

OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA PARA LA GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS: APLICACIÓN A UNA RED DE PAVIMENTOS URBANOS EN CHILE

Cristina Torres-Machí, Universitat Politècnica de València y Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España
Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción
Av. Vicuña Mackenna 4860. Edif. San Agustín Piso 3, Santiago, Chile
E-mail: critorma@upv.es
Tel + 34 96 387 95 62

Alondra Chamorro, Pontificia Universidad Católica de Chile
Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales, CONICYT/FONDAP/15110017
Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción
Av. Vicuña Mackenna 4860. Edif. San Agustín Piso 3, Santiago, Chile
E-mail: achamorro@ing.puc.cl
Tel + 56 2 2354 4244

Eugenio Pellicer, Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España
E-mail: pellicer@upv.es

Víctor Yepes, Universitat Politècnica de València
ICITECH, Departamento de Ingeniería de la Construcción
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España
E-mail: vyepesp@cst.upv.es

Alelé Osorio, Pontificia Universidad Católica de Chile y University of Waterloo
Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción
Department of Civil Engineering, University of Waterloo – Canada
Av. Vicuña Mackenna 4860. Edif. San Agustín Piso 3, Santiago, Chile
E-mail: aosoriol@ing.puc.cl

Carlos Videla, Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción
Av. Vicuña Mackenna 4860. Edif. San Agustín Piso 3, Santiago, Chile
E-mail: cvidela@ing.puc.cl

Gestión del Mantenimiento Vial

11^{er} Congreso Internacional PROVIAL

20 al 24 de Octubre de 2014, Valdivia

Fecha de envío:	31 de julio 2014
Número de palabras:	4969 palabras
Número de figuras y tablas:	6 (1500 palabras)
TOTAL	6469 palabras

RESUMEN

A pesar de la importancia de las infraestructuras en el desarrollo económico y social, los recursos disponibles para su conservación suelen ser insuficientes, generando un deterioro acelerado de las mismas. En este contexto surge la disciplina de gestión de infraestructuras, la cual combina conocimientos propios de la ingeniería y economía para conseguir una asignación óptima de recursos para la gestión, operación y conservación de las infraestructuras mediante un análisis de su ciclo de vida. Sin embargo, la asignación óptima de recursos de conservación a una red de infraestructuras es un problema que no tiene una solución directa. De hecho, existen S^{TxN} soluciones factibles para una red compuesta por N activos, S posibles tratamientos de conservación y un periodo de análisis de T años.

Los métodos de optimización mayoritariamente empleados para resolver este problema son los de optimización matemática y los métodos de cuasi-optimización. Sin embargo, las aplicaciones de métodos de optimización heurísticos resultan escasas y se limitan a resolver el problema de optimización a nivel de proyecto. Este trabajo presenta una herramienta de optimización heurística para el diseño de programas de mantenimiento de redes de infraestructuras. El objetivo de esta herramienta es asistir en la toma de decisiones para el mantenimiento de infraestructuras sujetas a restricciones presupuestarias. Esta herramienta se aplica a una red de pavimentos urbanos en Chile. De esta aplicación se concluye que la herramienta propuesta permite optimizar los recursos disponibles para el mantenimiento resultando en niveles de servicio superiores a los obtenidos bajo la política actual de mantenimiento.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura de transporte terrestre y particularmente la infraestructura vial supone uno de los mayores patrimonios de los países, además de ser una pieza clave para su desarrollo económico, productividad y bienestar social [1]. Sin embargo, estudios recientes ponen en evidencia que los niveles de inversión necesarios para su conservación son inferiores a los requeridos, dando lugar a un deterioro acelerado de las mismas [2, 3]. A la disminución de valor patrimonial derivada de este deterioro deben sumarse, además, las pérdidas económicas debidas a conservaciones tardías y técnicamente deficientes respecto al grado de deterioro que se desea reparar. En el caso de pavimentos, se ha podido comprobar que una conservación tardía triplica los costos de rehabilitación y los costos de circulación de los usuarios [4].

Ante esta situación surge la disciplina de gestión de infraestructura, la cual combina conocimientos propios de la ingeniería, economía y procesos de negocio para conseguir una asignación óptima de recursos para la gestión, operación y conservación de la infraestructura mediante un análisis de su ciclo de vida [5]. Para garantizar además un enfoque sustentable en la gestión de infraestructura, deben considerarse de forma integrada aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales, políticos e institucionales en su ciclo de vida [6–8]. Uno de los procesos necesarios en la gestión sustentable de infraestructura es la asignación de los recursos disponibles para el mantenimiento. Sin embargo, la asignación óptima de recursos para el mantenimiento de una red vial es un problema que no tiene una solución directa. De hecho, existen S^{TxN} soluciones factibles para una red compuesta por N tramos, S posibles tratamientos y un periodo de análisis de T años [9].

