

Sierra-Varela, L. & Filun, A. (2024). Método multicriterio para la priorización de caminos rurales sostenibles. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción* (IX ELAGEC 2024).

METODO MULTICRITERIO PARA LA PRIORIZACION DE CAMINOS RURALES SOSTENIBLES

Leonardo A. Sierra-Varela ¹ – leonardo.sierra@ufrontera.cl

Alvaro Filun ² – a.filun01@ufromail.cl

¹*Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.*

²*Magister en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.*

RESUMEN

En América Latina se han impulsado programas para la construcción de caminos rurales que permitan un adecuado rodado libre de polvo, del barro y reducción de ruido. Los criterios de priorización de inversión pública no se ajustan a las necesidades de infraestructura rural. En efecto en lo rural las condiciones territoriales como la apertura a los mercados campo-ciudad, el acceso a la educación y la salud, el resguardo del medioambiente, la cultura e identidad toman más sentido que los tiempos de transporte o el volumen de tránsito. De esta forma, se propone un método de evaluación multicriterio para priorizar la mejora de caminos rurales que maximice su contribución al desarrollo territorial sostenible. A través de un análisis de toma de decisión multicriterio y multiobjetivo se optimizan los caminos con mayor contribución sostenible en base a una distancia de Manhattan. Un mapa cognitivo difuso analiza el comportamiento dinámico de los caminos óptimos. A partir de esta propuesta se seleccionan 15 caminos de una muestra de 101 en la Región de la Araucanía – Chile. Los resultados son consistentes para ambas distancias de priorización, considerando 16 criterios, 27 indicadores y las dimensiones social, ambiental, técnica y económica.

PALABRAS CLAVE

Caminos rurales; Sostenibilidad; Multicriterio; Multiobjetivo; Planificación territorial

INTRODUCCIÓN

Los caminos rurales juegan un papel crucial en el desarrollo de la sociedad en América Latina. Los sectores rurales son los más vulnerables con limitaciones de acceso a la educación, la salud y los mercados (Pérez, 2020). El desarrollo rural depende de la interacción y el mejoramiento simultáneo de la infraestructura rural, los sectores productivos y servicios económicos, y el hábitat natural y social (Lupano 2013). Inclusive el acceso vial puede compensar la falta de otros activos públicos y privados en la zona (Espinet et al. 2017). En este sentido, la toma de decisión de inversión de infraestructura de caminos es trascendental para el desarrollo rural sostenible de un territorio y no está suficientemente considerada (Smith, Gordon, Meadows and Zwick, 2001; Mattinzioli et al, 2020).

Al 2023 Chile cuenta con una red de 88210 km de carreteras de las cuales el 52,8% aún es de tierra o ripio. La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos son las regiones con mayor déficit de caminos pavimentados del país (Dirección de Vialidad- MOP, 2023). En este contexto, el 2003 se crea en Chile el programa de Caminos Básicos para el mejoramiento vial que busca la asignación de recursos de conservación del MOP, para caminos que normalmente no cuentan con una demanda de tráfico suficiente que justifique su inversión. Sin embargo, esta asignación de recursos carece de criterios definidos, claramente medibles, ni de una estructura de evaluación que defina objetivamente su aporte al territorio rural (CGR 2018). El desarrollo rural obedece a un conjunto holístico de factores relacionados no suficientemente reconocidos en todos los contextos para orientar una toma de decisión sostenible. En efecto, en América Latina la priorización y evaluación de infraestructura rural no se ajusta a los patrones convencionales de los sistemas nacionales de inversión de infraestructura pública basada en el análisis de costo beneficio (Pérez, 2020). En este caso los términos monetarios y factores de ahorro de tiempo pierden sentido en contextos rurales. Además, la cultura, y factores sociales que sí tienen trascendencia, habitualmente no son considerados en los sistemas tradicionales (Shen et al. 2011). En esta línea, el Programa de Caminos Básicos en Chile lleva construido más de 15.000 km con resultados en que se destaca la mejora en la calidad de vida de los habitantes del entorno, menores costos de transporte, reducción de la polución, mejora de la confortabilidad de conducción, acceso al paisaje, potenciación del turismo rural y mejora del desarrollo local (Leal 2016).

En la actualidad la sostenibilidad constituye una ciencia multidisciplinar con un enfoque holístico que integra la totalidad de los problemas interconectados (Vilchés et al. 2014). En estos casos la consideración de variables sostenibles debiese estar asociada a las necesidades sociales, culturales y socioeconómicas, sin afectar al medioambiente y bajo soluciones técnicamente viables. Diaz-Sarachaga et al. (2016) propone que un desarrollo sostenible implica un sistema integrado de variables sociales, económicas, ambientales y técnicas. En esta línea, se ha propuesto un conjunto de criterios de evaluación relacionados con la contribución de caminos rurales a la sostenibilidad territorial (Sierra et. al. 2021). A través de un conjunto de especialistas multidisciplinarios y la lógica neutrosófica se han determinado 23 criterios sobre la base de un conjunto de caminos rurales de la región de La Araucanía – Chile. Parte de estos criterios conforman el modelo de evaluación para el presente artículo. Sin embargo, un modelo de evaluación que aporte

a la toma de decisión, requiere de un mecanismo para representar la contribución de los caminos rurales a la sostenibilidad territorial de corto y largo plazo.

Algunos autores han propuesto algunos mecanismos para evaluar la sostenibilidad de las infraestructuras. Zhou, et al (2021) determina el desarrollo sostenible de caminos rurales a través del método de entropía. El estudio se focaliza en el aporte de corto plazo al desarrollo agrícola sostenible en provincias de China. Singh et al. (2022) se focaliza en los impactos socioeconómicos directos e indirectos de caminos rurales en India. Para ello basado en un conjunto de datos, aplican un análisis de georegresión y de componentes principales. Además, algunos Sustainability Rating Systems tales como ENVISION, CEEQUAL o IS son métodos que pre condicionan puntuaciones o créditos para el cumplimiento de criterios sostenibles. En estos casos el contexto es definido como un estándar, y no se considera la participación, ni variables externas que modifique la contribución en el ciclo de vida de la infraestructura (Díaz-Sarachaga et al. 2016). En la práctica profesional, el Análisis Costo Beneficio es un método convencional para la evaluación de infraestructuras. Sin embargo, presenta dificultades para tratar las externalidades no monetarias y no permite la participación en el proceso de evaluación (Munda 2004). La evaluación del ciclo de vida (ACV) es una estructura metodológica con un reciente desarrollo, la cual requiere de una base de datos o inventario para su funcionamiento (van Haaster et al. 2017). En complemento, se han propuesto bases de datos que complementan el método como por ejemplo los “social hotspot” que expresan el riesgo social por país y sector productivo. Sin embargo, actualmente la información de estas bases de datos solo integra algunos países desarrollados y se hace difícil extrapolarla a contextos específicos (van Haaster et al. 2017).

