



Sinergia entre sistemas urbanos y su papel en la generación de bienestar en ciudades

Autor:

Yuliana Andrea Buitrago Sarmiento

Universidad del Rosario
Maestría en Ciudades Inteligentes y Sostenibles
Escuela de Ciencias e Ingeniería
Bogotá Colombia, noviembre 2025



Sinergias entre sistemas urbanos y su papel en la generación de bienestar en ciudades

Trabajo presentado para obtener el título de:
Magíster en Ciudades Inteligentes y Sostenibles

Autor:

Yuliana Andrea Buitrago Sarmiento

Director: Mauricio Becerra Fernández PhD

Codirector: Johan Manuel Redondo PhD

Universidad del Rosario
Maestría en Ciudades Inteligentes y Sostenibles
Escuela de Ciencias e Ingeniería
Bogotá Colombia, noviembre 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo incondicional y aliento constante.

Al profesor **PhD. Johan Manuel Redondo**, por su guía rigurosa y generosa, cuyas preguntas y orientaciones metodológicas dieron solidez y rumbo a este trabajo.

ABSTRACT

Cities operate as complex adaptive systems in which mobility, energy, water, waste, public space, health, education, safety, and governance coevolve through feedbacks, delays, and nonlinear interactions. This thesis examines how synergies across urban systems contribute to well-being in Bogotá D.C. and advances a decision-support approach that integrates qualitative and quantitative system dynamics. Well-being is treated as an emergent, multidimensional outcome—encompassing environmental quality, health, safety, equitable access, and cohesion—rather than an isolated target. The research constructs and validates a causal loop diagram to operationalize interdependencies and feedback structures, translates this architecture into a stock-and-flow model in Vensim with equations, parameters, and time delays, and subjects the model to structural and behavioral tests plus sensitivity analysis. An evaluation framework links process and outcome indicators to dominant loops and leverage points, strengthened by expert judgment and documentary triangulation. An interactive web interface enables exploration of scenarios by stakeholders.

Results show that under business as usual the city's well-being follows a quasi-exponential decay toward a low-performance equilibrium driven by demand–capacity imbalances and lags in service expansion and maintenance. Single-sector interventions deliver marginal gains, leaving the dominant feedback architecture intact. Scenarios emphasizing health, environment, and social fabric attenuate the decline by capturing co-benefits—better air, thermal comfort, active living, and greater use of public space—while the integrated package combining health, environment, active mobility, and urban capacity achieves the best performance. Yet none produces a regime shift without concurrent changes in governance and demand management capable of addressing rebound effects. Demographic simulations (1928–2030) exhibit a logistic S-curve approaching the district's effective carrying capacity, explaining the near-stationary population from 2024 to 2030 and reinforcing the need to raise well-being through systemic synergies rather than growth.

The contribution is twofold: theoretical–methodological, by linking intersystem synergies to a testable system-dynamics representation and indicator framework; and practical, by delivering a replicable tool to identify leverage points, estimate co-benefits and risks, and coordinate smart, sustainable interventions across sectors and scales. The findings support a shift from siloed actions to integrated bundles that reconfigure feedbacks, shorten delays, and steer the city toward higher well-being trajectories.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
Contextualización	12
1. OBJETIVOS.....	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos	13
1.3. Alcance y delimitación	13
2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	15
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	16
3.1 MARCO TEÓRICO	16
3.1.1 Enfoque sistémico aplicado al entorno urbano.....	16
3.1.2 Sinergia entre sistemas urbanos	16
3.1.3 Bienestar urbano como eje integrador.....	17
3.1.4 Territorio, gobernanza y planificación sinérgica.....	17
3.2 ESTADO DEL ARTE	17
3.2.1 Conceptualización de ciudades y sistemas urbanos	17
3.2.2 Enfoques sistémicos: complejidad, escalamiento y sinergia.....	18
3.2.3 Gobernanza urbana y planificación integrada para la sinergia sistémica.....	19
3.2.4 Servicios ecosistémicos y estructura territorial sostenible.....	20
3.2.5 Bienestar urbano y justicia ambiental	21
3.2.6 Evaluación, modelación y validación de sistemas urbano	21
3.2.7 Vacíos teóricos y aportes a esta investigación	22
3.3 MARCO NORMATIVO	23
4. METODOLOGÍA.....	26
5. IDENTIFICACIÓN Y CATALOGACIÓN DE SISTEMAS URBANOS.....	27
5.1. Diagrama causal de la sinergia entre los sistemas urbanos.....	27
5.1.1 R1: Beneficios de energía renovable.....	29
5.1.2 R2: Salud y calidad de vida.....	31

5.1.3	R3: Fortalecimiento del sistema productivo.....	32
5.1.4	R4: Eficiencia transporte público con energía renovable.....	33
5.1.5	R5: Percepción de seguridad	34
5.1.6	R6: Percepción de seguridad y uso del vehículo	35
5.1.7	R7: Calidad de servicios públicos	37
5.1.8	R8: Calidad de espacios públicos.....	38
5.1.9	B1: Economía circular.....	39
5.1.10	B2: Movilidad amigable con el medio ambiente.....	40
5.1.11	B3: Eficiencia transporte público con energía convencional	41
5.1.12	B4: Congestión vehicular	42
6.	ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE LOS DE SISTEMAS URBANOS	44
6.1	Evaluación de influencia por contexto en los sistemas urbanos.....	44
6.1.1	Evaluación de influencia de los Sistemas Urbanos en Distintos Contextos.....	44
6.1.2	Evaluación de influencia de Variables en un Diagrama Causal.....	45
6.1.3	Evaluación de influencia en la Toma de Decisiones Urbanas.....	46
6.2	Análisis de interacción entre bucles	47
6.3	Herramienta: Matriz de priorización de bucles	48
6.4	Identificación de puntos de palanca	52
6.5	Estrategias para los puntos de palanca identificados.....	53
7.	MODELO ESTRUCTURAL DE DINÁMICAS URBANAS: DIAGRAMA DE NIVÉLES Y FLUJOS	55
7.1	Del modelo causal al modelo estructural: aportes del enfoque de niveles y flujos.....	55
7.1.1	Submodelo población de la ciudad y su estado de bienestar.....	56
7.1.2	Submodelo capital disponible para inversión.....	59
7.1.3	Submodelo calidad y acceso a la educación.....	62
7.1.4	Submodelo contexto ambiental de la ciudad.....	64
7.1.5	Submodelo de infraestructura urbana.....	68
7.1.6	Submodelo productividad laboral	70

7.1.7	Submodelo de percepción de calidad de vida	72
7.1.8	Submodelo de transporte público	74
7.1.9	Submodelo de salud pública.....	76
7.1.10	Submodelo de vehículos particulares	78
7.1.11	Submodelo de energía: dinámica del consumo y producción	80
7.1.12	Submodelo de seguridad urbana: percepción, cohesión y control estructural	83
7.2	Consolidación de la estructura de simulación del sistema urbano	86
8.	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS Y EVALUACIÓN PROSPECTIVA DEL MODELO URBANO	87
8.1	Escenarios de simulación: Definición y configuración paramétrica	87
8.2	Análisis detallado de escenarios de simulación.....	88
8.2.1	Escenario 1 – BAU.....	89
8.2.2	Escenario 2 – Infraestructura urbana.....	90
8.2.3	Escenario 3 – Movilidad activa	91
8.2.4.	Escenario 4 – Salud y Bienestar	92
8.2.5.	Escenario 5 – Integrado	93
8.2.6.	Escenario 6 – Dinámica poblacional	94
8.3	Discusión comparativa de escenarios	95
8.3.1	Activación de bucles: apalancamientos y sinergias	95
8.3.2	Capacidad de absorción sistémica	96
8.3.3	Sostenibilidad estructural y efectos a largo plazo	97
9.	INTEGRACIÓN DEL SIMULADOR EN PLATAFORMA WEB.....	97
9.1	Escenario BAU simulación	97
9.2	Escenario 2 Infraestructura Urbana	99
9.3	Escenario 3 Movilidad activa	100
9.4	Escenario 4 Salud y bienestar	102
9.5	Escenario 5 Integrado	103
9.6	Escenario 6 Dinámica poblacional	105

10.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	107
10.1	Desempeño del bienestar por escenarios	107
10.2	Indicadores de acompañamiento y lectura sistémica.....	107
10.3	Dinámica poblacional (1928–2030)	108
10.4	Robustez y validez del modelo	108
10.5	Implicaciones para ciudades inteligentes y sostenibles.....	108
10.6	Limitaciones y futuras extensiones	108
	CONCLUSIONES	110
	REFERENCIAS	111
	ANEXOS 113	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de Priorización de Bucles en Sistemas Urbanos.....	49
Tabla 2 Identificación de puntos de palanca	53
Tabla 3 Escenarios	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama Causal.....	29
Figura 2 Bucle Reforzador: R1: Beneficios de la energía renovable	30
Figura 3 Bucle Reforzador: R2: Salud y calidad de vida.....	31
Figura 4 Bucle Reforzador: R3: Fortalecimiento del sistema productivo.....	33
Figura 5 Bucle Reforzador: R4: Eficiencia transporte público con energía renovable.....	34
Figura 6 Bucle reforzador: R5: Percepción de seguridad	35
Figura 7 Bucle reforzador: R6: Percepción de seguridad y uso del vehículo	36
Figura 8 Bucle reforzador: R7: Calidad de servicios públicos.....	37
Figura 9 Bucle reforzador: R8: Calidad de espacios públicos	38
Figura 10 Bucle balanceador: B1: Economía circular	39
Figura 11 Bucle balanceador: B2: Movilidad amigable con el medio ambiente	41
Figura 12 Bucle balanceador: B3: Eficiencia transporte público con energía convencional.....	42
Figura 13 Bucle balanceador: B4: Congestión vehicular.....	43
Figura 14 Submodelo población de la ciudad y su estado de bienestar	57
Figura 15 Submodelo capital disponible para inversión	60
Figura 16 Submodelo calidad y acceso a la educación	63
Figura 17 Submodelo contexto ambiental de la ciudad	65
Figura 18 Submodelo de infraestructura urbana	68
Figura 19 Submodelo productividad laboral.....	70
Figura 20 Submodelo percepción de la calidad de vida.....	72
Figura 21 Submodelo transporte público	75
Figura 22 Submodelo salud pública	77
Figura 23 Submodelo vehículos particulares	79
Figura 24 Submodelo de energía: dinámica del consumo y producción.....	81
Figura 25 Submodelo se seguridad urbana: percepción, cohesión y control estructural	84
Figura 26 Escenario BAU: Bienestar de la ciudad.....	98

Figura 27 Escenario BAU: Indicadores de acompañamiento	98
Figura 28 Escenario 2 Infraestructura Urbana: Bienestar de la ciudad	99
Figura 29 E2 Indicadores de acompañamiento	100
Figura 30 Escenario 3 Movilidad activa: Bienestar de la ciudad	100
Figura 31 E3 Indicadores de acompañamiento	101
Figura 32 Escenario 4 Salud y bienestar: Bienestar de la ciudad.....	102
Figura 33 E4 Indicadores de acompañamiento	102
Figura 34 Escenario 5 Integrado: Bienestar de la ciudad.....	103
Figura 35 E5 Indicadores de acompañamiento	104
Figura 36 Dinámica poblacional 2024 – 2030	105

INTRODUCCIÓN

Las ciudades funcionan como sistemas complejos y adaptativos en los que interactúan, con efectos acumulativos y no lineales, subsistemas como movilidad, energía, agua, residuos, espacio público, salud, educación, seguridad y gobernanza [1], [2]. En contextos latinoamericanos – y particularmente en Bogotá – la fragmentación institucional, las brechas socioespaciales y las presiones ambientales evidencian los límites de la planificación sectorial y la necesidad de enfoques integradores que hagan explícitas las interdependencias, los retardos y los bucles de realimentación que gobiernan el desempeño urbano [3], [4], [8].

Este trabajo de grado analiza cómo las sinergias entre sistemas urbanos contribuyen a la generación de bienestar, identificando puntos de palanca y estrategias integradas que potencien bucles virtuosos y mitiguen dinámicas indeseadas [23]. Para ello se articula un marco conceptual del territorio: (i) identificación y catalogación de sistemas urbanos; (ii) construcción de un diagrama causal (reforzadores y balanceadores); (iii) análisis de bucles y priorización de intervenciones; y (iv) lineamientos estratégicos para la acción pública [3], [4], [7], [8]. El caso de Bogotá sirve como banco de prueba para valorar la viabilidad técnica e institucional de las sinergias propuestas y su transferibilidad a otras ciudades, con énfasis en co-beneficios de salud, calidad ambiental y cohesión social [10], [12].