Los métodos de optimización mayoritariamente empleados para resolver este problema son los de optimización matemática y los métodos de cuasi-optimización [10]. Los métodos de optimización matemática (que incluyen la optimización lineal, no lineal, entera y dinámica) presentan la ventaja de proporcionar la solución óptima global del problema. Sin embargo, requieren altos tiempos de

computación, por lo que su aplicación suele reducirse al análisis de pequeñas redes de activos [10]. En cambio, los métodos de cuasi-optimización (entre los que se incluyen los algoritmos evolutivos y los métodos heurísticos) ofrecen soluciones cercanas a las óptimas con menores esfuerzos de computación. Los algoritmos evolutivos y, concretamente, los algoritmos genéticos, han sido ampliamente utilizados para resolver el problema considerando grandes redes de pavimentos. Por el contrario, las aplicaciones de métodos heurísticos resultan escasas y se limitan a resolver el problema de optimización a nivel de proyecto [10]. Estudios realizados en otros campos de investigación como el diseño estructural o el diseño de rutas de transporte, han demostrado la eficiencia de los métodos heurísticos para resolver problemas complejos de optimización [13–16]. De hecho, las aplicaciones de Martínez et al. [14] y Rao y Shyju [15] han obtenido resultados más robustos con métodos heurísticos que los obtenidos con algoritmos genéticos, los cuales han tenido mayor aplicación en el ámbito de gestión de infraestructura.

Objetivo y Alcance del Estudio

De los antecedentes expuestos surge la oportunidad de desarrollar una herramienta heurística para optimizar la asignación de recursos disponibles para el mantenimiento de redes infraestructura. El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de esta herramienta y su aplicación a una red real de pavimentos urbanos en Chile.

Este trabajo es parte de un proyecto desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile denominado Fondef D09I1018 “Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile”. El objetivo general de este proyecto es desarrollar, a partir del análisis de la situación en que se encuentra la gestión de pavimentos urbanos en Chile, un conjunto sistemático de soluciones a los principales problemas institucionales, técnicos y económicos que enfrentan las entidades a cargo de su gestión bajo criterios de optimización de recursos.

Si bien como resultado del proyecto Fondef se prevé desarrollar un sistema que permita la consideración integrada de criterios técnicos, económicos, ambientales, sociales, políticos e institucionales en la gestión de pavimentos urbanos; la aplicación presentada en este estudio se limita a abordar el problema considerando criterios técnicos y económicos.

Metodología de la Investigación

Para alcanzar los objetivos descritos, el estudio se ha desarrollado en base a la siguiente metodología:

- Definición del problema de optimización existente en la asignación de recursos de mantenimiento para una red de infraestructura, identificando las variables, parámetros, funciones objetivo y restricciones del problema de optimización.

- Definición del marco conceptual de la herramienta de optimización heurística.
- Aplicación de la herramienta propuesta a una red real de pavimentos urbanos en Chile.

PROPUESTA DE UNA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA PARA LA ASIGNACIÓN DE RECURSOS DE MANTENIMIENTO A NIVEL DE RED

Definición del Problema de Optimización

En términos generales, un problema de optimización consiste en encontrar el valor de las variables $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, que hagan mínima (o máxima) una función objetivo (f , definida en (1)) cumpliendo una serie de restricciones (g_j y h_p definidas en (2) y (3)).

Funciones objetivo:

$$\min(\text{o max}) f_1(\mathbf{x}) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0; \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

$$h_p(\mathbf{x}) = 0; \quad p = 1, 2, \dots, q \quad (3)$$

Donde $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ son las variables del problema de optimización.

Función objetivo

Las funciones objetivo del problema de asignación de recursos buscan maximizar o minimizar un determinado indicador. El objetivo de estos indicadores es evaluar en qué medida la infraestructura satisface los fines para los que fue construida [1]. Si bien existen múltiples indicadores para la evaluación de alternativas de mantenimiento, el área entre la curva de comportamiento y un nivel mínimo de condición (ABC) resulta especialmente apropiado para la evaluación técnico-económica de alternativas de conservación en redes de pavimentos. Esto es así porque, en primer lugar, un pavimento con un buen mantenimiento (y, por tanto, una mayor ABC) genera mayores beneficios a los usuarios que una alternativa de peor mantenimiento. En segundo lugar, permite incluir en la evaluación beneficios que son difíciles de cuantificar monetariamente. En el trabajo de Torres-Machí et al. [17] se analiza con mayor profundidad la idoneidad de distintos indicadores para la gestión redes de pavimentos. El problema planteado busca, por tanto, maximizar el ABC de los tramos que componen la red de pavimentos (4).

$$\max f(\mathbf{x}) = \max \sum_{n=1}^N ABC_n = \max \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^T (IC_n(t) - IC_{\min,n}) dt \quad (4)$$

Variables

Las variables del problema de optimización definen el programa de mantenimiento de una red compuesta por N tramos durante un periodo de análisis de T años. Un total de $m = NxT$ variables definen una solución del problema de optimización. Cada una de estas variables puede tomar S_n posibles valores, siendo S el número de alternativas de tratamiento posibles para cada tramo n . Dado un conjunto de valores de estas variables, queda definida una solución particular del problema, de la que puede obtenerse el valor de la función objetivo (1).

Parámetros

Los parámetros son aquellas magnitudes tomadas como dato del problema y cuyo valor permanece constante durante el proceso de optimización. En el problema de optimización para la asignación de recursos de mantenimiento, se distinguen cuatro tipos de parámetros:

- Parámetros de inventario: Recogen información de las características de la red tales como segmentación, tipo de infraestructura, longitud, tráfico, clima y jerarquía.
- Parámetros técnicos: Incluyen información de la condición inicial de los tramos, sus modelos de deterioro, el catálogo de tratamientos posibles y los umbrales de condición en los que se pueden aplicar.
- Parámetros económicos: Recogen los costos de aplicación de los tratamientos.
- Parámetros asociados a decisiones tomadas a nivel estratégico: Definen las regulaciones legales e institucionales, los objetivos y políticas institucionales, el presupuesto disponible y su evolución en el tiempo, así como el periodo de análisis y la tasa de descuento a aplicar en la evaluación económica.