Por su parte, los métodos multicriterios son los más comúnmente usados en la evaluación de proyectos de forma multidimensional y participativa (Munda 2004). Los métodos multicriterio permiten en un solo modelo tratar aspectos de diferente naturaleza (cuantitativos y cualitativos), interconectarlos y complementar con otras técnicas apropiadas para lograr la mejor representación de cada variable. Bajo este enfoque se reportan estudios que han utilizado métodos multicriterio para priorizar la mejora de caminos rurales con enfoques estáticos basados en la reducción de la pobreza, mantenimiento, y aspectos técnicos y de seguridad en el corto plazo (Naimanye and Whiteing 2016; Nautiyal and Sharma 2021; Vilke et al. 2018). Otros autores han seleccionado los tipos de pavimentación en consideración de las características físicas y medioambientales de caminos (Villegas-Flores et al. 2023). En complemento métodos multiobjetivo y análisis de distancias han permitido optimizar y priorizar infraestructuras que cumplen con objetivos sustentables que no son transables, evitando la compensación (Sierra et al. 2018; Yepes et al. 2015).

En el transcurso del ciclo de vida del camino (diseño, construcción y operación) los cambios de utilidad, de percepción y tecnológicos inciden en el valor de las variables de la sostenibilidad, ampliamente arraigadas al contexto (Zhang et al. 2014). Además, las variables de la sostenibilidad no son independientes de los efectos de otras variables de los ámbitos sociales, económicos, ambientales o técnicos que se susciten en el ciclo de vida de un proyecto (Vanclay et al 2015). De esta forma, bajo un enfoque multicriterio o aún se requiere incluir el efecto dinámico de la relación causal de las variables sociales,

económicas, técnicas y ambientales para determinar el comportamiento interactivo de la sostenibilidad.

En contextos rurales la falta de información es una limitante para la toma de decisiones y para las aplicaciones metodológicas. En este sentido los procesos de participación pueden aportar a la construcción de modelos lógicos basados en sistemas blandos que expliquen los impactos en contextos rurales (Vanclay et al. 2015; Sierra et al. 2018); Saeedi et al. 2022). De esta forma, los mapas cognitivos difusos (MCD) son un mecanismo basado en la teoría de grafos y compatible con los sistemas de computación blandos y redes neuronales. Los MCD ayudan a capturar y operar las interacciones dinámicas que ocurren dentro de un contexto bajo la participación de sus actores claves (Papageorgiou, et al. 2020; Félix et al. 2019). Estos modelos ya se han usado para analizar los impactos dinámicos en la administración de proyectos de construcción y en la evaluación de sostenibilidad de infraestructuras urbanas (Gao, et al. 2024; Chen et al. 2024).

De esta forma, si bien existe un modelo conceptual de criterios que representan el aporte de los caminos básicos a la sostenibilidad territorial, los mecanismos para estimar la contribución actual y del largo plazo aún requieren un estudio. En este sentido, las técnicas multicriterio y multiobjetivo son un punto de partida para operar un modelo que represente las dimensiones de la sostenibilidad. En adición, un modelo cognitivo difuso puede representar comportamientos dinámicos superando la dificultad de acceso a bases de datos cuantitativos a través de la participación. Con todo lo anterior, esta investigación propone un mecanismo de evaluación y priorización de caminos rurales en consideración del aporte estático y dinámico a la sostenibilidad territorial. En los siguientes párrafos se presentan los métodos de trabajo, los resultados y las principales conclusiones de esta investigación.

METODOLOGÍA

MECANISMO DE EVALUACIÓN

De acuerdo a los propósitos de este paper se presentan los métodos para evaluar la contribución estática y dinámica de los caminos al desarrollo territorial sostenible. Este mecanismo requiere del soporte de un modelo de evaluación multicriterio determinada por las condiciones del contexto, las características del tipo de infraestructuras y de su localización. A partir de este modelo se desprende un mecanismo de evaluación estático (A), dinámico (B) y una priorización (C). El método estático involucra un conjunto de indicadores y criterios jerárquicos ponderados que permiten estimar la contribución de cada dimensión de la sostenibilidad (ambiental, técnico, económica y social) en un tiempo actual (t_0). El método dinámico considera las interacciones de causalidad entre cada uno de los indicadores. Esto permite calcular el efecto progresivo de las interacciones en cada tiempo k debido al efecto que tienen unos indicadores sobre otros, a partir de los valores iniciales estáticos y un conjunto optimizado de caminos. A partir de comportamiento dinámico se procesan los indicadores en cada t_k para priorizar a los caminos seleccionados de acuerdo a su distancia a un ideal y determinar su comportamiento temporal. En la Figura 1 se ilustra el método de evaluación en concordancia con las etapas A, B y C.

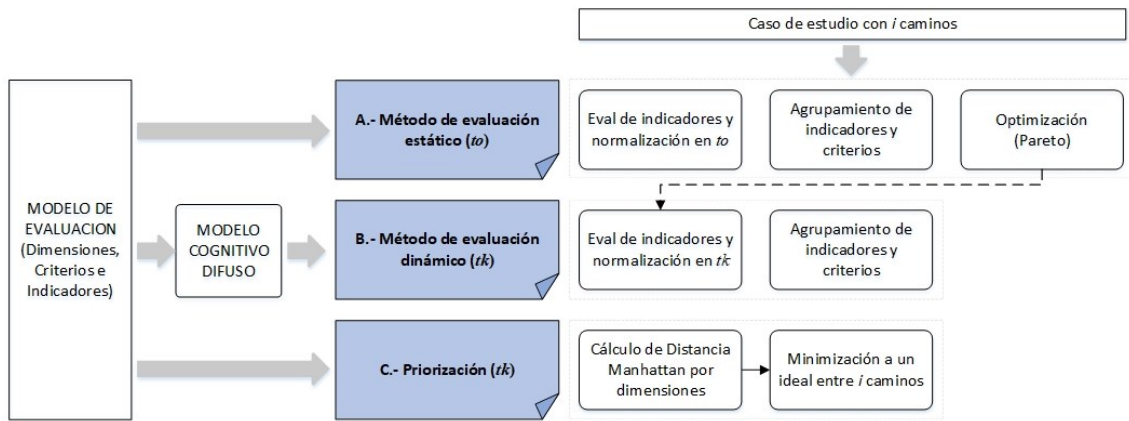


Figura 1. Método de evaluación estático – dinámico de caminos rurales

De acuerdo a la Figura 1, para emprender con la evaluación estática es necesario un caso de estudio con una base de datos de caminos que dé respuesta a los indicadores de la estructura de evaluación. En este caso se consulta la base de datos de indicadores de caminos rurales para la región de La Araucanía-Chile propuesta por Sierra (2021). A partir de esta información los indicadores normalizados son agregados por criterio y dimensión en consistencia con los pesos propuestos por Sierra et al. (2021) y la técnica multicriterio SAW (Podvezko 2011). Con la contribución a cada dimensión de la sostenibilidad se implementa una optimización multiobjetivo para el conjunto de caminos del caso de estudio. A través de la técnica de óptimo de Pareto es posible reducir el conjunto de caminos a aquellas infraestructuras eficientes que garantizan que no existe otra opción de camino tal que mejore una de sus dimensiones sin reducir al menos uno de los otros (Yoo and Harman, 2010).