El alcance se centra en ofrecer evidencia estructural (no proyecciones deterministas) para orientar la coordinación intersectorial y la inversión pública hacia resultados verificables de bienestar. El documento se organiza en: Marco teórico, Marco normativo, Metodología, Resultados del diagrama causal y análisis de bucles, Discusión y Conclusiones, asegurando trazabilidad entre supuestos, estructura del sistema y recomendaciones para la decisión pública [1], [3], [8].

Contextualización

Este trabajo se sitúa en ciudades latinoamericanas – con énfasis en Bogotá y su ámbito metropolitano – caracterizadas por crecimiento disperso, desigualdades socioespaciales, déficits históricos en infraestructura y servicios, presión sobre ecosistemas estratégicos y riesgos climáticos. Estas condiciones exponen los límites de la planificación por “silos” y demandan una lectura integrada de los sistemas urbanos – movilidad, energía, residuos, espacio público, salud, educación y seguridad – como un entramado complejo con realimentaciones, retardos y no linealidades [1], [3], [4], [8]. Desde la complejidad urbana y la dinámica de sistemas, en diálogo con enfoques de ciudades inteligentes y sostenibles [5], [6], se identifican sinergias con potencial de co-beneficios [p. ej., movilidad activa + calidad del aire con impactos en salud y cohesión social; economía circular que reduce carga sanitaria y costos fiscales) [10]-[12]. Sin embargo, la literatura rara vez vincula de forma operativa dichas interacciones con resultados de bienestar y con diseños de gobernanza que las sostengan. Este estudio aborda ese vacío, articulando un modelo causal y criterios de priorización para detectar puntos de palanca viables bajo el marco normativo vigente, alineando decisiones técnicas e institucionales con resultados medibles de bienestar [23], [29].

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Modelar y evaluar, desde la dinámica de sistemas, cómo las sinergias entre los principales sistemas urbanos de Bogotá (movilidad, energía, residuos, espacio público, salud, educación y seguridad) contribuyen al bienestar colectivo, mediante la construcción y validación de un diagrama causal que explicita interdependencias y bucles de realimentación, la jerarquización de bucles y la identificación de puntos de palanca con una matriz de priorización, y el desarrollo y aplicación de un marco de evaluación con indicadores y validación experta para estimar co-beneficios, riesgos y condicionantes institucionales a escala urbana del Distrito Capital.

1.2. Objetivos específicos

- Construir y validar un diagrama causal que operacionalice las interdependencias entre los subsistemas urbanos, explicitando bucles reforzadores y balanceadores, retardos y no linealidades, y clarificando su incidencia en el comportamiento global del sistema, todo ello con trazabilidad a los ejes y variables del modelo y coherencia con el marco conceptual.
- Jerarquizar los bucles críticos mediante una matriz de priorización sustentada en dominancia temporal, sensibilidad estructural y potencial de palanca, para identificar puntos de palanca capaces de maximizar co-beneficios de bienestar y mitigar dinámicas indeseadas, dejando explícitos criterios y ponderaciones utilizados.
- Desarrollar y aplicar un marco de evaluación de sinergias que defina indicadores de resultado y de proceso (trazados a los bucles y palancas priorizados), especifique fuentes de datos, periodicidad y criterios de medición, e incorpore validación por juicio experto o contraste documental para el contexto de Bogotá, emplear dicho marco para estimar co-beneficios y riesgos asociados a las palancas seleccionadas.

1.3. Alcance y delimitación

Este trabajo integra modelación cualitativa y cuantitativa para analizar las sinergias entre sistemas urbanos en Bogotá D.C., parte de la construcción y validación de un diagrama causal que explicita interdependencias, bucles reforzadores y balanceadores, retardos y no linealidades, lo traduce a un modelo de niveles y flujos en Vensim con formulaciones y parámetros explícitos, ejecuta simulaciones de escenarios para estimar trayectorias, co-beneficios y riesgos; jerarquiza bucles e identifica puntos de palanca mediante una matriz de priorización sustentada en dominancia temporal, sensibilidad estructural y potencial de palanca, y aplica un marco de evaluación con indicadores de proceso y resultado y validación por juicio experto o contraste documental. La parametrización se apoya en fuentes secundarias y supuestos transparentes, se realizan verificación estructural y pruebas de sensibilidad para evaluar la consistencia del modelo. Quedan expresamente excluidas la recolección de datos primarios, la optimización matemática, el análisis costo-beneficio y la formulación de lineamientos de política. El ámbito espacial corresponde a Bogotá D.C.,

incorporando de manera puntual interacciones funcionales con su entorno cuando resulten necesarias para comprender las sinergias, el horizonte temporal cubre la última década y un periodo de simulación de corto y mediano plazo, condicionado por la disponibilidad y comparabilidad de datos.

2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En Bogotá persiste una brecha entre el ideal de ciudad integrada y la demostración – con evidencia modelada y verificable – de cómo las sinergias entre sistemas urbanos (movilidad, energía, residuos, espacios públicos, salud, educación y seguridad) se traducen en resultados de bienestar, bajo qué mecanismos estructurales (realimentaciones, retardos, no linealidades) se sostienen o colapsan y dónde conviene intervenir para evitar efectos no deseados y *trade-offs* intersectoriales. Esta ausencia de operacionalización dificulta priorizar palancas, anticipar co-beneficios y riesgos y coordinar decisiones entre sectores. El estudio se justifica porque cierra ese vacío con un enfoque de dinámica de sistemas propio del nivel de maestría: construye y valida un diagrama causal de interdependencias, lo formaliza en Vensim como modelo de niveles y flujos con ecuaciones, parámetros y retardos transparentes, realiza verificación estructural y pruebas de sensibilidad, ejecuta simulaciones de escenarios y aplica una matriz de priorización (dominancia temporal, sensibilidad estructural, potencial de palanca) junto con un marco de evaluación con indicadores y validación experta/contraste documental. Con base en fuentes secundarias y supuestos explícitos, el trabajo ofrece una contribución teórico-metodológica rigurosa y una utilidad práctica: estimar trayectorias, co-beneficios y riesgos y fortalecer la coordinación intersectorial y el seguimiento del desempeño urbano, sin prescribir lineamientos de política; es, además, factible, replicable y transferible a otros contextos urbanos comparables.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 MARCO TEÓRICO

3.1.1 Enfoque sistémico aplicado al entorno urbano

El enfoque sistémico constituye el fundamento conceptual central de esta investigación. Desde esta perspectiva, la ciudad es concebida como un sistema complejo, dinámico y adaptativo, compuesto por múltiples subsistemas interconectados – como el transporte, la energía, el agua, los residuos, los espacios verdes, la infraestructura social y gobernanza – que interactúan entre sí y con el entorno natural [1], [2], [29]. Cada uno de estos subsistemas posee funciones específicas, pero también producen efectos cruzados que, en conjunto, determinan el comportamiento general del sistema urbano [1], [8].

Inspirado de la teoría general de sistemas (Bertalanffy, 1968) y en los desarrollos contemporáneos de la dinámica de sistemas urbanos (Forrester, 1969; Barlas, 1996), este enfoque permite identificar flujos de información, recursos, energía y externalidades entre los distintos componentes del sistema. En este contexto, las ciudades son entendidas como *sistemas de sistemas* que operan de forma no lineal y en condiciones de incertidumbre, generando patrones emergentes que no pueden ser explicados por el análisis de partes aisladas [3], [4], [8], [29].

El enfoque sistémico, al poner énfasis en las relaciones, realimentaciones y estructuras subyacentes, resulta particularmente útil para analizar fenómenos urbanos como la congestión, la contaminación, la segregación espacial o la distribución de servicios, que son producto de múltiples causas interdependientes. Esta visión permite pasar de una lógica sectorial a una lógica integradora, en la que el análisis de sinergias y conflictos entre sistemas se convierte en una herramienta clave para comprender y mejorar el funcionamiento urbano [1], [3], [4], [8].

3.1.2 Sinergia entre sistemas urbanos

El concepto de sinergia se refiere a la interacción entre dos o más elementos que, al combinarse, producen un efecto total mayor que la suma de sus efectos individuales. En el contexto urbano, las sinergias ocurren cuando la articulación funcional y estratégica entre distintos sistemas o sectores – por ejemplo, movilidad y espacio público, energía y edificación, gestión hídrica y biodiversidad – genera beneficios acumulativos para la sostenibilidad y el bienestar urbano.

Autores como Frantzeskaki et al. [26] y Raudsepp-Hearne et al. [20] han aplicado el análisis de sinergias en ámbitos como los servicios ecosistémicos y las soluciones basadas en la naturaleza, mostrando cómo los patrones de co-beneficios (bundles) pueden fortalecer la resiliencia de las ciudades. En el plano técnico, las sinergias pueden expresarse mediante integraciones operativas (por ejemplo, redes de infraestructura híbrida) o institucionales (gobernanza colaborativa), mientras que en el plano social pueden traducirse en mejoras en la equidad, la participación y la calidad de vida urbana.

Esta investigación adopta el concepto de sinergia como un criterio evaluativo para analizar cómo se relacionan los sistemas urbanos, no solo desde su eficiencia sectorial, sino desde su capacidad de producir *bienestar urbano integrado*, entendido como una combinación de salud, seguridad, justicia espacial, sostenibilidad ambiental y oportunidades económicas.

3.1.3 Bienestar urbano como eje integrador

El bienestar urbano es un concepto multidimensional que articula dimensiones objetivas y subjetivas de la calidad de vida en las ciudades. En el marco de este proyecto, se concibe como el resultado de la interacción entre condiciones estructurales – acceso a servicios básicos, infraestructura, espacio público, entorno ambiental – y factores sociales como la percepción de seguridad, la equidad territorial, la participación ciudadana y la justicia ambiental.

Diversos enfoques han sido propuestos para medir el bienestar en contextos urbanos, desde índices de desarrollo humano adaptados, pasando por indicadores de salud urbana y evidencia sobre espacios verdes y salud, hasta métricas de felicidad y satisfacción con la vida. Sin embargo, bajo el enfoque sistémico, el bienestar se interpreta como una *variable emergente* del funcionamiento integrado del sistema urbano [8], [10], [11]. Es decir, no como un objetivo aislado, sino como un resultado complejo que depende de las sinergias – o disfuncionales – entre los distintos sistemas urbanos.

Autores como Aiello et al. [24], Sousa-Silva et al. [25] y Frantzeskaki et al. [26] han demostrado que variables como la cobertura vegetal, la calidad del aire, el acceso equitativo a la infraestructura verde o la conectividad funcional entre sistemas influyen directamente en el bienestar físico, emocional y social de los ciudadanos. Por ello, el análisis de sinergias debe considerar no solo eficiencias técnicas, sino también impactos distribuidos en términos de bienestar.

3.1.4 Territorio, gobernanza y planificación sinérgica

El territorio constituye el soporte físico y simbólico donde se manifiestan las relaciones entre los sistemas urbanos. En este sentido, la gobernanza territorial debe entenderse como el conjunto de arreglos institucionales, normativos y de coordinación que permiten integrar decisiones de múltiples sectores y actores, orientadas a un objetivo en común: la mejora del bienestar urbano desde una lógica sistémica.

El concepto de planificación sinérgica implica la construcción de estrategias urbanas que no respondan exclusivamente a necesidades sectoriales (vivienda, transporte, energía), sino que identifiquen interdependencias y promuevan soluciones que generen co-beneficios. Esto exige capacidades institucionales para la gestión colaborativa, el uso de evidencia integrada y el diseño de instrumentos de política pública adaptativos y multiescalares.

Autores como Echebarria et al. [5], Chen et al. [27] y Valiente [28] resaltan la importancia de modelos de gobernanza intersectorial, participativa y territorializada como condición necesaria para viabilizar las sinergias urbanas. En América Latina, este desafío se ve acentuado por los déficits históricos de coordinación institucional, informalidad y fragmentación territorial.

3.2 ESTADO DEL ARTE

3.2.1 Conceptualización de ciudades y sistemas urbanos

Se adopta la ciudad como sistema de sistemas, en el que cada subsistema (p. ej., movilidad, energía, agua, residuos, espacio público, salud, educación y seguridad) interactúa mediante relaciones causales que pueden amplificar o amortiguar cambios [1], [3], [8]. La sinergia entre sistemas urbanos se entiende como la generación de co-beneficios cuando dos o más subsistemas se diseñan y gestionan de forma coordinada (p. ej., movilidad activa + espacio público + calidad del aire),

activando bucles reforzadores deseables y reduciendo trade-offs ambientales, sociales y fiscales [6], [10], [12], [19]. El bienestar urbano se asume como un resultado multidimensional que integra calidad ambiental, salud pública, seguridad, acceso equitativo a servicios y cohesión social.

