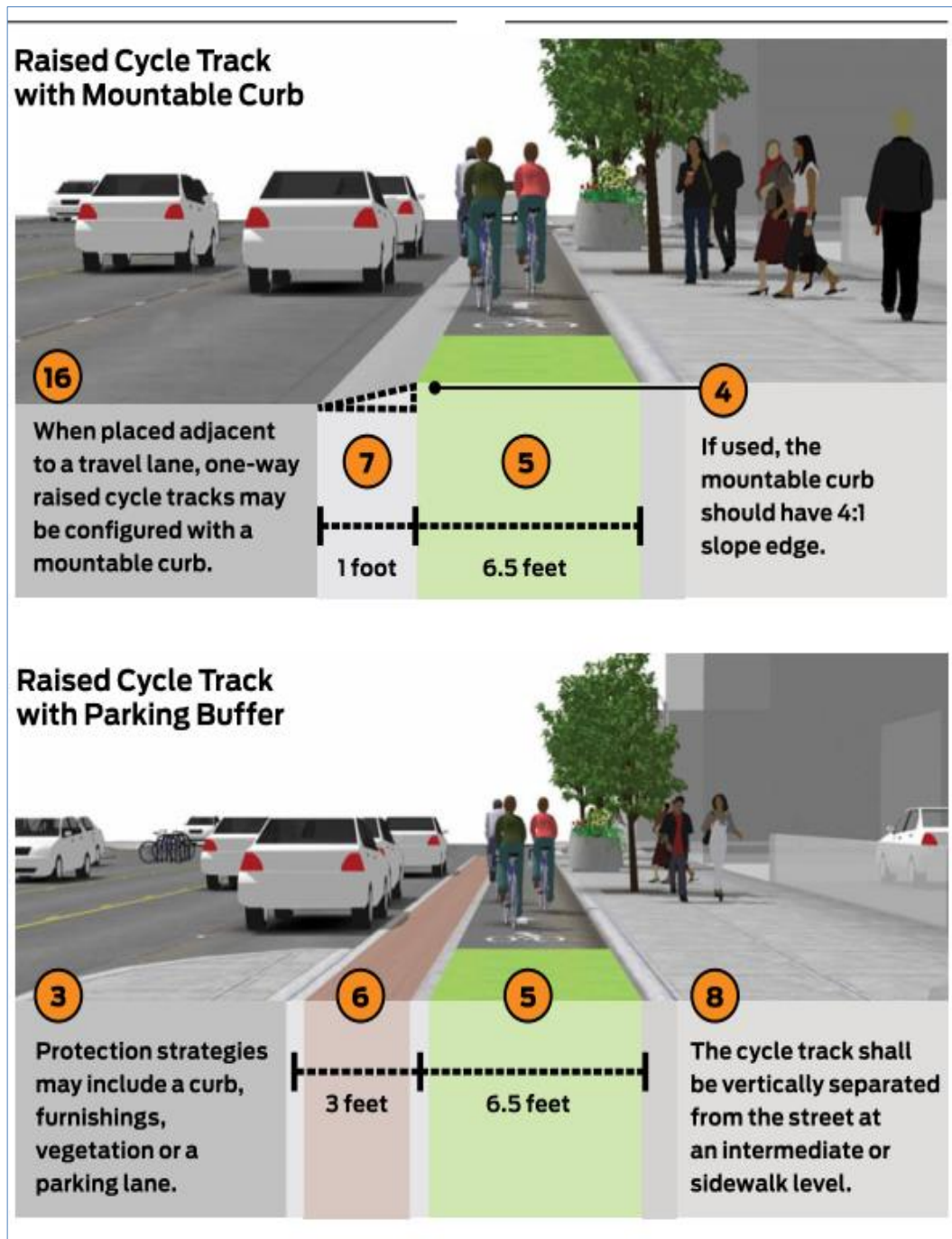


Figura 10. Recomendaciones técnicas de una cycle track.

Fuente: [NACTO, 2014](#).

Las pistas elevadas para bicicletas son instalaciones para ciclistas que están separadas verticalmente del tráfico de vehículos automotores, muchos están emparejados con una zona de equipamiento entre el carril para bicicletas y el carril de viaje del vehículo motorizado y/o el área peatonal.

Una ruta ciclista elevada puede permitir el desplazamiento en una o dos direcciones para los ciclistas, es necesario tener en cuenta que las pistas de ciclo bidireccional tienen algunas características operativas diferentes que merecen consideración adicional.

Las cycle tracks elevadas pueden estar al nivel de la acera adyacente o ubicarse en un nivel intermedio entre el camino y la acera para segregar la pista para bicicletas del área peatonal, estas pistas de bicicleta elevada se pueden combinar con una línea de estacionamiento u otra barrera entre la vía para bicicletas y la línea de circulación del vehículo¹. En las intersecciones, la pista del ciclo elevado se puede soltar para fusionarse con la calle.

Las cycle tracks pueden funcionar mejor para personas con discapacidades motrices que las pistas para bicicletas de nivel de calle, pues en casos donde se debe proporcionar espacios de estacionamiento accesibles adyacentes a la pista para bicicletas elevada, se puede suministrar un amortiguador ampliado para acomodar una rampa o elevador montado lateralmente que no sobresalga en la pista para bicicletas y se convierta en un peligro para los ciclistas. En estos lugares, la pista para bicicletas elevada puede estar al ras con la zona de amortiguación y la acera adyacente con mobiliario de la calle, para minimizar el conflicto.

¹ Consulte las pistas de ciclo protegidas para obtener información adicional.

CAPÍTULO 2. CASOS DE ESTUDIO

En la literatura científica mundial se han encontrado relativamente pocos modelos matemáticos para el diseño de ciclovías, ([Mauttone et al, 2017](#)) los cuales analicen los problemas mediante la programación lineal, la optimización binivel, los métodos metaheurísticos y GIS ([Terth y Cao, 2018](#)) ([Duthie y Unnikrishnan, 2014](#)) ([Liñan, Perez y Cabrera, 2016](#)) ([Gaspar et al, 2015](#)) ([Martínez et al 2012](#)) ([Mesbah y Thompson 2011](#)). Estos modelos están enfocados principalmente en reducir el tiempo de los viajeros y en analizar las ventajas y desventajas de tener ciclovías conectadas o con interferencias en su red, indagan sobre qué tipo de infraestructura para bicicleta es mejor para cada segmento de calle o en qué partes de la red es mejor ubicar estaciones de préstamo de bicicletas.

En contraste, en la literatura peruana encontramos que a pesar de que hay propuestas de diseño de ciclovías en Lima, la mayoría se basan en evaluaciones cualitativas que no consideran la complejidad combinatoria y analítica del problema, excepto en el estudio de [Guevara Estrada et al 2018](#) que es el primer estudio en el Perú que propone una red de ciclovías en Lima Metropolitana mediante un enfoque matemático a través del uso del algoritmo de Floyd-Marshall.

En este capítulo se presentarán cuatro casos de estudio en los que se ha aplicado el diseño de una red de ciclovías mediante GIS y/o programación matemática.

2.1 Caso 1: Planeamiento de ciclovías basado en GIS – MCDA: Un caso de estudio en Singapur

Autores: Shin Huoy Terh y Kai Cao.

La investigación realizada por [Terth y Cao, 2018](#) tiene como objetivo realizar un diseño de red de ciclovías en el área de Woodlands acorde a su Plan Nacional de Ciclismo, que se anunció en 2013; el cual propone aumentar significativamente la infraestructura de ciclismo y promover el ciclismo en todo el país para el año 2030.

La mayor restricción de Singapur es la limitación de las tierras al ser un país insular de 697 km^2 ([Oratlas, 2018](#)) con aproximadamente 5,6 millones de habitantes en el 2017 ([Department of Statistics Singapore, 2018](#)), por tal razón es inteligente invertir en infraestructura para el transporte activo, el cual requiere mucho menos espacio que el transporte motorizado ([Centre for Liveable Cities & Urban Land Institute, 2014](#)).

En la figura 11 se presenta el mapa de Woodlands donde se aplica la metodología de los autores mostrando los diferentes tipos de áreas que dispone, tres estaciones de MRT y 28 instituciones educativas.

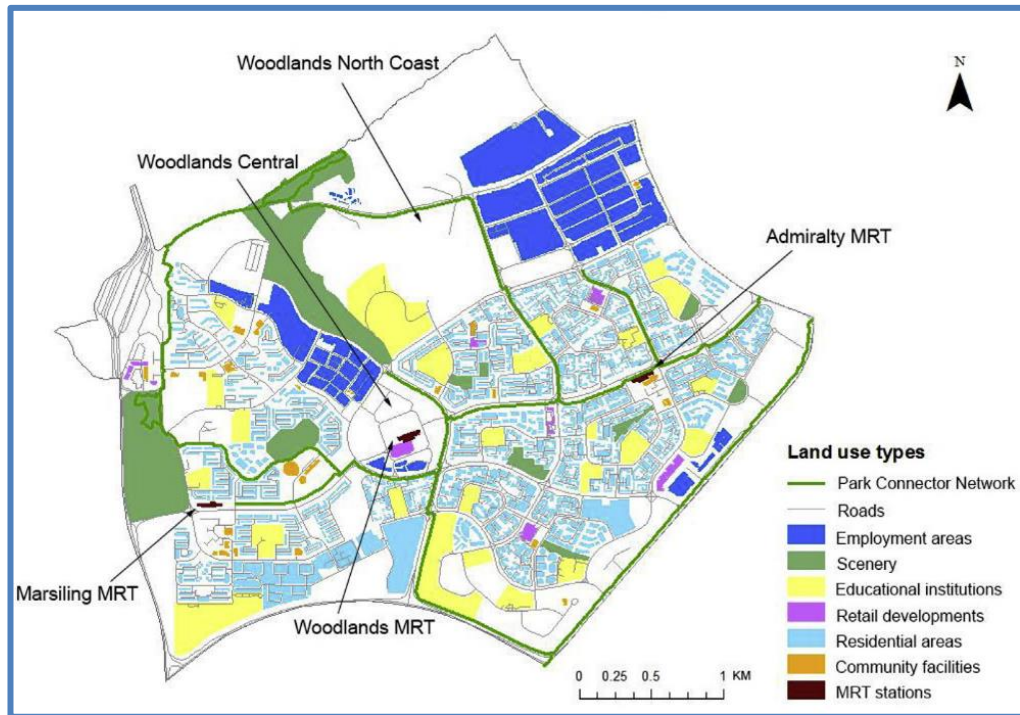


Figura 11. Mapa de Woodlands.
Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

El enfoque de los autores en este caso de estudio es seguir la metodología *Geographical Information System based multicriteria decisión analysis* GIS – MCDA, el cual es una metodología multicriterio, que logra incluir y representar la percepción de varios stakeholders sobre donde construir las ciclovías; en este estudio son tres stakeholders: los ciudadanos de Woodlands, los expertos de transporte y los planificadores del gobierno.

Este enfoque es diferente, según los autores, a los utilizados en occidente donde se priorizan solo valores objetivos para el diseño de la red de ciclovía; como ejemplo de los métodos occidentales tenemos la metodología desarrollada por [Davis, 1987](#) llamada *Bicycle Safety Index Rating* que relaciona la seguridad de manejar bicicleta a las características físicas y condiciones operativas de las vías disponibles. Otra metodología occidental es la llamada Bicycle Level of Service (BLOS) desarrollada por la [Transportation Research Board, 1994](#) que es usada en Estados Unidos para evaluar la posibilidad de que se implemente infraestructura de ciclismo

en determinadas calles evaluando factores como ancho de la vía, volumen de tráfico, condiciones del suelo y velocidad de vehículos.

Tabla 1. Nueve Factores para la evaluación del problema de ciclovías en Singapur.

	Factor	Justificación
A	Pendiente	Una menor pendiente reduce el esfuerzo físico y puede motivar a más gente a realizar ciclismo.
B	Trafico Pedestre	Áreas con alto nivel de tráfico pedestre incrementa la posibilidad de colisión y obstáculo para el ciclista.
C	Distancia de principales calles con alto tráfico motorizado	Mayor distancia de las principales vías puede reducir la exposición al peligro del tráfico motorizado y de sus emisiones.
D	Proximidad a instituciones educativas	Facilitar el transporte a instituciones educativas para viajes de corta distancia.
E	Proximidad a áreas comerciales	Facilitar el transporte a áreas comerciales para viajes de corta distancia.
F	Proximidad a zonas de empleo	Facilitar el transporte a zonas de empleo para viajes de corta distancia.
G	Proximidad a zonas recreacionales (parques, piscinas, etc)	Facilitar el transporte a zonas recreacionales para viajes de corta distancia.
H	Proximidad a estaciones de tren ligero o metro	Facilitar el transporte a estaciones de tren ligero o metro para permitir la transferencia entre los tipos de transporte y promover el ciclismo como transporte de puerta a puerta para largas distancias.
I	Proximidad a estaciones de buses	Facilitar el transporte a estaciones de buses para permitir la transferencia entre los tipos de transporte y promover el ciclismo como transporte de puerta a puerta para largas distancias.

Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

Los autores concluyen que los métodos occidentales tienen sentido en sus contextos propios porque allá se prefiere la construcción de ciclovías compartidas con el tráfico motorizado en la vía, caso contrario ocurre en Singapur donde su Plan Nacional de Ciclismo se enfoca en la construcción de ciclovías separadas del tráfico vehicular. Los investigadores después de revisar la literatura sobre qué factores también son tomados en cuenta en la planificación de ciclovías en otras ciudades y de recibir feedback de varios ciclistas en Singapur, concluyeron que lo mejor para Singapur sería evaluar los nueve factores descritos a continuación en la tabla 1.

Posteriormente, las nueve variables son jerarquizadas por los tres tipos de stakeholders mediante encuestas con una escala de importancia del número 1 al 7. Los resultados son mostrados en la figura 12 donde se puede apreciar que para el planificador del gobierno los factores más importantes son: evitar áreas con alto nivel de tráfico (B), evitar principales vías de transporte motorizado (C) y la proximidad a estaciones de trenes ligeros y metro (H), similar a la priorización de los ciudadanos de Woodlands quienes identifican que los factores más importantes son B, C, H y la proximidad a zonas de empleos (F). Mientras que los expertos de transporte identifican que los factores más importantes son la proximidad a las zonas recreacionales (G), proximidad a zonas de empleos (F) y a áreas comerciales (E).

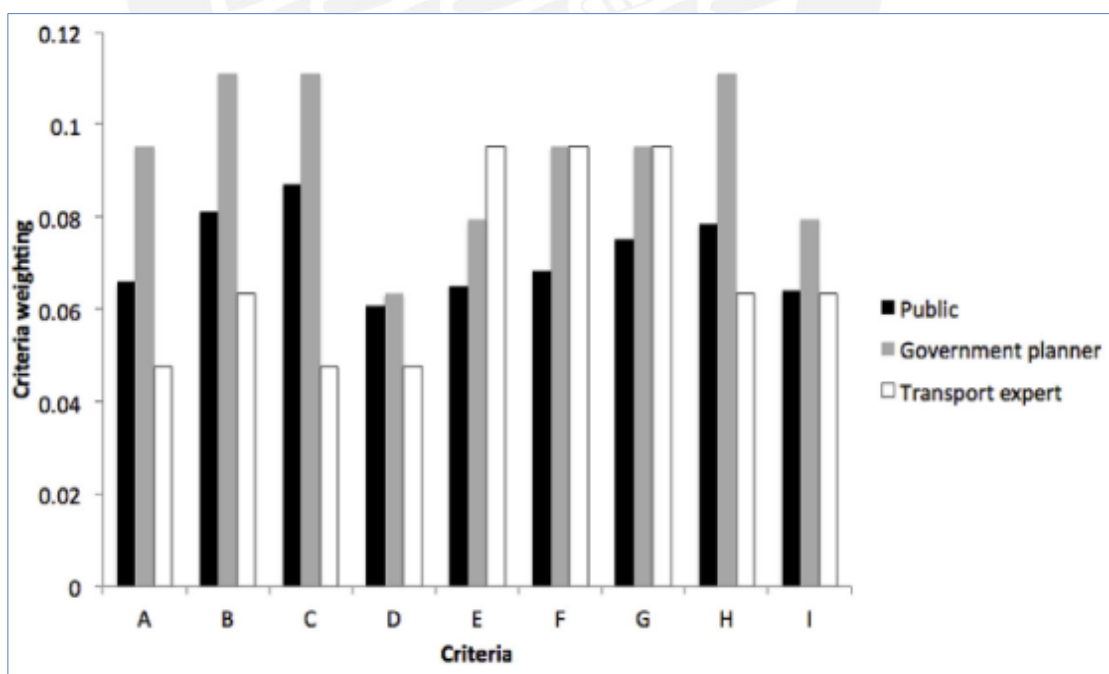


Figura 12. Importancia de los factores por stakeholder.
Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

En la figura 13 se muestran mapas de calor para cada uno de los nueve factores, con el color verde se representan las áreas con mayor prioridad de construcción de ciclovías y en contra parte las regiones en rojo son las áreas que menos prioridad de construcción de ciclovías tienen. Estos mapas de calor están contruidos independiente de la preferencia de los stakeholder.

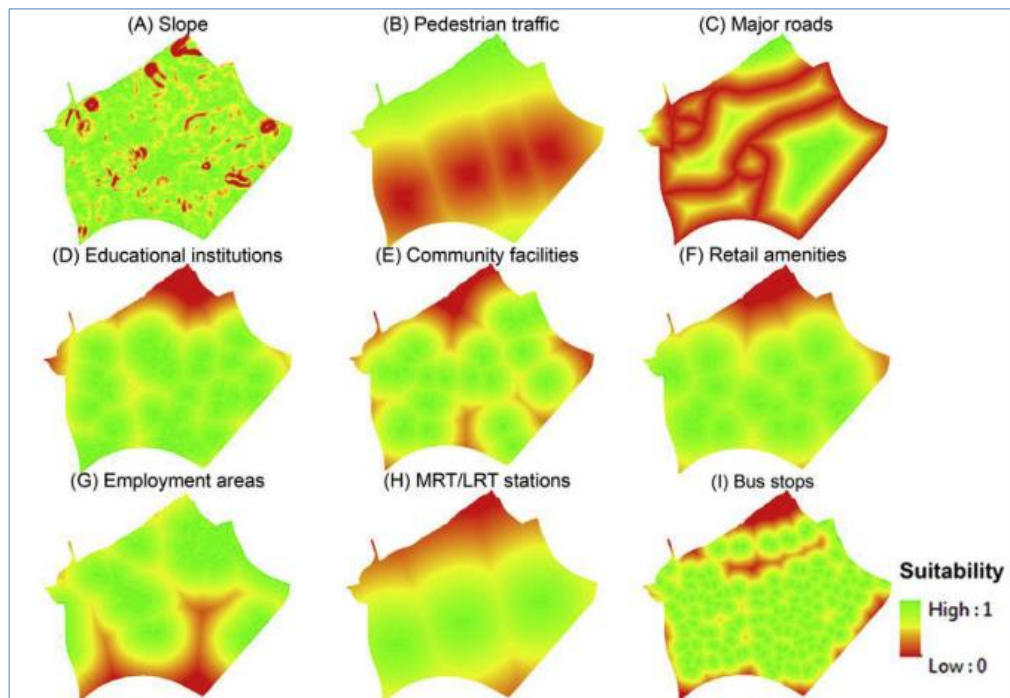


Figura 13. Mapas sobre donde construir ciclovías por factor.

Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

Se logra apreciar en los mapas de la figura 13 que dependiendo del factor analizado se puede generar conflicto entre las variables, uno de lo más resaltantes es el mapa del factor tráfico pedestre (B) que está en conflicto con el mapa del factor proximidad a estaciones de trenes ligeros o metro (H), lo que se explica porque es evidente que cerca de las estaciones de trenes ligeros o metro hay mayor cantidad de tráfico pedestre.

En la figura 14 se muestran cuatro mapas de calor, las tres primeras son la combinación de las preferencias de los nueve factores por stakeholder, mientras el cuarto mapa es la combinación de las preferencias de los tres stakeholders.

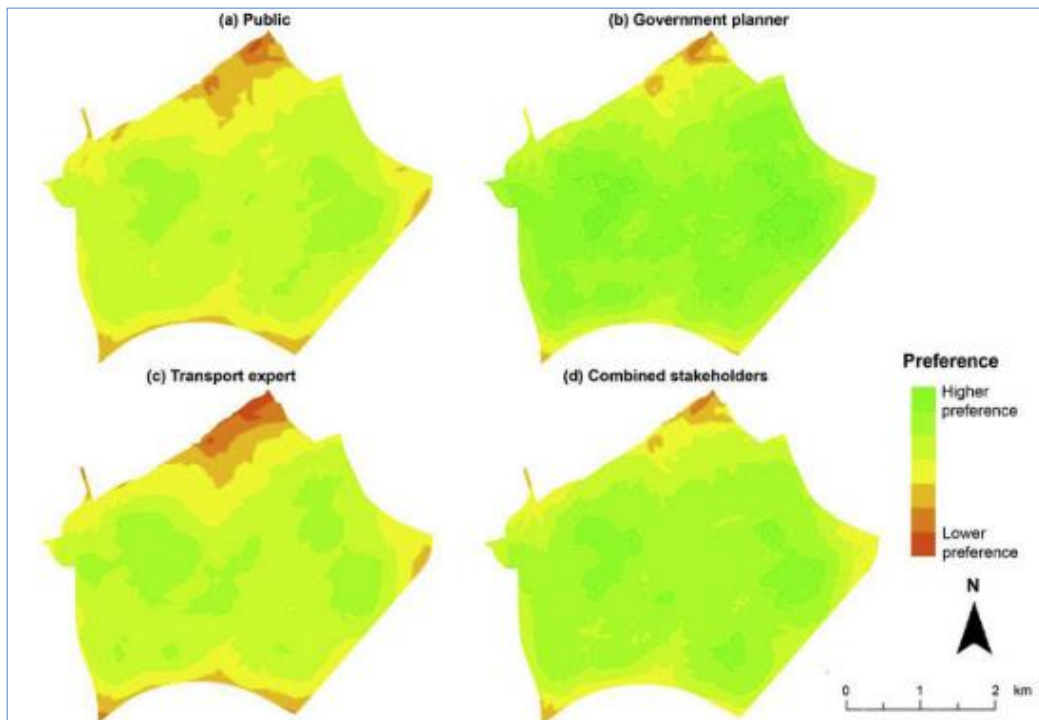


Figura 14. Mapas de calor de la ubicación de ciclovías por stakeholder.

Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

En los mapas de la figura 14 se puede apreciar que en el mapa de calor generado por las preferencias de los planificadores del gobierno (b) hay mayores áreas donde se prefiere la ubicación de ciclovías y esto se refleja porque ellos han dado más importancia en general a todos los factores en comparación de los demás.

En general se observa un patrón en todos los mapas generados por stakeholders donde el área central es la que tiene valores más altos en detrimento de los bordes.

El mapa de la combinación de los stakeholders es menos extremo que la de los ciudadanos de Woodlands por lo que refuerza la hipótesis de la idoneidad del uso de esta metodología propuesta.

Debido a que otras ciudades construyen preferentemente ciclovías al costado de las principales veredas, se extraen dichas veredas del mapa 4d obteniéndose el mapa mostrado en la figura 15.

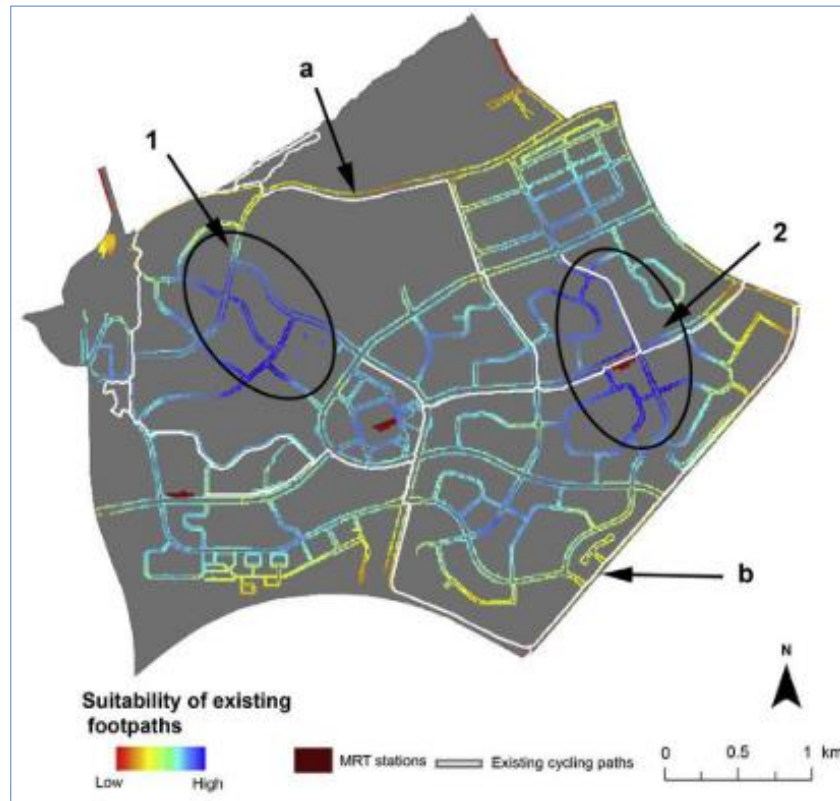


Figura 15. Mapa de las veredas dentro del mapa de la figura 4d.

Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

Las líneas blancas de la figura 15 representan ciclovías actualmente existentes que fueron construidas para conectar principalmente los diferentes parques de Woodlands, es decir, con fines puramente recreativos sin analizar la conectividad con zonas de empleo, zonas comerciales, etc. Por lo tanto, alguna de ellas tiene poco valor en esta metodología como se señala en la parte a y b del mapa.

Las áreas azules en la figura 15 son las ubicaciones óptimas para nuevas ciclovías.