Restricciones

En el problema de optimización se consideran restricciones técnicas y económicas. La restricción económica (5) exige que el costo del programa de mantenimiento sea inferior a la capacidad presupuestaria existente en cada año del periodo de análisis. Por su parte, la restricción técnica exige que todos los tramos de la red presenten, en todos los años del periodo de análisis, una condición superior a una condición mínima definida a nivel estratégico (6).

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{n=1}^N \text{costo}(x_{nt}) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \leq B_t; \forall t \quad (5)$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_m) = IC_{n,t} \geq IC_{\min,n}; \forall t \text{ y } \forall n \quad (6)$$

Donde t es el año de análisis (con $t \leq T$, siendo T el periodo de análisis); n es el tramo de pavimento bajo análisis (con $n \leq N$, siendo N el número de tramos en la red); $\text{costo}(x_{nt})$ es el costo del tratamiento x aplicado en el tramo n en el año t ; i es la tasa de descuento para la actualización de costos; B_t es el presupuesto disponible para tratar la red el año t ; y $IC_{\min,n}$ es la condición mínima exigida para el tramo n .

Marco Conceptual de la Herramienta de Optimización

De acuerdo a esta definición del problema de optimización presentado, la herramienta de optimización heurística propuesta consta de cuatro componentes: datos del problema de optimización (parámetros), módulos de evaluación, proceso de optimización y resultados (Figura 1).

- Datos del problema de optimización (parámetros): Recogen información relativa al inventario de la red, las decisiones estratégicas de la gestión, así como parámetros técnicos y económicos.
- Módulos de evaluación: Evalúan las alternativas de conservación bajo criterios técnicos y económicos. Concretamente, en el módulo técnico se evalúa la evolución en el tiempo del índice de condición del pavimento (valor a partir del cual puede determinarse la efectividad de la alternativa, según la expresión (4)). En el módulo de evaluación económica se determina el flujo de costos en el periodo de análisis.
- Proceso de optimización: Consiste en la búsqueda del programa de mantenimiento que optimiza la función objetivo.
- Resultados: En el caso en el que las necesidades de la red sean superiores al presupuesto disponible, la herramienta propone ajustar las decisiones estratégicas (bien aumentando el presupuesto disponible y/o aceptando peores niveles de condición). En caso contrario, se define el programa de mantenimiento óptimo en el que se incluye el listado de tramos a tratar y los tratamientos que deben ser aplicados.