En esta lógica, la dinámica urbana está dominada por tres propiedades: retroalimentación (bucles reforzadores y balanceadores), retardos temporales (desfase entre intervención y efecto) y no linealidad (respuestas desproporcionadas ante cambios marginales) [4], [8], [23]. Un ejemplo de bucle reforzador relevante es: calidad de servicios públicos → percepción de calidad de vida → uso de espacio público → salud pública → productividad laboral → ingresos → recaudo → inversión en infraestructura → calidad de servicios públicos, que puede impulsar trayectorias virtuosas si se gobierna con criterios de equidad y sostenibilidad [3], [8], [11]. Los puntos de palanca son variables o vínculos donde intervenciones relativamente pequeñas producen efectos sistémicos significativos (p. ej., integrar transporte y uso del suelo; electrificación del transporte y gestión de la demanda; economía circular con enfoque de salud pública) [15], [16], [23]. Estas decisiones deben enmarcarse en una gobernanza multinivel coherente con el marco normativo vigente, para habilitar coordinación intersectorial y continuidad de políticas; de ahí la importancia de articular el diseño técnico con una visión integral de ciudad y con fundamentos de ciencias de la complejidad [5], [6], [29].

3.2.2 Enfoques sistémicos: complejidad, escalamiento y sinergia

La ciudad, entendida como un sistema dinámico compuesto por múltiples subsistemas interdependientes, ha sido objeto de análisis desde perspectivas complejas que permiten identificar patrones emergentes, interacciones no lineales y estructuras de realimentación [1], [8], [29]. Esta visión sistémica resulta fundamental para comprender las sinergias urbanas, en tanto que estas emergen de la interacción entre los distintos componentes del sistema urbano y no pueden explicarse de forma aislada [1], [8].

El trabajo de Sahasranaaman y Bettencourt [30] aporta un marco analítico basado en las leyes de escalamiento urbano, aplicadas al caso de 500 ciudades en la India. Sus hallazgos demuestran que, a medida que crecen, las ciudades tienden a volverse más eficientes en términos de empleo y conectividad, pero también enfrentan mayores desafíos en informalidad y degradación ambiental [30]. Este enfoque de *escalamiento urbano* revela patrones matemáticamente consistentes en el crecimiento y funcionamiento de las ciudades, lo cual permite cuantificar cómo el tamaño afecta sus subsistemas y abre la puerta a analizar sinergias funcionales o disfuncionales entre ellos.

Desde una perspectiva sociológica y urbana, Keuschnigg et al. [31] refuerzan la noción de ciudad como sistemas de múltiples escalas al examinar cómo la forma urbana y la movilidad impactan la cohesión social y los flujos de capital humano. Su enfoque subraya que la infraestructura y la distribución espacial del territorio no solo condicionan la eficiencia urbana, sino también su capacidad de generar bienestar social [31]. En este sentido, el análisis sistémico permite observar cómo las decisiones urbanas producen externalidades cruzadas entre subsistemas como el transporte, la salud o la educación.

Por otro lado, Barlas [4], desde el campo de la dinámica de sistemas, propone criterios formales de validez y validación de modelos sistémicos, enfatizando la importancia de identificar bucles de realimentación (positivos y negativos), no lineales y dependencias temporales. Este marco es particularmente útil para el diseño y validación de modelos de simulación que integren variables de diferentes sistemas urbanos (como residuos, energía, movilidad), permitiendo evaluar el comportamiento del sistema complejo de bajo distintos escenarios [4].

Estos enfoques se complementan con estudios como el de Frantzeskaki et al. [26], quienes proponen integrar los marcos ecológicos de resiliencia urbana con métodos de codiseño y coproducción de conocimiento, subrayando que las soluciones urbanas más eficaces son aquellas que emergen del reconocimiento de la complejidad urbana y la participación activa de múltiples actores.

En conjunto, estos aportes evidencian que las ciudades no pueden ser comprendidas ni transformadas eficazmente desde enfoques sectoriales o lineales. Por el contrario, la perspectiva de la *ciudad como sistema complejo* permite identificar los efectos cruzados, las relaciones emergentes y las posibilidades de sinergia o conflicto entre sus componentes. Este enfoque resulta clave para la tesis, ya que proporcionan la base teórica y metodológica para identificar como las interacciones entre sistemas urbanos (como transporte, residuos, energía o espacios verdes) pueden generar efectos acumulativos en el bienestar urbano [1], [3], [4], [8], [26].

3.2.3 Gobernanza urbana y planificación integrada para la sinergia sistémica

La gobernanza urbana se ha posicionado como un elemento clave en la articulación de políticas que integren múltiples sistemas urbanos (movilidad, energía, espacio público, gestión ambiental, etc.), permitiendo generar sinergias que contribuyan al bienestar colectivo. Desde un enfoque integrador, se reconoce que la gestión de la ciudad debe ir más allá del enfoque sectorial y avanzar hacia la coordinación interinstitucional y territorial que permita una planificación basada en sistemas [5], [6].

El concepto de planificación sinérgica implica construir estrategias urbanas que no respondan exclusivamente a necesidades sectoriales (vivienda, transporte, energía), sino que identifiquen interdependencias y promuevan soluciones con co-beneficios, ello exige capacidades institucionales para la gestión colaborativa, el uso de evidencia integrada y el diseño de instrumentos adaptativos y multiescalares [5], [6].

Echebarria et al. [5] presenta una revisión sistemática del concepto de ciudad inteligente, diferenciando tres grandes perspectivas: tecnocéntrica, humanista y colaborativa. Este último enfoque enfatiza la necesidad de una gobernanza multinivel basada en redes, donde se integren actores públicos, privados y sociales. Esta perspectiva es especialmente relevante para el análisis de sinergias urbanas, pues plantea que la ciudad es un sistema abierto cuya transformación requiere de capacidades institucionales que promuevan la coordinación y la adaptación.

En un sentido complementario, Chen et al. [27] analizan la dinámica inmobiliaria en pequeñas ciudades de China y muestran como decisiones de política sobre desarrollo urbano indican en configuración espacial, desigualdad territorial y sostenibilidad económica, proponiendo una tipología de zonas de intervención que refuerza la importancia de una planificación adaptativa y contextualizada. Desde el ámbito ecológico-territorial, Li et al. [32] introducen un modelo de zonificación funcional ecológica basado en la estabilidad funcional de los sistemas en regiones montañosas del sur de China y proponen asignar funciones específicas (ecológicas, productivas, residenciales) según la capacidad de carga, subrayando la necesidad de integrar la planificación ecológica con la urbana. En el contexto latinoamericano, Valiente [28] evidencia cómo formas de organización socioeconómica (p. ej., cooperativismo) contribuyen a arraigo y bienestar en territorios históricamente desfavorecidos, sugiriendo que la gobernanza urbana debe incluir actores locales para potenciar la resiliencia territorial. Asimismo, el análisis de políticas de seguridad y transporte en Bogotá realizado por Páez Murillo et al. [33] en el marco del Metro de Bogotá muestra

que las grandes infraestructuras requieren marcos de gobernanza integradores capaces de anticipar riesgos y generar sinergias entre seguridad, movilidad, justicia espacial y desarrollo urbano.

3.2.4 Servicios ecosistémicos y estructura territorial sostenible

La noción de sinergia entre sistemas urbanos no puede comprenderse plenamente sin integrar el papel de la naturaleza en el entorno construido. En los últimos años, los servicios ecosistémicos han emergido como un concepto clave para entender cómo los sistemas ecológicos construyen directamente al bienestar humano y cómo estos servicios pueden articularse con la planificación urbana.

Uno de los aportes seminales en esta línea es el de Raudsepp-Hearne et al. [20], quienes introducen el concepto de *bundless de servicios ecosistémicos*, es decir, patrones recurrentes de provisión simultánea de servicios en territorios específicos. Esta idea permite pasar de un enfoque aislado a uno racional, que muestra cómo la intervención en un tipo de servicio (por ejemplo, la expansión urbana) puede comprometer otros (como la regulación hídrica o la biodiversidad). Así, se facilita una lectura territorial integrada, útil para mapear sinergias y compensaciones entre sistemas naturales y urbanos.

Ampliando este enfoque, Cao et al. [34] desarrollan una tipología de clústeres de servicios ecosistémicos en áreas urbanas y rurales de China, concluyendo que los cambios en el uso del suelo urbano afectan la multifuncionalidad ecológica, y que una planificación para garantizar una estructura territorial que promueva sinergias sostenibles.

En la misma línea, Ren et al. [35] analizan la variación espacio-temporal de los servicios ecosistémicos en la provincia de Shandong, aplicando el modelo InVEST y regresión geográficamente ponderada. Los autores demuestran que la urbanización puede generar *trade-offs* significativos entre servicios de provisión (p. ej., alimento) y de regulación (p. ej., secuestro de carbono), lo que subraya la necesidad de políticas territoriales diferenciadas según escala e intensidad de uso del suelo. Desde una perspectiva de cuantificación de valor ambiental, Ma et al. [36] emplean simulación espacial y valor presente neto para estimar el alcance de los servicios de captura de carbono en la región de Qinling, mostrando que las funciones ecológicas pueden integrarse a sistemas inteligentes de gestión urbana y a la planificación basada en datos. Por su parte, Frantzeskaki et al. [26] sostienen que las soluciones basadas en la naturaleza (NbS) ofrecen alternativas viables para afrontar simultáneamente desafíos climáticos, sociales y urbanos, abogando por coproducción con comunidades y actores múltiples e incorporando indicadores de resiliencia, bienestar y conectividad ecológica. Finalmente, Xie et al. [37] analizan la evolución funcional de los ecosistemas desde una perspectiva estructura-función en regiones colinadas del sur de China; combinan análisis de *trade-offs* y *synergies* para proponer una zonificación funcional orientada a equilibrar desarrollo urbano y sostenibilidad ecológica, reforzando la idea de que la planificación urbana debe reconocer límites funcionales de los ecosistemas para evitar degradaciones acumulativas y fomentar sinergias biofísicas duraderas. En conjunto, estos estudios resaltan que los servicios ecosistémicos no son un componente ambiental externo al sistema urbano, sino una pieza esencial de su funcionamiento, cuya integración explícita en la planificación puede potenciar sinergias entre sistemas y mejorar de manera sustantiva el bienestar urbano.

3.2.5 Bienestar urbano y justicia ambiental

El análisis de la sinergia entre sistemas urbanos cobra sentido en la medida en que estos sistemas contribuyen, de forma articulada, al bienestar de la población. Este bienestar no se limita a indicadores económicos o a la provisión de servicios básicos, sino que integra dimensiones complejas como la salud, la seguridad, el acceso equitativo al entorno urbano y la cohesión social [10], [11], [12], [8]. Uno de los aportes clave en esta línea es el de Aiello et al. [24], quienes abordan la relación entre urbanización, infraestructura verde y justicia ambiental en zonas urbanas de Europa, mostrando que el acceso desigual a infraestructura verde reproduce inequidades socioambientales que afectan de manera desproporcionada a poblaciones vulnerables; por ello, la justicia ambiental debe ser central al analizar la efectividad y equidad de las sinergias urbanas. Sousa-Silva et al. [25] refuerzan esta perspectiva al evidenciar que la cobertura arbórea varía según el nivel socioeconómico de los barrios: las zonas de menor ingreso presentan menor cobertura vegetal y, por ende, mayor exposición a islas de calor, menor bienestar psicológico y más riesgos asociados al estrés térmico. Estos hallazgos subrayan que los beneficios de sistemas como espacio público, biodiversidad urbana o microclima deben distribuirse equitativamente para considerarse verdaderamente sinérgicos y no excluyentes. Desde un enfoque urbano-contextual, Páez Murillo et al. [33] analizan los desafíos de seguridad ciudadana que acompañan la implementación de grandes infraestructuras como el Metro de Bogotá, mostrando que percepción de seguridad, diseño ambiental y planificación del transporte son elementos interrelacionados que inciden directamente en la calidad de vida, y que la gobernanza y las capacidades institucionales condicionan las sinergias entre movilidad, espacio público y convivencia. Frantzeskaki et al. [26], por su parte, sintetizan evidencia sobre cómo las soluciones basadas en la naturaleza (NbS) contribuyen a la salud física y mental, al sentido de pertenencia y a la calidad del aire cuando se diseñan de forma inclusiva y contextualizada, destacando la participación comunitaria y la cocreación como claves para sinergias sociales y ecológicas a múltiples escalas. Finalmente, el trabajo de Ma et al. [36] sobre el valor económico del carbono capturado en zonas forestales urbanas muestra que, incluso desde una lógica de mercado, es posible incorporar dimensiones de bienestar ambiental en los sistemas de planificación urbana, integrando valor ecológico, equidad social y funcionalidad económica hacia una visión sistémica y equilibrada del bienestar urbano.