En la figura 16 se muestra la misma lógica que la mostrada en la figura 15, pero con los tres diferentes stakeholders para analizar si hay diferencias sustanciales de donde construir las ciclovías entre los stakeholders.

Las áreas a y b del mapa de la figura 15 siguen siendo las áreas predilectas en los tres mapas de la figura 16. Dentro de la figura 16 se observa que en el mapa realizado por las preferencias de los ciudadanos de Woodlands con los planificadores del gobierno es prácticamente igual; mientras que en el mapa realizado por las preferencias de los expertos en transporte público se observan ligeras diferencias, sobre todo en las áreas 1 y 2. Esta diferencia se debe a que para los expertos de

transporte les es más indiferente las zonas de alto tráfico pedestre que para los otros dos stakeholders.

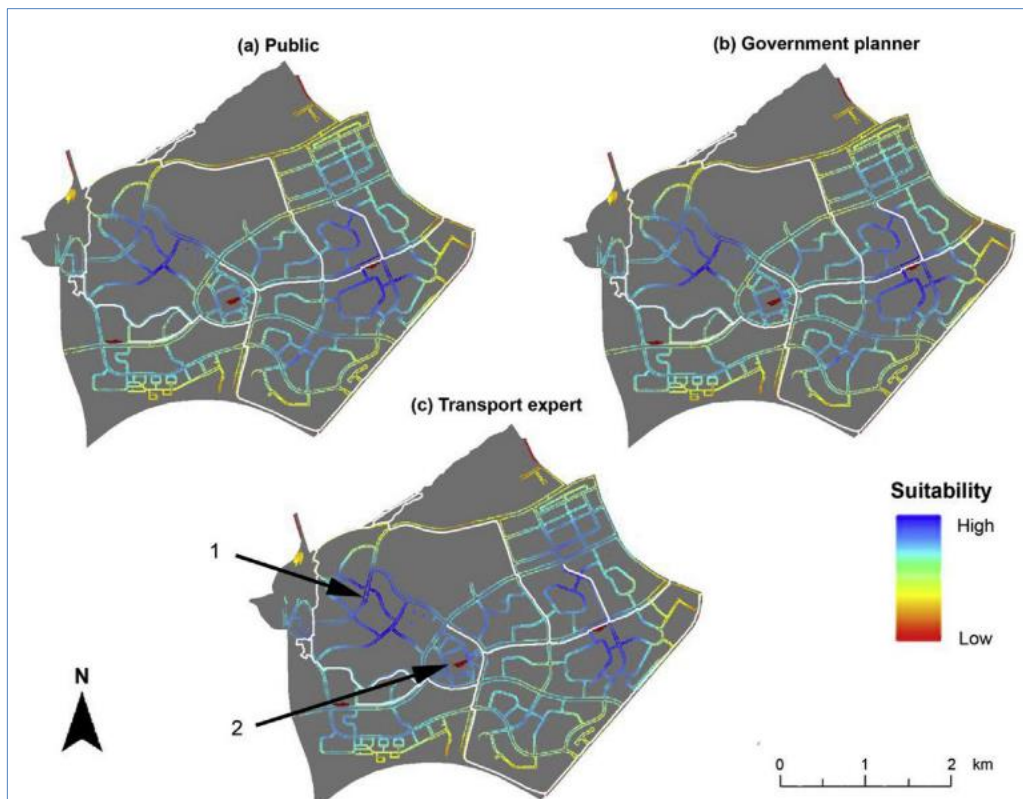


Figura 16. Comparación de las preferencias por Stakeholders.

Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

En la figura 17 se muestran mapas de las preferencias de los ciudadanos de Woodlands en dos escenarios:

- Escenario 1: Se coloca una menor resistencia a las ciclovías existentes, mucho menor a las veredas y al resto de calles se les pone una resistencia alta.
- Escenario 2: Las ciclovías existencias y veredas tienen el mismo nivel de resistencia, mientras que las demás calles tienen alto nivel de resistencia.

Las líneas rojas representan las ciclovías preferidas entre diferentes tipos de infraestructura con las estaciones del metro. Se logra observar que la red de ciclovías conectaría solamente con la estación Admiralty del metro, lo que es realista porque actualmente hay un problema de estacionamientos ilegales alrededor de esta estación y bajo uso de las otras estaciones por los ciclistas.

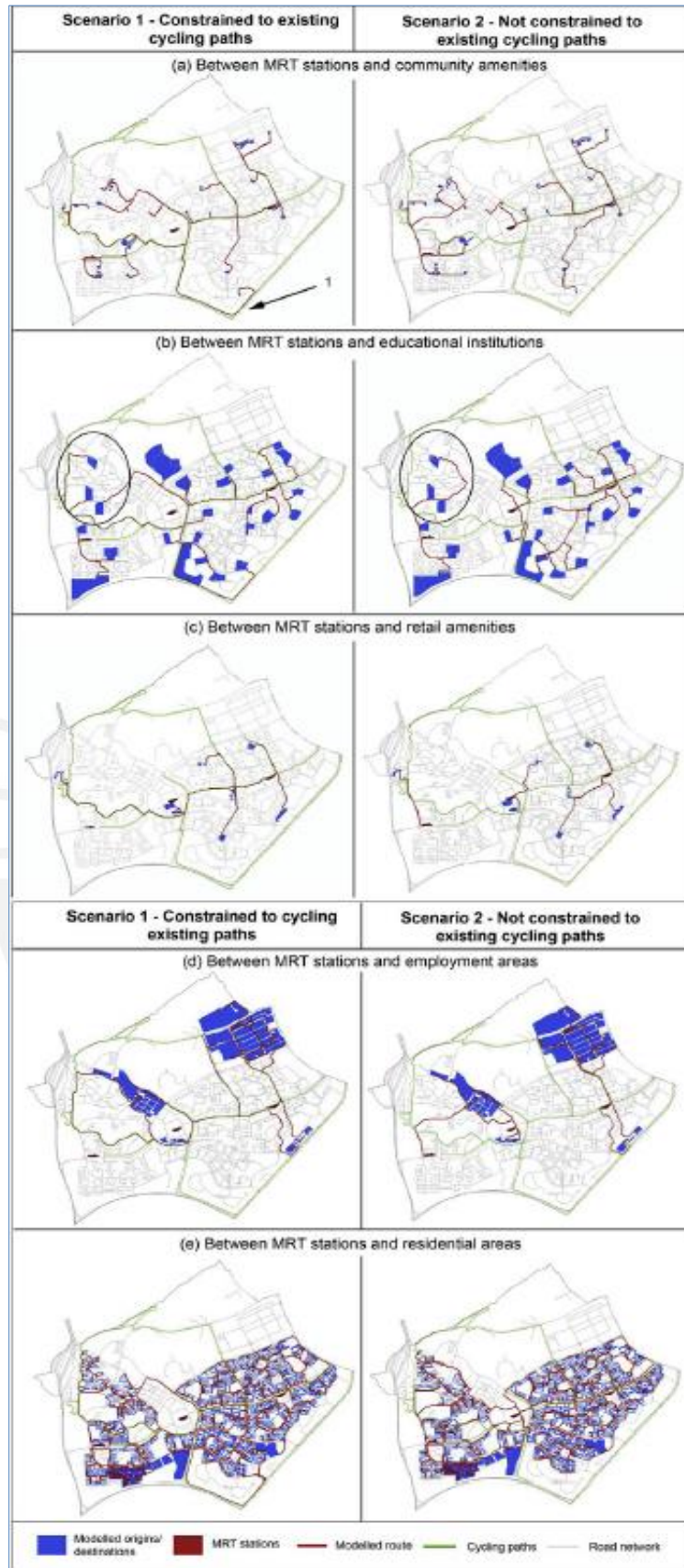


Figura 17. Ubicación de ciclovías en dos escenarios diferentes.

Fuente: Terth y Cao, 2018.

También se logra observar que en el escenario 2 la red de ciclovías está mejor interconectada con las tres estaciones de metro.

En la figura 18 se muestra el mapa de las redes de ciclovía por stakeholders en un escenario 2; aquí se puede observar que el mapa entre a y el b son muy similares excepto por la red 1 que se muestra en la imagen. Sin embargo, en la red mostrada en la parte c se muestra una gran diferencia entra la a y la b, donde la red no conecta con sus estaciones de metro más cercanas, sino que las lleva hasta la estación admiral en contraste de lo que ocurría en los mapas anteriores.

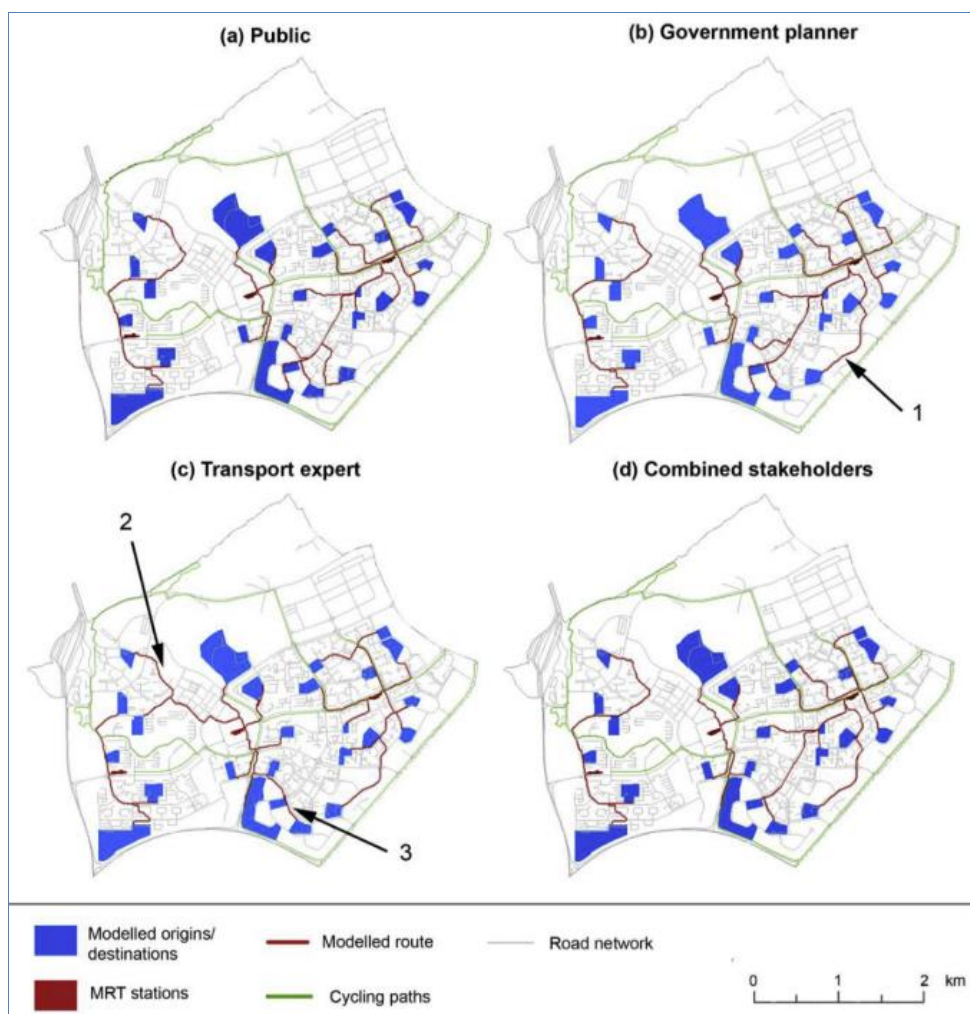


Figura 18. Red de ciclovías por stakeholders.

Fuente: [Terth y Cao, 2018](#).

Las limitaciones del estudio son los límites arbitrarios del área de Woodlands para el estudio, porque la red de ciclovías podría ser más efectiva sino estuviera circunscritos

a esos límites. Adicionalmente solo se tuvo el criterio de un experto de transporte y de un planificador del gobierno lo cual podría dar una inexacta muestra de la percepción de esas entidades.

Los siguientes pasos del grupo de investigación serán construir una plataforma web basada en GIS para transparentar la participación de los ciudadanos en el planeamiento de la red de ciclovías y buscar la participación de otros tipos de stakeholders. Concluyen que también existe un potencial en esta metodología para aplicarla al diseño de redes de trenes y metros o a la ubicación de rellenos sanitarios.

2.2 Caso 2: Propuesta de diseño de Ciclovías en Lima Metropolitana mediante la optimización de flujo de redes.

Autores: Renato Vladimir Guevara Estrada, Adrián Chirre Gaona, Jorge Young Lores, Jonatan Edward Rojas Polo y Miguel Ángel Rodríguez Anticona.

La investigación realizada por [Guevara Estrada et al. 2018](#) tiene como objetivo proponer una red de ciclovías en Lima Metropolitana mediante el algoritmo Floyd-Marshall.

Según [Taha, 2012](#) el algoritmo de Floyd - Marshall representa una red de n nodos, expresada como una matriz cuadrada con n filas y n columnas. La entrada (i, j) de la matriz es la distancia d_{ij} del nodo i al nodo j , la cual es finita si i está vinculado directamente a j , e infinita en caso contrario. Básicamente, si tenemos tres nodos, i , j y k , con sus respectivas distancias en sus arcos, es más rápido llegar de i a j , pasando por k .

En este estudio, a partir de 75 encuestas y de la observación en campo se identificaron las siguientes carencias en las ciclovías limeñas:

- **Poca Conectividad:** Existe poca conectividad entre la red de ciclovías limeñas, puesto que están separadas en islas que tienen pocas conexiones entre sí, esto dificulta el traslado entre distintos distritos por este medio. Las personas entrevistadas declaran que pueden tomar ciclovías por tramos, pero generalmente éstas las conducen a ningún sitio útil.
- **Estado y mantenimiento:** Algunas de las ciclovías que se tienen en Lima se encuentran en estado no óptimo (Universitaria, Salaverry, Arequipa). Tienen

agujeros en las vías, no se encuentran pintadas adecuadamente, no están correctamente señalizadas y presentan interrupciones.

- **Baja cultura de ciclismo:** En la ciudad de Lima aún no existe una cultura vial bien desarrollada y esto abarca el sector ciclista. Las personas usualmente no respetan las ciclovías y hacen mal uso de ellas, entre estos malos usos encontramos el uso como estacionamiento para carros en las ciclovías, al ser usadas como vías peatonales, el poco espacio de tránsito que dejan los carros para el paso de bicicletas en los cruces congestionados en los que existe una ciclovía, suelen encontrarse motos lineales y las personas muchas veces interrumpen estas vías bajando de taxis o realizando otras actividades.
- **Poca Seguridad:** Existe una sensación generalizada de inseguridad en la ciudad de Lima debido a los múltiples actos delictivos que se cometen en sus calles, la basura, poca iluminación y desorden de algunas zonas. Esto cohibe a muchas personas de utilizar la bicicleta como medio transporte, lo que se traduce en poca demanda de este medio que a pesar de todo está en crecimiento. Asimismo, la falta de una red estratégicamente distribuida de ciclovías limita el uso de las mismas dado que en la vía vehicular no se respeta a los ciclistas, contribuyendo a la inseguridad percibida en el transporte mediante bicicleta.

Los autores concluyen que por eso se debe diseñar una red que sea estratégicamente distribuida con un mantenimiento periódico de las ciclovías implementadas, así como la inversión en culturizar a la ciudadanía mediante medios de comunicación (televisión, radio, centros educativos) para lograr una alta efectividad en el aumento de este eficiente medio de transporte para disminuir la problemática vial en la ciudad de Lima.

Se escogieron nodos principales basándose en las redes de ciclovías no interconectadas que se encuentran en Lima que se desean conectar. O sea se escogen nodos referenciales de clusteres o agrupaciones de ciclovías no conectadas actualmente para buscar interconectarlas. Asimismo, se consideró como un punto puente al nodo que conectará los puntos principales.

Estos puntos serán determinados evaluando principalmente los puntos críticos de que podrían unirse para conectar dos "islas" de ciclovías. Una vez definidos los nodos

principales se establecen los nodos intermedios que se encuentran en las intersecciones de las avenidas principales que conectan los nodos principales.

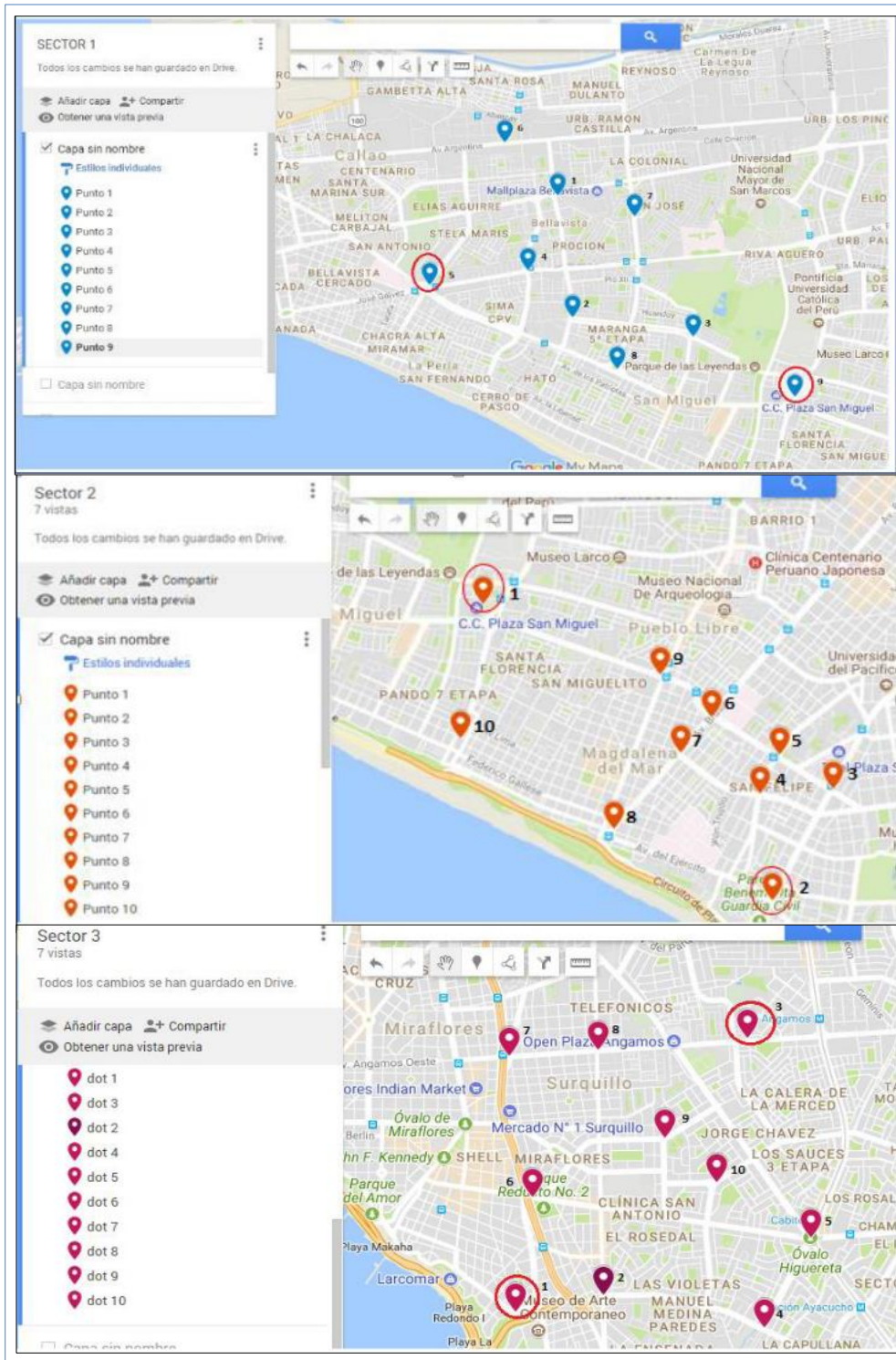


Figura 19. Mapa de los tres sectores del análisis.

Fuente: (Guevara Estrada et al. 2018).

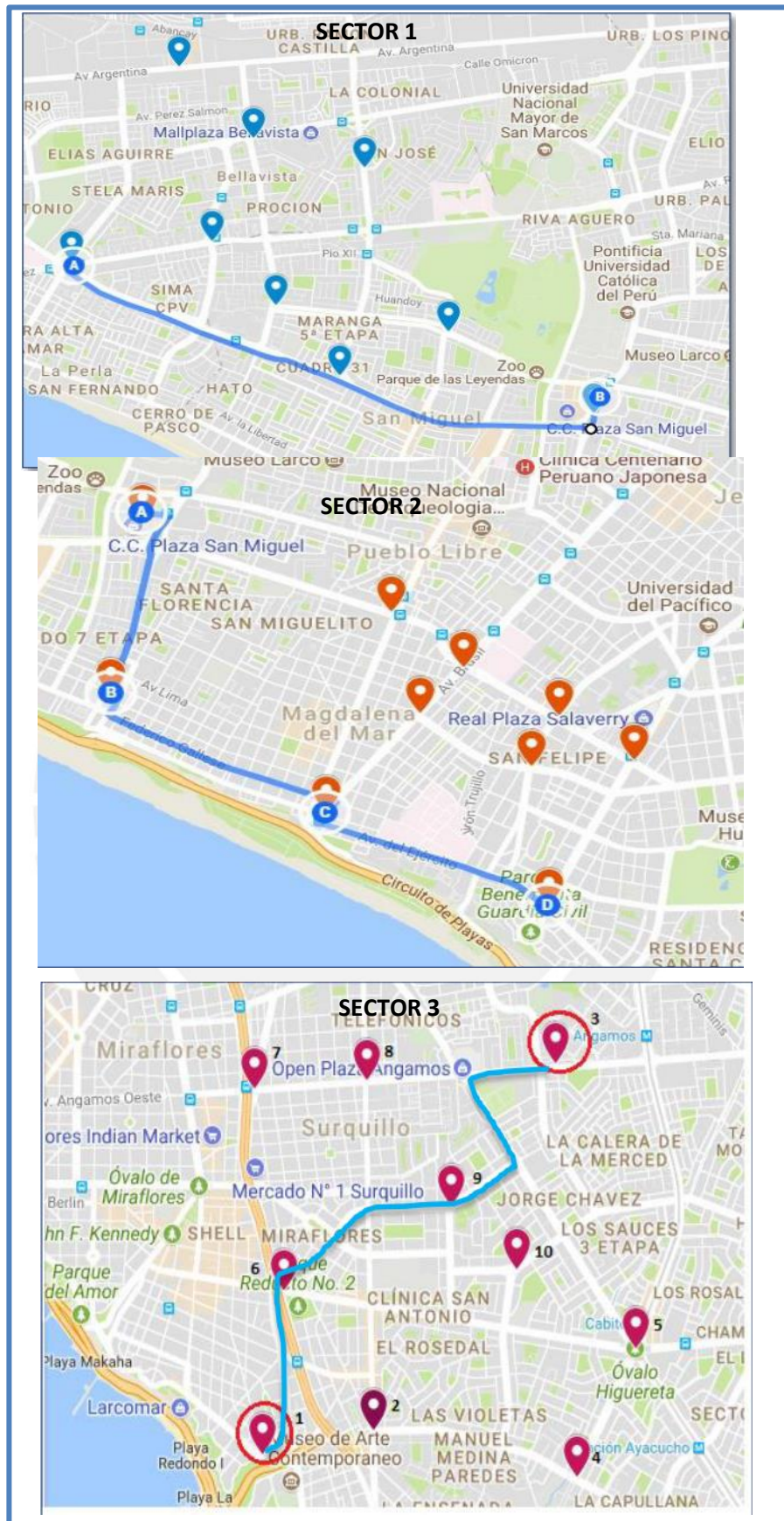


Figura 20. Los 3 sectores con las rutas óptimas entre los nodos principales.

Fuente: (Guevara Estrada et al. 2018).

A continuación, se muestran los nodos principales (encerrados en rojo) y los nodos secundarios que conectarán dichos nodos principales. Se tienen 3 sectores, que representan 3 conexiones entre islas.

Este estudio utiliza los siguientes factores para evaluar la ubicación de ciclovías: seguridad, costo, distancia más corta entre el nodo inicial y final y flujo de personas.

Después de aplicar el algoritmo de Floyd-Warshall a todos los nodos que se muestran en la figura 19 se obtienen los resultados donde se muestran la ruta óptima de los tres sectores para los nodos principales, los que se encontraban encerrados en un círculo rojo en la figura 19, en la figura 20.

En resumen, se trata unir diferentes clústeres de ciclovías para lograr una interconectividad y por lo tanto crear una red mucho más extensa y más interconectada que la actual. Estos clusteres o “islas” se pretendern unir con el algoritmo de Floyd – Warshall. El alcance de esta red solo es para el distrito de Pueblo Libre.

Este estudio se podría aplicar para unir las diferentes islas de ciclovías que tiene todo Lima, como se puede observar en la figura 25 uniendo los centroides de estas islas o uniendo nodos estratégicos por razones culturales o buscando interconexión con otros tipos de transporte, buses o metropolitano o tren eléctrico.

2.3 Caso 3: Método o Marco de trabajo de optimización en el diseño de red de ciclovías

Autores: Jennifer Duthie y Avinash Unnikrishnan.

En esta investigación [Duthie y Unnikrishnan, 2014](#) presentan una nueva formulación matemática para el diseño de redes de ciclovías a partir de las existentes infraestructuras viales. El objetivo es la minimización de la distancia para conectar todos los pares origen-destino donde cada segmento de vía e intersección cumpla o exceda un mínimo límite en su nivel de servicio de ciclismo. La longitud del óptimo camino está restringida a no ser más grande que un cierto límite, la cual esta expresada en función al camino más corto posible.

A pesar de que existe una nutrida literatura sobre la falta de planeamiento sistémico para el diseño de una red, la mayoría de ellas ha sido aplicada al transporte motorizado que se diferencia del transporte en bicicleta en que en este último no existe el problema de la congestión vehicular (Duthie y Unnikrishnan, 2014).