En este punto es necesario configurar un Mapa Cognitivo Difuso (MCD) que surge de los indicadores del modelo de evaluación y un panel de especialistas multidisciplinarios. En este modelo se determina la interrelación causa-efecto entre indicadores. Los MCD son técnicas de computación blanda que combinan lógica difusa y redes neuronales. Esta técnica permite simplificar un entorno de decisión complejo al tiempo que integra las diferentes perspectivas de los actores mediante un enfoque semi cuantitativo con información incompleta y vaga (Papakostas, et al. 2012). De esta forma, se representa una red en que cada nodo ilustra el valor normalizado $[0,1]$ de un indicador en t_0 . Los indicadores se interconectan con pesos difusos entre $[-1,1]$ que representan la fuerza de una relación causal y el sentido del impacto. El peso de la relación surge a partir de la aplicación de un sistema de inferencia borrosa (SIB) de tipo Mandani y una distribución triangular. Un SIB se define como un sistema experto con razonamiento aproximado que mapea un vector de entradas a una salida única escalar (Maguiña 2010). Con apoyo de software Matlab R2021b, la herramienta *Fuzzylogic* y la teoría de centro de gravedad se agrupan las respuestas de 45 expertos multidisciplinarios para obtener pesos difusificados de relación entre indicadores. Para mayores antecedentes de la aplicación del SIB referirse a Maguiña, (2010) y Hurtado, (2014).

A partir de la determinación de los caminos Pareto-óptimos para un tiempo t_0 , y el MCD el análisis dinámico busca evaluar el comportamiento del conjunto de caminos óptimos en diferentes tiempos t_k . En cada tiempo se calcula el valor A_r de cada indicador C_r , agregando las influencias de todos los demás indicadores sobre este y aplastando el impacto global mediante una función barrera f , según la Ecuación [1] (Nasirzadeh, et al. (2019).

$$A_r^{t+1} = f\left(A_r^t + \sum_{r=1, r \neq j}^n W_{jr} \times A_j^t\right) \rightarrow f(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}} \quad \text{Ec. [1]}$$

Donde A_r^{t+1} corresponde al valor del indicador C_r en el paso de simulación $t+1$. A_r^t es el valor del indicador C_r y A_j^t corresponde al valor del indicador C_j ambos en el tiempo t . W_{jr} es el peso de la interconexión desde el indicador C_j al indicador C_r . Finalmente, f muestra la función umbral sigmoide que permite el traspaso de un tiempo a otro (Stylios, et al., 2008). En este caso, el parámetro λ controla la pendiente de la curva. El proceso de inferencia MCD finaliza cuando se alcanza la estabilidad. De esta forma, a través del software FCM Expert se obtiene el MCD y se aplica un análisis dinámico por cada camino i . Análogamente al procedimiento emprendido en t_0 cada indicador puede ser agregado en criterios y dimensiones sostenibles para cada tiempo t_k y cada camino i .

A partir de este punto, los caminos son priorizados de acuerdo a la distancia mínima a un punto ideal. Para ello se emplea la distancia de Manhattan de acuerdo a la ecuación [2]. Esta distancia representa el modelo matemático de priorización; en el cual d_i es la suma ortogonal de cada dimensión de la sostenibilidad. Luego los caminos con mínima distancia de Manhattan son elegibles. Específicamente TC_i, SC_i, EnC_i and EcC_i representan los valores de contribución técnica, social, ambiental y económica, respectivamente para cada camino i . Los valores $\lambda_T, \lambda_S, \lambda_{En}, \lambda_{Ec}$ son los pesos de importancia por cada dimensión; los TC^*, SC^*, EnC^* y EcC^* representan la contribución de la solución ideal, y los valores TC_*, SC_*, EnC_* and EcC_* la solución anti-ideal para las dimensiones técnica, social, ambiental y económica, respectivamente.

$$\text{Min}_{t_k} d_1; \quad d_{1i} = \lambda_T \left(\frac{TC^* - TC_i}{TC^* - TC_*} \right) + \lambda_S \left(\frac{SC^* - SC_i}{SC^* - SC_*} \right) + \lambda_{En} \left(\frac{EnC^* - EnC_i}{EnC^* - EnC_*} \right) + \lambda_{Ec} \left(\frac{EcC^* - EcC_i}{EcC^* - EcC_*} \right) \quad \text{Ec. [2]}$$

CASO DE ESTUDIO

Un conjunto de 101 caminos básicos rurales de la región de La Araucanía - Chile se ha propuesto como caso de estudio. La región de La Araucanía tiene una superficie de 31.842 Km², 32 comunas y una población rural de 281.127 personas (32.3% población regional). Al año 2023 la red de caminos de la región alcanza el 13,6% de la red nacional y de ellos el 75,6% (9.060 Kms) corresponden a caminos que tienen una rodadura en grava o tierra. Esto representa la mayor cantidad de caminos no pavimentados a nivel nacional (Dirección de Vialidad, 2023). Sobre un universo de 119 proyectos de caminos básicos regionales ejecutados entre el año 2003 y 2017 se determina una muestra probabilística de 101 proyectos (976 Kms) a un 95% de nivel de confianza. La muestra de caminos cae dentro de la categoría de camino básico por conservación según el Ministerio de Obras Publicas de Chile (Dirección de Vialidad, 2017); y está distribuida en ocho zonas de desarrollo territorial para la región tal como se ilustra en la Figura 2. La muestra incluye caminos con capa de rodadura en grava (62%), y doble tratamiento superficial asfálticos con distinto nivel de deterioro (48%). El 100% de la muestra presenta un tránsito medio diario anual que no supera los 150 vehículos/día. Los caminos apoyan la conectividad intrarregional entre localidades rurales o entre localidad rural y ciudad. Los grupos poblacionales residentes dentro del área de influencia rural de cada camino se concentran el rango de 425 a 1390 habitantes. Los caminos atienden necesidades básicas de la población rural (acceso a escuelas básicas, postas salud rural, acceso a ciudades

intermedias), vías alternativas para acceder a espacios de esparcimiento (ecoturismo), acceso agrícola y/o ganadero, y accesos alternativos a pasos fronterizos.