3.2.6 Evaluación, modelación y validación de sistemas urbano

El estudio de las sinergias entre sistemas urbanos requiere herramientas metodológicas que permitan representar, analizar y validar las múltiples interacciones entre componentes heterogéneos del entorno urbano; de ahí el uso de dinámica de sistemas, modelos espaciales, simulaciones de escenarios y marcos de evaluación que combinan variables sociales, ambientales y económicas [4], [8]. Uno de los fundamentos teóricos más sólidos en esta línea es Barlas [4], quien define principios formales para la validación de modelos en dinámica de sistemas: los modelos deben reproducir comportamientos históricos y validarse tanto estructural como conductualmente; esta rigurosidad es clave para construir modelos urbanos que integren no solo variables individuales (p. ej., movilidad, energía), sino también sus bucles de realimentación y efectos acumulativos. Zhang et al. [38] y Gu et al. [39] aplican modelos de simulación para evaluar cómo cambios en uso del suelo, conectividad espacial e inversión pública afectan patrones de

desarrollo y sostenibilidad ecológica: Zhang [38] emplea autómatas celulares y análisis de escenarios; Gu [39] utiliza evaluación multicriterio para medir impactos sobre la biodiversidad. Ambos refuerzan la necesidad de considerar capas espaciales, funcionales y temporales al evaluar sinergias o conflictos entre sistemas urbanos. Xie et al. [37] proponen un modelo para evaluar la funcionalidad de los ecosistemas a partir de su estructura y servicios, combinando análisis de sinergias y trade-offs; este enfoque facilita integrar la dimensión ecológica en la planificación territorial y la simulación urbana. Desde políticas climáticas, Ma et al. [36] incorporan valor presente neto (NPV) para estimar el valor económico de servicios ecosistémicos (p. ej., captura de carbono), integrando emisiones, usos del suelo y planificación prospectiva. Por su parte, Ren et al. [35] aplican regresión geográficamente ponderada (GWR) para identificar relaciones espaciales entre urbanización e indicadores de servicios ecosistémicos, localizando zonas donde las interacciones son más intensas o conflictivas y aportando insumos para una toma de decisiones con enfoque territorial. En conjunto, estos modelos muestran que la modelación y evaluación sistémica —con validación rigurosa, enfoques dinámicos y espaciales y combinación de múltiples variables— permite representar de forma más realista las interdependencias entre sistemas urbanos, abrir oportunidades para identificar sinergias, anticipar efectos colaterales y diseñar intervenciones más efectivas para el bienestar colectivo.

3.2.7 Vacíos teóricos y aportes a esta investigación

La revisión de la literatura permite identificar vacíos significativos en el abordaje de las sinergias entre sistemas urbanos, lo que justifica la pertinencia de esta investigación. Primero, se observa **fragmentación sectorial**: la mayoría de estudios analiza componentes individuales —energía, movilidad, biodiversidad, planificación— sin profundizar en sus interacciones funcionales, lo que impide comprender la ciudad como sistema interconectado y limita la identificación de sinergias para el bienestar [1], [6], [29]. Además, existe una débil conexión entre dichas sinergias y resultados de bienestar (salud, seguridad, justicia ambiental, cohesión social): sólo una parte de la literatura vincula explícitamente interacciones sistémicas con indicadores y evidencia de bienestar [10], [12], [24], [25]. Aunque se han difundido herramientas avanzadas —InVEST, GWR, simulaciones dinámicas— su uso rara vez se integra en marcos conceptuales orientados a objetivos urbanos sistémicos y transformadores [4], [8], [35]. El desafío es, por tanto, también epistemológico: transitar de enfoques sectoriales y lineales hacia una comprensión compleja, adaptativa y relacional de la ciudad [1], [8], [29]. A ello se suma la subrepresentación latinoamericana en la literatura, lo que dificulta marcos sensibles a condiciones específicas de la región (desigualdad estructural, informalidad, déficits institucionales, presión sobre ecosistemas) [28], [33]. Finalmente, persiste una insuficiente articulación entre planificación urbana, gobernanza territorial y gestión ecológica, pese a avances en servicios ecosistémicos y soluciones basadas en la naturaleza (NbS) [5], [26], [32], [36].

Frente a estos vacíos, esta investigación propone un enfoque sistémico e integrador para analizar y comprender las interacciones entre sistemas urbanos y su papel en la generación de bienestar. Se avanza en un marco analítico que reconoce la ciudad como sistema complejo y dinámico de subsistemas interdependientes —movilidad, residuos, recursos hídricos, infraestructura verde, servicios ecosistémicos— cuya articulación puede producir efectos sinérgicos (o disfuncionales) sobre la calidad de vida [3], [4], [8], [20], [26], [29]. El estudio busca aportar herramientas

conceptuales y metodológicas para identificar, evaluar y potenciar dichas sinergias, integrando variables sociales, ecológicas y territoriales desde una perspectiva contextualizada [10], [11], [32], [36]. Asimismo, se aplica el enfoque a ciudades latinoamericanas, atendiendo retos de fragmentación territorial, informalidad, debilidad institucional, desigualdad socioespacial y presión ecológica [28], [33]; con ello, se aspira a generar insumos analíticos para una planificación basada en sinergias —integrada, participativa y orientada al bienestar colectivo— con criterios de sostenibilidad, equidad y resiliencia [5], [6], [26].

3.3 MARCO NORMATIVO

El análisis de sinergias entre sistemas urbanos en la generación de bienestar requiere, necesariamente, una comprensión profunda del marco jurídico que regula las funciones, dinámicas e interacciones de dichos sistemas. En el contexto colombiano, y particularmente en el caso de Bogotá, el desarrollo urbano está enmarcado en una arquitectura legal que busca equilibrar el crecimiento económico, la equidad social y la sostenibilidad ambiental. Este capítulo aborda el marco normativo que sustenta las principales componentes del modelo sistémico empleado en este estudio, integrando leyes, decretos, acuerdos distritales y políticas públicas que orientan la planificación, operación y transformación de los sistemas urbanos que inciden en el bienestar colectivo a escala de paisaje urbano.

Desde una perspectiva integral, la Ley 388 de 1997 constituye uno de los pilares fundamentales del ordenamiento territorial en Colombia. Esta ley establece los instrumentos técnicos, financieros y jurídicos que permiten a los municipios y distritos estructurar su desarrollo urbano bajo criterios de sostenibilidad, función social del suelo y equidad territorial. En el caso de Bogotá, esta norma habilita la adopción del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), el cual, en su versión más reciente (Decreto Distrital 555 de 2021), introduce un enfoque sistémico y relacional de ciudad, reconociendo la necesidad de coordinar infraestructura, servicios, hábitat, movilidad y medio ambiente como partes interdependientes de un todo urbano. Dicha visión es coherente con el planteamiento central de este proyecto, en tanto permite estructurar sinergias entre sistemas urbanos para maximizar el bienestar multidimensional, entendido no solo en términos individuales sino como una cualidad emergente de las interacciones ciudad – territorio.

La movilidad, como uno de los sistemas neurálgicos de cualquier ciudad, está regulada en Colombia por la Ley 105 de 1993 y la Ley 336 de 1996, las cuales establecen los principios rectores del transporte como servicio público esencial, con énfasis en la accesibilidad, continuidad, eficiencia y sostenibilidad. Estas normas otorgan competencias claras a los entes territoriales para planificar y operar sistemas integrados de transporte. En Bogotá, su aplicación se materializa en el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), concebido como política de Estado mediante el Decreto 309 de 2009, que busca garantizar cobertura, conectividad y calidad del servicio. En el marco del modelo sistémico utilizado en este proyecto, estas disposiciones normativas permiten cuantificar y analizar la variable “accesibilidad y calidad de transporte público”, entendida como un determinante del uso modal, la congestión vehicular, el consumo energético y, por tanto, del bienestar ambiental y económico urbano.

En este mismo ámbito, la Ley 1811 de 2016 reconoce e incentiva el uso de la bicicleta como medio de transporte sostenible, lo cual respalda la promoción de infraestructuras para la movilidad activa – peatonal y ciclística – que, en el modelo, se relaciona con la calidad ambiental y la salud pública. De igual manera, la Ley 2251 de 2022, que adopta el enfoque de “Sistema Seguro” para la

seguridad vial, proporciona una base normativa para analizar el impacto de la movilidad segura sobre la percepción de seguridad la salud y la cohesión ciudadana.

El acceso a vivienda digna, regulado constitucionalmente en el artículo 51 y desarrollado normativamente en la Ley 2079 de 2021, se vincula estrechamente con la configuración del hábitat urbano. Esta ley reconoce la política de vivienda y hábitat como una política de Estado, estableciendo lineamientos para reducir el déficit habitacional cuantitativo y cualitativo a través de estrategias como el mejoramiento integral de barrios, el subsidio a la demanda y la habilitación del suelo para Vivienda de Interés Social (VIS). En Bogotá, su implementación se articula con el POT 2021, que define una estructura funcional y del cuidado, exigiendo que todo proyecto urbano garantice una mezcla de usos, infraestructura social, movilidad accesible y espacio público adecuado. En el modelo propuesto, esta dimensión normativa permite evaluar la variable “acceso a vivienda” no como un bien estático, sino como parte de un sistema de relaciones que incluyen ingresos del hogar, capital esperado para vivienda, localización y acceso a servicios urbanos básicos.

La protección y promoción del espacio público se encuentra amparada por el artículo 82 de la Constitución Política, el cual ordena al Estado garantizar su integridad y destinación al uso común. El Decreto Nacional 1504 de 1998 y el Plan Maestro de Espacio Público de Bogotá desarrollan estos mandatos, estableciendo criterios para su planificación, diseño y mantenimiento. El POT 2021 introduce además el concepto de estructura ecológica del cuidado, integrando espacio público, servicios sociales, movilidad y gestión ambiental como condiciones de vida urbana digna. La calidad y el uso del espacio público, variables contempladas en el modelo, se entienden en este marco no solo como atributos físicos, sino como habilitadores de cohesión social, percepción de seguridad y apropiación territorial.

En cuanto a los servicios públicos, la Ley 142 de 1994 establece su régimen general, reconociéndolos como servicios esenciales regulados por principios de eficiencia, universalidad y solidaridad. La ley impone obligaciones de cobertura, calidad y continuidad en la prestación de servicios como agua potable, alcantarillado, energía eléctrica, aseo y gas. Esta normativa es fundamental para analizar variables del modelo como calidad de los servicios públicos, consumo energético y generación de residuos. A nivel distrital, el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), la política “Basura Cero” y las acciones derivadas del Acuerdo 779 de 2020 (Política de economía circular) permite integrar objetivos de sostenibilidad urbana y formalización laboral de recicladores, contribuyendo simultáneamente al bienestar ambiental, económico y social.

La dimensión educativa, entendida como base del capital humano y factor determinante del bienestar a largo plazo, está regulada por la Ley 115 de 1994 (Ley General de Educación) y la Ley 715 de 2001, que establecen las competencias del Estado en la financiación, calidad y cobertura de la educación básica, media y superior. En Bogotá, estas disposiciones se materializan en planes sectoriales, programas de formación técnica, y políticas de educación para primer empleo, como “Jóvenes a la U”. En el modelo, la variable “calidad y acceso a la educación” se articula con la productividad laboral y las brechas de desigualdad, mostrando cómo la inversión educativa, más allá de sus defectos individuales, genera retornos sistémicos en términos de bienestar colectivo, movilidad social y reducción de conflictos urbanos.

En lo que respecta al componente de salud pública, la Ley 100 de 1993 y la Ley Estatutaria 1751 de 2015 consolidan la salud como un derecho fundamental y un servicio público esencial. Estas normas aseguran la universalidad en la cobertura, la integridad de la atención y el enfoque preventivo de la salud. A nivel territorial. Bogotá ha adoptado el Plan Territorial de Salud Pública

y ha implementado programas como “Territorios Saludables”, que permiten la intervención focalizada en entornos urbanos vulnerables. En el modelo, la salud pública se relaciona dinámicamente con la calidad ambiental, el uso del espacio público y la cohesión social, reflejando la interdependencia entre los sistemas urbano – sanitario y el bienestar colectivo.