En este estudio no se toma en cuenta el tema de la demanda entre los nodos porque esto genera el problema del huevo y la gallina, en el cual las áreas con buena infraestructura mejoran y las áreas con pobre infraestructura no se toman en cuenta. Por lo tanto, mejorar las ciclovías donde en la actualidad ya las hay solamente ignoraría la demanda latente que podría producirse si solamente una red conectada estuviera disponible dentro de su zona.

La calidad de la ruta es definida usando el índice de compatibilidad ciclística (BCI) de Harkey et al, 1998 para los segmentos de vía, y para las intersecciones se usa la metodología definida por Landis et al, 2003. Ambos valores salen del nivel de calidad de las vías llamada LOS, las cuales fueron estimadas por Transportation Research Board, 1994 para saber el nivel de calidad de determinada calle evaluándolo por los siguientes factores:

El problema de la red de ciclovías se puede describir con las siguientes notaciones:

$G = (V, A)$ es una red de ciclovías, donde V es el conjunto de intersecciones y A es el conjunto de segmentos de vías.

Cada segmento de vía $(i, j) \in A$ tiene una longitud $l_{ij} \geq 0$, y un costo $c_{ij} \geq 0$, asociado con mejorar el nivel de servicio lo cual varía dependiendo del nivel de calidad LOS deseado.

Cada intersección $i \in V$ tiene una longitud $m_i \geq 0$, y un costo $d_i \geq 0$.

Las vías que cumplen a cabalidad con los niveles de calidad requeridos tendrán un valor de cero.

Luego de especificar los puntos de origen y destino (OD) representarlos por una W , donde cada par de OD, $w \in W$, es definida por un par de intersecciones (r^w, s^w) , donde r^w corresponde al inicio de intersección y s^w corresponde al final de la intersección. L^w corresponde al nivel máximo de longitud que un ciclista está dispuesto a viajar entre un par OD.

La formulación tiene tres variables de decisión:

- δ_{ij} , el cual toma el valor de 1 si el segmento de vía $(i,j) \in A$ es elegido como parte de la mejor conexión o toma el valor de 0 en caso contrario.
- γ_i , el cual toma el valor de 1 si la intersección $i \in V$ es elegido parte de la mejor conexión o toma el valor de 0 en caso contrario.
- x_{ij}^w , el cual toma el valor de 1 si el segmento de vía (i,j) yace en el mejor conectado camino OD, $w \in W$, o toma el valor de 0 en caso contrario.

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \delta_{ij} + \sum_{i \in V} d_i \gamma_i \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i:(i,j) \in A} x_{ij}^w - \sum_{j:(i,j) \in A} x_{ji}^w = b_i^w \quad \forall i \in V, w \in W \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} l_{ij} x_{ij}^w \leq L^w \quad \forall w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \frac{x_{ij}^w}{|W|} \leq \delta_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (4)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} \frac{\delta_{ij}}{|\alpha_i|} + \sum_{j:(i,j) \in A} \frac{\delta_{ij}}{|\beta_i|} \leq \gamma_i + 1 \quad \forall i \in V \quad (5)$$

$$x_{ij}^w, \delta_{ij}, \gamma_i \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, i \in V, w \in W \quad (6)$$

Como se puede observar, la función objetivo en la ecuación se trata de minimizar el costo, de mejorar los segmentos de vías e intersección para un deseable nivel de calidad de servicio.

En la ecuación 2 es la restricción es para balancear el flujo, asegurando que todas las vías elegidas están interconectadas.

La ecuación 3 asegura que la ruta elegida sea menor o igual a una distancia máxima; estas distancias máximas pueden ser 1.1, 1.2 o X veces la distancia del camino más corto entre esos nodos, este valor se podría determinar a partir de estudios de cuanto más podrían estar dispuestos los ciclistas de determinada región a realizar el recorrido con la referencia del camino más corto posible. Lo relatado anteriormente

sobre poner un límite máximo del camino entre dos puntos, con referencia a la distancia más corta, se observa en estudios como el que se realizó en Phoenix sobre el comportamiento de los ciclistas ([Howards y Burnes, 2001](#)).

Los autores proponen dos nuevas ecuaciones que son las 4 y 5 para reducir el tiempo computacional de esta programación lineal. Estas restricciones son para dar lógica de existencia a las variables, por ejemplo, si una intersección entre tales vías existe entonces ese segmento de vía también tiene que existir.

La ecuación 6 es para definir la dimensión binaria de las variables de decisión.

La metodología de relacionar el BCI con los LOS se muestran en la tabla 2, estos datos después son usados para hallar los costos de la ecuación 1.

Tabla 2. Tipos de problemas intermedios: minimización del input.

LOS	BCI (Arco)	BCI (Intersección)	Notas
A	0 to 1.50	0 to 1.50	Utilizable para todos los ciclistas
B	1.51 to 2.30	1.51 to 2.50	Utilizable para el 95% de ciclistas
C	2.31 to 3.40	2.51 to 3.50	Utilizable para el 75% de ciclistas
D	3.41 to 4.40	3.51 to 4.50	Utilizable para el 50% de ciclistas
E	4.41 to 5.30	4.51 to 5.50	Utilizable para el 25% de ciclistas
F	> 5.30	> 5.50	Utilizable para el 5% de ciclistas

Fuente: [Duthie y Unnikrishnan, 2014](#).

Para hallar estos costos por segmento de vía y de intersección se usan las ecuaciones 7 y 8, por ejemplo, un segmento de vía que tiene una longitud más grande que 3.4, tiene que tener un LOS de D o F y por lo tanto tiene un costo para mejorar este arco, para lograr convertirlo a un arco con LOS de A, B o C. Se ocupa una lógica similar para estimar los costos para mejorar la infraestructura de las intersecciones.

$$c_{ij} = \max \{0, BCI_{ij} - 3.4\} * l_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (7)$$

$$d_i = \max \{0, BCI_i - 3.5\} * m_i \quad \forall i \in V \quad (8)$$

Esta formulación matemática fue usada en el downtown de Austin en Texas, a su red se extrajeron nodos como las carreteras por la imposibilidad de los ciclistas de transitar en ellas; en una simplificación de esa región se obtuvieron 75 nodos y 185 arcos, y fueron resueltos usando el software CPLEX.

Para ilustrar cómo la restricción del valor del coeficiente multiplicado a la distancia más corta posible entre el nodo origen y destino puede afectar el diseño de la red, se eligieron en este ejemplo 25 pares de nodos OD. Los resultados se muestran en la figura 21.

En general, mientras más relajada sea dicha restricción menor será el costo de la red y menores serán las vías que mejorar dentro de la red. Si este coeficiente se ajusta a un 100%, es decir, que solo es posible realizar el camino más corto, se obtiene que el costo logra ser hasta un 215%, lo que se puede obtener ajustando el coeficiente de distancia máxima a un 130%.

Adicionalmente, cuanto más relajada sea la restricción anteriormente discutida, menos tiempo computacional toma para resolverlo porque el conjunto de soluciones se determina. Se llegó a probar con un máximo de 5625 pares de nodos OD, lográndose tiempos computacionales para un coeficiente del 150% de la distancia más corta menores a 210 segundos, por lo tanto, es bastante factible realizar esta metodología en otras ciudades para el diseño de ciclovías.

También se hicieron pruebas para los diferentes LOS deseados A, B o C, lográndose detectar que el incremento es más alto cuando se desea incrementar la calidad de los segmentos de vía de la ciclovía desde un C a un B, que cuando se intenta incrementar la calidad desde un B a un A. Por lo tanto, quedaría en criterio de los tomadores de decisión la opción más apropiado a su contexto o se podría realizar un análisis de sensibilidad variando cada parámetro y encontrando algún punto donde la variación de la red de ciclovía sea mínima y tomarla como la mejor propuesta de red de ciclovías.

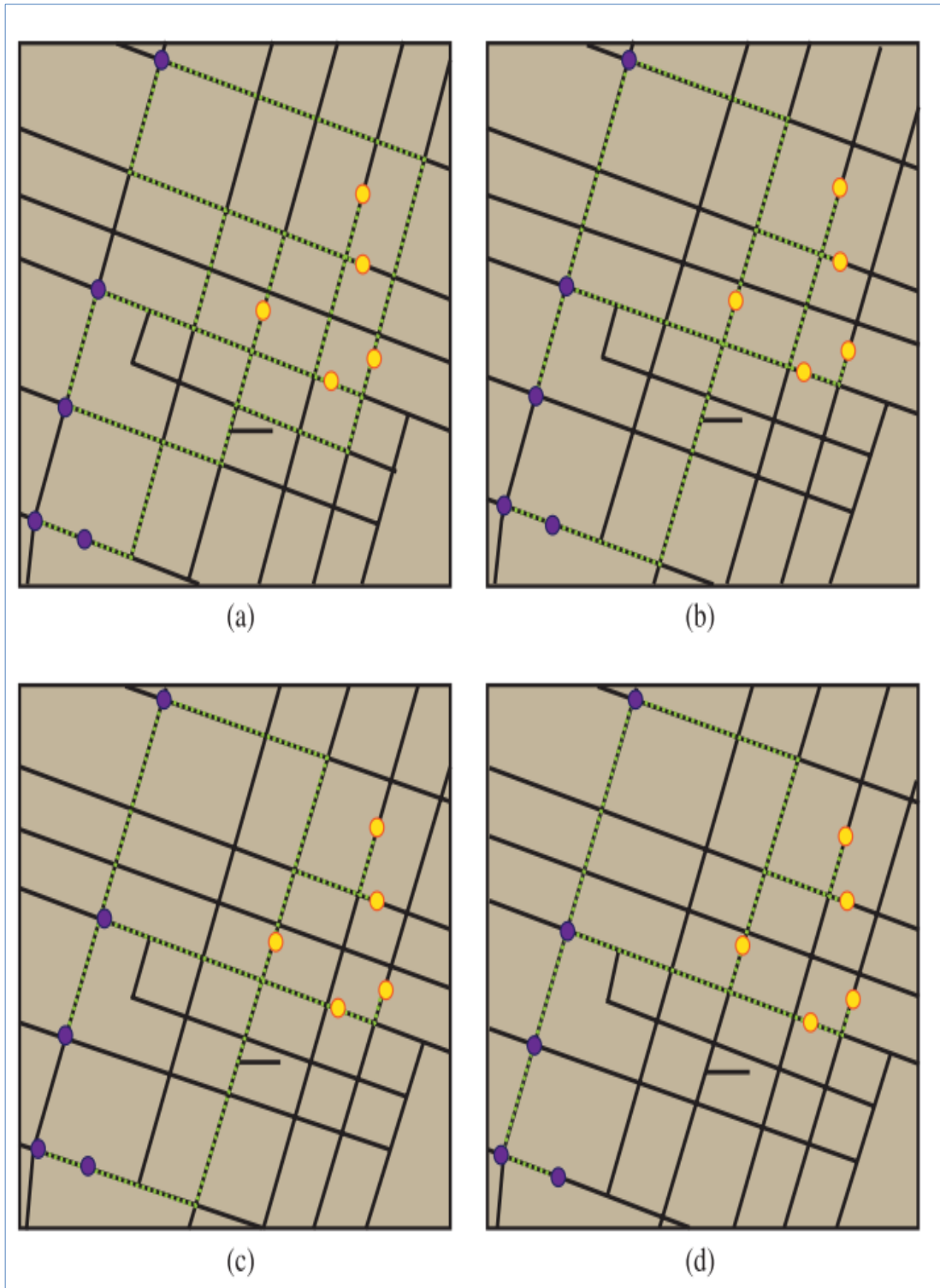


Figura 22. Red de ciclovías para varios coeficientes de máxima longitud de viaje por la distancia más corta a) 100%, b) 110%, c) 120%, d) 130%.

Fuente: (Duthie y Unnikrishnan, 2014).

2.4 Caso 4: Diseño de red de ciclovías: modelo y algoritmo de solución

Autores: Antonio Mauttone, Gonzalo Mercadante, María Rabaza y Fernanda Toledo.

En esta investigación [Mauttone et al, 2017](#) proponen para el diseño de una red de ciclovías una programación lineal y una metaheurística basada en Grasp que son aplicadas en la ciudad de Montevideo, capital de Uruguay. En esta propuesta se considera el efecto de la minimización de las discontinuidades de infraestructura ciclística en la red.

A pesar de las excepciones en las regulaciones, las calles pueden ser compartidas por carros y bicicletas sin problema, y por lo tanto, cualquier destino en la ciudad es posible realizarlo en bicicleta. Sin embargo, es aún de vital importancia la construcción de infraestructura especial para el transporte en bicicleta que se encuentre dentro de una red debidamente interconectada para que sea usada por los interesados ([Mauttone et al, 2017](#)) ([Buehler y Dill, 2016](#)).

Incluso, según [Krizek y Roland, 2005](#) las discontinuidades terminan por exponer a un mayor riesgo de accidente a los ciclistas por enfrentarlos súbitamente al tráfico motorizado o a una intersección peligrosa, lo que finalmente termina por desalentarlos a seguir transportándose en bicicleta. Por esta razón [Mauttone et al, 2017](#) quieren brindar una metodología de cómo planificar a largo plazo una red de ciclovías con límites de presupuesto.

En la tabla 3, se muestran las notaciones y sus descripciones del modelo propuesto, que es una variante del *fixed-charge multi-commodity network design problem*.

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} f_{ij}^k + c'_{ij} f'_{ij}^k \quad (1)$$

Subject to

$$y_{ij} + x_{ij} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} f_{ij}^k \leq y_{ij} \sum_{k \in K} R_k \quad \forall (i,j) \in A \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} f'_{ij}^k \leq x_{ij} \sum_{k \in K} R_k \quad \forall (i,j) \in A \quad (4)$$

$$= R_k \text{ if } i = O(k)$$

$$\sum_{j \in N} (f_{ij}^k + f'_{ij}{}^k) - \sum_{l \in N} (f_{li}^k + f'_{li}{}^k) = -R_k \text{ if } i = D(k) \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (5)$$

$= 0 \text{ en caso contrario}$

$$\sum_{(i,j) \in A} l_{ij} y_{ij} \leq l_{max} \quad (6)$$

$$f_{ij}^k \geq 0, f'_{ij}{}^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A \quad (7)$$

$$y_{ij}, x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (8)$$

La función objetivo minimiza el costo total de los viajeros a lo largo de la red G; se asume que cada par OD serán recorridos por el camino más corto entre ellos, habiendo o no habiendo una ciclovía en sus arcos.

La ecuación 5 es el balance del flujo de ciclistas que entran y salen de la red de ciclovías.

La ecuación 6 es la restricción del presupuesto con que se cuenta para construir una determinada longitud de ciclovías; la ecuación 2 establece que el arco está dispuesto para ser recorrido por una bicicleta, tenga o no construida una ciclovía en ella; las ecuaciones 3 y 4 instauran que el flujo de bicicletas está permitido solamente en arcos posibles.

Los autores concluyen sobre el modelo previamente presentado que no asegura la conectividad ni minimiza el número de discontinuidades y adicionalmente presenta un alto nivel de complejidad computacional; por lo tanto, para problemas de gran tamaño proponen usar una metaheurística basada en GRASP, el cual a partir de una construcción aleatoria greedy, para obtener una solución inicial va iterándose mientras se acerca a un óptimo local. Debido a la estocástica naturaleza de sus iteraciones, diferentes soluciones son obtenidas en las corridas por lo que hay una amplia exploración de óptimos en toda la región.

Tabla 3. Notación del caso 4.

Notación	Descripción
G	Red de posibles vías para construir la infraestructura ciclística.
N	Grupo de nodos G (i,j,l).
n	Cardinalidad de N.
A	Grupo de arcos dirigidos de G (i,j).
l_{ij}	Longitud del arco (i,j).
L_{TOT}	Longitud total de G.
l_{max}	La máxima longitud de ciclovías que serán construidas.
c_{ij}	Costo del usuario (distancia o tiempo) para atravesar el arco (i,j) cuando la ciclovía es construida.
c'_{ij}	Costo para atravesar el arco (i,j) cuando no hay ciclovía
K	Grupo de nodos de origen y destino OD.
O(k)	Nodo Origen.
D(k)	Nodo Final.
R(k)	Cantidad de viajes de bicicleta por unidad de tiempo dentro de un horizonte de tiempo en un par de nodos de OD.
D_{tot}	Cantidad de viajes en la red G.
y_{ij}	Variable binaria que toma el valor de 1 cuando la ciclovía es construida en el arco (i,j), toma el valor de 0 en caso contrario.
x_{ij}	Variable binaria que toma el valor de 1 si hay flujo de ciclistas en el arco (i,j), incluso cuando la ciclovía no esté construida en ese arco, toma el valor de 0 en caso contrario.
f_{ij}^k	Flujo de ciclistas correspondiente al arco (i,j) donde la ciclovía es construida.
f_{ij}^{*k}	Flujo de ciclistas correspondiente al arco (i,j) donde la ciclovía no es construida.
F_{in}	Porcentaje de la total demanda que ingresan a la red de ciclovías.
F_{out}	

	Porcentaje de la total demanda que egresa de la red de ciclovías.
--	---

Fuente: [Mauttone et al, 2017](#).

La construcción de las iteraciones de la metaheurística propuesta se basa en una subrutina denominada `computePathTrip`, en el cual se agregan arcos a la solución para satisfacer la demanda dada por el conjunto K ; para lograrlo se dividen los pares de nodo OD en dos grupos, los elementos con demanda inferior al promedio y los elementos con demanda superior al promedio. En el RLC, que en este caso es el grupo 1, la ventaja de esta metaheurística es que en cada tiempo que se busca el óptimo local se puede colocar un control de discontinuidades, al contar la cantidad de veces que los ciclistas tienen que salir o entrar a la red.

Mientras se realizan pruebas con método exacto a través de CPLEX, en la metaheurística propuesta se realizan a través de Java. En los resultados de las pruebas se logra notar que el método exacto puede tomar hasta 18 horas en una región de aproximadamente 416 nodos, 1266 arcos y 1406 pares de OD, mientras que para la misma instancia la metaheurística demora tan solo 23 minutos. Pese a ello, se logra promediar que la metaheurística obtiene valores 6% inferiores al método exacto, lo que se compensa al tener la mayor eficiencia en procesamiento computacional.

Posteriormente, se prueba la metaheurística para la ciudad de Montevideo, definiendo el límite presupuestal como la mitad total de la red de Montevideo que puede ser convertida en ciclovías.

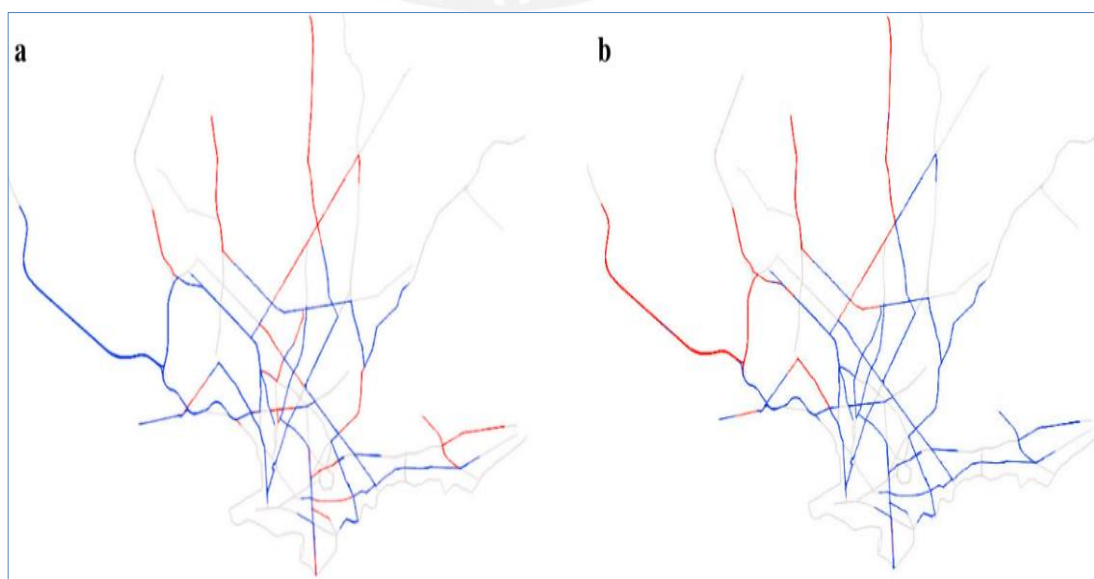


Figura 23. Red propuesta de ciclovías. a) Sin penalidad por discontinuidad,
b) Con penalidad por discontinuidad.

Fuente: ([Mauttone et al, 2017](#)).

En el escenario con penalidad por discontinuidad de la vía logramos obtener que un 93% de viajes de los ciclistas están dentro de la red, mientras que en el escenario sin penalidad por discontinuidad ese porcentaje llega a un 92%; se logra observar en la figura 22 los resultados de estos dos escenarios, donde las líneas azules representan la red de ciclovías, las líneas rojas representan arcos que son usados por ciclistas y que no tienen ciclovías; y las líneas grises representan zonas con inusuales viajes de ciclistas. Claramente la segunda red propuesta de ciclovías, que tiene penalidad por discontinuidad, está mejor interconectada que la primera.



CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DE LA RED DE CICLOVÍAS EN LIMA

Lima es una ciudad en constante crecimiento que concentra el 29% de la población del Perú, con más de 9 millones de habitantes (INEI, 2017), de los cuales según un estudio de Lima como vamos, 2017 solo el 35% de sus habitantes se encuentra satisfecho con su ciudad; entre las principales causas de la insatisfacción están la inseguridad ciudadana y el transporte público con 75% y 51% respectivamente².

Adicionalmente el 80% de limeños estiman que la principal causa de la contaminación ambiental de su ciudad se debe a la contaminación atmosférica y no les falta razón, en un reporte de la OMS, 2016 se indicó a Lima como la capital sudamericana con peor calidad de aire por tener los mayores índices de PM2.5 Y PM10. Es relevante mencionar que el 70% de dicha contaminación atmosférica se debe al parque automotor, el cual presenta un alto crecimiento en Lima, por ejemplo, del 2010 al 2015 creció en un 66,2% (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2017), lo que seguirá ocasionando mayor congestión vehicular, insatisfacción de los usuarios y mayores niveles de contaminación atmosférica.

En consecuencia, surge la necesidad de proponer nuevos sistemas de transporte que sean eficientes y ecoamigables, uno de ellos es la movilidad en bicicleta tan promovida en Europa por ser más rápida en trayectos urbanos de puerta a puerta en distancias de 5 kilómetros e incluso más si aumenta la congestión como lo demuestra Dekoster, 2002 al tiempo que promueve la salud, reduce los niveles contaminación atmosférica y sonora, reduce el costo de transporte para los usuarios, y disminuye el consumo energético, etc.

Komanoff, 2004 en su estudio estima que la velocidad promedio de los ciclistas urbanos es de 15 kmph, mientras que se ha estimado que la velocidad promedio de un carro en Lima está entre 10kmph a 12kmph, sin embargo, en hora punta la velocidad promedio es aún mucho menor; se debe considerar también que la distancia promedio para viajar al trabajo es de 8 km en Lima, por lo tanto, se propone diseñar una red de ciclovías utilizando herramientas de minería de datos y programación matemática que alivie los horarios de congestión vehicular, esta

² La encuesta admitía opciones múltiples.

congestión se debe principalmente a que el 75% del motivo de los desplazamientos en Lima es laboral ([Marketwin, 2017](#)).

Perú tiene un gran potencial para ser un país con altos niveles de desplazamiento en bicicleta, porque solo el 11% de los hogares tiene al menos un automóvil, uno de los ratios más bajas en Sudamérica; Chile por el contrario, llega a tener un ratio de 49% ([Pew Research Center, 2015](#)). Un dato interesante sobre la posesión de bicicletas en Lima es que solamente el 26% de la población cuenta con una ([El Comercio, 2015](#)).

Tabla 4. Variables de regresión múltiple para encontrar una relación del nivel de uso de bicicleta.

Variables predictoras	Variable dependiente o de respuesta
Ciclovía (<i>bike lane</i>) por milla cuadrada	% de uso de bicicleta como modo de transporte
Millas de Ciclovías por 100 mil habitantes	
Promedio de gasto anual per capita por ciclovías y veredas	
Densidad de la población	
Días de lluvia anual (promedio)	
Porcentaje de estudiantes	
Promedio del precio de gasolina por galón	
Promedio de vehículos por hogar	
Ingreso promedio anual por hogar	

Fuente: [Dill y Carr, 2003](#).

Debido a varias razones como el descongestionamiento del tráfico, el mejoramiento de la salud, y la reducción de la contaminación sonora y atmosférica, el ciclismo urbano está creciendo no solamente en Europa y USA sino también en países latinoamericanos. El mayor caso de éxito está Bogotá, en la capital colombiana después de implementar una red de ciclovías integradas se reportó un aumento de ciclistas urbanos en un 300% desde al año 1995 al año 2003 ([Pucher et al, 2010](#)). Según un modelo de regresión múltiple realizado por [Dill y Carr, 2003](#) con las variables que se muestran en la tabla 4, para pronosticar la cantidad de personas que se trasladan al trabajo en bicicleta con respecto a diversas variables de 35

grandes ciudades de Estados Unidos, se encontró que por cada milla cuadrada por 100 000 habitantes de ciclovía (*bike lane*) construida adicional se incrementa en 1% la cantidad de viajeros que se trasladan hacia sus trabajos en bicicleta con respecto a otras modalidades.

Sin embargo, para el caso de Lima, a pesar de algunos esfuerzos aislados de construir ciclovías en distritos como San Isidro o San Borja, según [Lima como vamos, 2017](#) el porcentaje de ciclistas urbanos se está reduciendo; en el año 2010 eran el 1.10% los ciclistas en la ciudad, cifra que para el año 2017 se redujo al 0.82% frente a los diferentes tipos de medios de transporte, donde los principales modos de transporte en Lima son el bus y las combis, con un aumento de buses en los últimos años en detrimento de las custers o combis como se logra ver en la figura 23.