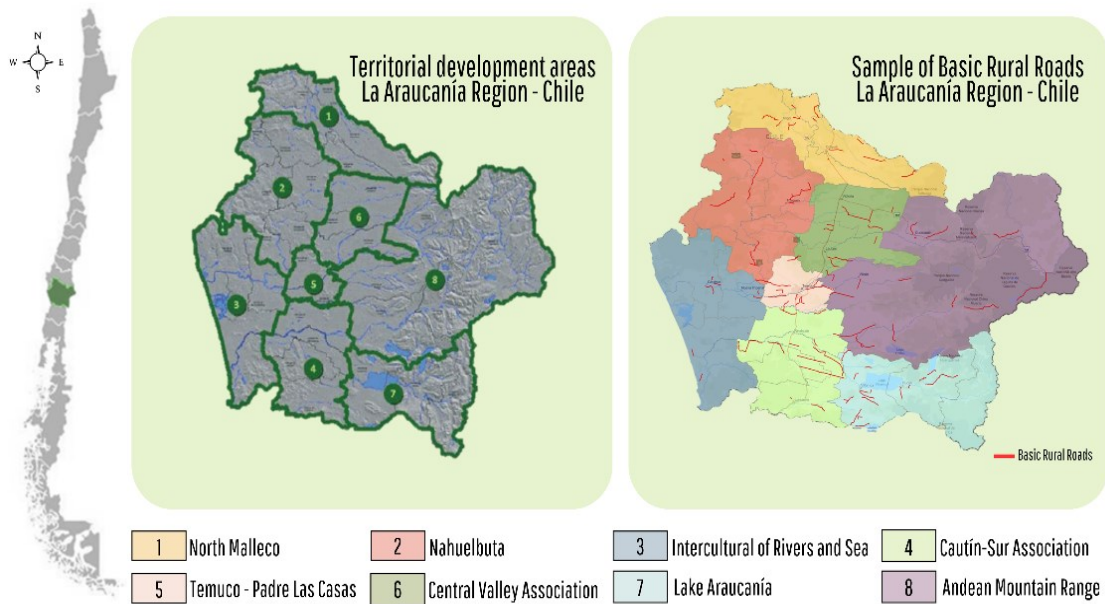


Figura 2: Localización de los 101 caminos del caso de estudio (Sierra et al. 2021)

El caso de estudio se asocia a un modelo de evaluación compuesto por 16 criterios y 27 indicadores que integran las dimensiones sostenibles técnica, económica, ambiental y social requeridas para el desarrollo rural de un territorio. Con ello, fuentes de información secundarias, visitas de campo y la aplicación de una encuesta complementaria conforman una base de datos de caminos para la región (Sierra 2021). Para mayores antecedentes de los criterios de evaluación y sus pesos de trascendencia referirse a Sierra et al. (2021).

RESULTADOS

A partir de la implementación del mecanismo propuesto y los antecedentes del caso de estudio se determinan las contribuciones de los 101 caminos a las dimensiones de la sostenibilidad. En la Figura 3 (derecha) se identifican los resultados dimensionales de la muestra en un t_0 ; en que las medianas de contribución no sobrepasan el 20%. Así también se evidencian valores extremos de caminos que sobrepasan la media general. En efecto, las contribuciones específicas de cada camino (criterios e indicadores) se ven compensadas a la baja en el cálculo de las contribuciones por dimensión al tener en cuenta una compensación de todos los criterios involucrados en el modelo de evaluación. En este sentido, la Figura 3 (izquierda) ilustra la situación del camino Liucura-Icalma en que solo el 38% de sus criterios de evaluación sobrepasan el 50% de contribución.

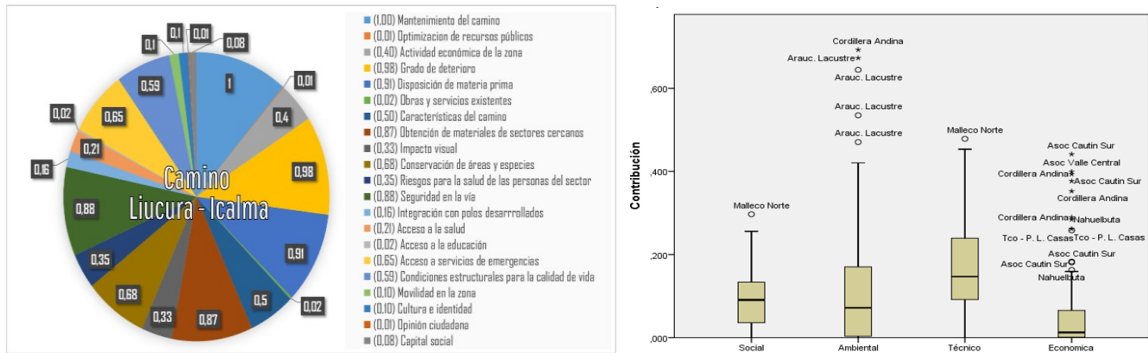


Figura 3. Contribución a la sostenibilidad territorial de caminos rurales. (Izquierda) Contribución por criterio para un camino específico. (Derecha) Contribución por dimensión de una muestra de 101 caminos

De acuerdo con la contribución a cada dimensión de la sostenibilidad en un análisis estático la muestra de caminos es optimizada. De este proceso surgen 15 caminos Pareto-óptimos en primera capa; que corresponden a una primera selección de caminos a priorizar. En la Figura 4 se presenta en verde los 15 caminos de primera capa que constituyen un extracto de la Frontera de Pareto de la dimensión social frente al resto de las dimensiones.

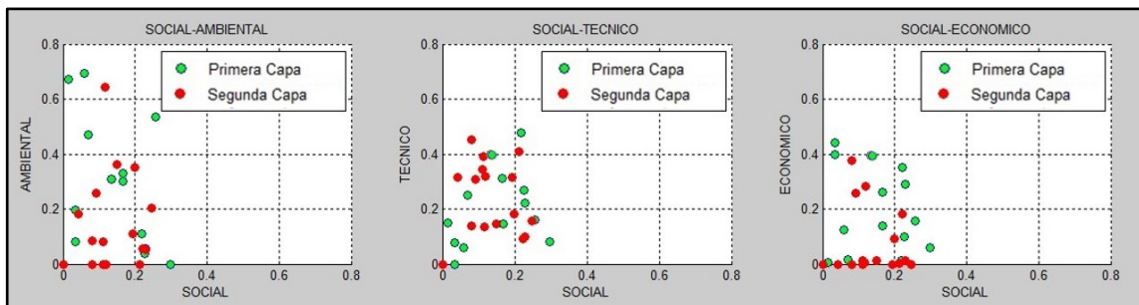


Figura 4. Caminos optimizados de acuerdo al aporte de la dimensión social frente otras dimensiones de sostenibilidad

En la Figura 5 se representa la matriz de interrelación difusificada que determina la construcción del MCD y agrega la participación de 45 especialistas multidisciplinares. De este modo cada fila de indicador impacta con cada columna de acuerdo al peso difusificado que se indica en su interior; el signo (+ -) del peso representa el sentido a favor o en contra de un indicador fila sobre otro en columna. De acuerdo con la matriz del MCD, la E_c [1] y los valores en t_0 de cada indicador por cada camino i se determina el valor de los indicadores para cada tiempo t_k . La estabilidad general de los indicadores para la muestra de caminos se logra en 9 tiempos.