El componente ambiental, transversal en todos los sistemas urbanos, se sustenta legalmente en la Ley 99 de 1993, que creó el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y asignó funciones de regulación y control a entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y las autoridades ambientales locales. En Bogotá, la Secretaría Distrital de Ambiente cumple funciones de autoridad urbana en virtud de los convenios con la CAR. La gestión del cambio climático está normada por la Ley 1931 de 2018, que obliga a los entes territoriales a formular e implementar planes integrales de gestión climática. La ciudad, en respuesta, adoptó el Plan Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (PDGR-CC) y declaró formalmente la Emergencia Climática mediante el Acuerdo 790 de 2020. Estas normas permiten incorporar en el modelo variables como la calidad ambiental, emisiones contaminantes, producción de energía renovable y conciencia ambiental, mostrando como la planificación ambiental urbana incide en la sostenibilidad y resiliencia del bienestar colectivo.

En materia de seguridad y convivencia, el marco normativo incluye la Ley 2197 de 2022, que fortalece los instrumentos penales y administrativos del Estado frente al delito urbano, y la Ley 1801 de 2016 (Código Nacional de la Policía), que regula el comportamiento ciudadano en el espacio público. A nivel distrital, el Plan Integral de Seguridad, Convivencia y Justicia y la estructura operativa de la secretaria de seguridad permiten una gestión territorial del riesgo social, incorporando estrategias de videovigilancia, mediación comunitaria y redes de cuidado. En el modelo, la percepción de seguridad, los delitos y la inversión en seguridad pública son variables directamente impactadas por estas normativas, evidenciando cómo la seguridad ciudadana se configura tanto desde la infraestructura como desde la confianza institucional y la organización comunitaria.

Finalmente, el marco institucional de la planeación urbana en Bogotá se fundamenta en el Decreto Ley 1421 de 1993, que otorga al Distrito Capital competencias específicas para definir su modelo de desarrollo territorial, financiero y político. A través de instrumentos como el POT, el Plan Distrital de Desarrollo y los planes maestros sectoriales, la ciudad articula sus políticas sectoriales bajo una lógica de planificación integrada. La reciente Ley 2199 de 2022, que regula la región Metropolitana Bogotá-Cundinamarca, amplía esta perspectiva hacia una gobernanza multinivel que reconoce la escala funcional real de la ciudad-región, permitiendo sinergias metropolitanas en movilidad, ambiente, seguridad alimentaria y gestión de residuos. Esta legislación refuerza el carácter sistémico del desarrollo urbano y respalda los principios teóricos y metodológicos de este proyecto.

En conjunto, este entramado normativo no solo habilita las operaciones de cada sistema urbano, sino que exige una visión integrada y sistémica de ciudad, orientada a garantizar los derechos colectivos, la equidad territorial y la sostenibilidad ambiental, pilares fundamentales del bienestar urbano en el siglo XXI.

4. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación ha sido diseñada para abordar de manera integral las sinergias entre sistemas urbanos y su influencia en la sostenibilidad de las ciudades inteligentes. El proceso metodológico se estructura en dos etapas principales: la construcción de un diagrama causal y su análisis detallado, lo que permite modelar la dinámica de interacción entre los distintos subsistemas urbanos y evaluar su impacto en la planificación sostenible.

En la primera etapa, se desarrolla un modelo conceptual basado en diagramas causales, que permite visualizar de manera estructurada las relaciones de interdependencia entre los sistemas urbanos, incluyendo transporte, energía, gestión de residuos, entre otros. Este modelo conceptual facilita la identificación de variables críticas, así como la representación de bucles de realimentación, los cuales pueden reforzar tendencias positivas en el desarrollo urbano o equilibrar dinámicas que requieran regulación para evitar externalidades negativas.

En la segunda etapa, se lleva a cabo un análisis profundo del diagrama causal, con el propósito de identificar puntos estratégicos de intervención y priorizar aquellas acciones que potencien sinergias positivas entre los distintos sistemas urbanos. Este análisis se complementa con la evaluación de escenarios urbanos, en los cuales se examina la influencia de los bucles de realimentación bajo diferentes condiciones de planificación y gobernanza. Para facilitar la toma de decisiones estratégicas, se elabora una matriz de priorización, que permite jerarquizar las intervenciones de acuerdo con su impacto en la sostenibilidad urbana, la resiliencia del sistema y la mejora del bienestar ciudadano.

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación garantiza un análisis rigurosamente estructurado y sistémico, combinando la representación visual de dinámicas urbanas con una evaluación cualitativa y estratégica. De este modo se proporciona un marco analítico sólido para la planificación y optimización de ciudades inteligentes y sostenibles, permitiendo la formulación de estrategias integradas que maximicen la eficiencia de los sistemas urbanos y fortalezcan su capacidad de adaptación frente a desafíos ambientales, tecnológicos y sociales.

5. IDENTIFICACIÓN Y CATALOGACIÓN DE SISTEMAS URBANOS

Este capítulo presenta el análisis sistémico de un modelo urbano formulado mediante dinámica de sistemas en Vensim, complementado con una revisión exhaustiva de literatura científica sobre ciudades inteligentes y sostenibles. La construcción del modelo se fundamenta en la necesidad de entender la ciudad como un sistema complejo, caracterizado por múltiples interacciones no lineales, realimentaciones cruzadas y comportamientos emergentes, tal como lo definen Batty [1] y Holland [2] en sus marcos sobre sistemas adaptativos complejos. En este sentido, las ciudades no deben ser interpretadas únicamente como acumulaciones de infraestructura, sino como entornos dinámicos donde confluyen dimensiones físicas, sociales, tecnológicas y ambientales.

La aplicación de dinámica de sistemas, inspirada en los trabajos fundacionales de Forrester [3] y refinada por autores como Barlas [4], permite capturar las relaciones causales y los efectos acumulativos entre variables clave del sistema urbano. Esta metodología resulta especialmente útil en el contexto de las ciudades inteligentes, donde la integración tecnológica, la gobernanza distribuida y la sostenibilidad ambiental son elementos esenciales [5], [6].

Asimismo, el uso de esta aproximación permite enfrentar los retos de toma de decisiones en contextos complejos. De acuerdo con Pérez Alcázar y Redondo [7], la dinámica de sistemas facilita la comprensión de escenarios prospectivos mediante el uso de diagramas de bifurcación, que actúan como mapas de todos los futuros posibles del sistema.

A través de la integración entre simulación computacional y teoría urbana, se logró capturar las dinámicas clave que configuran los entornos urbanos contemporáneos, permitiendo identificar bucles de realimentación críticos, tanto de refuerzo como de balance. Estos bucles representan mecanismos estructurales que explican cómo evolucionan los procesos urbanos en torno a cinco ejes principales: infraestructura, servicios, medio ambiente, movilidad y gobernanza. Cada uno de estos ejes está compuesto por variables interrelacionadas que, al ser modeladas dinámicamente, revelan patrones de comportamiento a corto, mediano y largo plazo. En consecuencia, este análisis no solo ofrece una visión holística sobre cómo se interrelacionan los distintos componentes del sistema urbano, sino que también permite detectar puntos de intervención estratégicos para mejorar su desempeño, eficiencia y sostenibilidad en el largo plazo.

5.1. Diagrama causal de la sinergia entre los sistemas urbanos

La representación de un diagrama causal que integre la sinergia entre los distintos sistemas urbanos es esencial para comprender el comportamiento global de la ciudad como sistema complejo. Esta sinergia se manifiesta en las interacciones simultáneas y múltiples entre infraestructura, medio ambiente, gobernanza, movilidad y servicios, que se realimentan dinámicamente generando resultados no lineales. Como plantean Forrester [3] y Barlas [4], los diagramas causales no solo

ilustran relaciones directivas entre variables, sino que revelan circuitos de realimentación que producen efectos acumulativos o estabilizadores dentro del sistema.

En particular, los nodos de articulación, como la inversión en infraestructura urbana o la percepción de calidad de vida, funcionan como puntos de convergencia entre subsistemas. Por ejemplo, mejoras en la infraestructura urbana no solo impactan en la calidad de vida, funcionan como puntos de convergencia entre subsistemas. Por ejemplo, mejoras en la infraestructura urbana no solo impactan en la calidad de servicios públicos, sino que también activan cadenas causales que afectan la movilidad activa, la cohesión social y la salud pública. Este tipo de relaciones estructurales integradas de lugar a bucles compuestos que refuerzan o equilibran la evolución urbana de forma sistémica. Según Pérez Alcázar y Redondo [7], este enfoque permite construir mapas causales que revelen trayectorias posibles del sistema, mejorando la toma de decisiones en escenarios urbanos complejos. De este modo, el diagrama causal no es una herramienta descriptiva estática, sino una estructura lógica que condensa la arquitectura de interdependencias que configuran el desempeño de ciudad inteligente y sostenible.

Figura 1. Diagrama causal de la sinergia entre los sistemas urbanos. Este diagrama resume visualmente las interrelaciones descritas:

mejora ambiental, la equidad en salud, la innovación tecnológica y la reducción de vulnerabilidades urbanas.

5.1.2 R2: Salud y calidad de vida

El bucle R2 refleja una relación reforzadora fundamental entre salud pública, calidad de vida y productividad laboral, elementos que constituyen pilares de un entorno urbano sostenible e inclusivo. Este mecanismo parte de la mejora en la salud pública, que puede ser impulsada tanto por la calidad ambiental como por el uso efectivo de los espacios públicos. Una población más saludable tiende a mostrar mayores niveles de productividad, ya que experimenta menos ausentismo laboral, mayor capacidad cognitiva y una mejor disposición para participar en la vida económica y comunitaria [10].

El aumento en la productividad laboral genera ingresos más altos, tanto para los ciudadanos como para el sistema fiscal a través de impuestos, lo que posibilita una mayor inversión en infraestructura urbana, incluyendo servicios de salud, educación y movilidad activa. Esta inversión, a su vez, realimenta el sistema al mejorar nuevamente las condiciones de salud y bienestar de la población. La percepción positiva de la calidad de vida refuerza este ciclo, ya que motiva un mayor uso de espacios públicos y fomenta prácticas saludables en la vida cotidiana. Este tipo de sinergias ha sido ampliamente documentado en contextos de planificación urbana centrada en el bienestar [11], [12].

Desde una perspectiva sistémica, R2 actúa como un bucle de refuerzo positivo que promueve un desarrollo humano sostenible, en el que el bienestar individual y colectivo se convierte en motor de progreso urbano. Este bucle resulta particularmente importante en ciudades inteligentes, donde el uso de tecnologías puede potenciar el monitoreo de salud, la telemedicina y la accesibilidad a servicios básicos, reforzando aún más los beneficios descritos [6].

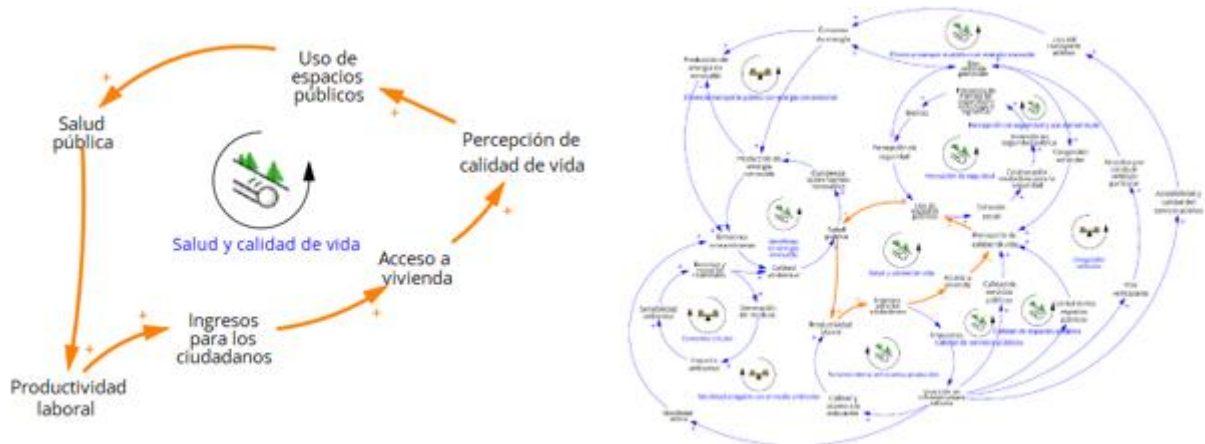


Figura 3 Bucle Reforzador: R2: Salud y calidad de vida

Este bucle comienza a evidenciar su influencia de manera modesta en el corto plazo, dado que las mejoras de salud y productividad son graduales. En el mediano plazo, su impacto se intensifica conforme se fortalecen los componentes del capital humano. A largo plazo, se convierte en una palanca estructural crítica para la sostenibilidad económica y social del sistema urbano. Su activación está condicionada por políticas inclusivas en educación, salud y acceso equitativo a servicios. Sus implicaciones sistémicas incluyen el fortalecimiento de las capacidades productivas del territorio, la cohesión social y la resiliencia urbana. A lo largo del tiempo, este bucle comienza a mostrar un impacto más tangible conforme las mejoras en salud pública fortalecen el capital humano urbano. En el mediano plazo, esta sinergia se traduce en aumento progresivo de la productividad, los ingresos y la inversión pública. A largo plazo, R2 puede convertirse en una palanca estructural crítica para el desarrollo económico, especialmente si es respaldado por políticas educativas y sanitarias inclusivas que aseguren el acceso equitativo a servicios esenciales. En términos sistémicos, su activación representa una oportunidad para reforzar las capacidades estructurales del sistema urbano, consolidando una base sólida para la resiliencia social, económica y ambiental.