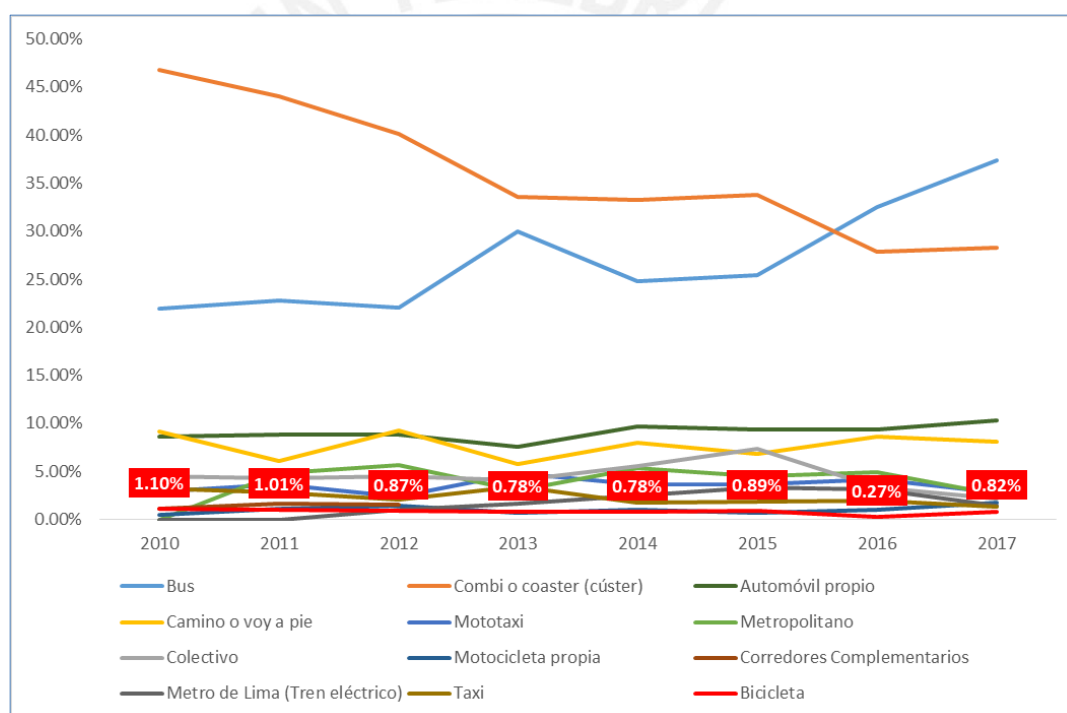


Figura 24. Diferentes modalidades de transporte en Lima.

Fuente: [Lima Como Vamos, 2017](#).

La baja tasa de viajes en bicicleta en Lima se vuelve irónica si se observa la tabla 5, la cual recoge un estudio del [BID, 2015](#) donde se puede apreciar que Lima es la quinta ciudad con mayores kilómetros de ciclovías en Latinoamérica, pero llama la atención que dentro de esas 32 ciudades analizadas es la que posee menor tasa de viajes en bicicleta; por lo tanto, es imprescindible reformular nuestro diseño de la red de ciclovías especialmente cuando se pretenden construir 276 kilómetros de ciclovías

más para el 2021 y 320 kilómetros adicionales para el año 2025 (PLAM, 2014). (Silva, 2015).

Tabla 5. Kilómetros de infraestructura ciclística y porcentajes de viajes realizados en bici en las principales ciudades Latinoamericanas.

Ciudad	Kilómetros de Infraestructura ciclística	Porcentaje de viajes realizados en bici
Bogotá	392	5.0%
Rio de Janeiro	307	3.2%
Sao Paulo	270.7	1.0%
Santiago	236	3.0%
Lima	141	0.3%
Buenos Aires	130	3.0%
México D.F.	128.2	2.0%
Curitiba	127	1.0%
Córdoba	103.5	2.4%
Rosario	100	5.3%
Florianópolis	57	2.8%
Belo horizonte	52.8	1.1%
Montevideo	35.9	2.0%
Concepción	28	1.0%
Medellín	26.9	0.5%
Cochabamba	23.6	3.0%
Guadalajara	18.4	2.5%
San José	17.3	2.0%
La Paz	14	1.2%
Mendoza	11.8	2.2%
Puebla	5	1.9%
Pereira	3.4	3.0%
Monterrey	0.4	0.5%

Fuente: BID 2015.

La causa del decrecimiento del porcentaje de la tasa de viajes en bicicleta, es decir, de la baja tasa de viajes en bicicleta en la ciudad de Lima, puede estar relacionada con las grandes discontinuidades que tiene la red de ciclovía, como se puede observar en la figura 25, las cuales según [Krizek y Roland, 2005](#) terminan por exponer a un mayor riesgo de accidente a los ciclistas al enfrentarlos súbitamente al tráfico motorizado o a una intersección peligrosa, lo que termina por desalentarlos a seguir transportándose en bicicleta, como se había anotado en el capítulo 2.

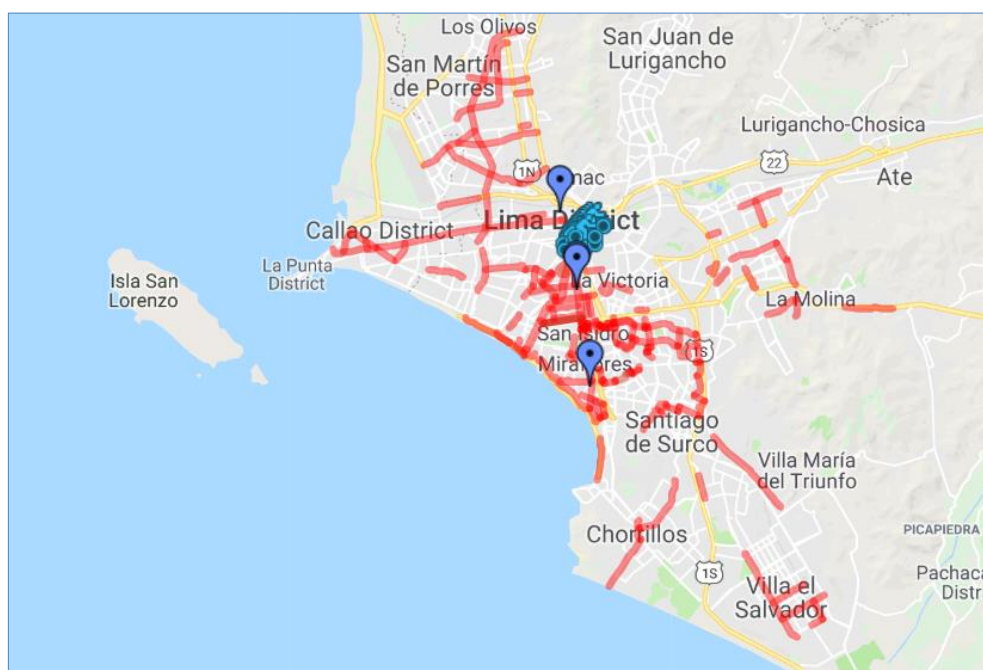


Figura 25. Mapa de la red de ciclovías actual.

Fuente: [Google Maps, 2018](#).

Otra razón del decrecimiento en el uso de la bicicleta como medio de transporte principal en Lima, es la falta de una buena legislación y de control por parte de las autoridades competentes para hacer respetar las ciclovías existentes, como ejemplo de ello muchos automóviles se estacionan ilegalmente en las ciclovías como se puede apreciar en la figura 26, donde inclusive un camión repartidor de Coca – Cola emplea este espacio reservado para ciclistas como un punto para distribuir sus productos, paralelamente se observa en esta misma figura que los carros particulares también incurren en este tipo de acciones que obstaculizan el libre tránsito de los ciclistas en los lugares establecidos para ellos.



Figura 26. Automóviles estacionados en ciclovías de San Isidro y San Borja.

Elaboración Propia.

En la figura 27, se presenta un caso donde las ciclovías se convierten en un punto de basura como sucede con algunas ciclovías en Villa El Salvador.

Esto se encuentra reflejado en la baja tasa de satisfacción de un 13% de las ciclovías existentes, con Lima Sur como la región de Lima con menor satisfacción de ciclovías con un 6% como se logra ver en la figura 28.



Figura 27. Ciclovía en Villa El Salvador convertido en basural.

Elaboración Propia.

Una característica resaltante de los ciclistas urbanos limeños es que el 89% son hombres y el 11% son mujeres ([Lima Como Vamos, 2017](#)), lo que demuestra que es un modo de transporte principalmente masculino en una ratio mucho mayor que en países como Australia, Reino Unido, Estados Unidos y Canadá donde el porcentaje de participación de las mujeres en los viajes en bicicleta es aproximadamente en 30% ([Sustrans, 2017](#)). Este fenómeno se podría explicar principalmente a que debido a cuestiones culturales en las que se relaciona fuertemente la actividad física con la masculinidad y poco con la femineidad ([Sustrans, 2017](#)).

Otra característica es que el mayor porcentaje de viajes en bicicleta en Lima se da en la región de Lima Centro y Lima Sur con 1.09% y 0.82% respectivamente, y por el contrario las regiones con menor porcentaje en Lima son Lima Este y Lima Norte con 0.7% y 0.69% respectivamente ([Lima Como Vamos, 2017](#)), irónicamente en la figura 27 se aprecia que Lima Sur es la que cuenta con menos satisfacción por sus ciclovías, porcentajes que guardan una relación con el mapa de la red de ciclovías actual de la figura 25, donde se aprecia un mayor nivel de ciclovías en Centro y Sur en contraste con la región con menor ciclovías que es Lima Este.

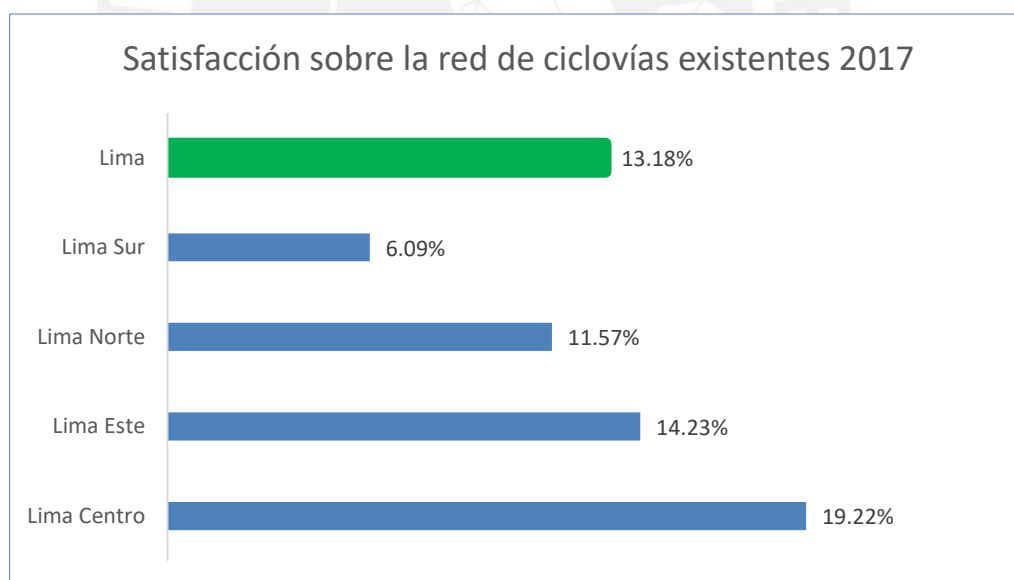


Figura 28. Satisfacción sobre las ciclovías por región de Lima en 2017.

Fuente: [Lima Como Vamos, 2017](#).

Pese a lo mencionado previamente, el contexto del área metropolitana de Lima presenta oportunidades para un mayor desarrollo e implementación de iniciativas para promover el uso del transporte no motorizado. En principio, las oportunidades están relacionadas con [Ortegon-Sanchez y Oviedo-Hernandez, 2016](#):

- La topografía favorable, ya que la principal área geográfica de la ciudad está en una llanura.
- Clima favorable sin temperaturas extremas y lluvias limitadas durante todo el año.
- Distancia de viaje promedio (todos los modos y propósitos) de alrededor de 7.5 km, de acuerdo con el Plan Maestro de Transporte Urbano.
- Bajas tasas de motorización con solo el 16.5% de los hogares que poseen un vehículo privado y la propiedad de bicicletas relativamente alta con el 30% de los hogares que poseen una bicicleta.
- 126 km de carriles para bicicletas que están en funcionamiento desde el 2013, y plazas de estacionamiento para bicicletas disponibles dentro de tres de las estaciones de la línea de metro de Lima.

En el caso del ciclismo, las leyes peruanas de ciclismo existentes hasta la fecha, que han sido aprobadas por el Congreso de la República son ([Congreso de la República del Perú, 2019](#)):

- Ley n° 29593: Ley que declara de interés nacional el uso de la bicicleta y promueve su utilización como medio de transporte sostenible; dictada por el Congreso de la República el 7 de octubre del 2010.
- Disposición complementaria final única de la ley 25593:- Día Nacional sin Auto, Declárase el día 22 de setiembre de todos los años.
Día Nacional sin Auto. Dictada el 7 de octubre del año 2010, siendo César Zumaeta Presidente del Congreso de la República, Alejandro Aguinaga Primer Vicepresidente del Congreso de la República y Alan García Presidente Constitucional de la República.
- Ley que modifica artículo 4 de la ley 29461: Ley que regula el estacionamiento vehicular, para disponer zonas de estacionamiento para bicicletas. Fue presentada a la Comisión de Transportes y Comunicaciones del Congreso de la República como iniciativa del congresista Wuilian Monterola y aprobada por unanimidad en dicha Comisión, para luego ser presentada al Congreso de la República el 9 de noviembre del 2016.
- Ley n° 30936: Ley que promueve y regula el uso de la bicicleta como medio de transporte sostenible. Dictada por el Congreso de la República el 22 de noviembre del 2018.

Sin embargo, pese a leyes implementadas, en el Reglamento Nacional de Tránsito, solo se considera a la bicicleta como un vehículo menor, motivo por el cual no se establecen deberes ni derechos para los usuarios. A partir de ello, se generan muchos interrogantes como los siguientes: ¿Debe tener SOAT un ciclista? ¿Debe tener Tarjeta de Identificación Vehicular? ¿El ciclista debería tener una licencia de conducir?

Estos tópicos no han sido considerados en los reglamentos vigentes, no hay que olvidar que un ciclista no está exento de cometer un accidente de tránsito y que como usuario de la vía pública tiene derechos y obligaciones relacionadas a responsabilidades administrativas, civiles y penales que podrían derivar de su negligencia, imprudencia o falta de pericia en el uso de la bicicleta en relación con la vía pública (Pizarro, 2018).

Debido a la ley n° 29593 el ministerio de vivienda emitió la norma técnica CE.30 de Obras Especiales y complementarias, donde declara que los lineamientos técnicos para el diseño y construcción de ciclovías deben tener estos mínimos requisitos dado su contexto (MVCS, 2010):

- Para ciclovías dispuestas en ambos lados de la vía, con el fin de segregar al ciclista del transporte motorizado, se deberá considerar un ancho mínimo efectivo de 1,50 metros para cada una de ellas.
- Para la ciclovía dispuesta a un solo lado de la vía, con el fin de segregar al ciclista del transporte motorizado, se deberá considerar un ancho mínimo efectivo de 2,00 metros.

En ambos casos, el profesional responsable del diseño deberá ampliar el ancho mínimo de la ciclovía en función a factores específicos como el flujo de ciclistas, una curva de la ciclovía, una pendiente del terreno, elementos de segregación, etc.). También se debería tener en cuenta que por consideraciones técnicas del Ministerio de Transporte y Comunicaciones del Perú un carril para carros debería tener un ancho mínimo de 3 metros o manera excepcional estas vías podrán tener carriles hasta de 2,50 m, contando con el sustento técnico correspondiente (MVCS, 2018).

Según las consideraciones anteriores, se pueden encontrar en Lima varias pistas que ni siquiera cuentan con el ancho mínimo para el flujo vehicular y que aún así le han agregado ciclovías acortando volviendo inseguro e insostenible el flujo vehicular y el

flujo de potenciales ciclistas. Un ejemplo es la avenida Mariano Cornejo en el distrito limeño de Pueblo Libre, distrito de clase media, en la cual se puede apreciar que dos carriles suman un ancho aproximadamente de 4.6 metros cuando debería de tener como mínimo un ancho de 5 metros. Y en esta estrecha pista se colocó una ciclovía que la acorta mucho más volviéndola aún más peligrosas para ciclistas o para automovilistas. El ancho de la ciclovía tampoco tiene el ancho mínimo recomendado por el Ministerio de Transportes de 1.5 metros, tiene un ancho menor a 1 metro. Este tipo de ciclovías que en vez de ofrecer una mayor seguridad a los ciclistas ofrece un mayor peligro es una razón por la cual la presencia de ciclistas que la utilizan es muy baja.



Figura 29. Característica de ciclovía en Mariano Cornejo

Fuente: [Google Maps, 2019a](#)

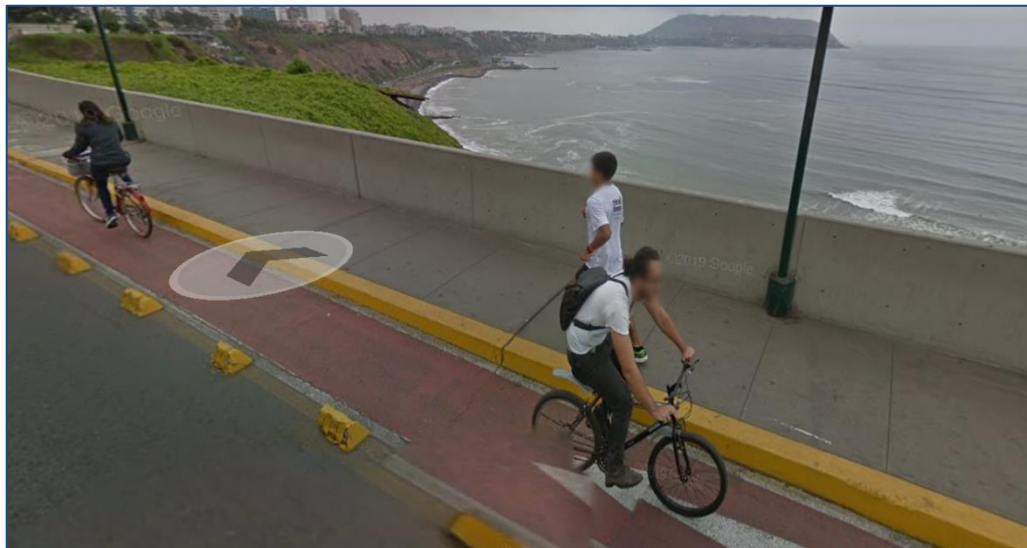


Figura 30. Característica de ciclovía cerca a Larcomar

Fuente: [Google Maps, 2019b](#)

Se puede observar que en distritos de clase alta en Lima también se logran encontrar ciclovías que no disponen del ancho mínimo de 1.5 metros como la que se encuentra en el Malecón de la reserva en Miraflores que se visualiza en la figura 30.

Una estrategia para incrementar el porcentaje de viajeros habituales en bicicleta podría dar varios impactos positivos a la ciudad de Lima, entre los que encontramos el impacto social, económico, tecnológico, ambiental, y metodológico que se desarrollarán a continuación:

IMPACTO SOCIAL.

[Oliver Smith, 2017](#) y varios investigadores han encontrado que las personas que viajan en bicicleta para ir al trabajo obtienen un bienestar en promedio mayor y una menor variabilidad de su percepción de bienestar que las personas que usan otras modalidades de transporte, este ranking se mantiene hasta cuando las distancias son mayores de 10 km. En correspondencia con lo anterior [Heinen et al, 2003](#) encontró que las personas que viajan más de 10 km para ir a sus trabajos tienden a incursionar en el ciclismo deportivo, aumentando así la salud de los habitantes.

Adicionalmente, la bicicleta como medio de transporte habitual se convierte en una solución al buscar reducir el tiempo de viaje para ir al trabajo, especialmente para personas que viven a un radio de 5km de distancia de su lugar de trabajo, lo que se puede constatar en varios estudios europeos que han demostrado que viajar en

bicicleta es mucho más rápido que las otras modalidades de transporte a esa distancia ([Dekoster, 2002](#)).

Creemos que en Lima el viaje en bicicleta será más eficiente incluso para distancias mucho más largas de 5km, ¿En cuánto?, esta tesis quiere responder a dicha pregunta.

IMPACTO ECONÓMICO.

Los viajes en metropolitano, bus y carro cuestan en promedio 39, 30 y 238 soles mensuales respectivamente ([Marketwin, 2017](#)), por lo tanto, incrementar los viajes hacia el trabajo en bicicleta provocaría un ahorro considerable anual. También se reducirán las horas-hombre perdidas en la congestión vehicular y los costos en materias de salud gracias a los efectos del ejercicio practicado regularmente.

IMPACTO TECNOLÓGICO.

Las herramientas computacionales que se utilizarán en el desarrollo y solución del modelo servirán para automatizar parte de la gestión de las operaciones de transporte en bicicleta de la ciudad de Lima; estas funciones podrán ser utilizadas en el futuro por los operadores del sistema a fin de agilizar las decisiones respecto a la posibilidad de añadir rutas o para implementarlas en otras ciudades del Perú.

IMPACTO AMBIENTAL.

La propuesta analizará el impacto ambiental que tendrá la implementación de la bicicleta como medio de transporte cotidiano en la contaminación atmosférica y sonora, así como también la huella de carbono y la reducción de energía primaria como son los combustibles fósiles. Un ejemplo de ello es que un carro consume 2.9MJ por persona-kilómetro, por el contrario, un ciclista consume 80KJ/p-km de energía proveniente de comida, es decir, menos que 1/30 del requerimiento energético de un carro ([Mackay et al, 2009](#)).

IMPACTO METODOLÓGICO.

La investigación realizada se propone contribuir al avance científico-aplicado en la materia de Investigación de Operaciones aplicada a la solución de problemas de transporte de bicicletas; siendo dichas operaciones escasas a nivel nacional e internacional. El modelo por elaborar, así como la metodología de solución del mismo, servirá como referencia a futuras investigaciones para complementar o mejorar los resultados del presente estudio y/o aplicarlo a nuevos sistemas.

A continuación, se muestra el mapa de calor realizado en base a los viajes en bicicleta de los usuarios de ([Strava, 2018](#)) en la figura 31, donde se aprecia que hay distritos limeños con bajísimo tránsito de bicicletas como son La Victoria y el Agustino, y en contraposición se observa que las zonas con mayor presencia de viajes en bicicleta son Miraflores, Barranco, San Borja, La Molina y Chorrillos, de los cuales La Molina y Chorrillos cuentan con una casi inexistente red de ciclovías por su territorio, lo que llama la atención por la falta de sintonía entre las necesidades de los ciclistas limeños y sus autoridades.

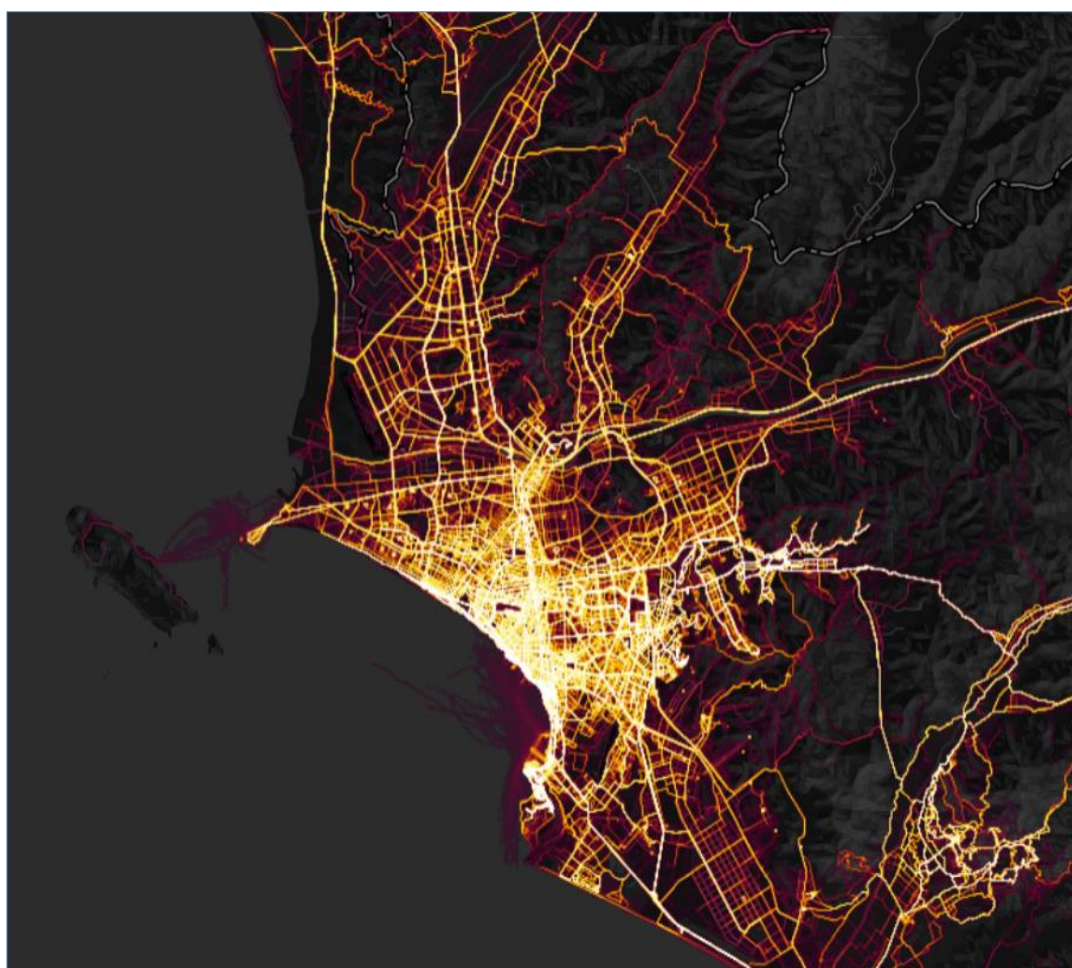


Figura 31. Mapa de calor de los viajes realizados por los usuarios de Strava.