INDICADORES	IND. 1	IND. 2	IND. 3	IND. 4	IND. 5	IND. 6	IND. 7	IND. 8	IND. 9	IND. 10	IND. 11	IND. 12	IND. 13	IND. 14	IND. 15	IND. 16	IND. 17	IND. 18	IND. 19	IND. 20	IND. 21	IND. 22	IND. 23	IND. 24	IND. 25	IND. 26	IND. 27	
IND. 1	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0	-0,5	-0,25	0,5	0	0,75	0,75	0,5	0	0,75	0,25	0	0,083	0,083	0,5	0	-0,5	
IND. 2	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,92	0,92	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0,92	0	0
IND. 3	0,25	0,25	0	0	-0,75	0,92	0,92	0,92	0,92	0	0	0	0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0	0	0	0	0,92	0,75	0,92	0,75	-0,5	
IND. 4	0,75	0	0	0	-0,25	0	0,083	0	0	0	0	0	0	-0,25	-0,25	-0,08	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0,25	0,5	0	
IND. 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,25	0	0
IND. 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,92	-0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,75	0	0
IND. 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,92	-0,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,25	0	0
IND. 8	0,25	0,75	0	0	-0,25	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
IND. 9	0	0	0	0	-0,5	0	0	0	0	0	0	-0,5	-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0	0
IND. 10	0	0,75	-0,5	0	-0,75	0,25	0,5	0,92	0,92	0	0	0	0	-0,75	-0,75	-0,5	-0,5	-0,5	0	0	0	0	0,75	0,92	0,92	0,5	-0,75	
IND. 11	0	0	0	0,083	-0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,75	0,75	0,25	-0,5
IND. 12	0,5	0	-0,75	0	0,75	-0,8	-0,75	-0,75	-0,75	0	-0,5	0	0	0	0	-0,5	-0,5	-0,5	0	0	0,5	0	-0,25	-0,75	-0,92	-0,75	0	
IND. 13	0,25	0	-0,75	0	0,75	-0,8	-0,75	-0,75	-0,75	0	-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	-0,25	-0,5	-0,5	0	0	
IND. 14	0	0	0	0	-0,25	0	0	0	-0,08	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,25	0	0	0	0	0	0	0,75	0,25	0	0	
IND. 15	0	0	0	0	-0,08	0	0	-0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0,75	0,25	0	0
IND. 16	0,082	0,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,5	0	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0	0	0,92	0	0
IND. 17	0,082	0,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,92	0	0
IND. 18	0,082	0,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0
IND. 19	0	0	0,75	0	0	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0,5	0	-0,75	0	0	0	0	0	0	0,25	0,75	0	0,75	0,75	0,92	0,5	0	
IND. 20	0	0	0,75	0	0	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0,5	0	0	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,5	0,92	0,5	0,5
IND. 21	0	0	0,75	0	0,083	-0,8	-0,75	-0,75	-0,75	0	-0,5	0,92	0,92	0	0	0	0	0	0	-0,25	0	-0,5	-0,75	-0,75	-0,5	-0,5	-0,5	
IND. 22	0	0	-0,5	0	0,75	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0	0	0,75	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0,75	0	-0,5	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	
IND. 23	0	0	0	0	0	-0,3	-0,25	-0,25	-0,25	0	0	0,92	0,75	-0,75	-0,92	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,5	-0,75	-0,75	-0,75	
IND. 24	0	0,5	-0,08	0,5	-0,92	0	0	0	0	0	0,5	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,75	-0,5	
IND. 25	0	0,75	-0,75	0,5	-0,92	-0,3	-0,25	0	-0,5	0,5	0,75	0,25	0,083	-0,25	-0,25	-0,92	-0,92	-0,92	0	0	0,083	0	0,75	0	0,75	-0,75	-0,75	
IND. 26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IND. 27	0	0	0	0	0	-0,3	-0,25	-0,25	-0,25	0	-0,3	0	0,5	-0,5	-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-0,5	0,75

(IND. 1) Centros de reunión comunitaria. (IND. 2) Reconocimiento de valores culturales. (IND. 3) Conectividad local y comunidades indígenas. (IND. 4) Nivel de concentración de la población. (IND. 5) Calidad sanitaria. (IND. 6) Tiempo ponderado de acceso a servicios de seguridad policial. (IND. 7) Tiempo ponderado de acceso a servicios de bomberos. (IND. 8) Acceso a infraestructura educacional. (IND. 9) Acceso a establecimientos de salud. (IND. 10) Diversidad e importancia de la Intersección con otros caminos. (IND. 11) Centros proveedores de servicios y bienes. (IND. 12) Condiciones de inseguridad del contexto. (IND. 13) Condiciones técnicas de inseguridad del trazado. (IND. 14) Impacto de la reducción de la contaminación del camino. (IND. 15) Impacto de la reducción del ruido del camino. (IND. 16) Resguardo de las zonas protegidas. (IND. 17) Resguardo de la Flora. (IND. 18) Resguardo de la Fauna. (IND. 19) Geometría del camino. (IND. 20) Tipo de carpeta existente. (IND. 21) Condiciones desfavorables para la construcción. (IND. 22) Condiciones climáticas desfavorables. (IND. 23) Ejes equivalentes. (IND. 24) Potencialidad productiva. (IND. 25) Potencialidad turística. (IND. 26) Rentabilidad del camino. (IND. 27) Mantenimiento del camino.

Figura 5. Matriz de interrelación de indicadores disfuncionados para la construcción MCD de caminos rurales sostenibles.

En coherencia con los resultados de los indicadores para cada camino i y cada tiempo t_k se determinan el valor de los criterios y dimensiones de acuerdo al modelo de evaluación. A través de la Ec[2] es determinada la distancia de Manhattan que unifica la cercanía de cada camino a un punto ideal de máxima contribución a la sostenibilidad territorial. De esta forma son priorizados los caminos en cada t_k en función de la cercanía al punto ideal; es decir, menor distancia de Manhattan. En la Figura 6 se representa el comportamiento de los 15 caminos seleccionados respecto de la distancia de Manhattan para cada t_k . Se identifica que el comportamiento de largo plazo difiere de la priorización en un t_0 , estando influenciado por la interacción de indicadores y criterios de evaluación. Cabe considerar que el comportamiento de largo plazo está sujeto a la fuerza de las relaciones entre indicadores determinados en un tiempo actual y que son susceptibles de ajustes futuros de acuerdo a los avances tecnológicos, políticas y percepciones. En este caso el camino S907 está fuertemente influenciado a partir del t_1 por las dimensiones Social y Económica y en el caso del camino R35 está influenciados por las dimensiones Ambiental y Económica teniendo buenos resultados a partir del t_2 .