5.1.3 R3: Fortalecimiento del sistema productivo

El bucle R3 representa un mecanismo de refuerzo clave en el desarrollo económico del entorno urbano, centrado en la productividad laboral y su relación sinérgica con la infraestructura y la inversión pública. Este ciclo inicia con mejoras en la educación y la salud, que generan un incremento en la productividad de la población económicamente activa. Como señalan autores como Glaeser [13] y Acemoglu y Robinson [14] han demostrado que el capital humano es una de las fuentes fundamentales del crecimiento económico urbano. A medida que las personas acceden a servicios públicos de calidad y a entornos saludables, su capacidad para generar valor económico aumenta, lo que se traduce en mayores ingresos para los hogares.

Estos ingresos adicionales incrementan la base tributaria, lo que habilita al Estado para invertir en infraestructura estratégica como movilidad, redes digitales, educación avanzada y servicios sociales. Según Batty [1], estas inversiones no solo reducen desigualdades, sino que también fortalecen las capacidades estructurales de resiliencia del sistema urbano. El resultado es un ciclo reforzado donde el aumento de productividad impulsa la inversión pública, que a su vez mejora las condiciones estructurales del sistema productivo, generando mayor productividad. Esta sinergia se alinea con el enfoque de ciudades inteligentes que integran datos, tecnología y gobernanza para mejorar la eficiencia y equidad urbana [6].



Figura 4 Bucle Reforzador: R3: Fortalecimiento del sistema productivo

Este bucle comienza a mostrar efectos en el corto plazo a través de mejoras en eficiencia operativa y reducción de tiempos de desplazamiento. En el mediano plazo, se consolida como impulsor del crecimiento económico al reducir la dependencia de subsidios y fomentar la innovación endógena. En el largo plazo, si se mantiene una estrategia fiscal progresiva y una planificación orientada al bienestar colectivo, el bucle puede convertirse en uno de los principales motores del desarrollo urbano integral. Su activación depende de políticas públicas que prioricen la inversión en capital humano, equidad en el acceso a servicios y fomento de economía basada en el conocimiento [7].

5.1.4 R4: Eficiencia transporte público con energía renovable

El bucle R4 articula una dinámica positiva en torno a la relación entre eficiencia en la movilidad urbana y sostenibilidad energética. Este mecanismo comienza con la mejora en la accesibilidad y calidad del servicio público de transporte, incentivada por inversiones en infraestructura y por políticas urbanas orientadas al desarrollo de sistemas de transporte masivo. A medida que la población percibe mayor confiabilidad, cobertura y frecuencia en el transporte público, aumenta su uso, lo que disminuye progresivamente la dependencia del vehículo particular y, con ello, la congestión y las emisiones contaminantes [15].

Este proceso se potencia aún más cuando el transporte público está impulsado por fuentes de energía renovable, como electricidad generada por sistemas fotovoltaicos o hidrógeno verde. Según la Agencia Internacional de Energía [16], la electrificación del transporte masivo alimentada por fuentes limpias tiene el potencial de reducir hasta un 70% de las emisiones urbanas vinculadas a la movilidad. A medida que las ciudades adoptan este tipo de soluciones, se generan beneficios acumulativos en términos de calidad del aire, salud pública y ahorro energético. Estos beneficios

fortalecen la legitimidad social y política de los sistemas de transporte público sostenibles, lo que refuerza su uso y promueve nuevas inversiones en tecnologías limpias [6].

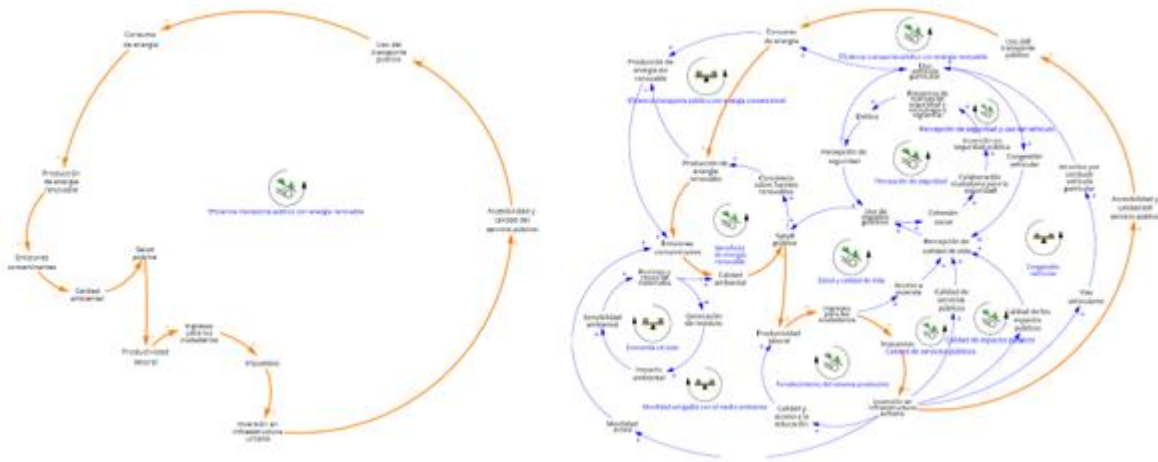


Figura 5 Bucle Reforzador: R4: Eficiencia transporte público con energía renovable

Desde la perspectiva sistémica, este bucle de refuerzo se consolida a través de una lógica de retorno positivo, donde el fortalecimiento del transporte público alimentado por energía renovable mejora simultáneamente la movilidad, el ambiente urbano y la equidad social. En el corto plazo, los efectos se perciben en la reducción de tiempos de traslado y de comunicación local. En el mediano plazo, su influencia se amplifica mediante la consolidación de una cultura de movilidad activa y la expansión de la infraestructura energética limpia. A largo plazo, si se sostiene el marco institucional y financiero para integrar transporte y energías renovables, R4 puede volverse estructuralmente dominante. Su activación está condicionada por la inversión pública y privada en transporte multimodal, la planificación integrada del suelo y la política energética urbana [5].

En suma, el bucle R4 representa una palanca estratégica que permite abordar simultáneamente los desafíos de movilidad, emisiones y equidad en el contexto de ciudades inteligentes y sostenibles.

5.1.5 R5: Percepción de seguridad

El bucle R5 analiza cómo la percepción de seguridad en el entorno urbano puede activarse como un mecanismo reforzador que mejora la cohesión social, incrementa el uso de espacios públicos y fortalece la gobernanza local. Este bucle comienza con la disminución en los niveles de delitos, resultado de la inversión en infraestructura tecnológica y humana para la seguridad, como cámaras, alumbrado público y patrullaje inteligente. De acuerdo con Giffinger et al. [17], una ciudad inteligente debe incorporar soluciones tecnológicas que no solo disuadan el delito, sino que fortalezcan la sensación de seguridad ciudadana.

La reducción del crimen mejora la percepción de seguridad entre los ciudadanos, lo que incentiva una mayor interacción comunitaria y el uso activo de espacios públicos. Este uso fortalece la cohesión social al facilitar la construcción de vínculos de confianza, cooperación y corresponsabilidad entre los habitantes, elementos fundamentales para la resiliencia urbana [11], [18]. A su vez, una ciudadanía más cohesionada tiende a colaborar más activamente en iniciativas de seguridad comunitaria, como redes de vecinos, alertas tempranas, o reportes colaborativos mediante aplicaciones digitales.

Estos mecanismos realimentan positivamente el sistema, disminuyendo nuevamente la criminalidad y mejorando el bienestar urbano. Desde la perspectiva de la dinámica de sistemas, este bucle muestra como una variable subjetiva como la percepción puede incidir en dinámicas objetivas del entorno urbano, afectando tanto la calidad de vida como la eficiencia en la provisión de servicios [6].

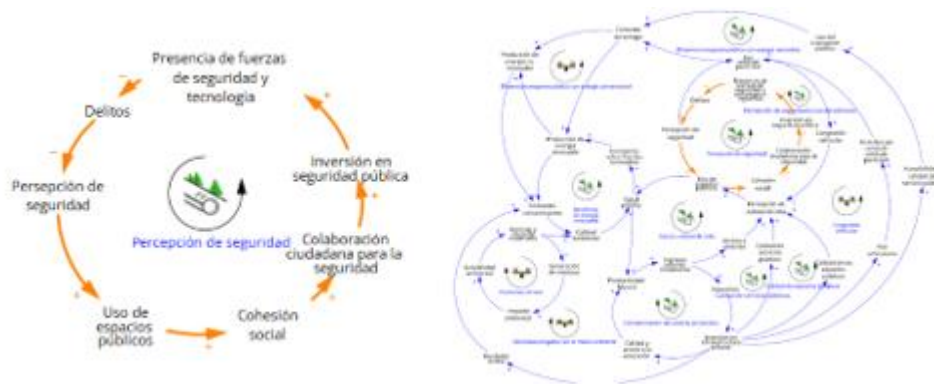


Figura 6 Bucle reforzador: R5: Percepción de seguridad

En corto plazo, este bucle muestra efectos visibles en el comportamiento ciudadano y en el uso del espacio urbano. En el mediano plazo, su consolidación depende del fortalecimiento institucional y de la apropiación social de las estrategias de seguridad. A largo plazo, puede convertirse en un motor de transformación cultural que sustente la paz urbana. Su activación requiere no solo intervenciones tecnológicas, sino también políticas orientadas a la equidad territorial, el urbanismo inclusivo y la participación ciudadana efectiva [5].

5.1.6 R6: Percepción de seguridad y uso del vehículo

El bucle R6 explora cómo la percepción de seguridad en el entorno urbano puede inducir cambios en los patrones de movilidad, específicamente en la elección del modo de transporte. En contextos donde la ciudadanía percibe niveles altos de inseguridad, es común observar un incremento en el uso del vehículo particular como mecanismo de protección frente a riesgos reales o percibidos [11], [15]. Esta tendencia genera un aumento en la demanda de infraestructura vial, así como una mayor

sostiene la inversión pública y se articulan mecanismos de gobernanza participativa y planificación intersectorial. Su activación requiere condiciones estructurales como estabilidad fiscal, transparencia institucional y políticas públicas orientadas a la equidad. En términos sistémicos, R7 constituye una palanca fundamental para lograr ciudades resilientes, inclusivas y ambientalmente responsables.

5.1.8 R8: Calidad de espacios públicos

El bucle R8 se centra en cómo la inversión sostenida en infraestructura urbana puede potenciar la calidad de los espacios públicos, reforzando dinámicas urbanas clave como la cohesión social, la percepción de seguridad y la salud pública. Esta dinámica inicia con la asignación de recursos fiscales orientados a mejorar parques, plazas, mobiliario urbano y espacios recreativos, lo cual incrementa la habilidad del entorno urbano y fomenta su uso activo por parte de la ciudadanía [19].

A medida que los ciudadanos hacen uso frecuente de los espacios públicos, se fortalece la interacción social, elemento crucial para la construcción de capital social y el refuerzo de la cohesión comunitaria [12], [18]. Una mayor cohesión genera corresponsabilidad en el uso y cuidado del espacio urbano, lo que a su vez incrementa la percepción de seguridad y estimula prácticas saludables, como la actividad física o la recreación colectiva [11]. Estas prácticas tienen un efecto positivo en la salud pública y en la percepción de calidad de vida, generando un entorno social que justifica y realimenta la inversión pública inicial.