Fuente: [Strava, 2019a](#).

Si bien es cierto que los usuarios de Strava son en su mayoría usuarios deportivos, hay varios estudios donde se encuentra una gran relación positiva entre las rutas más frecuentes realizadas por los usuarios de Strava con los conteos manuales en la mayoría de las vías ([Musakwa y Selala, 2016](#)) ([Boss et al, 2018](#)) ([Jestico et al, 2016](#)) ([Sun et al, 2017](#)).


ANALISIS DE ENCUESTA

Se realizó una encuesta en un formulario de Google que se puede visualizar en el siguiente enlace <https://goo.gl/ugv4ha> y en la figura 32, donde se pidió que coloquen el URL de Strava de la ruta de ida hacia el trabajo o al lugar de estudio.

Bicicleteando ando

Esta encuesta forma parte de una investigación de largo aliento para diseñar una red de ciclovías en Lima que represente mejor el comportamiento de los ciclistas.

***Obligatorio**



Género *

Mujer

Hombre

Lugar de Residencia *

Lima

Provincia

Extranjero

¿Cuántos días a la semana vas al trabajo o al centro de estudios en bicicleta? *

Tu respuesta _____

Si utiliza un app de ciclismo inserte su URL de ruta de ida al trabajo (opcional)

Tu respuesta _____

En una escala del 5 al 1, siendo 5 fuertemente de acuerdo y 1 fuertemente en desacuerdo conteste las siguientes preguntas

¿La cantidad de buses es un factor importante para la elección de tu ruta? *

1 2 3 4 5

¿La seguridad del vecindario es un factor importante para la elección de tu ruta? *

1 2 3 4 5

¿La calidad del pavimento es un factor importante para la elección de tu ruta? *

1 2 3 4 5

¿El ancho de la calle es un factor importante para la elección de tu ruta? *

1 2 3 4 5

¿La iluminación de la calle es un factor importante para la elección de tu ruta? *

1 2 3 4 5

En tu ruta diaria ¿Qué nivel de congestión prefieres? Siendo el 5 alto volumen de tráfico y 1 bajo nivel de tráfico. *

1 2 3 4 5

¿Qué otro factor consideras importante para la elección de tu ruta? *

Tu respuesta _____

Si tu frecuencia de ir al trabajo es menor a 4 a la semana ¿Qué te incentivaría a usar con mayor frecuencia la bicicleta como medio de transporte?

Tu respuesta _____

¿Tienes automóvil? *

Si

No

¿Qué marca de bicicleta utiliza? *

Golliat

Monark

Trek

Specialized

Cannondale

Figura 32. Encuesta realizada.

Elaboración Propia.

Se optó por usar solo la ruta de ida al considerarla un mejor indicador que la ruta de regreso a casa, puesto que es muy importante llegar al trabajo o a estudiar sin señales de cansancio o de sudoración intensa, debido a que la mayoría de los trabajos o escuelas en Lima no cuentan con la cantidad de duchas necesaria.

La encuesta fue realizada a 240 ciclistas limeños urbanos, con las siguientes características que se visualiza en la figura 33, donde el 73% eran hombres y el 27% mujeres. Este porcentaje demuestra que es un medio de transporte principalmente masculino, con un porcentaje similar al de países como Australia, Reino Unido, Estados Unidos y Canadá; sin embargo, se considera un porcentaje muy bajo en comparación con la participación femenina de los países europeos que rondan el 50% (Sustrans, 2017).

En la figura 34 se visualiza la frecuencia por mes y por día en que fueron realizadas las encuestas.

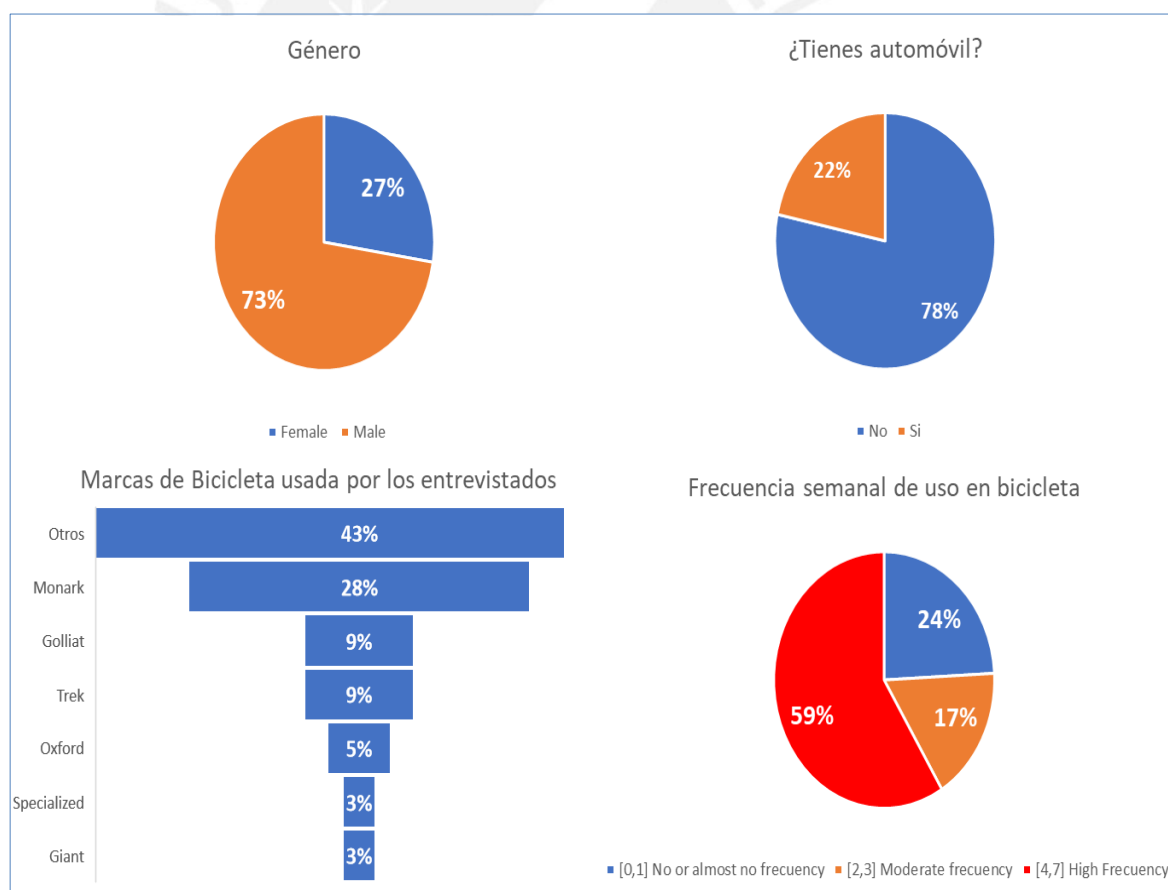


Figura 33. Características de los encuestados.

Elaboración Propia.

Entre las personas encuestadas, solamente el 22% poseía un vehículo, lo que tiene sentido con la tasa baja de autos que existe en Lima, que recae en el 11% ([Pew Research Center, 2015](#)), lo que evidencia la potencialidad de implementar un transporte eco sostenible y saludable en Lima.

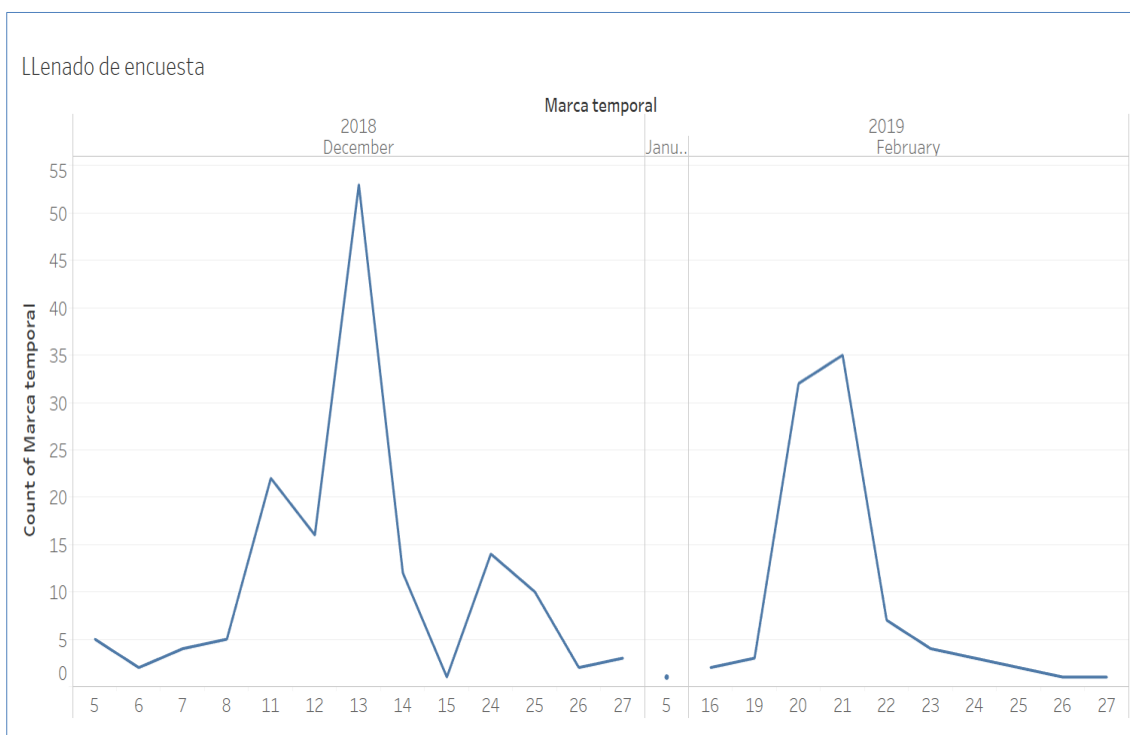


Figura 34. Frecuencia de llenado de encuesta
Elaboración Propia.

La frecuencia de viajes al trabajo o estudio por semana fue clasificada como nula o casi nula si el número de viajes estimados estaban entre 0 a 1 día la semana; por moderada frecuencia si viajaban de 2 a 3 días a la semana, y como alta frecuencia si viajaban de 4 a 7 días de la semana.

En el Perú varias personas trabajan 6 días a la semana debido a que la jornada laboral máxima es de 48 horas semanales, así como también muchos pueden estudiar 6 días a la semana en las universidades o institutos; por este motivo este rango de frecuencia de uso semanal de bicicleta es bastante representativo.

Se visualiza que las marcas de bicicleta están muy atomizadas entre casi la mitad de la población encuestada, lo que demuestra que el mercado de venta de bicicletas tiene mucho potencial. La marca de bicicleta más usada entre los encuestados es Monark, una marca peruana que tiene 60 años en el mercado y que tiene su planta de fabricación y ensamblaje en Lima ([Monark, 2019](#)).

En la figura 35 se visualiza la distancia recorrida de los viajes de hombres y mujeres hacia el trabajo donde se logra apreciar que aproximadamente el 50% viaja distancias menores de 8 kilómetros, lo que está en sintonía con el estudio de Marketwin que afirma que los limeños en general viajan en promedio 8 kilómetros para ir al trabajo (Marketwin, 2017). Aproximadamente el 90% de los encuestados viaja distancias menores de 15 kilómetros para ir al trabajo, lo que demuestra que si se implementan buenas políticas de promoción del uso de bicicleta como medio de transporte se podría solucionar en gran medida el problema del transporte limeño.

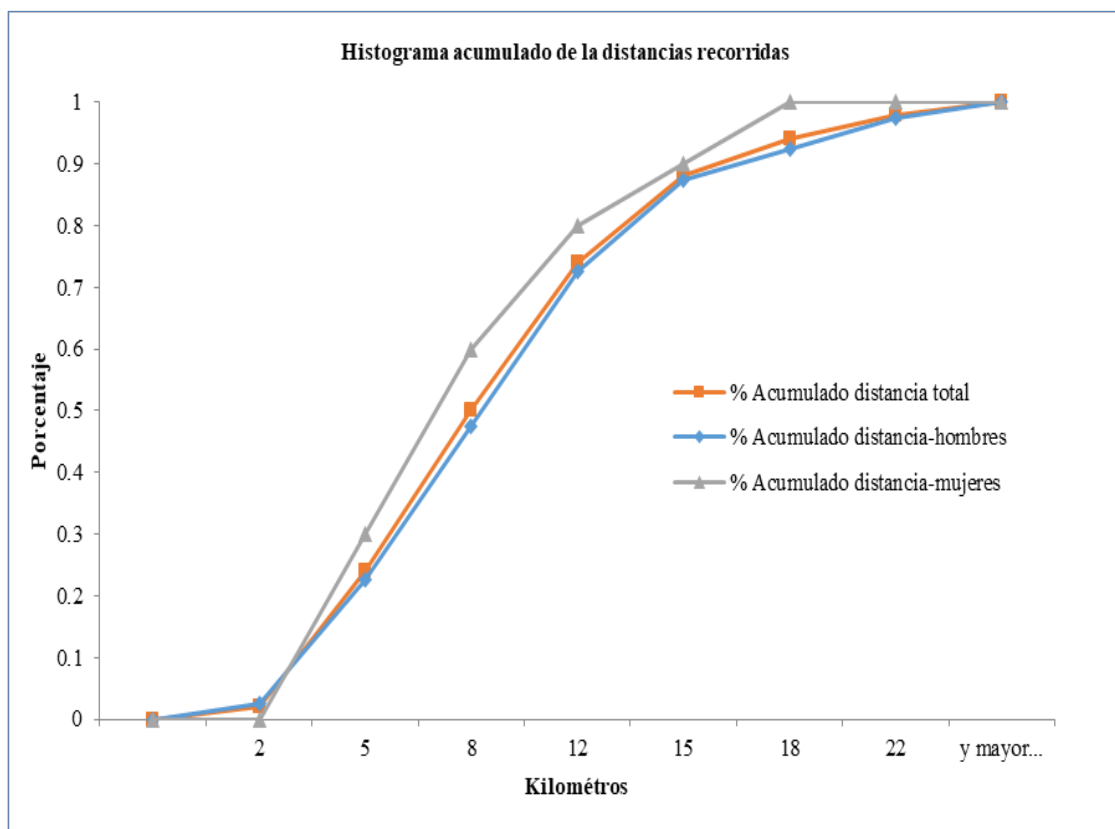


Figura 35. Características de los encuestados.

Elaboración Propia.

En la figura 36 se muestra la nube de palabras obtenidas de las respuestas a la pregunta de la encuesta ¿Qué otro factor consideras importante para la elección de tu ruta? Donde se logra ver que los encuestados opinan que para la elección de sus rutas en sus trayectos urbanos son importantes los siguientes factores:

- Ciclovías
- Señalización
- Semáforos

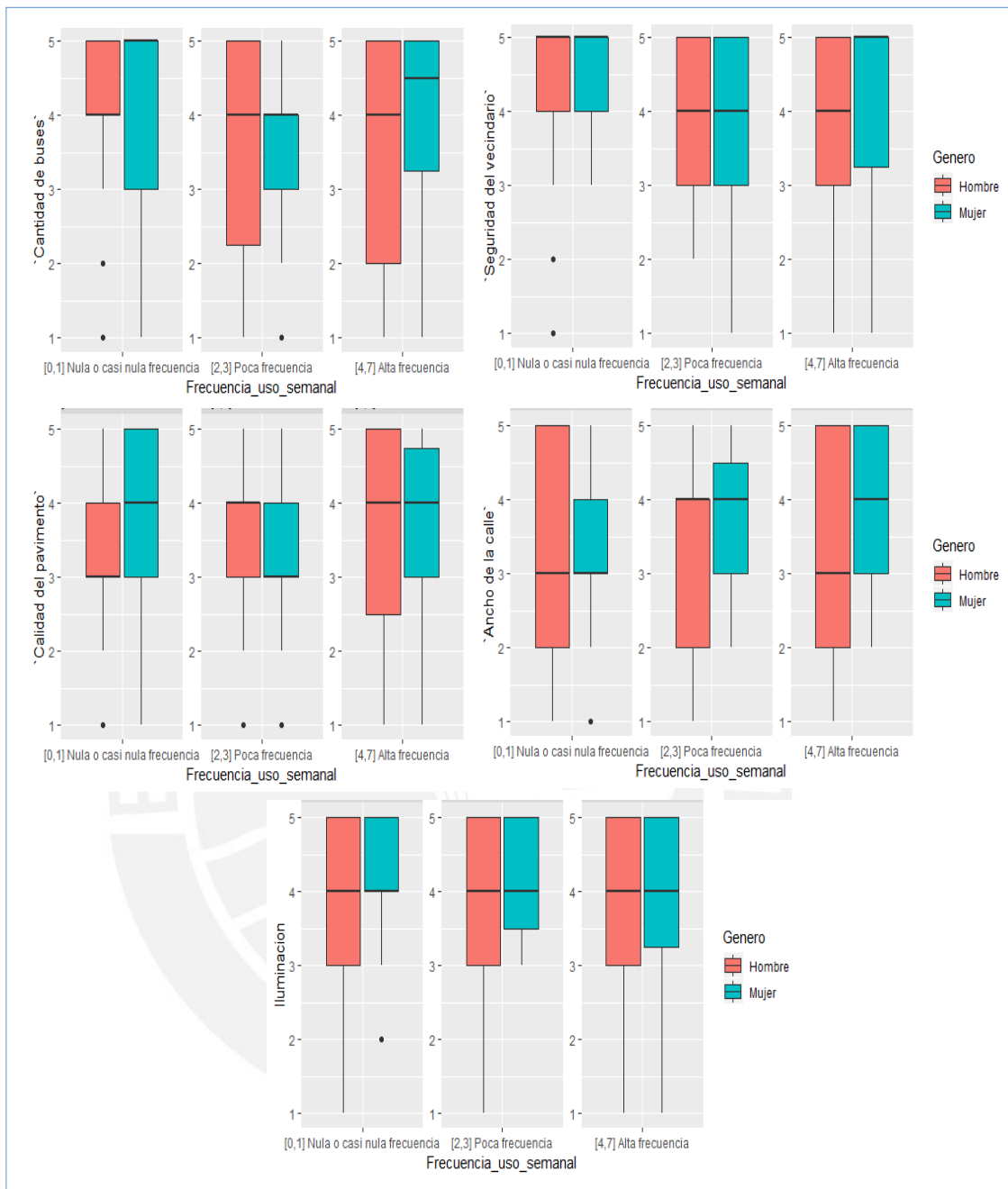


Figura 37. Importancia de los factores para la elección de ruta por género y por frecuencia de uso semanal.

Elaboración Propia.

En la figura 37 se realiza una visualización de la percepción de los factores por frecuencia de uso semanal de la bicicleta, por género y por tipo de factor logrando intuir visualmente que en la mayoría de combinación no existen grandes diferencias entre género ni por frecuencia. Para cuantificar si hay una diferencia por factor utilizaremos anova en R como se logra visualizar en la figura 38.

```

> anova(lm(`Cantidad de buses` ~ Frecuencia_uso_semanal + Genero))
Analysis of Variance Table

Response: Cantidad de buses
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Frecuencia_uso_semanal  2  12.60  6.3007  3.1552 0.04443 *
Genero                  1   3.03  3.0260  1.5153 0.21955
Residuals              236 471.27  1.9969
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> anova(lm(`Seguridad del vecindario` ~ Frecuencia_uso_semanal + Genero))
Analysis of Variance Table

Response: Seguridad del vecindario
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Frecuencia_uso_semanal  2   4.783  2.39173  1.9754  0.141
Genero                  1   0.637  0.63677  0.5259  0.469
Residuals              236 285.742  1.21077
> anova(lm(`Calidad del pavimento` ~ Frecuencia_uso_semanal + Genero))
Analysis of Variance Table

Response: Calidad del pavimento
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Frecuencia_uso_semanal  2   3.10  1.54938  0.8993  0.4082
Genero                  1   0.23  0.23295  0.1352  0.7134
Residuals              236 406.60  1.72289
> anova(lm(`Ancho de la calle` ~ Frecuencia_uso_semanal + Genero))
Analysis of Variance Table

Response: Ancho de la calle
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Frecuencia_uso_semanal  2   2.80  1.4017  0.8619  0.42370
Genero                  1   5.36  5.3578  3.2942  0.07079 .
Residuals              236 383.84  1.6264
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> anova(lm(`Iluminacion` ~ Frecuencia_uso_semanal + Genero))
Analysis of Variance Table

Response: Iluminacion
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Frecuencia_uso_semanal  2   2.64  1.3205  0.9246  0.3981
Genero                  1   3.49  3.4852  2.4403  0.1196
Residuals              236 337.06  1.4282

```

Figura 38. Reporte anova por cada factor.

Elaboración Propia.

Utilizamos el método de Duncan para jerarquizar las medias del factor de cantidad de buses por frecuencia de uso semanal para hallar el subgrupo que tiene una mayor sensibilidad por este factor, los resultados se muestran en la figura 37. Se usa la librería agricolae en el software estadístico R, con el cual se logra concluir que las personas que manejan muy poca bicicleta en la semana le dan una mayor

importancia al factor “Cantidad de buses” cuando eligen sus rutas, que las personas que manejan con poca o alta frecuencia.

Se preferirá la percepción de este subgrupo por ser más crítico para el factor “Cantidad de buses”, debido a que si diseñamos ciclovías que sean lo más inclusivas posible tendrán más acogida por la mayoría de los potenciales usuarios ([Portland Bureau of Transportation, 2019](#)). Por lo tanto, cambiaremos los valores de las respuestas de las personas que manejan poco o con alta frecuencia por el valor promedio de los que manejan con nula o casi nula frecuencia y se comparará con los otros factores.

```
> model <- aov(`Cantidad de buses` ~ Frecuencia_uso_semanal)
> duncan.test(model, "Frecuencia_uso_semanal", group=T, console=T)

Study: model ~ "Frecuencia_uso_semanal"

Duncan's new multiple range test
for Cantidad de buses

Mean Square Error:  2.001242

Frecuencia_uso_semanal, means

                Cantidad.de.buses      std   r  Min Max
[0,1] Nula o casi nula frecuencia      4.051724 1.190937  58   1   5
[2,3] Poca frecuencia                  3.512195 1.398606  41   1   5
[4,7] Alta frecuencia                  3.517730 1.500490 141   1   5

Groups according to probability of means differences and alpha level( 0.05 )

Means with the same letter are not significantly different.

                Cantidad de buses groups
[0,1] Nula o casi nula frecuencia      4.051724      a
[4,7] Alta frecuencia                  3.517730      b
[2,3] Poca frecuencia                  3.512195      b
```

Figura 39. Reporte Duncan del factor “Cantidad de buses”.

Elaboración Propia.

Posteriormente se comparará la media de todos los factores mediante sus intervalos de confianza a un 95% como se logra ver en la tabla 6, para evaluar la jerarquización más oportuna de los factores analizados. Disponiendo de los resultados de la tabla 6 jerarquizamos los factores como $F4=F3<F5<F1=F2$, siendo los factores de cantidad de buses y seguridad del vecindario los más críticos para los ciclistas urbanos limeños, es decir:

“Ancho de calle” = “Calidad del Pavimento” < “Iluminación” < “Cantidad de Buses” = “Seguridad del vecindario”

Tabla 6. Intervalos de confianza de los factores.

Factor	Nombre de Factor	Límite Inferior	Media	Límite Superior
F1	Cantidad de buses	3.98	4.05	4.12
F2	Seguridad del vecindario	3.95	4.09	4.23
F3	Calidad del pavimento	3.35	3.52	3.68
F4	Ancho de la calle	3.34	3.50	3.66
F5	Iluminación	3.66	3.81	3.96

Elaboración Propia.

Luego se aplicará la técnica AHP para asignar pesos a los factores que se jerarquizaron en la tabla 6, con el criterio de asignarle un valor de 9 cuando la diferencia de importancia es grande entre las dos variables, de 5 cuando la diferencia es mediana y 1 cuando se estiman igual grado de importancia.

El resultado de estas comparaciones se visualiza en la tabla 7. Posteriormente cada valor de la tabla 7 será dividido por la sumatoria de la fila correspondiente obteniéndose la matriz normalizada que se visualiza en la tabla 8. Finalmente calculamos los promedios por fila obteniendo los pesos a asignar a cada factor que se muestra en la tabla 9 ordenados por importancia con un nivel de consistencia aceptable (CR) = 0.

Tabla 7. Matriz de Comparaciones Pareadas.

	F1	F2	F3	F4	F5
F1	1.00	1.00	9.00	9.00	5.00
F2	1.00	1.00	9.00	9.00	5.00
F3	0.11	0.11	1.00	1.00	0.20
F4	0.11	0.11	1.00	1.00	0.20
F5	0.20	0.20	5.00	5.00	1.00

Elaboración Propia.

Tabla 8. Matriz Normalizada.

	F1	F2	F3	F4	F5
F1	0.41	0.41	0.36	0.36	0.44
F2	0.41	0.41	0.36	0.36	0.44
F3	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02
F4	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02
F5	0.08	0.08	0.20	0.20	0.09

Elaboración Propia.

Tabla 9. Pesos por cada factor.

Pesos	
F1	0.40
F2	0.40
F5	0.13
F3	0.04
F4	0.04

Elaboración Propia.

Análisis de los 5 Por qué del bajo ratio de viajeros urbanos en bicicleta

En este análisis presentado en el esquema de la imagen 40 podemos apreciar que las dos causas de bajo ratio de ciclistas urbanos se debe a la falta de infraestructura que ofrezca seguridad en el traslado, estacionamientos seguros donde guardar las bicicletas mientras estén trabajando o estudiando y duchas que le permitan estar limpios y frescos. Es importante también acotar la importancia de que no solamente la infraestructura en la construcción de ciclovías podría aliviar este problema sino que también se necesita de un cambio profundo en el civismo de todos los ciudadanos para que el transporte no importa en qué modalidad se se sea más segura y no un aventura riesgosa.