	Camino 1	Camino 2	Camino 3	Camino 4	Camino 5	Camino 6	Camino 7	Camino 8	Camino 9	Camino 10	Camino 11	Camino 12	Camino 13	Camino 14	Camino 15
DISTANCIA	R791	R955	S61	S61	S39	R35	R226	R825	R260	S65	S592	S907	S919	S887	S921
Tiempo 0	0,4546	0,3474	0,5260	0,6271	0,5323	0,7012	0,6460	0,6817	0,4448	0,6464	0,6741	0,5653	0,5877	0,7661	0,5585
Tiempo 1	0,3742	0,3585	0,6915	0,6755	0,5728	0,8479	0,4069	0,6875	0,2954	0,5923	0,8494	0,2295	0,4946	0,5259	0,4799
Tiempo 2	0,3645	0,3805	0,4401	0,2986	0,2612	0,3647	0,2833	0,4248	0,3779	0,6472	0,7884	0,0803	0,4551	0,5127	0,4250
Tiempo 3	0,4404	0,5163	0,4526	0,2755	0,2569	0,2442	0,3294	0,4558	0,4601	0,7452	0,7500	0,0486	0,4684	0,5738	0,4982
Tiempo 4	0,5643	0,6647	0,5441	0,3423	0,3167	0,2099	0,4199	0,4894	0,5592	0,8058	0,7500	0,0675	0,5374	0,6133	0,5868
Tiempo 5	0,6766	0,7529	0,5936	0,3868	0,3705	0,1853	0,4887	0,5107	0,6487	0,8255	0,7500	0,0783	0,5826	0,6406	0,6330
Tiempo 6	0,7310	0,7635	0,6101	0,3844	0,3992	0,1761	0,5281	0,5271	0,6556	0,8229	0,7500	0,0813	0,6205	0,6316	0,6938
Tiempo 7	0,6883	0,7287	0,5218	0,3275	0,467	0,1178	0,5259	0,4795	0,6214	0,712	0,7500	0,0904	0,6126	0,6063	0,6552
Tiempo 8	0,6589	0,8206	0,5118	0,4845	0,4072	0,0628	0,6795	0,4301	0,5260	0,8281	0,6504	0,0003	0,6154	0,7327	0,6574
Tiempo 9	0,9088	0,8892	0,9460	0,8571	0,7834	0,0628	0,8020	0,8024	0,9483	0,8162	0,8815	0,0005	0,8634	0,7834	0,8815
Tiempo 10	0,9088	0,8892	0,9460	0,8571	0,7834	0,0628	0,8020	0,8024	0,9483	0,8162	0,8815	0,0005	0,8634	0,7834	0,8815

SIMBOLOGÍA



Figura 6. Comportamiento dinámico de la contribución al desarrollo territorial sostenible de caminos básicos rurales - Región de La Araucanía.

DISCUSIÓN

A partir de los resultados del mecanismo propuesto se determinan las contribuciones a la sostenibilidad técnica, económica, ambiental y social de una muestra de 101 caminos cuyos resultados no superan el 20% de contribución (Figura 3). En efecto, socialmente los caminos regionales se vieron limitados debido a la falta de reconocimientos de elementos culturales dentro de su área de influencia, en su mayoría no permiten la accesibilidad entre localidades indígenas, y que no permiten la accesibilidad a servicios de educación, salud o de emergencia. En esta línea, la dimensión ambiental de los caminos tampoco da garantía del aporte de la reducción en el ruido y dispersión de material particulado, como tampoco en los cambios del paisaje del entorno. Análogamente, la escasez de aridos existentes en la zona, la ausencia de obras de saneamiento que complemente los servicios de transporte y el desajuste de los trazados merman la contribución técnica de los caminos de la muestra. Similarmente, lo económico se ve limitado debido a la baja rentabilidad y costosas mantenciones que afectan bidireccionalmente el desarrollo agrícola y el turismo. Estos resultados son consistentes con estudios previos del equipo de investigación en que los criterios de mayor peso según expertos multidisciplinarios de la región son aquellos que los caminos no logran demostrar una evidencia que justifique su contribución (Sierra et al. 2021). Además, estos resultados se justifican parcialmente debido a la falta de integración de políticas públicas multisectorial (por decir, la salud, la educación, o el desarrollo social) alineadas con las políticas de desarrollo de infraestructura rural y la falta de criterios integrados de evaluación (Lupano, 2013; Espinel et al., 2017, CGR, 2018). Tanta la falta de integración intersectorial como la los aspectos que limitan la mayor contribución de los caminos no son una condición exclusiva de la región de caso de estudio, sino que también ha sido documentada para otras regiones de América Latina y el Caribe (Pérez, 2020). A pesar de lo anterior se detectan casos en la región que sobresalen respecto de los resultados de la mayoría de los caminos bordeando hasta el 60% de contribución ambiental y 40% de contribución económica y que se registran como casos extremos en la Figura 3. Los valores de contribución a la sostenibilidad no afectan la etapa de optimización y priorización en que se selecciona de acuerdo a los mejor de lo que existe en el contexto

de evaluación. Esto es consistente con el propósito de la sostenibilidad en que la comparación no aplica entre espacio geográficos sino al progreso en el desarrollo y mejora dentro del mismo contexto (Vilchés et al. 2014; Vanclay et al. 2015). De cualquier forma, la maximización de las cuatro dimensiones de la sostenibilidad a través del Pareto óptimo condiciona la no compensación entre las dimensiones de la sostenibilidad. Esto garantiza un balance ético del desarrollo sostenible en que ha determinado la igualdad en la consideración de al menos lo social, técnico y económico de la sostenibilidad (Brundtland, 1987; Diaz-Sarachaga, 2016).

A partir de las interacciones del modelo se identifican tres indicadores que tienen el mayor impacto y son los menos influenciados por otros indicadores del sistema de evaluación. Estos son *Potencialidad Productiva* (I24), *Potencialidad Turística* (I25), y la *Mantenimiento del Camino* (I27) todos de tipo económico. Por su parte *Reconocimiento de valores culturales* (social) también tiene un alto impacto, sin embargo, esta altamente influenciado por otros indicadores del sistema que hacen que su sola intervención tengo un efecto limitado de largo plazo. Esto se condice con los hallazgos de Sierra et al. (2017) y Van de Walle (2009) en que para ciertos contextos geográficos se hace más notorio que los criterios económicos conducen la toma de decisiones de infraestructura, por sobre aspectos de otro tipo. Bajo esta lógica, los caminos R35 y S907 se acercan a un ideal de contribución a la sostenibilidad de largo plazo aun cuando no sean los primeros caminos seleccionados en primera instancia sin el efecto de la interacción (tiempo cero).