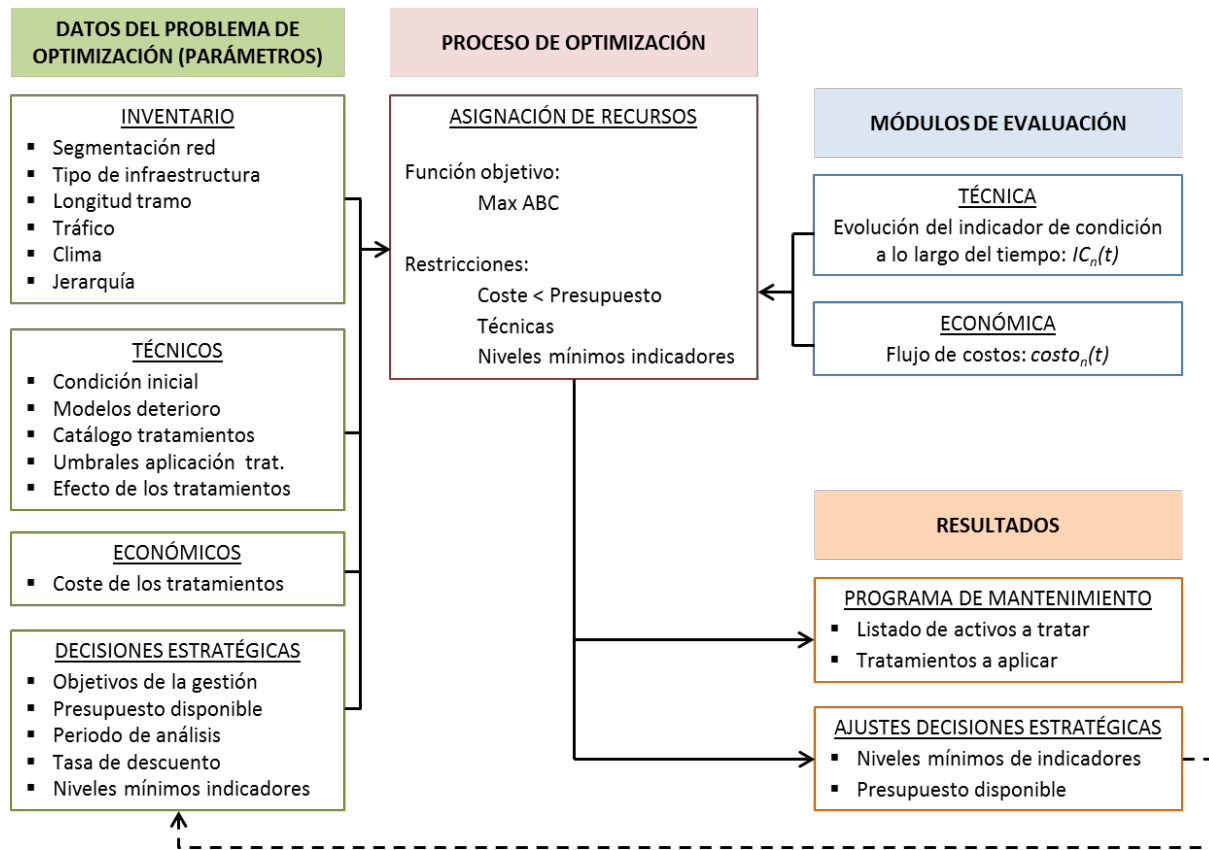


FIGURA 1 Marco conceptual de la herramienta de optimización heurística

Estrategia Propuesta para la Optimización Heurística

Si bien en la investigación general se están explorando diversas estrategias de optimización heurística tales como recocido simulado, aceptación por umbrales, etc.; en este trabajo se presenta un avance preliminar de la aplicación de un método constructivo. Estos métodos siguen un proceso iterativo mediante el cual van construyendo una solución al problema de optimización. En función del procedimiento seguido para la construcción de soluciones, se derivan distintos métodos tales como el GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), con una selección probabilística de candidatos o el ACO (*Ant Colony Optimization*), el cual emplea una memoria indirecta en el proceso de construcción. En este trabajo se presenta un método determinístico para la construcción de soluciones. Este método preliminar puede ser modificado para adaptarse a las características específicas de otros métodos constructivos más avanzados tales como el GRASP o ACO.

El método de construcción propuesto en este trabajo, cuyo diagrama de flujo se recoge en la Figura 2, consiste en un proceso iterativo que se realiza para cada año del periodo de análisis. En cada año del periodo de análisis, se analizan los posibles tratamientos a aplicar en cada uno de los tramos de la red. Estas $k_{posibles}$ alternativas se evalúan en base a la función objetivo y se ordenan en función del incremento en el ABC generado por la aplicación de la alternativa. Aquellos tramos que incumplirían la restricción técnica si no se les aplica ningún tratamiento, son priorizados en esta lista ordenada. Una vez constituida esta lista ordenada, se seleccionan los tratamientos a incluir en el programa de

mantenimiento. En base a su posición en la lista ordenada, los tratamientos son incluidos en la solución si el costo total de mantenimiento resultante no excede el presupuesto anual disponible.

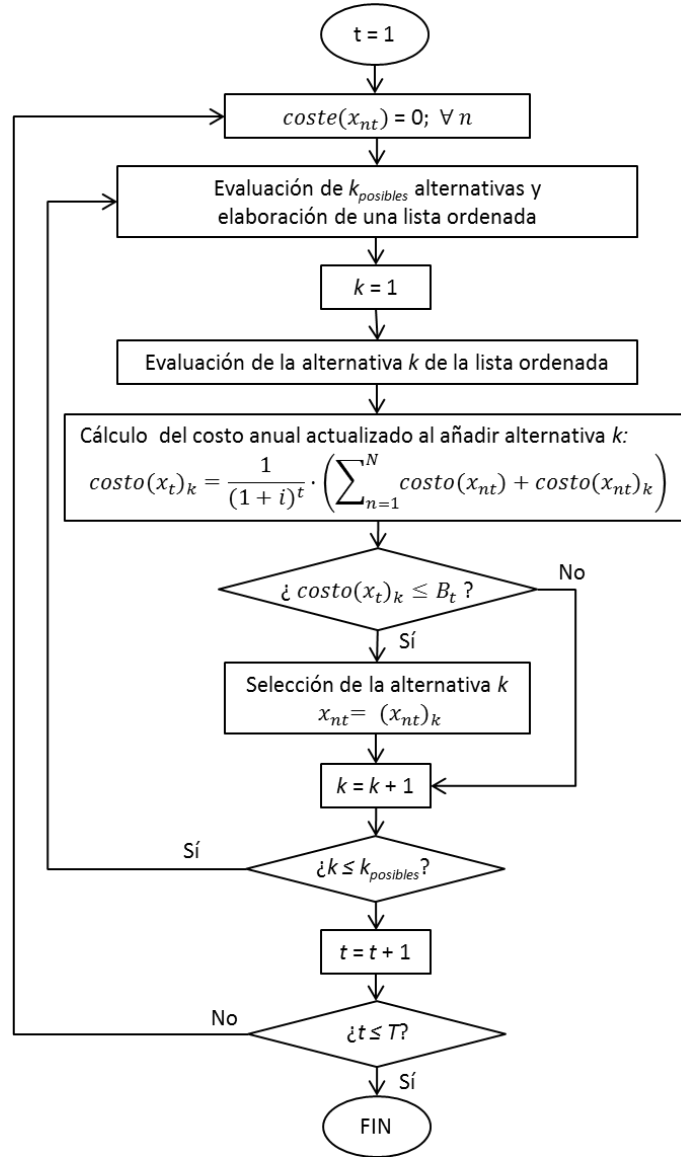


FIGURA 2 Diagrama de flujo del proceso para la construcción de soluciones

APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA: EL MANTENIMIENTO DE REDES DE PAVIMENTOS URBANOS EN CHILE

La red considerada en esta aplicación está situada en la ciudad de Santiago (Chile). La red urbana de Santiago tiene una extensión de 810 km [18], y está gestionada por distintos organismos, principalmente el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y las Municipalidades. Santiago se caracteriza por presentar un clima Mediterráneo en el que existen cinco meses de clima seco correspondientes a la estación de verano, donde prácticamente no hay precipitaciones, y siete meses de estación lluviosa con precipitaciones mensuales de entre 50 y 400 mm [8, 19].