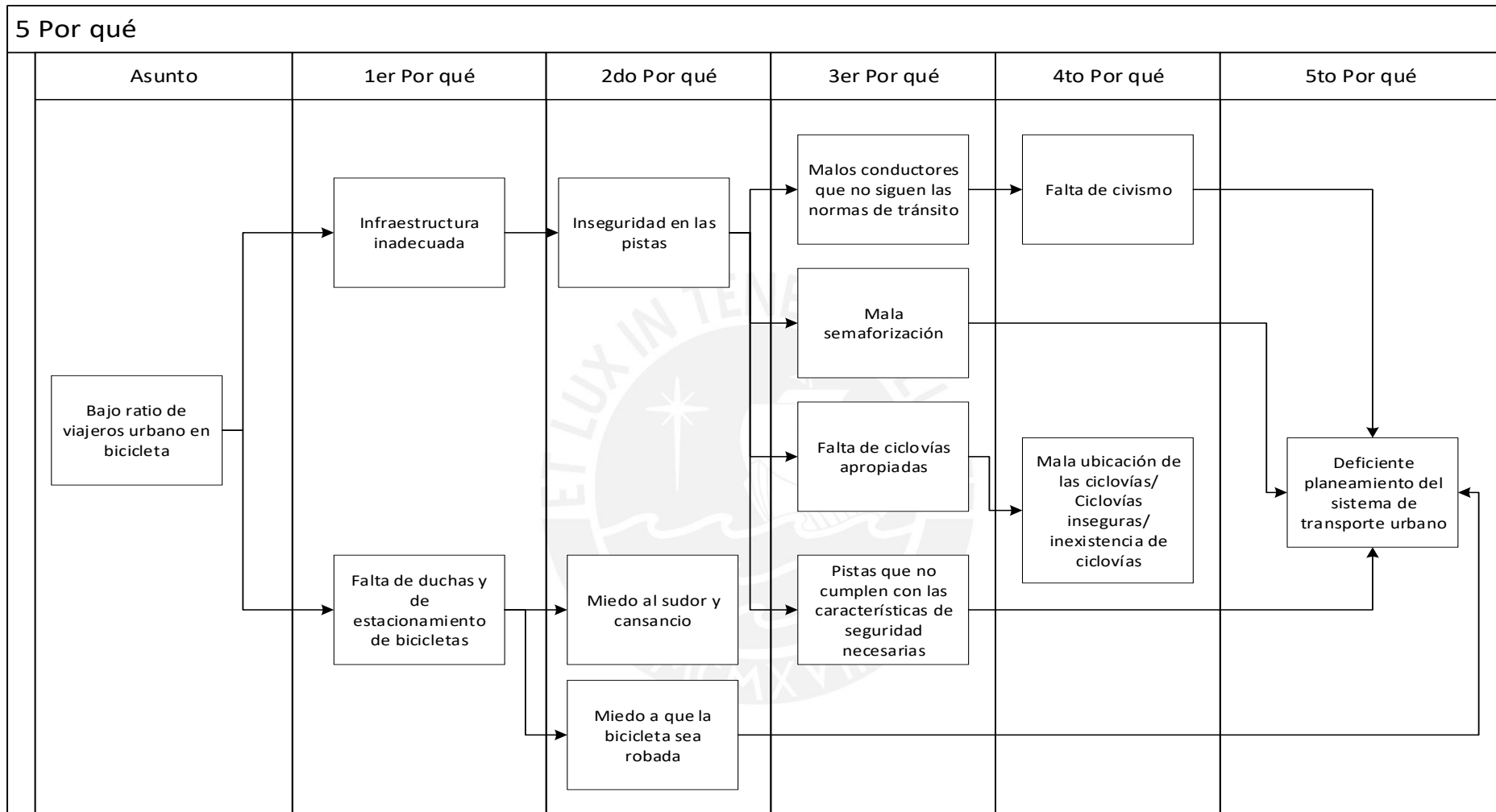


Figura 40. 5 Por qué de bajo ratio de ciclistas urbanos en Lima

Elaboración Propia

Análisis de las rutas más frecuentes en Lima.

De los 240 entrevistados 135 pusieron el URL de sus rutas en su Strava por lo cual pudimos tener acceso a los datos de sus rutas como se visualizan en la figura 40 y analizar cuál es la región con mayor actividad de ciclistas en Lima para poder delimitar el alcance de nuestro estudio.

Las rutas son ploteadas una a una en QGIS, Software libre de GIS, trasladando las coordenadas mostradas en Strava a una capa de mapa de ese software como se logra visualizar en la figura 41 y después de plotear la muestra de 135 rutas se realiza un mapa de calor o heatmap para delimitar el área de estudio que se visualiza en la figura 42. Entre las rutas más frecuentes por los ciclistas que se visualizan en la figura 43 encontramos el pentagonito, la avenida San Borja Norte, la avenida Canadá, la avenida Arequipa, la avenida de la Costa Verde y la avenida La Marina. Es interesante que de esas zonas no existen ciclovías ni en la avenida Canadá ni en la avenida Costa Verde.

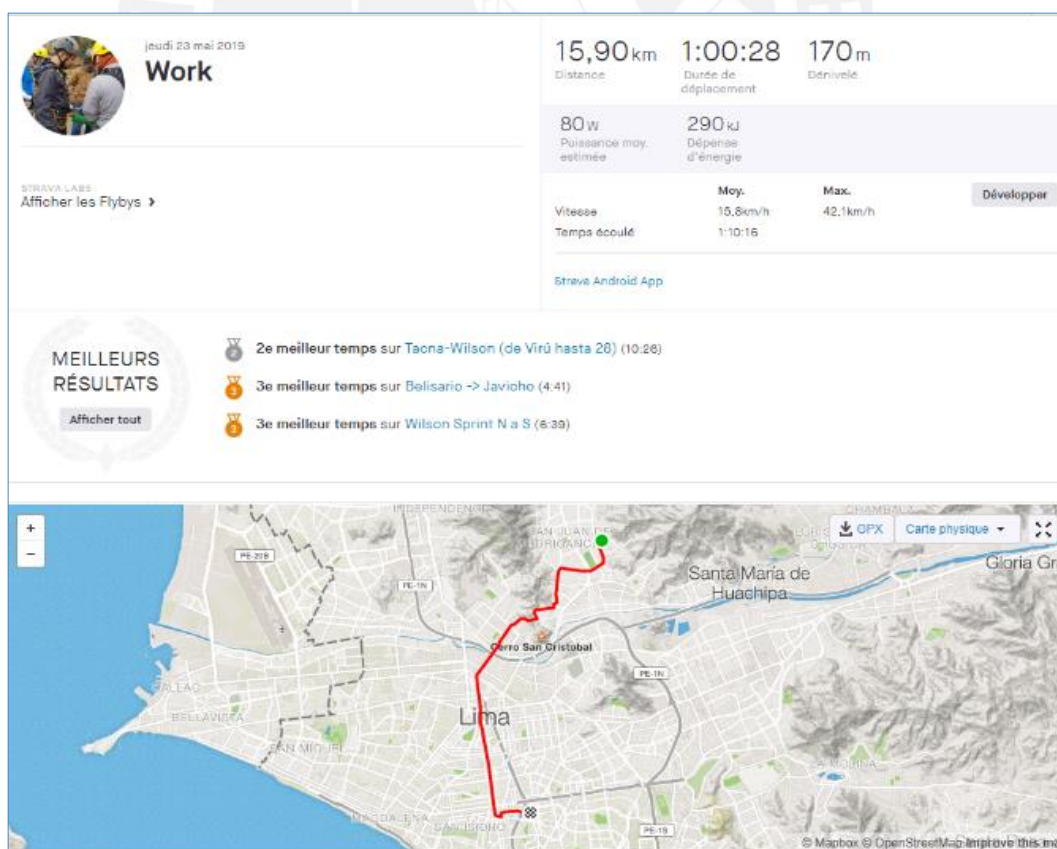


Figura 41. Ejemplo de ruta en Strava que se compartió en encuesta

Fuente: [Strava, 2019](#)



Figura 42. Ruta de ciclista planteada en QGIS desde Strava
Elaboración Propia

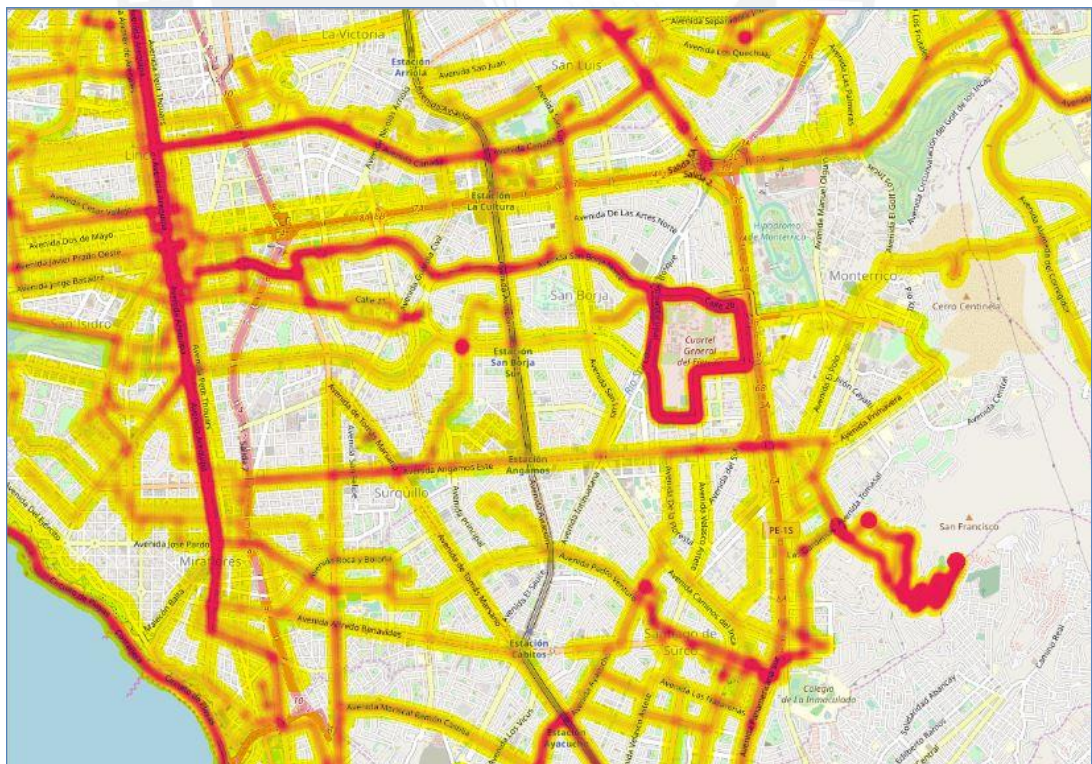


Figura 43. Rutas más frecuentes de ciclismo
Elaboración Propia

Es interesante notar en la figura 44 que la zona del Agustino no es muy frecuentada por los ciclistas, probablemente debido a la mala condición de sus pistas, al comercio ambulante en sus calles que contribuyen al tráfico y a la alta delincuencia. Notar también que la parte sur de San Juan de Lurigancho tiene una demanda potencial de ciclovías que no ha sido atendida hasta ahora.

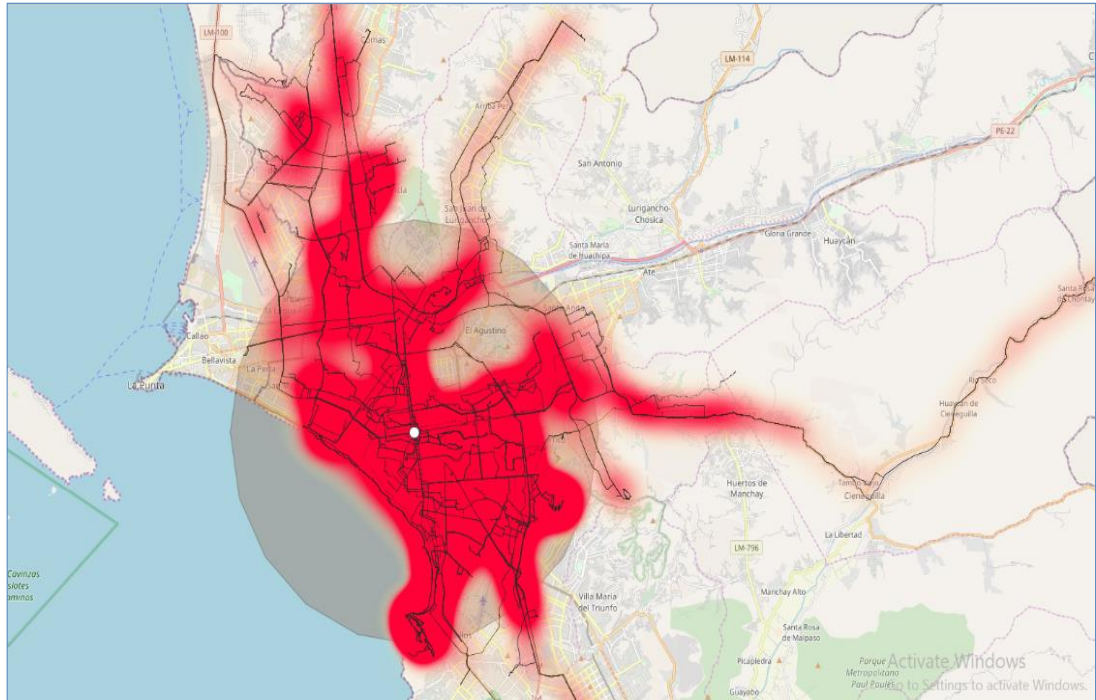


Figura 44. Mapa de calor por rutas más frecuentes en Lima
Elaboración Propia

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL MODELO

Luego de obtener el principal clúster logrado en la figura 43 procederemos a extraer las coordenadas de los nodos de cada calle de ese clúster y asignamos un valor de costo de riesgo de acuerdo con las siguientes variables:

FCR_{ij} = Función de costo de riesgo por camino

$$FCR_{ij} = L_{ij} * (0.4 * F_{1ij} + 0.4 * F_{2ij} + 0.04 * F_{3ij} + 0.04 * F_{4ij} + 0.13F_{5ij})$$

Donde:

L_{ij} = Longitud del nodo i al nodo j

F_{1ij} = Factor de criminalidad del nodo i al nodo j

F_{2ij} = Flujo de buses o carros del nodo i al nodo j

F_{5ij} = Luminosidad urbana del nodo i al nodo j

F_{4ij} = Ancho de camino del nodo i al nodo j

F_{3ij} = Calidad del camino del nodo i al nodo j

FCR_{ij} es una Función de Costos de Riesgo por cada arco ij, esta función nos ayudará a cuantificar cuáles son las calles con mayor costo para instalar una ciclovía y cuáles son las menores. Para hallar este costo utilizamos un ponderado entre factores como criminalidad, flujo de buses, luminosidad, ancho de camino y calidad del camino. El peso de cada factor en la formula es extraída de la tabla 9 que son los resultados de un análisis AHP a cada factor.

Para el factor de criminalidad consideramos un rango de 0 a 1, donde 0 es muy seguro, 0.5 es medianamente seguro y 1 es nada seguro. Para estas tres clasificaciones nos ayudamos del estudio realizado por Breña donde agrupa en tres los distritos en Lima en base a similitudes en cuanto a variables de victimización, desorganización social, capital social y actividades rutinarias. Los distritos por cada clúster se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Clúster de distritos por seguridad

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
	San Isidro	Barranco	Ancón
	Miraflores	Breña	Ate
		Chorrillos	Carabayllo
		Jesús María	Cieneguilla
		La Molina	Comas
		Lince	El Agustino
		Magdalena	Independencia
		Pueblo Libre	La Victoria
		San Borja	Los Olivos
		San Miguel	Lurigancho
		Surquillo	
		Lima Cercado	Lurín
			Pachacamac
			Puente Piedra
			Rímac
			San Juan de
			Lurigancho
			San Juan de
			Miraflores
			San Martín de Porres
			Santa Anita
			Santiago de Surco
			Villa el Salvador
			Villa María el Triunfo
Nombre de	Protección	Protección	Desprotección
Cluster:	Latente	Limitada	Permanente

Fuente: [Breña 2018](#)

Para obtener los valores del factor de flujo de buses y carros se usará el mapa de tráfico de Lima de 6 a 9 am como se logra visualizar en la figura 45. Se elige este tramo horario por ser el horario pico en la Lima y por lo tanto donde la mayoría de

demanda de posibles ciclistas interactuaría junto con la actual demanda de automovilista. Solo se analiza el pico de la mañana debido a que hay mayor prioridad de llegar al trabajo, al colegio o a la universidad que a tu casa. En Lima hay muchos trabajos que penalizan la tardanza directamente con tu salario.

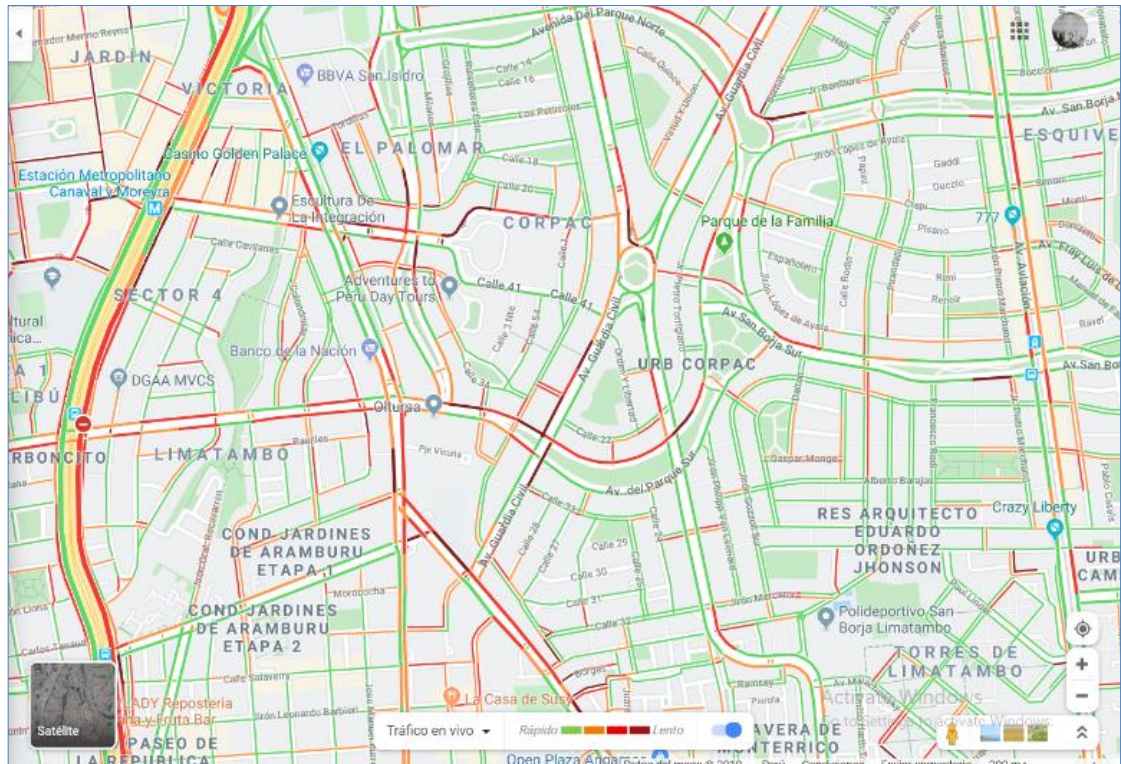


Figura 45. Mapa de tráfico en Lima 6 a 9 a.m.

Fuente: [Google Maps 2019c](#)

Para analizar el ancho se estandarizará el ancho excedente de las pistas a un rango de 0 a 1. Para calcularlo se tomará en cuenta el ancho por cada carril que tenga, estableciendo que un carril debe tener un valor de 3 metros como mínimo, lo restante sería el ancho excedente. De igual modo se contará como ancho excedente el ancho de los jardines que podría haber en medio de estas vías, algo que es muy típico en Lima. Está lógica se puede visualizar en la figura 46, donde la avenida Javier Prado Oeste tiene dos vías con 7.5 metros en suma y con un jardín central con un ancho de 14.5 metros, por lo tanto, su ancho excedente sería de 1.5 metros más 7.25 metros, es decir 8.75 metros. Y a más metros al estandarizar el ancho más cercano al factor de 0 estará.

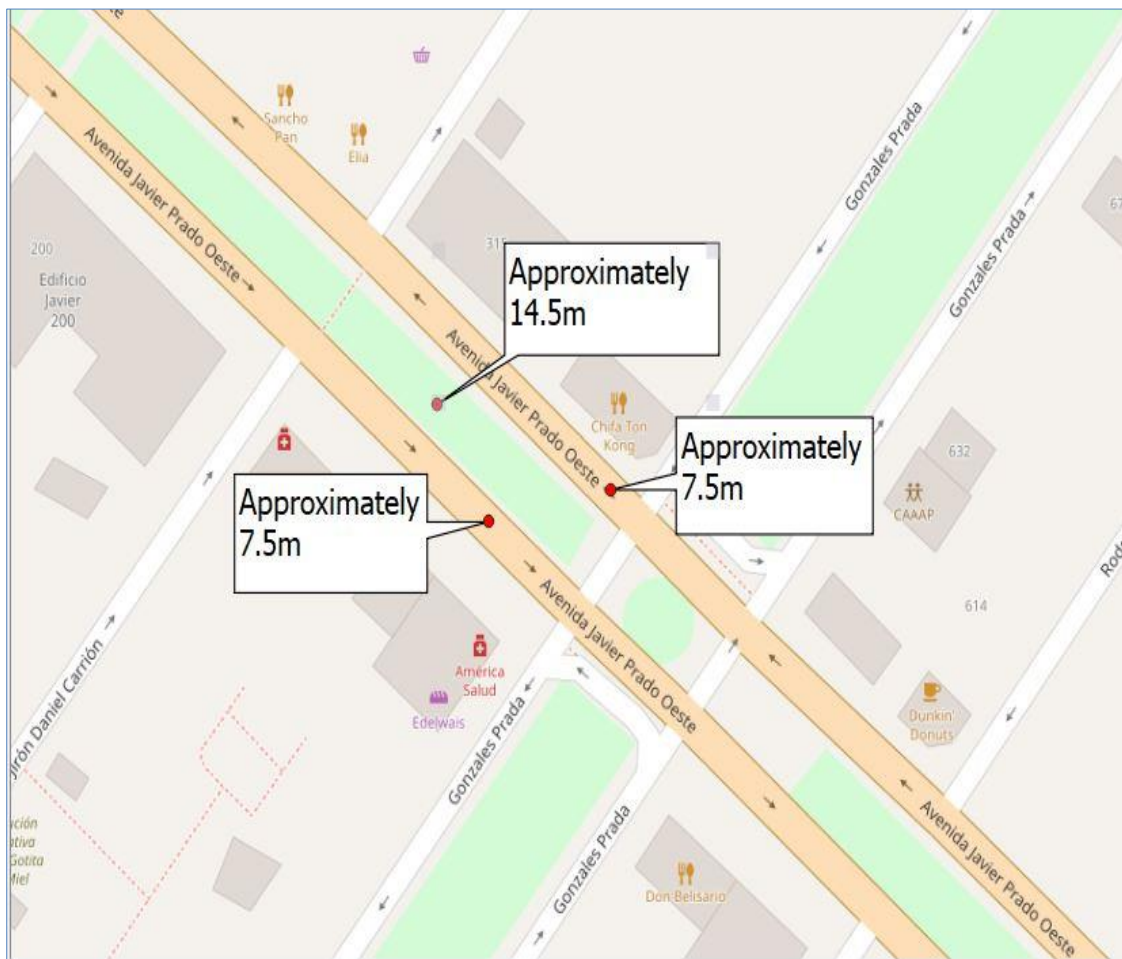


Figura 46. Cálculo de ancho de vía
Elaboración Propia

El cálculo de la luminosidad de las calles y de la calidad del pavimento es muy difícil de determinar para cada calle dentro del clúster, pero son restricciones mejorables, después de saber en qué calle se construirá la ciclovía se propondrá mejorar la luminosidad de esas vías, así como la calidad del pavimento. Por lo tanto, para efectos del modelo a realizar la ecuación de costo de riesgo quedaría así.

$$FCR_{ij} = L_{ij} * (0.4 * F_{1ij} + 0.4 * F_{2ij} + 0.04 * F_{4ij})$$

En la figura 47 se muestran los nodos y algunos arcos con valores de costo que se han logrado identificar mediante la herramienta QGIS bajo los parámetros descritos anteriormente.