Estos resultados son validos bajos ciertas consideraciones del modelo y mecanismo propuesto. El modelo de toma de decisión empleado es válido para infraestructuras rurales de caminos secundarios bajo el contexto de la Región de La Araucanía – Chile.

CONCLUSIONES

Este artículo propone un mecanismo para priorizar el mejoramiento de caminos rurales desde el punto de vista del aporte a la sostenibilidad territorial. Este método enfatiza y conecta en el análisis de corto plazo y de largo plazo a través de la interacción de indicadores de la sostenibilidad para un territorio. El mecanismo se asocia a un modelo de evaluación multicriterio a partir del cual se estructura en tres etapas: un análisis estático, un análisis dinámico y una priorización. El método se ilustró a través de un caso de estudio con una muestra de 101 proyectos de caminos rurales dentro de un contexto Chileno.

La implementación de este mecanismo permitió distinguir la contribución a la sostenibilidad territorial de diferentes proyectos de caminos rurales y diferentes zonas de ubicación. Aun cuando la contribución a las dimensiones técnica, económica, ambiental y social no supera el 20% en la mayoría de la muestra evaluada, se identifican caminos que destacan sobre el rango intercuartílico de la muestra de forma independiente por dimensión. Tras la optimización un conjunto eficiente de caminos 15 son seleccionados de tal manera que alcancen la máxima contribución social, ambiental, técnica y económica en simultaneo. Tras un análisis dinámico de los 15 caminos óptimos se identifican dos (R35, S907) que en su comportamiento progresivo al largo plazo reducen

su aproximación a un punto ideal de máxima contribución, determinado por la potenciación de criterios económicos.

De esta forma, el mecanismo de evaluación identifica la infraestructura de caminos rurales en términos de su contribución sostenible actual al territorio y a su comportamiento de largo plazo. Esta propuesta apoya la toma temprana de decisiones sobre proyectos de infraestructura y su ubicación desde el punto de vista de contribución a la sostenibilidad. En este sentido, puede ser una herramienta para apoyar a las agencias públicas encargadas de las inversiones en infraestructura rural; para promover el desarrollo en diferentes escenarios geográficos que no se ajustan a los criterios bajo demanda del sistema nacional de inversiones.

El método puede aplicarse antes de la construcción de un proyecto para seleccionar las alternativas de infraestructura más pertinentes a un contexto en virtud de su sostenibilidad. Este mecanismo puede replicarse en otros contextos geográficos, adaptando el modelo de evaluación a las características locales, regionales y específico tipo de infraestructura.

En el futuro, a través de la Inteligencia Artificial se busca identificar perfiles de proyecto eficientes que faciliten el trabajo la elaboración de perfiles óptimos de proyectos de caminos rurales y facilite la labor de los formuladores de proyectos. A este respecto se pretende incluir la infraestructura de puentes dentro de la red de priorización para no limitar la conectividad de la red accesos rurales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) bajo el programa Fondecyt 11190501 del Gobierno de Chile. En adición los autores desean agradecer su colaboración al equipo de la Dirección de Vialidad del MOP y Gobernación Regional de La Araucanía por su activa participación en la implementación de los métodos y construcción del modelo de evaluación. Así mismo este trabajo fue posible gracias al aporte metodológico y equipamiento del Grupo de Investigación en Gestión de Infraestructura y Planeamiento Territorial Sostenible (GIPTs) de la Universidad de La Frontera.

REFERENCIAS

- Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental conservation*, 14(4), 291-294. <https://doi.org/10.1017/S0376892900016805>
- Chen, H., Cheng, S., Qin, Y., Xu, W., & Liu, Y. (2024). Sustainability evaluation of urban large-scale infrastructure construction based on dynamic fuzzy cognitive map. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141774>
- CGR - Contraloría General de la República de Chile. (2018). Auditoría de los Procesos Para la Conservación de Caminos, Informe Final N 501 de 03 Diciembre de 2018. Santiago de Chile, Chile. 2018.
- Díaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., Alsulami, B., & Castro-Fresno, D. (2016). Evaluation of existing sustainable infrastructure rating systems for their application in

- developing countries. *Ecological indicators*, 71, 491-502. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.033>
- Dirección de Vialidad- MOP (2023). Red Vial Nacional: Dimensionamientos y Características. Reporte. Obtenido en agosto 2024 <https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/gestionvial/Documents/Red%20Vial%20Nacional%20Dimensionamiento%20y%20Caracter%20C3%ADsticas%20A%20C3%B1o%202023.pdf>
- Dirección de Vialidad- MOP (2017). Caminos Básicos. Instructivo para postulación de caminos básicos intermedios. Obtenido en Agosto 2024. <https://sni.gob.cl/storage/docs/Instructivo-Caminos-Basicos%20Intermedios-2017.pdf>
- Técnico de la Subdirección de Desarrollo. Santiago de Chile, Chile. 2020. Available online: <https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/gestionvial/Paginas/Informesyestudios.aspx>
- Espinet, X., Schweikert, A., & Chinowsky, P. (2017). Robust prioritization framework for transport infrastructure adaptation investments under uncertainty of climate change. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 3(1), E4015001. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.000085>
- Felix, G., Nápoles, G., Falcon, R., Froelich, W., Vanhoof, K., & Bello, R. (2019). A review on methods and software for fuzzy cognitive maps. *Artificial intelligence review*, 52, 1707-1737. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9575-1>
- Gao, L., Zhang, X., Deng, X., Zhang, N., & Lu, Y. (2024). Using fuzzy cognitive maps to explore the dynamic impact on management team resilience in international construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2023-0828>
- García-Segura, T., Yepes, V., Alcalá, J., & Pérez-López, E. (2015). Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges. *Engineering Structures*, 92, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.015>
- Garza H., T., & Coronel, J. A. (1970). Un método para la determinación del tamaño de la muestra en encuestas sobre poblaciones finitas. *Demografía y Economía*, 4(1), 121–128. <http://www.jstor.org/stable/40601870>
- Hatzimichailidis, AG, Papakostas, GA y Kaburlasos, VG (2012). Una nueva medida de distancia de conjuntos difusos intuicionistas y su aplicación a problemas de reconocimiento de patrones. *Revista internacional de sistemas inteligentes*, 27 (4), 396-409. <https://doi.org/10.1002/int.21529>
- Hurtado Moreno, L., Quintero Montoya, O. L., & García Rendón, J. J. (2014). Estimación del precio de oferta de la energía eléctrica en Colombia mediante inteligencia artificial. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 18, 54-87. <https://hdl.handle.net/10419/113876>
- Krupowicz, W., Sobolewska-Mikulska, K., & Marija, B. (2017). Modern trends in road network development in rural areas. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, (12 (1)).
- Leal, M. (2016). Informe de evaluación del programa de caminos básicos región de La Araucanía. Ministerio de obras públicas – Dirección de Vialidad.
- Lupano, J., 2013. La infraestructura de transporte sostenible y su contribución a la igualdad en América Latina y el Caribe. <https://hdl.handle.net/11362/35883>
- Maguiña Pérez, R. A. (2010). Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio. *Revista de Investigación de Sistemas e Informática*,