Este ciclo virtuoso contribuye no solo a mejorar la equidad espacial, sino también a disminuir tensiones sociales, facilitando la inclusión de grupos vulnerables y promoviendo un sentido de pertenencia y apropiación territorial [6]. Desde la perspectiva de la dinámica de sistemas, R8 actúa como un mecanismo estructural que integra dimensiones físicas y sociales del entorno urbano, siendo particularmente sensible a intervenciones urbanas que prioricen el diseño centrado en las personas.

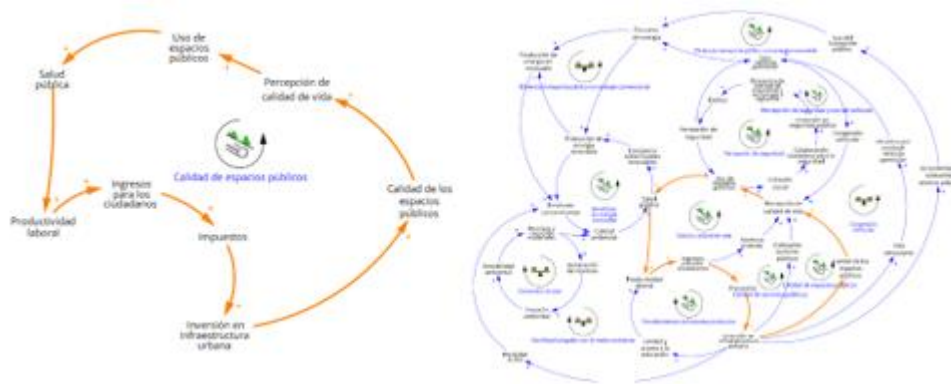


Figura 9 Bucle reforzador: R8: Calidad de espacios públicos

En el corto plazo, los efectos de este bucle se manifiestan en la revitalización de espacios públicos y en el aumento de la actividad ciudadana. En el mediano plazo, se fortalece al conectarse con indicadores de cohesión social, percepción de seguridad y salud. En largo plazo, puede convertirse en una palanca fundamental para lograr ciudades resilientes y equitativas, siempre que se mantenga un enfoque participativo e inclusivo en la planificación urbana [5].

5.1.9 B1: Economía circular

El bucle B1 representa una dinámica de balance clave en el contexto de las ciudades inteligentes y sostenibles, enfocada en la reducción de residuos a través de prácticas de economía circular. Esta dinámica inicia con el aumento de la sensibilidad ambiental entre los ciudadanos, producto de la percepción creciente del impacto ambiental generado por el consumo y la disposición inadecuada de materiales. Según Raudsepp-Hearne et al. [20], los sistemas urbanos que integran esta sensibilidad en sus prácticas sociales tienden a desarrollar mayores capacidades de adaptación ambiental.

La sensibilidad ambiental estimula la participación de la ciudadanía en programas de reciclaje y reúso de materiales, lo cual disminuye la generación de residuos sólidos urbanos. Esta reducción tiene un efecto directo sobre el impacto ambiental, minimizando la presión sobre los ecosistemas urbanos y periurbanos, y reduciendo la necesidad de expansión de infraestructuras de disposición final. El descenso en el impacto ambiental refuerza nuevamente la sensibilidad ciudadana, cerrando un ciclo de autorregulación que promueve la sostenibilidad material del sistema urbano [21].

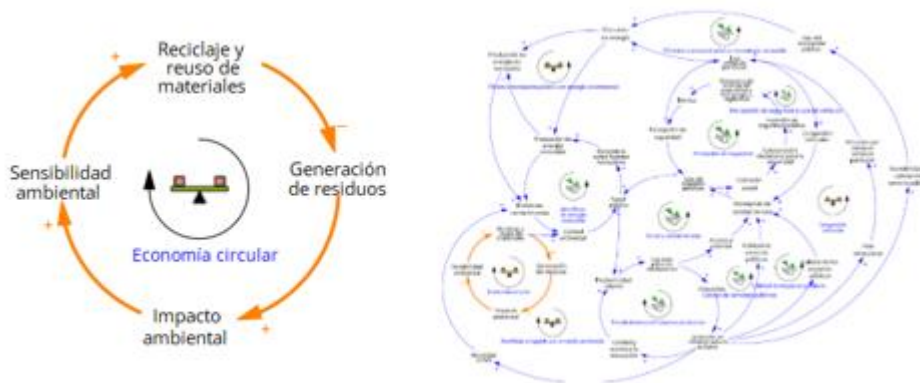


Figura 10 Bucle balanceador: B1: Economía circular

Este bucle de balance actúa como mecanismo de contención frente a los efectos negativos del consumo urbano desmedido. Su relevancia aumenta en escenarios de alta densidad poblacional y expansión territorial acelerada, donde los sistemas de recolección y tratamiento de residuos se ven

fácilmente sobrecargados. En el corto plazo, este bucle se manifiesta a través de mejoras logísticas y reducción de costos asociados a la gestión de residuos. En el mediano plazo, fortalece la gobernanza ambiental mediante la incorporación de principios de economía circular en la planificación urbana. En largo plazo, B1 puede convertirse en un regulador estructural del metabolismo urbano si se institucionalizan prácticas de producción y consumo responsable [5], [6].

Desde la perspectiva de la dinámica de sistemas, el bucle B1 representa una función de balance que previene la acumulación de externalidades negativas, asegurando que los flujos materiales dentro del sistema urbano permanezcan dentro de límites ecológicamente seguros. Su activación está condicionada por el diseño e implementación de políticas públicas que promuevan la educación ambiental, la infraestructura circular y el mercado de materiales secundarios, así como por un cambio cultural hacia modelos de consumo sostenibles.

5.1.10 B2: Movilidad amigable con el medio ambiente

El bucle B2 representa una dinámica de balance clave orientada a la contención de externalidades negativas asociadas al sistema de transporte urbano, específicamente aquellas derivadas del uso intensivo de vehículos particulares. Esta dinámica se activa cuando el incremento en el uso de transporte público y de formas de movilidad activa, como caminar o andar en bicicletas, reduce la demanda energética y las emisiones contaminantes asociadas al sector transporte [15]. En un entorno urbano inteligente, estos cambios de comportamiento son viabilizados por mejoras en la accesibilidad, calidad del servicio y conectividad multimodal, todos ellos factores estructurales que potencian un ecosistema de movilidad más equitativo y sostenible [6].

La disminución en el uso del vehículo privado genera una respuesta positiva en el sistema urbano al reducir la congestión vehicular, mejorar la calidad del aire y aumentar la eficiencia energética general del sistema. Estas mejoras tienen implicaciones directas sobre la salud pública y la calidad de vida, al tiempo que disminuyen la presión sobre la infraestructura vial y el sistema sanitario. A medida que estas externalidades negativas son contenidas, el sistema entra en una fase de autorregulación, donde la realimentación negativa modula las tendencias de crecimiento descontrolado de la movilidad motorizada [17].

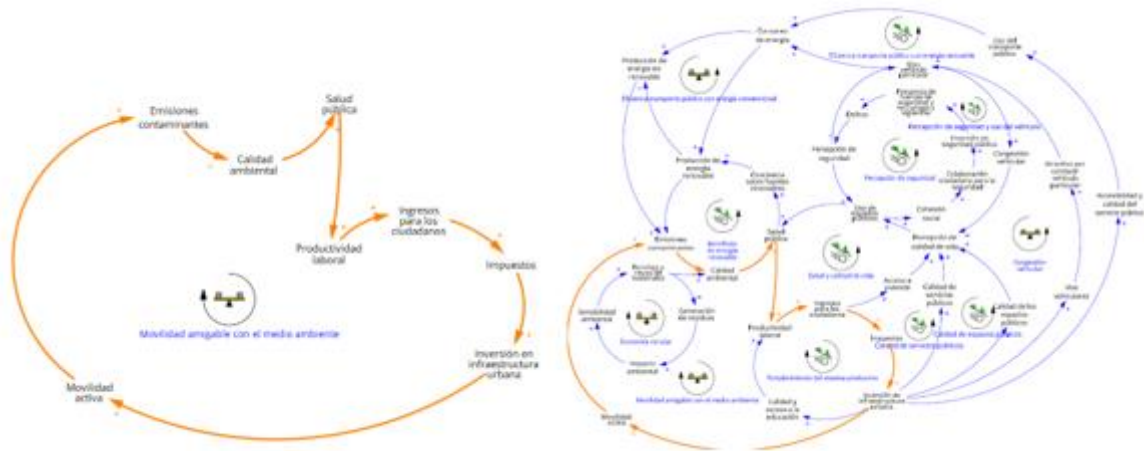


Figura 11 Bucle balanceador: B2: Movilidad amigable con el medio ambiente

Desde la perspectiva de la dinámica de sistemas, B2 funciona como un mecanismo de equilibrio que estabiliza el sistema urbano al reducir la dependencia estructural del automóvil privado. Su efectividad depende en gran medida del diseño de políticas integradas de transporte y ordenamiento territorial, capaces de fomentar modos de movilidad sostenible, deducir los incentivos al uso del vehículo particular y mejorar la seguridad vial [5]. En corto plazo, este bucle se manifiesta a través de una reducción inmediata en el tráfico y la contaminación local. En el mediano plazo, su influencia crece al generar cambios culturales en los hábitos de movilidad urbana. Finalmente, en el largo plazo, B2 puede consolidarse como una barrera estructural contra las emisiones y el deterioro ambiental, siempre que se mantenga una inversión constante en infraestructura para transporte público y movilidad activa.

5.1.11 B3: Eficiencia transporte público con energía convencional

El bucle B3 representa una dinámica de balance que emerge de la tensión entre el fortalecimiento del transporte público y su dependencia de fuentes energéticas convencionales. A medida que aumentan los niveles de accesibilidad y cobertura del sistema de transporte colectivo, también crece su uso por parte de la población, lo cual representa un logro en términos de eficiencia logística, equidad urbana y reducción del uso del vehículo particular [11], [15]. Sin embargo, cuando este sistema continúa funcionando sobre una base energética no renovable, se genera una presión paralela sobre los recursos fósiles y sobre las emisiones contaminantes del entorno urbano [16].

Este bucle de balance opera como una fuerza de contención: por un lado, el aumento del uso del transporte público reduce la congestión vehicular y mejora la movilidad urbana; por otro, incrementa el consumo energético y las emisiones asociadas si no está acompañado de una transición hacia tecnologías limpias. Esta paradoja evidencia que una mejora en la eficiencia

operativa del transporte no siempre se traduce en beneficios ambientales netos, especialmente en ciudades donde la matriz energética aún depende en gran medida de fuentes convencionales como el diésel o el gas natural [17].

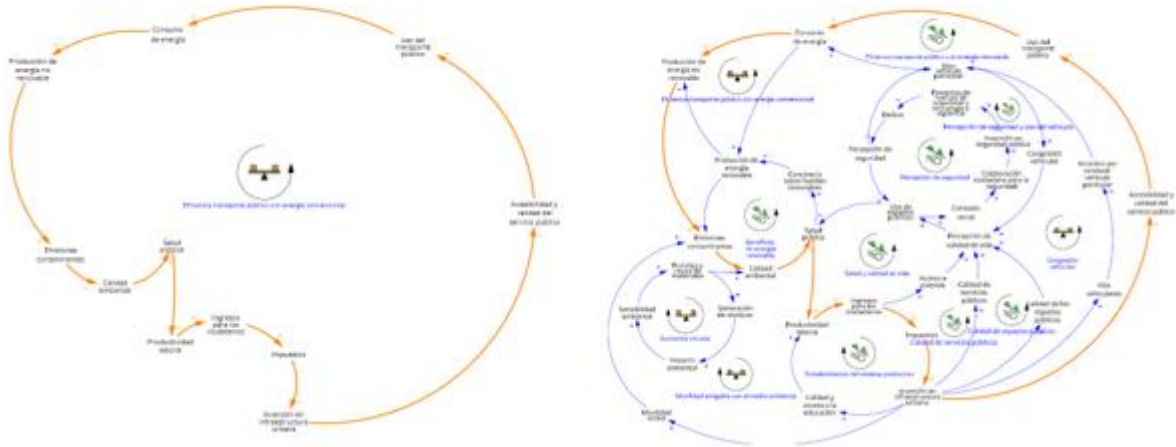


Figura 12 Bucle balanceador: B3: Eficiencia transporte público con energía convencional

Desde la perspectiva de dinámica de sistemas, B3 actúa como un mecanismo regulador que impone límites al crecimiento de beneficios del transporte público si no se acompaña de innovación tecnológica y transformación energética. En el corto plazo, la mejora en la eficiencia del servicio se percibe en reducción de tiempos de viaje y aumento de cobertura. En el mediano plazo, esta eficiencia puede verse comprometida por el aumento del consumo energético y los costos operativos. A largo plazo, si no se realiza una transición hacia sistemas de transporte público eléctricos o híbridos alimentados por fuentes renovables, el bucle pierde efectividad ambiental y genera un retroceso sistémico en los objetivos de sostenibilidad urbana [5], [6].