Características de la Red de Estudio

Parámetros de inventario

A efectos de este estudio, se ha analizado un conjunto de diez tramos pertenecientes a la comuna de Macul. Esta red presenta pavimentos asfálticos pertenecientes a distintas clases funcionales, de acuerdo a la clasificación fijada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo [20]: expresas, troncales, colectoras, servicio, locales y pasajes. Las cuatro primeras categorías componen la red estructurante, mientras que las dos últimas (locales y pasajes) componen la red secundaria. La Tabla 1 muestra los parámetros de inventario de los tramos de la red de estudio. Estos tramos han sido seleccionados con el objetivo de recoger pavimentos con distintos niveles de deterioro pertenecientes tanto a la red estructurante como secundaria.

Parámetros técnicos

El indicador de condición utilizado en esta aplicación es el ICPU (Índice de Condición de Pavimentos Urbanos). Este indicador, desarrollado en el marco del proyecto Fondef, consiste en un indicador compuesto que evalúa en una escala 1-10 la condición del pavimento, siendo 10 la mejor condición posible y 1 la peor. El ICPU se obtiene en base a medidas objetivas de deterioro tomadas en evaluaciones manuales o automáticas. En la publicación de Osorio et al. [19] pueden encontrarse los detalles del desarrollo y validación del ICPU. La condición inicial de los tramos de la red de estudio ($ICPU_{inicial}$ en Tabla 1) está basada en evaluaciones en terreno realizadas en junio 2012 como parte del proyecto Fondef.

TABLA 1 Características de inventario y condición inicial de la red de estudio

Tramo	Red	Longitud [m]	Ancho [m]	$ICPU_{inicial}$
1	Estructurante	718	3,5	5,5
2	Estructurante	1.210	3,6	5,2
3	Secundaria	118	4,0	6,6
4	Estructurante	600	3,4	6,6
5	Estructurante	502	3,0	8,0
6	Estructurante	98	3,0	7,1
7	Estructurante	273	3,6	8,3
8	Estructurante	603	3,0	9,4
9	Secundaria	533	3,6	10,0
10	Estructurante	593	3,4	9,9

Los modelos de deterioro considerados en esta aplicación han sido desarrollados como parte del proyecto Fondef para modelar el comportamiento de pavimentos urbanos en clima Mediterráneo [21]. Estos modelos se han desarrollado considerando tres campañas de evaluación de la red urbana de Santiago mediante modelos markovianos y un proceso de simulación de Montecarlo.

Las alternativas de mantenimiento consideradas son las recogidas en la Tabla 2. Estos tratamientos han sido seleccionados en base a la práctica actual en Chile, de acuerdo con entrevistas llevadas a cabo con personal técnico de administraciones y empresas encargadas del mantenimiento de pavimentos. Estos tratamientos fueron complementados con alternativas no aplicadas actualmente en Chile con el objetivo de ampliar el alcance del estudio a otros países.

TABLA 2 Alternativas de conservación

ID	Tratamiento	Clasificación	Incremento de vida útil (ΔSL) [years]	Costo [USD/m ²]
1	No hacer nada	-	0	0
2	Limpieza y sellado de grietas	Preservación	2	0.99
3	Riego neblina	Preservación	3	1.02
4	Lechada bituminosa	Mantenimiento	4	2.82
5	Micropavimento	Mantenimiento	5	3.07
6	Tratamiento superficial simple	Mantenimiento	6	9.42
7	Tratamiento superficial doble	Mantenimiento	7	9.89
8	Bacheo	Mantenimiento	1	19.13
9	Fresado y recapado funcional	Mantenimiento	10	23.24
10	Fresado y recapado estructural	Rehabilitación	12	25.44
11	Reciclado in situ en caliente	Rehabilitación	10	35.39
12	Reciclado in situ en frío	Rehabilitación	13	36.50
13	Reemplazo profundo	Rehabilitación	13	41.93
14	Reconstrucción	Rehabilitación	25	66.74

Puesto que los tratamientos considerados se aplican a pavimentos con distintos niveles de deterioro, es necesario clasificarlos en categorías: preservación, mantenimiento y rehabilitación. Los tratamientos de preservación mejoran la funcionalidad del pavimento extendiendo su vida en servicio sin mejorar su capacidad estructural [22]. Estos tratamientos se aplican antes de que aparezcan deterioros importantes ($ICPU \geq 8$). Los tratamientos de mantenimiento mejoran la condición funcional del pavimento sin aumentar de forma significativa su capacidad estructural [22]. Estos se aplican a pavimentos con condición buena o aceptable ($ICPU \geq 5$). Por último, los tratamientos de rehabilitación consisten en una mejora estructural del pavimento que extiende considerablemente su vida en servicio y/o aumenta su capacidad estructural [22].

La aplicación de un tratamiento produce un incremento de la vida en servicio del pavimento (ΔSL) y por tanto, un aumento en su condición ($\Delta ICPU$) en el momento de aplicación. De acuerdo con el enfoque empleado en otros trabajos de investigación [23], se considera que la aplicación del tratamiento retrasa el deterioro del pavimento de acuerdo a la vida útil del tratamiento aplicado. Así, la curva de deterioro tras la aplicación del mismo es una curva paralela a la inicial, la cual es trasladada en el tiempo en función de la vida útil del tratamiento aplicado. Puesto que en el momento de presentación de este trabajo se está calibrando el efecto de aplicación de los tratamientos al caso chileno, se han considerado valores recogidos de literatura internacional [24], [25]. Este estudio considera además una reducción del efecto de los tratamientos cuando son aplicados de forma repetitiva [25].