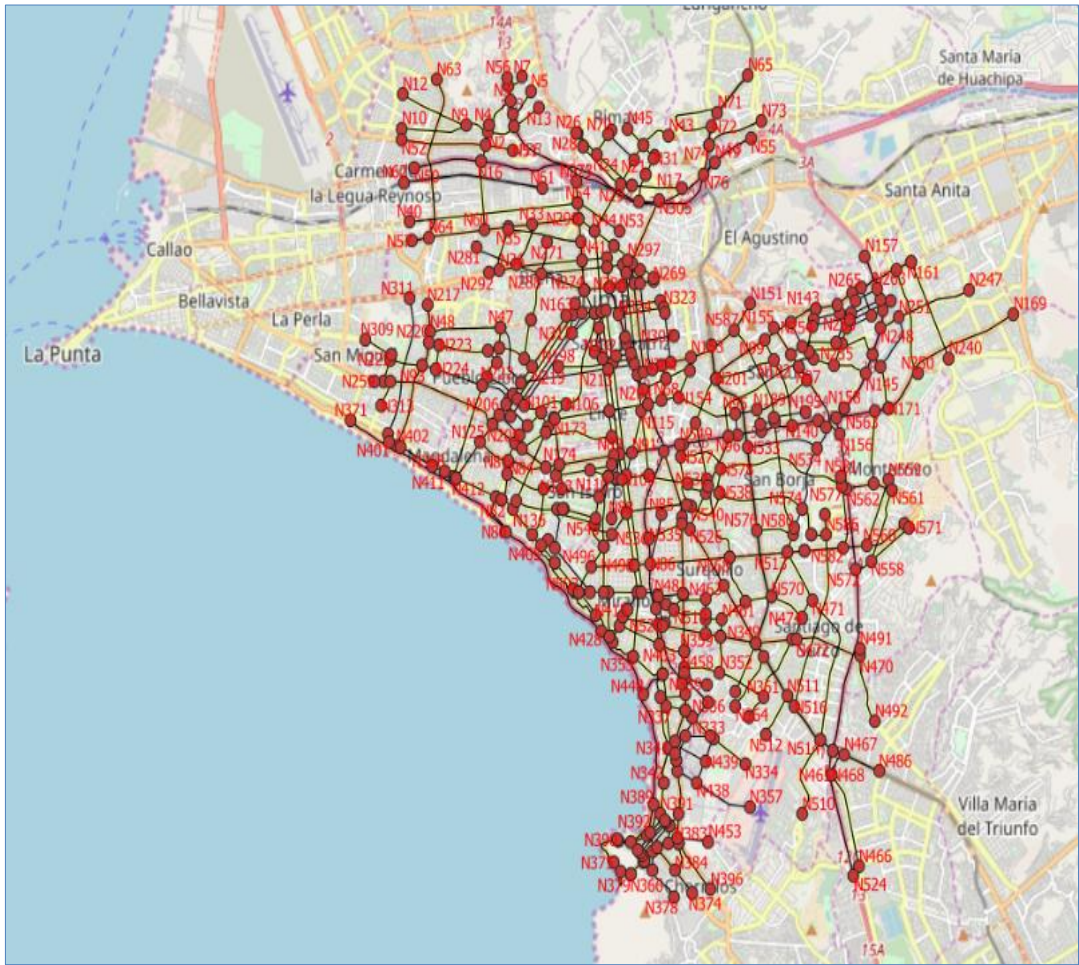


Figura 47. Nodos a evaluar
Elaboración Propia

En la figura 48 se muestran los nodos extremos de cada ruta obtenida bajo encuesta, logrando ver que la mayoría está entre San Borja, San Isidro y Miraflores. Con este input se desarrolla las rutas propuestas en la tabla 11 a evaluar en el modelo con la longitud mínima por cada ruta.

Es preciso tener en cuenta que también se podrían identificar los puntos donde debería haber ciclovías por cercanía a alguna institución cultural o a una futura interconexión intermodal de transporte como las que en el futuro podría haber entre el metropolitano y alguna línea del tren de Lima. Por lo tanto, elegir los nodos de interconectividad no solo tiene un análisis cuantitativo sino también cualitativo y estratégico

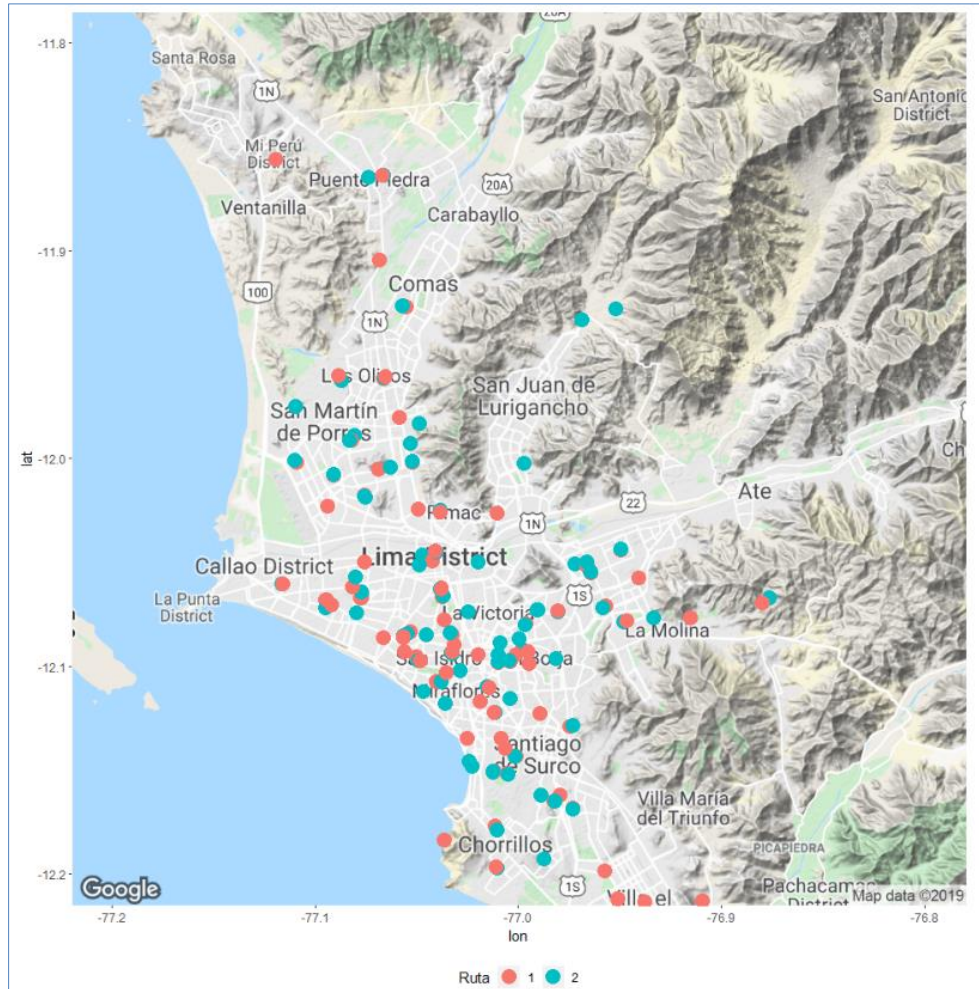


Figura 48. Nodos de extremos de rutas
Elaboración Propia

Tabla 11. Rutas a evaluar

ID Ruta	Extremos de ruta	Extremos de ruta (Detalle)	Longitud Mínima (metros)
Ruta 1	N574-N529	San Borja - San Isidro	4500
Ruta 2	N65-N529	San Juan de Lurigancho - San Isidro	12600
Ruta 3	N12-N529	San Martín de Porres - San Isidro	14400
Ruta 4	N217-N367	San Miguel - Chorrillos	15900
Ruta 5	N56 - N450	San Martín de Porres - Miraflores	15000
Ruta 6	N19 - N367	Rimac - Chorrillos	16000
Ruta 7	N169-N452	La Molina - Miraflores	14800
Ruta 8	N53-N220	Centro de Lima - San Miguel	6700

Elaboración Propia.

La tabla 11 tiene concordancia con lo que [Lima como vamos, 2017](#) señala que El Cercado de Lima es el principal distrito donde los limeños se dirigen para ir a estudiar y/o trabajar (14.5%), seguido por San Juan de Lurigancho (8.1%) y Santiago de Surco (6.4%).

Antes de empezar con la formulación del modelo definiremos sus índices, constantes, variables de decisión y parámetros.

Índices

- (i,j) Son los nodos de i a j de toda la red evaluada
- W Índice de rutas con nodos extremos (O_1, D_2)

Constantes

- l_{ij} Longitud del arco (i,j)
- l_w Longitud máxima del arco (i,j) de la ruta W

Variables de decisión

- δ_{ij} Segmento de arco (i,j) donde se evaluará construir una ciclovía 1 o 0, donde 1 es construir ciclovía y 0 es no construir ciclovía.
- x_{ijw} Segmento de arco (i,j) de la ruta W donde se evaluará construir una ciclovía, donde 1 es construir ciclovía y 0 es no construir ciclovía.

Parámetros

- c_{ij} Costo de riesgo por cada arco (i,j) que es el FCR_{ij}
- L Longitud de ciclovías máximas a construir

El modelo que describiremos sería una adecuación del modelo del árbol de Steiner, donde los puntos de Steiner serían los puntos donde se interconectarían unas ciclovías con otras. Siendo el modelo de programación lineal el siguiente:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \delta_{ij} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{(i,j)} \delta_{ij} l_{ij} \leq L \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ijw} l_{ij} \leq 1.4 * l_w \quad \forall w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{j:(i,j)} x_{ijw} - \sum_{j:(i,j)} x_{jiw} = 1 \quad \forall i \in V, w \in W, \text{ en caso } i = O_w \quad (4)$$

$$\sum_{j:(i,j)} x_{ijw} - \sum_{j:(i,j)} x_{jiw} = -1 \quad \forall i \in V, w \in W, \text{ en caso } i = D_w \quad (5)$$

$$\sum_{j:(i,j)} x_{ijw} - \sum_{j:(i,j)} x_{jiw} = 0 \quad \forall i \in V, w \in W, \text{ en caso } i = O_w \quad (6)$$

$$x_{ijw} - \delta_{ij} \leq 0 \quad \forall (i,j) \in A, w \in W \quad (7)$$

$$\delta_{ij}, x_{ijw} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (8)$$

La función por minimizar (1) es la función de costo de riesgo asociada a cada vía de ciclovía a construir.

La restricción (2) se refiere a la cantidad máxima de ciclovías a construir que en este caso es de 200 Km como L

La restricción (3) evita que la ciclovía construida para satisfacer la ruta W no supere una determinada longitud máxima que se alcanza multiplicando cada longitud mínima posible por un factor de tolerancia del ciclista para realizar un mayor tramo.

La restricción (4) permite que la ciclovía en la ruta W comience estratégicamente desde el nodo O de esa ruta.

La restricción (5) permite que la ciclovía en la ruta W termine estratégicamente en el nodo D de esa ruta.

La restricción (6) permite que la ciclovía conserve continuidad entre los nodos O y D de cada ruta.

La restricción (7) trata de compartir en lo máximo posible la construcción de una ciclovía en un arco (i,j) para diferentes rutas W.

La restricción (8) son por negatividad y para declarar que las variables evaluadas son binarias.

La restricción 7 implica una cantidad igual de restricciones a la cantidad de nodos i * cantidad de nodos j * Cantidad de rutas a evaluar. Si logramos reemplazarla por la ecuación 9 obtendríamos un numero restricciones igual a la cantidad de nodos i * cantidad de nodos j con W como número de rutas a evaluar. Lo cual implica que

$$\sum_{(w)} x_{ijw} \leq W * y_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (9)$$

En resumen, el algoritmo o la metodología utilizada para obtener la red de ciclovías propuestas en esta tesis siguió la secuencia que se describe en la figura 49.

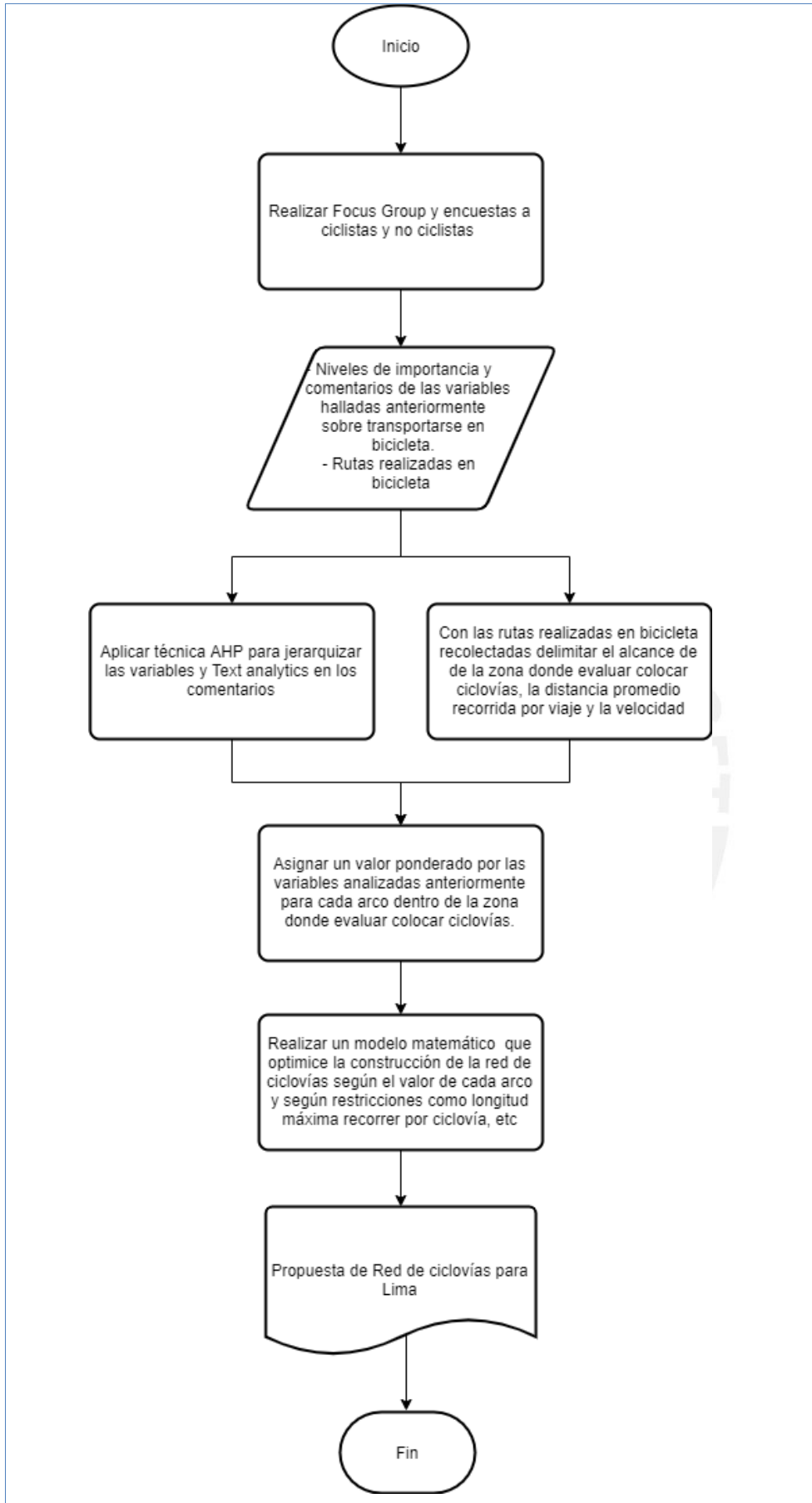


Figura 49. Flujograma de método usado en la propuesta de red de ciclovías

Elaboración Propia

CAPITULO 5. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Teniendo en cuenta la conectividad requerida en la tabla 11 el modelo programado en AMPL se muestra en la figura 50.

```
set nodos_filas := 1..490;
set nodos_columnas := 1..490;
set rutas := 1..8;
param longitud_minima {rutas};
param costoriesgo {nodos_filas,nodos_columnas};
param longitud {nodos_filas,nodos_columnas};
var y {nodos_filas,nodos_columnas} binary;
var x {nodos_filas,nodos_columnas, rutas} binary;

# Minimizar el costo de implementacion de ciclovias
minimize Costo_Riesgos:
sum {i in nodos_filas, j in nodos_columnas} costoriesgo[i,j] * y[i,j];

#restriccion de longitud maxima de ciclovias
subject to r1:
sum {i in nodos_filas, j in nodos_columnas} y[i,j]*longitud[i,j] <=
200000;

#restriccion de existencia de ciclovias por ruta
subject to r2 {i in nodos_filas, j in nodos_columnas}:
sum {w in rutas}x[i,j,w] <= 8*y[i,j];

#restriccion distancia maxima posible por ruta
subject to r3 {w in rutas}:
sum {i in nodos_filas, j in nodos_columnas}x[i,j,w]*longitud[i,j] <=
1.4*longitud_minima[w];

#restriccion de continuidad de ciclovias de la ruta 1
##restriccion de inicio de la ciclovias de la ruta 1
subject to r4:
sum {j in nodos_columnas}x[479,j,1] - sum {j in nodos_columnas}x[j,479,1]
= 1;

##restriccion de fin de la ciclovias de la ruta 1
subject to r5:
sum {j in nodos_columnas}x[445,j,1] - sum {j in nodos_columnas}x[j,445,1]
= -1;

##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovias de la ruta
1
subject to r6 {i in nodos_filas: i<>479 and i<>445}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,1] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,1] = 0;

#restriccion de continuidad de ciclovias de la ruta 2
##restriccion de inicio de la ciclovias de la ruta 2
subject to r7:
sum {j in nodos_columnas}x[57,j,2] - sum {j in nodos_columnas}x[j,57,2] =
1;
```

```

##restriccion de fin de la ciclovia de la ruta 2
subject to r8:
sum {j in nodos_columnas}x[445,j,2] - sum {j in nodos_columnas}x[j,445,2]
= -1;

##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovia de la ruta
2
subject to r9 {i in nodos_filas: i<>57 and i<>445}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,2] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,2] = 0;

#restriccion de continuidad de ciclovia de la ruta 3
##restriccion de inicio de la ciclovia de la ruta 3
subject to r10:
sum {j in nodos_columnas}x[11,j,3] - sum {j in nodos_columnas}x[j,11,3] =
1;

##restriccion de fin de la ciclovia de la ruta 3
subject to r11:
sum {j in nodos_columnas}x[445,j,3] - sum {j in nodos_columnas}x[j,445,3]
= -1;

##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovia de la ruta
3
subject to r12 {i in nodos_filas: i<>11 and i<>445}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,3] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,3] = 0;

#restriccion de continuidad de ciclovia de la ruta 4
##restriccion de inicio de la ciclovia de la ruta 4
subject to r13:
sum {j in nodos_columnas}x[189,j,4] - sum {j in nodos_columnas}x[j,189,4]
= 1;

##restriccion de fin de la ciclovia de la ruta 4
subject to r14:
sum {j in nodos_columnas}x[319,j,4] - sum {j in nodos_columnas}x[j,319,4]
= -1;

##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovia de la ruta
4
subject to r15 {i in nodos_filas: i<>189 and i<>319}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,4] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,4] = 0;

#restriccion de continuidad de ciclovia de la ruta 5
##restriccion de inicio de la ciclovia de la ruta 5
subject to r16:
sum {j in nodos_columnas}x[48,j,5] - sum {j in nodos_columnas}x[j,48,5] =
1;

##restriccion de fin de la ciclovia de la ruta 5
subject to r17:
sum {j in nodos_columnas}x[379,j,5] - sum {j in nodos_columnas}x[j,379,5]
= -1;
##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovia de la ruta
5

```

```

subject to r18 {i in nodos_filas: i<>48 and i<>379}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,5] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,5] = 0;

#restriccion de continuidad de ciclovía de la ruta 6
##restriccion de inicio de la ciclovía de la ruta 6
subject to r19:
sum {j in nodos_columnas}x[18,j,6] - sum {j in nodos_columnas}x[j,18,6] =
1;

##restriccion de fin de la ciclovía de la ruta 6
subject to r20:
sum {j in nodos_columnas}x[319,j,6] - sum {j in nodos_columnas}x[j,319,6]
= -1;

##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovía de la ruta
6
subject to r21 {i in nodos_filas: i<>18 and i<>319}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,6] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,6] = 0;

#restriccion de continuidad de ciclovía de la ruta 7
##restriccion de inicio de la ciclovía de la ruta 7
subject to r22:
sum {j in nodos_columnas}x[149,j,7] - sum {j in nodos_columnas}x[j,149,7]
= 1;

##restriccion de fin de la ciclovía de la ruta 7
subject to r23:
sum {j in nodos_columnas}x[381,j,7] - sum {j in nodos_columnas}x[j,381,7]
= -1;

##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovía de la ruta
7
subject to r24 {i in nodos_filas: i<>149 and i<>381}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,7] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,7] = 0;

#restriccion de continuidad de ciclovía de la ruta 8
##restriccion de inicio de la ciclovía de la ruta 8
subject to r25:
sum {j in nodos_columnas}x[45,j,8] - sum {j in nodos_columnas}x[j,45,8] =
1;

##restriccion de fin de la ciclovía de la ruta 8
subject to r26:
sum {j in nodos_columnas}x[191,j,8] - sum {j in nodos_columnas}x[j,191,8]
= -1;

##restriccion de continuidad de los nodos intermedios ciclovía de la ruta
8
subject to r27 {i in nodos_filas: i<>45 and i<>191}:
sum {j in nodos_columnas}x[i,j,8] - sum {j in nodos_columnas}x[j,i,8] = 0;

```

Figura 50. Modelo desarrollado en AMPL

Elaboración Propia

Para lograr que el modelo anterior pueda lograr encontrar solución en tiempos razonables, en el archivo.run relacionado al modelo descrito anteriormente se colocó el parámetro de treememlim = 7 000 y el parámetro de threads =8. El parámetro de treememlim es para evitar exceda la memoria de la RAM de 8 GB la computadora donde se procesará el modelo y el parámetro de threads se refiere a cuantos núcleos a la vez serán usados en el procesamiento, a menos threads más tiempo de procesamiento, pero mayor probabilidad que un modelo con millones de variables pueda ser procesado sin complicaciones por falta de memoria. Con las configuraciones en estos parámetros se pudo resolver el problema planteado en aproximadamente 35 horas. Estos parámetros que se configuraron para lograr que el modelo pueda procesarse se pueden observar en la figura 51.

```
reset;
model bike3.mod;
data bike3.dat;
option solver cplex;
option cplex_options 'nodefile = 3 treememlim= 15000 mipdisplay=2
mipinterval=100 lpdisplay=1 bardisplay=1 threads=3';
option times 1;
option gentimes 1;
option show_stats 1;
solve;
display x > variable10.out;
display y > variable11.out;
display _ampl_elapsed_time;
```

Figura 50. Archivo.run del modelo de red de ciclovías

Elaboración Propia

Con esas definiciones se obtiene una red de ciclovías que tiene la particularidad que pasa por algunas ciclovías ya construidas, pero a diferencia de las ciclovías discontinuadas que tenemos en la figura 29 llena de islas de ciclovías esta red propuesta busca una continuidad. En la figura 52 se muestran las ciclovías propuestas a construir en Lima.

En las ciclovías de la figura 51 se logra identificar varias ciclovías que comparten varias rutas, lo que según las definiciones del problema de Steiner son los puntos de Steiner.

Se valida la estrategia construcción de la ciclovía de la avenida Arequipa, así como también la de san Borja Sur, sin embargo, es necesario construir una en la Avenida Javier Prado y de igual manera en la Avenida Venezuela para tener un distrito correctamente interconectado.

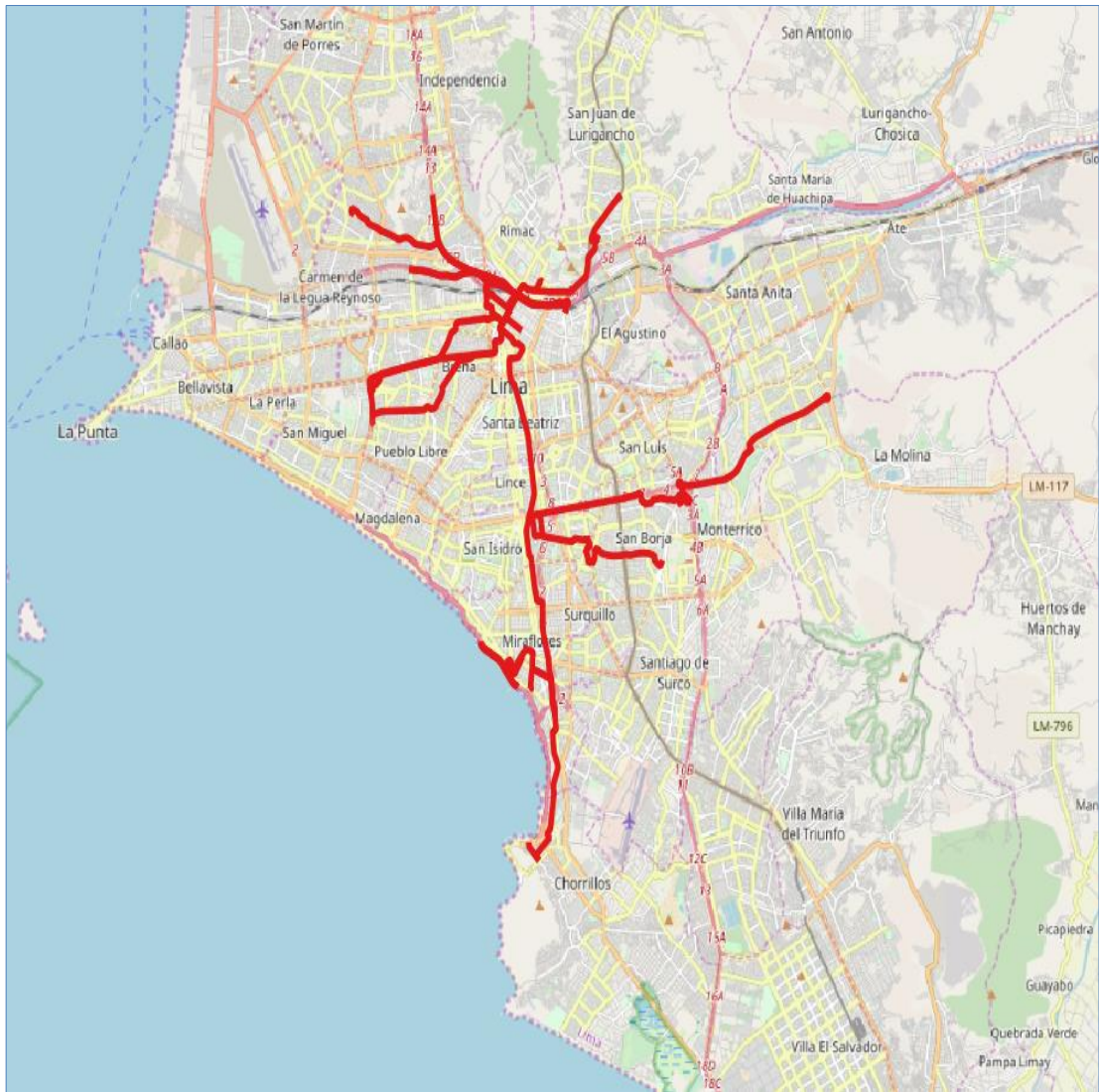


Figura 51. Ciclovías propuestas con el mapa de Lima
Elaboración Propia

La red de ciclovías propuesta de la figura 51 tiene ciclovías con una longitud total de 96 km de ciclovías, lo cual es muchísimo menor a las ciclovías que tenemos ahora como islas y no interconectadas que suman 141 km según [BID, 2015](#). La comparación entre las longitudes actuales de ciclovías con las propuestas se visualizan en la tabla 12, donde se logrará ver que si hubiera planificado sistemáticamente donde ubicarlas solo se hubiera necesitado construir un 68% de las ciclovías actualmente que no tienen mucha eficiencia de uso como se demostró en el capítulo 3 de diagnóstico.