- 7(1), 91-104. Recuperado el 04 de Enero de 2022, de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/sistem/article/view/3270>
- Mattinzioli, Thomas & Sol-Sánchez, M. & Martínez, G. & Gámez, Ma. (2020). A Critical Review of Roadway Sustainable Rating Systems. *Sustainable Cities and Society*. 63. 102447. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102447>
- Munda, G. (2004). Métodos y procesos multicriterio para la evaluación social de las políticas públicas. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, 1, 31-45.
- Naimanye, A. G., & Whiteing, T. (2016, December). Poverty-centred rural road funds sharing in sub-Saharan Africa. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 169, No. 6, pp. 387-396). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jtran.15.00071>
- Nasirzadeh, F., Carmichael, D. G., Jarban, M. J., & Rostamnezhad, M. (2019). Hybrid fuzzy-system dynamics approach for quantification of the impacts of construction claims. *Engineering, construction and architectural management*, 26(7), 1261-1276. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2017-0150>
- Nautiyal, A., & Sharma, S. (2021). Condition Based Maintenance Planning of low volume rural roads using GIS. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127649>
- Papageorgiou, K., Singh, P., Papageorgiu, E., Chudasama, H., Bochtis, D., & Stamoulis, G. (2020). Fuzzy Cognitive Map-Based Sustainable Socio-Economic Development Planning for Rural Communities. *Sustainability*, 12, 305. <https://doi.org/10.3390/su12010305>
- Pérez, G. (2020). Caminos rurales: vías claves para la producción, la conectividad y el desarrollo territorial. Documento técnico. Boletín 377. CEPAL - ONU. <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/1c446f45-b327-4def-83f7-e6d4eb39cf81>
- Podvezko, V. (2011). The comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. *Engineering Economics*, 22(2), 134-146. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.22.2.310>
- Shen, L.; Lu, W.; Peng, Y.; Jiang, S. Critical Assessment Indicators for Measuring Benefits of Rural Infrastructure Investment in China. *J. Infrastruct. Syst.* 2011, 17, 176–183. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000066](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000066)
- Saeedi, I., Mikaeili Tabrizi, A. R., Bahremand, A., & Salmanmahiny, A. (2022). A soft systems methodology and interpretive structural modeling framework for Green infrastructure development to control runoff in Tehran metropolis. *Natural Resource Modeling*, 35(2), e12339. <https://doi.org/10.1111/nrm.12339>
- Sierra, L. A., Pellicer, E., & Yepes, V. (2016). Social sustainability in the lifecycle of Chilean public infrastructure. *Journal of Construction engineering and management*, 142(5), 05015020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001099](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001099)
- Sierra, L. A., Pellicer, E., & Yepes, V. (2017). Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.02.004>
- Sierra, L. A., Yepes, V., & Pellicer, E. (2018). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, 187, 496-513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.022>
- Sierra, L.; Araya, F.; Yepes, V. (2021) Consideración de la incertidumbre y las múltiples disciplinas en la Determinación de Criterios de Sostenibilidad de Caminos Rurales Utilizando Lógica Neutrosófica. *Sustainability* 2021,13, 9854. <https://doi.org/10.3390/su13179854>

- Sierra, L. (2021). Base de datos de indicadores de sostenibilidad de caminos básicos rurales de la región de La Araucanía – Chile (2019-2021). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18563.27680>
- Singh, A. P., Wagale, M., Dhadse, K., & Singh, A. (2022). Socioeconomic impacts of low-volume roads using a GIS-based multidimensional impact assessment approach. *Environment, Development and Sustainability*, 24(5), 6676-6701. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01723-3>
- Smith, D. R., Gordon, A., Meadows, K., & Zwick, K. (2001). Livelihood diversification in Uganda: patterns and determinants of change across two rural districts. *Food policy*, 26(4), 421-435. [https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(01\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S0306-9192(01)00012-4)
- Van Haaster, B., Citroth, A., Fontes, J., Wood, R., & Ramirez, A. (2017). Development of a methodological framework for social life-cycle assessment of novel technologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 423-440. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1162-1>
- Van de Walle, D. (2009). “Impact evaluation of rural road projects”. *J. Dev. Eff.*, 1, 15–36. <https://doi.org/10.1080/19439340902727701>
- Vanclay, F., Esteves, A. M., Aucamp, I., & Franks, D. (2015). *Social Impact Assessment: Guidance for assessing and managing the social impacts of projects.*
- Vilches, A., & Pérez, D. G. (2015). Ciencia de la Sostenibilidad: ¿Una nueva disciplina o un nuevo enfoque para todas las disciplinas? *Revista Iberoamericana de Educación*, 69(1), 39-60. <https://doi.org/10.35362/rie691152>
- Vilke, S., Krpan, L., & Milković, M. (2018). Application of the multi-criteria analysis in the process of road route evaluation. *Tehnički vjesnik*, 25(6), 1851-1859. <https://doi.org/10.17559/TV-20170530085451>
- Villegas-Flores, N., Ochoa-Averos, S. D. R., Saldeño-Madero, Y. N., & Sánchez-Cotte, E. H. (2023). A Multi-Criteria Analysis for decision-making in the selection of an asphalt mixture on pavements. *Tecnura*, 27(75), 89-112. <https://doi.org/10.14483/22487638.18929>
- Yepes, V., García-Segura, T., & Moreno-Jiménez, J. M. (2015). A cognitive approach for the multi-objective optimization of RC structural problems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(4), 1024-1036. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.05.002>
- Yoo, S., & Harman, M. (2010). Using hybrid algorithm for pareto efficient multi-objective test suite minimisation. *Journal of Systems and Software*, 83(4), 689-701. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2009.11.706>
- Zhang, Q.; Prouty, C.; Koenig, E.S.; Wells, E.C.; Zarger, R.K. Rapid assessment framework for modeling stakeholder involvement in infrastructure development. *Sustain. Cities Soc.* 2014, 29, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.009>
- Zhou, Z.; Alcalá, J.; Yepes, V. Research on Sustainable Development of the Regional Construction Industry Based on Entropy Theory. *Sustainability* 2022, 14, 16645. <https://doi.org/10.3390/su142416645>