Parámetros económicos

Los parámetros económicos considerados en esta aplicación corresponden con los costos unitarios de los posibles tratamientos (Tabla 2). Los costos unitarios han sido principalmente tomados de contratos de mantenimiento urbano en la Municipalidad de Santiago y del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Los costos de aquellos tratamientos que no aplicados actualmente en Chile han sido tomados de literatura internacional [24, 26].

Parámetros asociados a decisiones estratégicas

En relación a los parámetros asociados a decisiones estratégicas, se considera un periodo de análisis (T) de 25 años y una tasa de descuento (i) del 6%, de acuerdo a lo establecido por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile [27].

La condición mínima exigida a los tramos de la red ($ICPU_{min}$) ha sido determinada en base a una evaluación cualitativa preliminar de la red urbana de Santiago, la cual fue llevada a cabo por un grupo de expertos como parte del proyecto Fondef. En base a estas evaluaciones, se estableció para el análisis específico presentado en esta publicación, una condición mínima aceptable para la red estructurante de $ICPU = 4$, mientras que para la red secundaria se consideró $ICPU = 3$. Estos valores determinan el umbral bajo el cual la condición de los pavimentos debería requerir una rehabilitación. Como parte del proyecto Fondef se están realizando estudios para la validación de los umbrales de condición a incluir en el sistema de gestión resultante del proyecto.

La capacidad presupuestaria considerada se ha establecido mediante una simulación basada en la práctica habitual de mantenimiento de la red urbana en Chile. En la actualidad, se detecta que los pavimentos se tratan cuando presentan altos niveles de deterioro, momento en el cual es necesario aplicar tratamientos de rehabilitación. Es importante señalar que este escenario, denominado de aquí en adelante escenario base o de política reactiva, no refleja necesariamente el presupuesto real de la entidad a cargo del mantenimiento de los tramos analizados. En base a estas consideraciones, se ha simulado el programa de mantenimiento que se implementaría en el periodo de análisis de 25 años bajo una política reactiva. En esta simulación se ha considerado que, cuando los pavimentos alcanzan el valor mínimo aceptable ($ICPU_{min}$), se aplica el tratamiento de rehabilitación más económico (fresado y recapado estructural, de acuerdo a los costos recogidos en la Tabla 2). Esta simulación resulta en un costo total actualizado, en el periodo de análisis 25 años, de 488.718 USD (en este monto se considera únicamente los costos derivados de la aplicación de los tratamientos de rehabilitación). En base a esta simulación, se establece el presupuesto anual considerado en la aplicación, el cual corresponde con el costo anual equivalente (CAE) necesario para mantener la red en el escenario de política reactiva descrito anteriormente (CAE = 36.067 USD).

Resultados

La herramienta heurística propuesta para la construcción de programas de mantenimiento se aplicó a la red urbana descrita en las secciones anteriores. Los resultados obtenidos de esta aplicación se comparan con los efectos, en términos de condición y costo, del escenario base que considera una política reactiva de mantenimiento.

En términos de condición, el programa de mantenimiento optimizado aumenta en un 40% el $ICPU$ medio de la red durante el periodo de análisis de 25 años. De hecho, la herramienta propuesta permite diseñar programas de mantenimiento con presupuestos inferiores al actual que resultan en mayores niveles de condición de la red. Así, la Figura 3 muestra cómo la condición media de la red bajo un programa optimizado con una reducción del presupuesto del 60%, es superior a la obtenida bajo la política actual.

Las tendencias observadas en la Figuras 3 se justifican con un análisis detallado de los programas de mantenimiento. Tal y como se indicó anteriormente, en el escenario base, los pavimentos son rehabilitados cuando su condición alcanza el valor mínimo definido a nivel estratégico ($ICPU_{min}$). A pesar de que los tratamientos de rehabilitación permiten reestablecer la condición de los pavimentos a altos niveles de $ICPU$, estos sufren un deterioro rápido de su condición que se traduce en bajos niveles de condición media de la red (Fig. 3). Los programas optimizados, por el contrario,

consideran fundamentalmente tratamientos de mantenimiento y preservación. Estos tratamientos se aplican cuando la condición de los pavimentos es buena o aceptable ($ICPU \geq 5$), por lo que la red presenta, en términos medios, mayores niveles de $ICPU$ que los obtenidos bajo la política reactiva.