Tabla 12. Ciclovías actuales vs propuestas

Longitud total de Ciclovías Actuales	141 km
Longitud total de Ciclovías Propuestas	96 km
Porcentaje de ciclovía necesarias/ actuales	68%

Elaboración Propia.

Si utilizamos el modelo de regresión de [Dill y Carr, 2003](#) que se explicó en el capítulo 3, es decir que con una milla de ciclovía por 100 mil habitantes podría aumentar en 1% la cantidad de personas que se movilizan en bicicleta, obtendríamos 5.6% de viajeros en ciclovías. Este ratio aumentaría en más de 18 veces el ratio actual, que es 0.3% ([BID, 2015](#)). Si somos conservadores y la proporcionalidad de Dill y Carr es de la mitad, el ratio aumentaría a 2.65% lo cual también es un buen aumento considerable.

Si aumentamos en 5% la cantidad de personas que se movilizarían en Lima en bicicleta, esto podría implicar teniendo en cuenta como promedio que 1.5 personas viajen en un vehículo que aproximadamente 32 359 automóviles dejarían de circular. Y si consideramos que 50 personas viajan en bus/custer, podrían 4 530 buses dejar de circular, lo cual aliviaría el tráfico vehicular. En la tabla 13 vemos la realización de los cálculos anteriores, teniendo que el 5.6% de las personas que viajarían en bicicleta tengan la misma configuración anterior de viajes en bus o en automóvil que presenta [Lima Como Vamos 2017](#).

En resumen tendríamos aproximadamente 323 590 personas que mejorarían su salud al cambiar el sedentarismo en su forma actual de transporte a uno más activamente físicamente, lo cual podría tener efectos positivos en su esperanza de vida y ahorros importantes en salud.

Según la [Cámara de Lima, 2018](#) en Lima y el Callao hay aproximadamente 1.5 millones de autos y camiones, y 50 441 Omnibuses, y teniendo en cuenta que no todo el parque automotor está en tránsito en la hora pico esta reducción podría ser mucho mayor al 2% con respecto a automóviles y camiones y al 9% en omnibuses, ver tabla 14. La reducción del 9% de omnibuses supondría un ahorro importante del gobierno y/o municipalidades en el transporte público y la reducción de autos en 2% implicaría un ahorro para las personas que en vez de gastar en un vehículo más de 5 mil dólares aprox. Invertirían en una bicicleta con un costo 10 veces menor. Esta

disminución del parque automotor también tendría impactos en la disminución de contaminación ambiental, especialmente en lo respecto a buses que en el caso limeño contaminan de manera más estrepitosamente que otros buses en Latinoamérica dado el bajo mantenimiento que tienen por la informalidad que los engloba.

Tabla 13. Potenciales Beneficiados

	Cantidad Personas
Población Lima (INEI, 2017)	9,320,000
Población Foco (Personas entre 20 años y 50 años) - 62% (INEI, 2017)	5,778,400
Porcentaje de Potenciales personas que se transporten en bicicleta (5.6%) = Población Foco * 5.6% = PPB	323,590
Personas probables que cambien su viaje en bus por bicicleta = $PPB * 0.7 = PPBBB$	226,513
Personas probables que cambiarían su viaje en carro por bicicleta = $PPB * 0.15 = PPBCB$	48,539
Cantidad de Buses probablemente reemplazados = $PPBBB / 50$	4,530
Cantidad de Carros probablemente reemplazados = $PPBCB / 1.5$	32,359

Elaboración Propia.

Tabla 14. Potencial reducción del parque automotor

Cantidad de autos y camionetas actual	1,500,000
Autos y camionetas reemplazadas por bicicleta	32,359
Reducción de autos y camionetas	2%
Cantidad de Omnibuses	50,441
Omnibuses reemplazadas por bicicleta	4,530
Reducción de Omnibuses	9%

Elaboración Propia.

Por otro lado, habría una mejora en los tiempos de transporte como se puede ver en la figura 53, en la cual si se viaja en automóvil desde el centro de Lima al parque Kennedy se demoraría aproximadamente 41 minutos en hora pico, mientras que viajando en las ciclovías propuestas considerando la velocidad de promedio en bicicleta hallada por [Komanoff, 2004](#) de 15 kmph se demoraría aproximadamente 36 minutos. Si se viaja en transporte pública la eficiencia en bicicleta es mucho mayor.

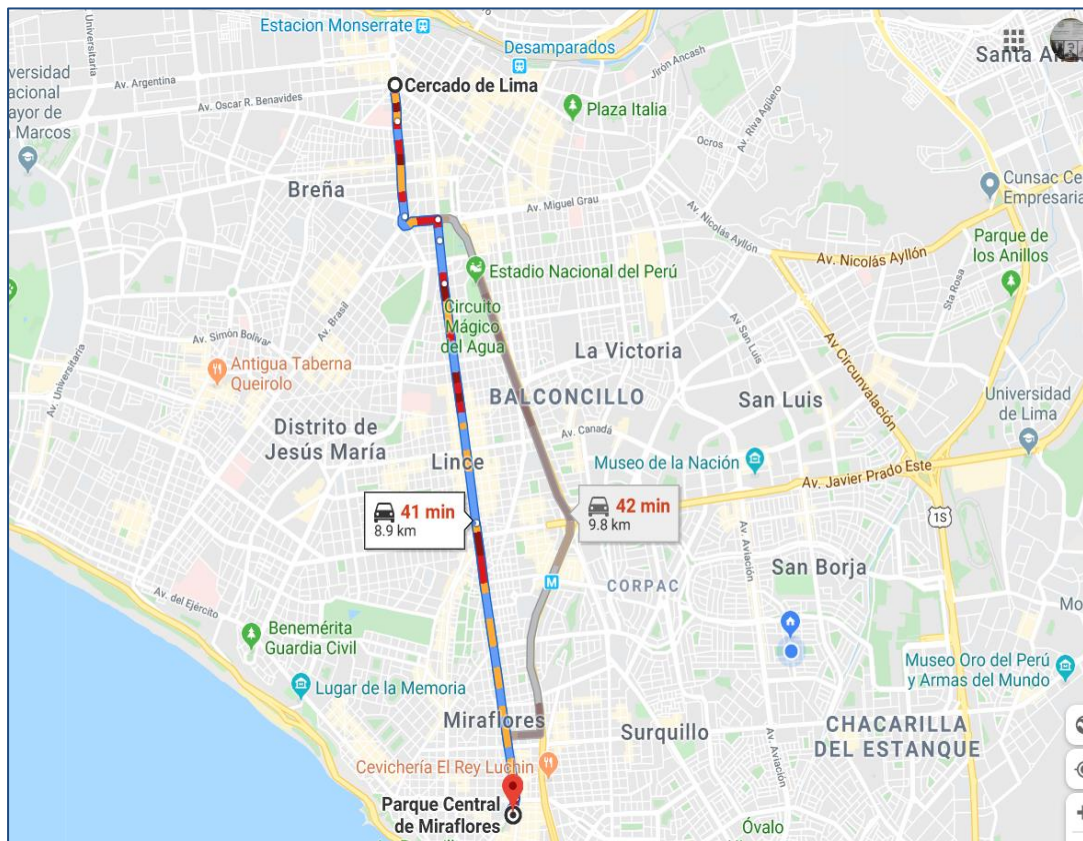


Figura 52. Ruta Centro de Lima a Parque Kennedy

Fuente: [Google Maps 2019c](#)

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El modelo realizado se le podría mejorar teniendo el costo de la construcción de ciclovía en cada tramo y los costos de mejorar cada intersección de las calles por lo que se necesitaría un trabajo arduo para recolectar esa información detallada por cada vía potencial.
- Esta propuesta podría reducir en más del 2% la cantidad de automóviles y en más del 9% de omnibuses en horas pico lo que aliviaría el tráfico y reduciría el estrés tanto de los nuevos viajeros ciclistas como de los automovilistas. Al igual que también reduciría la contaminación atmosférica donde el 80% de limeños estima que la principal causa de la contaminación ambiental de su ciudad se debe a la contaminación atmosférica y no les falta razón, en un reporte de la [OMS, 2016](#) se indicó a Lima como la capital sudamericana con peor calidad de aire por tener los mayores índices de PM2.5 Y PM10.
- Aproximadamente 323 590 personas mejorarían su salud al cambiar el sedentarismo en su forma actual de transporte a uno más activamente físicamente, lo cual podría tener efectos positivos en su esperanza de vida y ahorros importantes en salud tanto para ellos como para el gobierno.
- [Oliver Smith, 2017](#) y varios investigadores han encontrado que las personas que viajan en bicicleta para ir al trabajo obtienen un bienestar en promedio mayor y una menor variabilidad de su percepción de bienestar que las personas que usan otras modalidades de transporte. Por lo tanto se mejoraría la satisfacción de 323 590 personas en cuanto a su manera de transportarse. En correspondencia con lo anterior [Heinen et al, 2003](#) encontró que las personas que viajan más de 10 km para ir a sus trabajos tienden a incursionar en el ciclismo deportivo, aumentando así más la salud de los habitantes.
- Esta propuesta brinda una alternativa para los viajeros limeños más eficiente que usar buses de transporte público y en determinadas rutas u ocasiones más eficientes que viajar en sus propios automóviles.

- Para esta propuesta de red de ciclovías con una longitud total de 96 km se demuestra que el problema no está en construir más kilómetros sino en donde ubicarlas y como interconectarlas.
- La presente tesis presenta más allá del modelo matemático una metodología para una buena planificación de diseño de una red de ciclovías que podría usarse tanto en Lima como en cualquier otra ciudad del Perú o el mundo.
- Esta propuesta ayudaría a evitar el decrecimiento de las personas que viajan en bicicleta, es más ayudaría a revertir esta tendencia negativa a una positiva.
- Es evidente que las discontinuidades de ciclovías son las que más desaniman a las personas a transportarse en bicicleta, especialmente las personas que no están muy acostumbrados a moverse en ella. Las ciclovías más largas que tenemos de buena calidad es la de la avenida Arequipa con aproximadamente 6 kilómetros, cuando por los análisis realizados por esta tesis las personas se movilizan en promedio 8 kilómetros en bicicleta hacia su trabajo o estudio.
- El modelo desarrollado se puede aplicar con algunas modificaciones para diseñar rutas de buses o de las futuras líneas de tren
- El modelo desarrollado puede también ser usado para mejorar el flujo vehicular teniendo en cuenta las demandas en cada posible nodo.

Recomendaciones

- Es importante mejorar las intersecciones y la semaforización donde se construirán las ciclovías, al igual que la seguridad.
- Promover políticas públicas favorables para el transporte en bicicleta, como por ejemplo exoneración de IGV en la venta de bicicletas, seguros contra accidentes subsidiados para ciclistas, estacionamiento de bicicletas en edificios públicos, colas preferenciales en entidades públicas para los que hayan llegado en bicicleta, etc.

- Tal y como se detectó en las encuestas realizadas en este estudio se deben mejorar la luminosidad y brindar mantenimiento al pavimento de las ciclovías a construir para evitar que sean ciclovías sin uso como las que se encontró en San Juan de Miraflores, por ejemplo.
- Las áreas verdes que se reducen por la construcción de las ciclovías propuestas deben ser recolocadas para no afectar la salud de los ciudadanos ni la ecología limeña.
- Realizar una alianza con Strava o con otra app que guarde datos de viajes en bicicleta para que se pueda utilizar como input en el modelo y así tener mayor precisión, como por ejemplo se podría agregar al modelo datos o porcentajes de flujo de ciclistas que hay en la actualidad en determinadas zonas de Lima.
- Para lograr un mayor impacto en la satisfacción de ciudadanos se podría analizar las interconexiones no solamente debido a las demandas proyectadas sino también a estrategias que generen una mayor demanda según las políticas públicas que se deseen implementar.
- Es importante que el Ministerio de Transporte y Comunicaciones y/o el ministerio de Salud guarde información georeferenciada de los accidentes en bicicleta en Lima para usarlos como input en el cálculo de los costos de riesgo por arco ij o para mejorar determinadas ciclovías existentes.
- Que el Ministerio de Salud y el IPD realicen más torneos más nacionales de ciclismo, especialmente desde temprana edad para cultivar una cultura ciclista en varias dimensiones obtener mayores logros en ciclismo a nivel internacional y que se normalice en nuestra población el trasladarse en bicicleta a través de las ciudad o a través de las ciudades
- Se debe incentivar a que las empresas privadas y públicas cuenten con duchas apropiadas para los trabajadores que vayan en bicicleta y con los estacionamientos apropiados con buena seguridad y en suficiente cantidad.
- Se recomienda volver a enseñar un curso de civismo desde el colegio para que la cultura actual de conducir cambie. Es importante que en los exámenes para obtener brevetes también se recalque el espacio mínimo de respeto que se debe dar a los ciclistas, aproximadamente 3 metros.

- Es recomendable que en los futuros planes estratégicos de las ciudades del Perú no solamente mencionen la construcción de ciclovías sino que mencionen qué criterios utilizarán para ubicarlas. Con el fin de que no volvamos a cometer el mismo error que en Lima, donde tenemos varias ciclovías prácticamente inservibles, colocadas con poco criterio.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO BOIRIVANT, Jorge
2009 *La programación lineal, aplicación de las pequeñas y medianas empresas.*
- ANDESON, David, Dennis SWEENEY, Thomas WILLIAMS, Jeffrey CAMM y Kipp MARTIN
2012 *An introduction to management science: quantitative approaches to decision making.* USA: Cengage Learning
- ARREOLA RISA, Jesús y Antonio ARREOLA RISA
2003 *Programación lineal: Una introducción a la toma de decisiones cuantitativa.* México: International Thompson Editors.
- BOSS Darren, Trysalin NELSON, Meghan WINTERS y Colin FERSTER
2018 *Using crowdsourced data to monitor change in spatial patterns of bicycle ridership.*
- BUEHLER y DILL
2016 *Bikeway Networks: A Review of Effects on Cycling.*
- BREÑA HERNÁNDEZ, Wilson
2018 Crimen en Lima: Una aproximación con datos distritales, Informe final. Lima: CIES Consorcio de investigación económica y social. Disponible en: <https://observatorio.mininter.gob.pe/sites/default/files/evento/archivos/W.%20Hern%C3%A1ndez%20-%20Crimen%20en%20Lima-%20%28Informe%29.pdf>
- CAIRÓ BATTISTUTTI, Osvaldo
2006 *Fundamentos de la programación.* México: Pearson Education
- CAMARA DE COMERCIO DE LIMA
2018 *Aumento Continuo del Parque Automotor, un problema que surge solucionar.*
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DEL PERÚ
2019 *Archivo digital de la Legislación en el Perú.* Disponible en: <http://www.leyes.congreso.gob.pe/>
- DAVENPORT, Thomas
2006. *Competing on analytics.* Harvard Bus. Rev. 84(1) 98–107
- DAVIS, J.
1987 *Bicycle safety evaluation.* Tennessee: Auburn University.
- DEPARTMENT OF STATISTICS SINGAPORE
2018 <https://www.singstat.gov.sg/find-data/search-by-theme/population/population-and-population-structure/latest-data>

- DEKOSTER J
2002 *En bici, hacia ciudades sin malos humos.* Disponible en:
http://ec.europa.eu/environment/archives/cycling/cycling_es.pdf
- DILL, Jennifer y Theresa CARR
2003 *Bicycle Commuting and Facilities in Major U.S. Cities: If You Build Them, Commuters Will Use Them.* Transportation Research Record.
- DUTHIE, Jennifer y Avinash UNNIKRIISHNAN.
2014 *Optimization Framework for Bicycle Network Design.*
- ENCYCLOPEDIA BRITANNICA
2010 *Bridges of Königsberg.* Disponible en:
<https://www.britannica.com/science/Konigsberg-bridge-problem>
- EL COMERCIO
2015 Sandra Belaunde y Camila Bozzo. *Solo el 5% de limeños usa bicicletas como medio de transporte habitual*
- GASS Saul y Arjang ASSAD
2005 *An Annotated Timeline of Operations Research: An Informal History.*
- GASPAR, Iñaki, Juan BENAVENTE, María BORDAGARAY, Alonso BORJA, José MOURA y Ángel IBEAS
2015 *A bilevel mathematical programming model to optimize the design of cycle paths.*
- GOOGLE MAPS
2019a Avenida Mariano Cornejo. Disponible en: <http://bit.ly/2r42ISi>
- GOOGLE MAPS
2019b Malecón de la Reserva. Disponible en: <http://bit.ly/2YcoyJY>
- GOOGLE MAPS
2019c Mapa de tráfico. Disponible en: <http://bit.ly/34953Up>
- GUÉDEZ FERNÁNDEZ, Carmen
2011 *Programación Lineal e Ingeniería Industrial: una Aproximación al Estado del Arte Ingeniería Industrial.* Actualidad y Nuevas Tendencias, vol. II, núm. 6, 61-78.
- GUEVARA ESTRADA, Renato Vladimir, Adrián CHIRRE GANOA, Jorge YOUNG LORES, Jonatan Edward ROJAS POLO y Miguel Ángel RODRÍGUEZ ANTICONA
2018 *Propuesta de diseño de Ciclovías en Lima Metropolitana mediante la optimización de flujo de redes.*
- HARE TM, Pio ROSSI, FRIGERI A y MARMO C
2017 *Interoperability in planetary research for geospatial data analysis.* Planet Space Sci (PSS).
- HARKEY, David, Donald REINFURT y Mathew KNUIMAN
1998 *Development of the Bicycle Compatibility Index.*

- HEINEN, Eva, Kees MAAT y Bert VAN WEE
 2011 *The role of attitudes toward characteristics of bicycle commuting on the choice to cycle to work over various distances.*
- HARGITAI, Henrik
 2019 *Planetary Cartography and GIS.* Springer International Publishing.
- HILLIER, Frederick y Gerald LIEBERMAN.
 2015 *Introducción a la investigación de operaciones.* México, D.F: McGraw-Hill.
- HOWARD, Charlene y Elizabeth BURNS.
 2001 *Cycling to Work in Phoenix: Route Choice, Travel Behavior, and Commuter Characteristics.* Transportation Research Record:
- INFORMS
 2007 ManMohan Sodhi. *What about the “O” in O.R?*. Disponible en:
<https://www.informs.org/ORMS-Today/Archived-Issues/2007/orms-12-07/What-about-the-O-in-O.R>.
- INFORMS
 2019 *Certified Analytics Professional.* Disponible en:
<https://www.informs.org/ORMS-Today/Public-Articles/October-Volume-39-Number-5/Certified-Analytics-Professional>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).
 2017 *Encuesta Nacional.* Disponible en:
<https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>
- JESTICO Ben, Trysalin NELSON y Meghan WINTERS
 2016. *Mapping ridership using crowdsourced cycling data.*
- KIRBY, Maurice W.
 1989 *Operational Research in War and Peace: The British Experience from the 1930s to 1970.* Londres: Imperial College Press.
- KOMANOFF, Charles
 2004 *Bicycling.* Encyclopedia of Energy, 1, 141–150.
- KONG, Maynard
 2010 *Investigación de operaciones.* Lima: Fondo editorial PUCP.
- KRIZEK, Kevin y Rio ROLAND
 2005 *What is at the end of the road? Understanding discontinuities of on-street bicycle lanes un urban settings.*
- LANDIS Bruce, Venkat VATTIKUTI, Rusell OTTENBERG, Theodore PETRITSCH, Martin GUTTENPLAN y Linda CRIDER
 2003 *Intersection level of service for the bicycle through movement*
- LIBERATORE Matthew y Wenhong LUO.
 2010 *The Analytics Movement: Implications for Operations Research*

LIMA COMO VAMOS

2017 *VIII Informe de resultados sobre calidad de vida. Lima.* Disponible en: <http://www.limacomovamos.org/>

LIÑAN RUIZ ,Roberto, Jorge PEREZ ARACIL y Victor CABRERA CAÑIZARES
2016 *Mathematical optimization for planning and design of cycle paths.*

LONGLEY Paul, Michael GOODCHILD, David MAGUIRE Y David RHIRE
2015 *Geographic Information Systems and Science, 2nd edn.* New York: John Wiley and Sons.

MACKAY David

2009 *Sustainable Energy — without the hot air*

MARTINEZ, Luis, Luis CAETANO, Tomas Eiró, y Francisco CRUZ

2012 *An Optimisation Algorithm to Establish the Location of Stations of a Mixed Fleet Biking System: An Application to the City of Lisbon*

MALIENE, Vida, Vytautas GRIGONIS, Vytautas PALEVICIUS y Sam Griffiths

2011 *Geographic information system: Old principles with new capabilities.*

MARKETWIN

2017 *Estudio del tráfico en Lima.* Disponible en: <http://marketwin.pe/estudio-traffic/>

MAUTTONE, Antonio, Gonzalo MERCADANTE, María RABAZA y Fernanda Toledo.

2017 *Bicycle network design: Model and solution algorithm.*

MESBAH, Mahmoud y Rusell Thompson

2011 *Optimal design of bike lane facilities in an urban network.*

MEJÍA PUENTE, Miguel H.

2011 *Investigación Operativa 1.* Material de enseñanza. Lima: Fondo Editorial PUCP

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

2017 *Plan estratégico nacional de seguridad vial 2017- 2021.*

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

2018 *Manual de Carreteras “Diseño Geométrico (MTC) DG-2018.* Disponible en: <https://civilgeeks.com/2018/02/08/manual-carreteras-diseno-geometrico-mtc-dg-2018/>

MVCS

2010 *CE.030 Obras Especiales y Complementarias.* Disponible en: <http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/normas/norma-ce-030-obras-especiales-y-complementarias.pdf>

MONARK

2019 *Nosotros.* Disponible en: <https://www.monark.com.pe/nosotros/#>

MOOVITAP

2018 *Datos y estadísticas del uso del transporte público en Lima, Peru.* Diponible en: https://moovitapp.com/insights/es/Moovit_Insights_%C3%8Dndice_de_Transporte_P%C3%BAblico-1102

MUSAKAWA, Walter y Kadibetso SELALA
2016 *Mapping cycling patterns and trends using Strava Metro data in the city of Johannesburg, South Africa.*

National Association of City Transportation Officials, NACTO
2014 *Bikeway Design Guide Urban Bikeway Design Guide*

PEW RESEARCH CENTER
2015 *Car, bike or motorcycle? Depends on where you live*
<http://www.pewresearch.org/fact-tank/2015/04/16/car-bike-or-motorcycle-depends-on-where-you-live/>

PIZARRO, José
2018 *Ciclovías en Lima: problemática y cuatro tareas urgentes.* Disponible en:
<https://camp.ucss.edu.pe/blog/ciclovias-lima-problematica-tareas/>

PLAM
2014 *Plan Metropolitano del Desarrollo Urbano de Lima y Callao 2035.* Disponible en: <http://limatieneunplam.blogspot.com/2015/05/descarga-el-plam2035.html>

PUCHER, John, Jennifer DILL y Susan HANDY
2010 *Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling*

PORTLAND BUREAU OF TRANSPORTATION
2019 *Four Types of Transportation Cyclists.* Disponible en:
<https://www.portlandoregon.gov/transportation/article/158497>

OMS
2016 *Global Urban Ambient Air Pollution Database 2016.* Disponible en:
http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/

ORATLAS
2018 *Singapur.* Disponible en: <http://www.oratlas.com/libro-mundial/singapur/geografia>

ORTEGON SANCHEZ, Adriana y Daniel OVIEDO HERNANDEZ
2016 *Assessment of the potential for modal shift to non-motorised transport in a developing context: Case of Lima, Peru.*

SILVA NOLE, Luis
2015 *Municipalidad retoma plan para dotar a Lima de una red articulada de ciclovías.* Disponible en: <http://www.actualidadambiental.pe/wp-content/uploads/2015/02/elcomerciosabado.pdf>

SMITH, Oliver.
2017 *Commute well-being differences by mode: Evidence from Portland, Oregon.*

STRAVA
2019a *Global Heatmap.* Disponible en: <https://www.strava.com/heatmap#10.60/-76.80713/-12.02876/hot/all>

STRAVA
2019b *Ejemplo de ruta hacia el trabajo en Strava.* Disponible en:
<https://www.strava.com/activities/2390640801>

SUN, Yeran, Yashar MOSHFEGHI y Zhang LIU
2017 Exploiting crowdsourced geographic information and GIS for assessment of air pollution exposure during active travel. *Journal of Transport and Health* 6 (June), 93–104.

SUSTRANS

2017 *Inclusive city cycling. Women: reducing the gender gap*

TAHA, Hamdy A.

2012 *Investigación de operaciones*. Naucalpán de Juárez: Pearson Education.

TERH, Shin y Kai CAO

2018 *GIS-MCDA based cycling paths planning: a case study in Singapore*. *Applied Geography*, 94 (March), 107–118

TAMBASSI, Timothy

2019 *The Philosophy of GIS*. Springer International Publishing.

THIERAUF, Robert J.

1986 *Introducción a la investigación de operaciones* México: Editorial Limusa.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD

1994 *Highway Capacity Manual*, Washington D.C.

WINSTON, Wayne L.

2005 *Investigación de operaciones, algoritmos y aplicaciones*. México: International Thompson Editors.