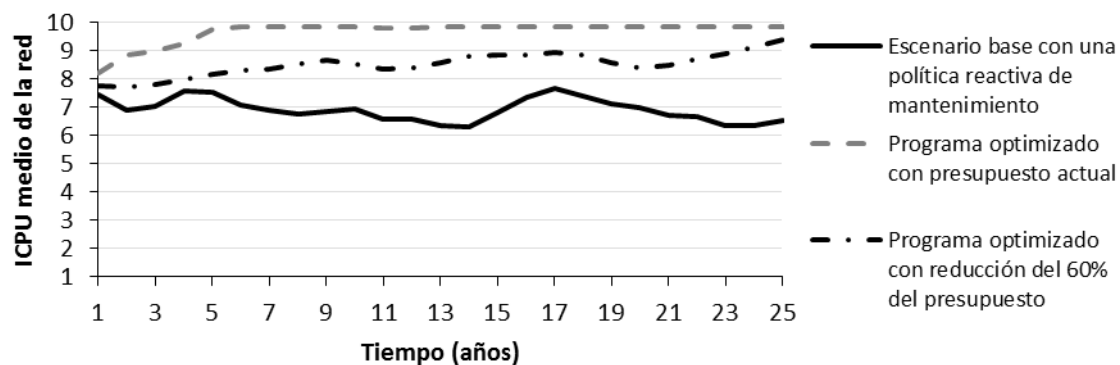


FIGURA 3 Condición media de la red en el periodo de análisis

En términos económicos se detectan también diferencias significativas entre los programas de mantenimiento analizados. La política reactiva requiere altos niveles de inversión para la rehabilitación de los pavimentos (Figura 4). Los programas optimizados, en cambio, consideran tratamientos de mantenimiento y preservación que tienen menores costos que los de rehabilitación. Esto permite que, incluso reduciendo el presupuesto en un 60%, el programa de mantenimiento optimizado resulte en un nivel de condición de la red mayor que el obtenido en el escenario de política reactiva. Adicionalmente a las reducciones del costo de mantenimiento, la herramienta propuesta permite diseñar programas de mantenimiento con una distribución temporal de costos más homogénea que la existente en la política actual (Figura 4).

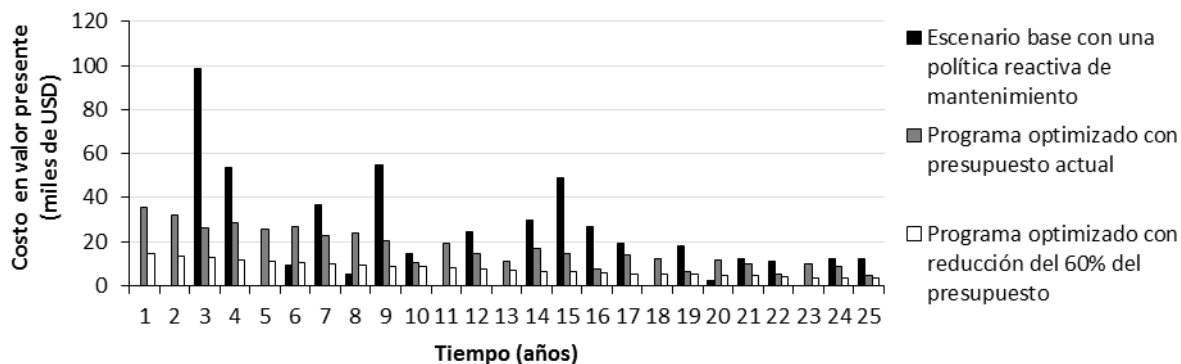


FIGURA 4 Flujo de costos de los programas de mantenimiento

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este artículo se presenta una herramienta heurística de optimización para resolver el problema de asignación de recursos para el mantenimiento de infraestructura. Basado en los resultados de la aplicación de esta herramienta a una red de pavimentos urbanos en Chile, se puede concluir que:

- La herramienta de optimización propuesta permite optimizar los recursos disponibles para el mantenimiento, resultando en niveles de servicio superiores a los obtenidos bajo una política reactiva.
- La evaluación de alternativas de mantenimiento considerando aspectos técnicos y económicos en el ciclo de vida de la infraestructura permite una asignación más eficiente de los recursos disponibles. Se obtienen así programas de mantenimiento que resultan en mayores niveles de servicio con costos inferiores a los derivados de la política reactiva.
- Los programas de mantenimiento optimizados consideran, mayoritariamente, tratamientos de preservación y mantenimiento que son aplicados cuando los pavimentos presentan condiciones buenas o aceptables. Se obtienen así mayores niveles de condición que el obtenido bajo una política reactiva.
- La aplicación de tratamientos de preservación y mantenimiento reduce los costos de mantenimiento de la red. Esto permite que, aun disminuyendo en un 60% el presupuesto disponible para mantenimiento, el programa optimizado presente un nivel de condición superior que el obtenido en el escenario de política reactiva.

Así mismo, se identifican las siguientes recomendaciones, las cuales se abordarán en futuras fases de la investigación:

- El método heurístico propuesto en este trabajo para la construcción de soluciones es susceptible de ser mejorado mediante un post-proceso de las soluciones obtenidas basado en estrategias más avanzadas tales como el GRASP o ACO.
- La aplicación de métodos de optimización para la gestión de pavimentos urbanos en Chile requiere calibrar el efecto derivado de la aplicación de los distintos tratamientos al caso chileno.
- El análisis de los tratamientos considerados en los programas óptimos de mantenimiento permitirá definir estrategias de mantenimiento más eficientes para la gestión de los pavimentos urbanos en Chile.
- La gestión de recursos de mantenimiento propuesta en este trabajo puede complementarse con un enfoque más sustentable mediante la inclusión de criterios ambientales, sociales, políticos e institucionales en la evaluación de alternativas.
- La integración de aspectos sustentables en la gestión de pavimentos urbanos y su implementación en un sistema de gestión requiere el estudio de distintos métodos para la optimización y/o priorización de alternativas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Fondef/Conicyt 2009 para la financiación del proyecto Fondef D09I1018 “Investigación y Desarrollo de Soluciones para la Gestión de Pavimentos Urbanos en Chile” y el Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales CONICYT/FONDAP/15110017. Se agradece también el apoyo recibido a través de las becas CONICYT-AGCI “Becas de doctorado nacional para estudiantes extranjeros en Chile 2013” (CONICYT-PCHA/Doctorado Nacional/2013-63130138).

REFERENCIAS

- [1] W. Uddin, R. C. G. Hudson, and R. C. G. Haas, *Public infrastructure asset management*. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- [2] ASCE, “ASCE 2013 Report Card for America’s Infrastructure,” 2013. [Online]. Available: <http://www.infrastructurereportcard.org>. [Accessed: 10-May-2014].
- [3] AEC, “Necesidades de inversión en conservación: Las carreteras muestran síntomas evidentes de un peligroso deterioro,” Asociación Española de la Carretera, Madrid, España, 2012.

- [4] D. N. Geoffroy, "Cost-effective preventive pavement maintenance," *NCHRP Synth. Highw. Pract.*, no. 223, 1996.
- [5] NAMS (National Asset Management Steering), *International Infrastructure Management Manual. Version 3.0*. Association of Local Government Engineering New Zealand Inc., 2006.
- [6] SADC, *Low-volume Sealed Roads Guidelines*. Gaborone, Botswana: Southern African Development Community, 2003.
- [7] A. Chamorro and S. Tighe, "Development of a Management Framework for Rural Roads in Developing Countries," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2093, pp. 99–107, Dec. 2009.
- [8] A. Chamorro, "Development of a Sustainable Management System for Rural Road Networks in Developing Countries," PhD. Thesis, University of Waterloo, Canada, 2012.
- [9] W. Chan, T. Fwa, and C. Tan, "Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. I: Formulation," *J. Transp. Eng.*, vol. 120, no. 5, pp. 693–709, 1994.
- [10] C. Torres-Machí, A. Chamorro, C. Videla, E. Pellicer, and V. Yepes, "An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level," *Sci. World J.*, vol. 2014, no. 524329, 2014.
- [11] P. Chootinan, A. Chen, M. R. Horrocks, and D. Bolling, "A multi-year pavement maintenance program using a stochastic simulation-based genetic algorithm approach," *Transp. Res. Part Policy Pract.*, vol. 40, no. 9, pp. 725–743, 2006.
- [12] S. Meneses and A. Ferreira, "Pavement maintenance programming considering two objectives: maintenance costs and user costs," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 206–221, 2013.
- [13] V. Yepes and J. Medina, "Economic Heuristic Optimization for Heterogeneous Fleet VRPHESTW," *J. Transp. Eng.*, vol. 132, no. 4, pp. 303–311, 2006.
- [14] F. J. Martínez, F. González-Vidoso, A. Hospitaler, and V. Yepes, "Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections," *Comput. Struct.*, vol. 88, no. 5–6, pp. 375–386, 2010.
- [15] A. R. M. Rao and P. P. Shyju, "A Meta-Heuristic Algorithm for Multi-Objective Optimal Design of Hybrid Laminate Composite Structures," *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 149–170, 2010.
- [16] C. Torres-Machi, V. Yepes, J. Alcalá, and E. Pellicer, "Optimization of high-performance concrete structures by Variable Neighborhood Search," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 90–99, 2013.
- [17] C. Torres-Machi, A. Chamorro, V. Yepes, and E. Pellicer, "Models and actual practices in the economic and environmental evaluation for the sustainable management of pavement networks," *Rev. Constr.*, vol. in press, 2014.
- [18] MINVU - Ministerio de Vivienda y Urbanismo, *Diagnostico Vial - Región Metropolitana, Cobertura y Déficit de Pavimentación. Unidad de Pavimentación.*, Dpto. Planes y Programas. Santiago, Chile, 2008.
- [19] A. Osorio, A. Chamorro, S. L. Tighe, and C. Videla, "Calibration and validation of a condition indicator for managing urban pavement networks," in *Transportation Research Board Conference Proceedings*, Washington D.C., USA., 2014, vol. 14–3216, pp. 1–18.
- [20] MINVU (Ministerio de Urbanismo y Vivienda), *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*. Santiago, Chile, 2008.
- [21] A. Osorio, A. Chamorro, S. L. Tighe, and C. Videla, "Development of performance models of urban pavements for network analysis," presented at the Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington, D.C., USA, 2015, vol. Enviado.
- [22] FHWA, "Memo: Pavement Preservation Definitions," 2005. [Online]. Available: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/preservation/091205.cfm>. [Accessed: 14-Jan-2014].

- [23] F. Giustozzi, M. Crispino, and G. Flintsch, "Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, no. 4, pp. 409–419, 2012.
- [24] R. G. Hicks, S. B. Seeds, and D. G. Peshkin, "Selecting a preventive maintenance treatment for flexible pavements," FHWA, Washington, D.C., USA, 2000.
- [25] C. Wei and S. Tighe, "Development of Preventive Maintenance Decision Trees Based on Cost-Effectiveness Analysis: An Ontario Case Study," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1866, pp. 9–19, 2004.
- [26] P. Chan and S. L. Tighe, "Quantifying Pavement Sustainability in Economic and Environmental Perspective," presented at the Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 2010.
- [27] MIDEPLAN, *Precios sociales para la evaluación social de proyectos*. Santiago, Chile: Ministerio de Planificación, 2012.