Por tanto, B3 no solo señala un límite práctico al paradigma actual de movilidad urbana, sino que destaca la urgencia de sincronizar las políticas de transporte y energía. Su activación exige una visión integral de planeación, en la que eficiencia, accesibilidad y descarbonización sean objetivos simultáneos y complementarios.

5.1.12 B4: Congestión vehicular

El bucle B4 representa un ciclo de balance derivado de la sobreutilización del vehículo particular en contextos urbanos. En muchas ciudades latinoamericanas, el aumento en la percepción de inseguridad, la mejora parcial de la infraestructura vial y la falta de alternativas de transporte eficientes conducen a un crecimiento sostenido en el uso del automóvil privado [11], [15]. A corto plazo, esta decisión puede parecer racional para los individuos, ya que ofrece mayor control, rapidez y una sensación subjetiva de seguridad. Sin embargo, en el agregado social, produce un

6. ANALISIS DE LA DINÁMICA DE LOS DE SISTEMAS URBANOS

6.1 Evaluación de influencia por contexto en los sistemas urbanos

La organización y evolución de los sistemas urbanos está profundamente condicionada por factores contextuales que definen sus límites, potencialidades y restricciones. Estos factores incluyen la estructura socioeconómica, el marco institucional, el entorno ambiental, así como las condiciones históricas y culturales que configuran las trayectorias urbanas. En consecuencia, las ciudades no son entornos homogéneos ni replicables, sino territorios singulares cuya transformación depende de cómo interactúan estos elementos entre sí [1], [2].

Las políticas públicas, por ejemplo, no actúan en el vacío: su impacto varía sustancialmente según el grado de institucionalidad, la capacidad administrativa y la legitimidad social. Del mismo modo, el acceso a tecnologías inteligentes no garantiza por sí solo un desarrollo sostenible si no existe una estructura de gobernanza que facilite su adopción e integración en la vida urbana [5], [21]. Esta variabilidad contextual implica que dos ciudades con objetivos similares – como reducir emisiones o mejorar la movilidad – pueden requerir estrategias totalmente diferentes, adaptadas a sus condiciones específicas de densidad, cultura de movilidad o estructura de financiamiento local [6].

Por otra parte, el contexto también influye en la forma en que las comunidades perciben y se apropian del espacio urbano. Factores como la cohesión social, la percepción de seguridad y el grado de participación ciudadana pueden mediar significativamente los efectos de una intervención urbana. Así, un parque urbano no genera los mismos beneficios en términos de salud, inclusión o sostenibilidad si se encuentra en un entorno social fragmentado que si esta inserto en una comunidad cohesionada y participativa [11], [19]. Esta lógica contextual obliga a superar enfoques normativos o universalistas en la planificación urbana, promoviendo en su lugar modelos flexibles, adaptativos y sensibles a la realidad local.

En síntesis, evaluar los sistemas urbanos desde su contexto permite comprender la singularidad de sus trayectorias, los límites de replicabilidad de ciertas soluciones y la necesidad de enfoques territorializados para alcanzar objetivos de bienestar colectivo y justicia espacial.

6.1.1 Evaluación de influencia de los Sistemas Urbanos en Distintos Contextos

La influencia que ejercen los sistemas urbanos en sus respectivos territorios no puede analizarse de forma aislada, sino como resultado de una interacción constante con los contextos sociales, económicos, ambientales y políticos en los que se insertan. Esta interacción genera efectos diferenciados que dependen de las características estructurales de cada ciudad, su nivel de desarrollo, su cultura institucional y su relación con el entorno natural y construido [1], [2].

En contextos urbanos consolidados, con alta capacidad institucional y marcos de gobernanza participativa, las transformaciones impulsadas por el sistema urbano suelen generar efectos

sinérgicos en múltiples dimensiones del bienestar colectivo. Por ejemplo, inversiones en infraestructura de transporte o servicios digitales tienden a ser integradas eficazmente, potenciando la conectividad, la equidad y la eficiencia territorial [6]. En cambio, en entornos urbanos con debilidades estructurales, fragmentación social o baja capacidad de planificación, los mismos esfuerzos pueden generar efectos limitados o incluso contraproducentes, reforzando dinámicas de exclusión, informalidad o deterioro ambiental [21].

Además, el grado de influencia de los sistemas urbanos también depende de la resiliencia de sus instituciones frente a perturbaciones externas. Las ciudades que operan con estructuras flexibles, horizontales y basadas en conocimiento tienden a adaptarse más eficazmente a eventos disruptivos como crisis sanitarias, económicas o climáticas, reforzando su capacidad de actuar como sistemas influyentes en términos regionales y globales [5]. En contraste, aquellas que mantienen estructuras rígidas y dependientes de marcos sectoriales tienden a replicar respuestas ineficaces ante la complejidad creciente del entorno.

Por tanto, la evaluación de la influencia de los sistemas urbanos debe considerar las condiciones históricas y culturales del territorio, las capacidades de planificación multiescalar y el nivel de apropiación ciudadana de las políticas públicas. Solo así es posible comprender por qué ciertas ciudades logran operar como nodos estratégicos de innovación, equidad y sostenibilidad, mientras otras permanecen atrapadas en dinámicas de dependencia, vulnerabilidad o inercia institucional [7], [18].

6.1.2 Evaluación de influencia de Variables en un Diagrama Causal

La evaluación de influencia de las variables en un diagrama causal permite identificar cuáles nodos del sistema ejercen mayor capacidad de propagación estructural a través de las relaciones causales. Esta evaluación, al centrarse en las conexiones entre variables, posibilita detectar variables estratégicas que, al ser intervenidas, generan efectos multiplicadores dentro del sistema urbano. Como plantea Sterman [8], en los sistemas complejos las variables no deben evaluarse por su valor absoluto, sino por su posición relacional y su capacidad para activar o mitigar trayectorias dinámicas.

En el caso del modelo causal desarrollado para ciudades inteligentes y sostenibles, se observa que variables como la “inversión en infraestructura urbana”, la “percepción de calidad de vida”, el “consumo energético” y la “salud pública” concentran una alta centralidad estructural. Estas variables no solo perciben múltiples influencias, sino que también emiten efectos significativos sobre otras dimensiones críticas del sistema, como la movilidad, el ambiente o la productividad. Este tipo de variables cumplen funciones de mediación y de amplificación, siendo clave para activar bucles de realimentación positivos [3], [4].

Por ejemplo, la variable “inversión en infraestructura urbana” aparece como catalizadora de al menos cinco trayectorias causales que involucran mejoras en transporte público, espacios públicos, movilidad activa, calidad ambiental y servicios básicos. Esta influencia estructural la convierte en una variable de alta palanca, cuya modificación tiene el potencial de desencadenar efectos deseables en múltiples dimensiones urbanas [7]. De manera similar, la “salud pública” opera como variable bisagra entre condiciones ambientales, uso de espacios públicos y productividad, representando una confluencia de dinámicas sociales, económicas y ecológicas.

Desde el punto de vista sistémico, las variables de alta influencia tienden a coincidir con nodos de gobernanza y planificación, lo cual evidencia que las decisiones institucionales tienden a tener la capacidad de configurar patrones estructurales del sistema. Esta perspectiva coincide con enfoques recientes sobre planificación adaptativa, que resaltan la importancia de invertir sobre variables críticas para lograr transformaciones sostenibles de largo plazo [5], [6].

6.1.3 Evaluación de influencia en la Toma de Decisiones Urbanas

La evaluación de la influencia de variables y relaciones causales en los sistemas urbanos resulta fundamental para orientar procesos de toma de decisiones con base en evidencia estructural. En contextos de alta complejidad, como el de las ciudades inteligentes y sostenibles, las decisiones urbanas no deben ser entendidas como respuestas puntuales a problemas aislados, sino como intervenciones sobre sistemas dinámicos interdependientes, donde cada acción puede generar efectos colaterales o retroalimentaciones no previstas [1], [8].

En este sentido, la identificación de variables con alta centralidad sistémica – como la inversión en infraestructura urbana, la salud pública o la percepción de calidad de vida – permite priorizar aquellas decisiones que tienen mayor potencial transformador sobre el sistema urbano en su conjunto. Esta estrategia de focalización coincide con lo propuesto por Pérez Alcázar & Redondo [7], quienes argumentan que la toma de decisiones en escenarios complejos debe orientarse hacia las variables que operan como nodos de bifurcación, es decir, como puntos estructurales donde pequeñas variaciones pueden inducir trayectorias completamente distintas del sistema.

Además, esta aproximación reconoce que la toma de decisiones urbanas no es meramente técnica, sino que esta medida por procesos sociales, institucionales y culturales que definen qué variables son visibles, cuáles son gobernables y bajo qué condiciones sociales, institucionales y culturales que definen qué variables son visibles, cuáles son gobernables y bajo qué condiciones pueden ser transformadas [5]. Por ello, el análisis de influencia no solo permite identificar variables clave, sino también revela los márgenes de acción institucional, las resistencias estructurales y los posibles puntos de palanca para una planificación efectiva y equitativa.

Este enfoque también se alinea con los principios de gobernanza inteligente, donde las decisiones deben basarse en sistemas de información integrados, participación ciudadana activa y una visión

estratégica del desarrollo urbano [6], [21]. De este modo, la evaluación de influencia se convierte en una herramienta clave para transformar el conocimiento estructural del sistema en políticas públicas capaces de anticipar consecuencias, reducir incertidumbres y maximizar beneficios colectivos.

6.2 Análisis de interacción entre bucles

El análisis de interacción entre bucles de realimentación dentro de sistemas urbanos complejos permite comprender cómo distintas dinámicas se potencian, inhiben o modulan mutuamente a lo largo del tiempo. Esta perspectiva es clave para anticipar comportamientos emergentes y no lineales del sistema urbano, así como para identificar sinergias o tensiones entre políticas públicas implementadas en distintos dominios funcionales [3], [8].

En el caso del modelo urbano inteligente y sostenible analizando, los bucles de refuerzo vinculados a la energía renovable (R1), la salud pública (R2) y el sistema productivo (R3) muestran una interacción positiva, donde la mejora en uno de ellos tiende a amplificar los efectos benéficos en los demás. Por ejemplo, una mayor inversión en infraestructura energética limpia no solo reduce las emisiones contaminantes, sino que mejora la salud pública y, en consecuencia, aumenta la productividad laboral, realimentando el sistema productivo urbano. Este tipo de sinergias entre bucles refuerzan la resiliencia del sistema y abren oportunidades para políticas integradas multisectoriales [5], [6].

Por el contrario, también se identifican bucles de balance que actúan como mecanismos de contención o regulación frente a los efectos acumulativos de los bucles reforzadores. El bucle B1 (economía circular) modera los impactos negativos de un consumo urbano creciente, mientras que el bucle B4 (congestión vehicular) funciona como una respuesta natural al aumento del uso del automóvil, generando límites físicos y sociales al crecimiento incontrolado del transporte privado. En estos casos, las interacciones entre bucles pueden inducir comportamientos de oscilación y saturación, típicos de sistemas complejos con múltiples realimentaciones [4].

Una interacción especialmente crítica se da entre los bucles R6 (percepción de seguridad y uso del vehículo particular) y B2 (producción de energía y presión ambiental). Si el aumento del uso de vehículos privados, motivado por percepciones de inseguridad, no se compensa con políticas energéticas y de movilidad sostenible, se produce una escalada en el consumo energético y en las emisiones contaminantes, lo que puede desplazar o inhibir los efectos positivos de bucles como R4 (transporte público con energía renovable). Este fenómeno, conocido como “dominancia dinámica”, muestra como bucles inicialmente secundarios pueden adquirir una influencia decisiva bajo ciertas condiciones estructurales o paramétricas [8].

En suma, la interacción entre bucles dentro del sistemas urbanos modelado revela tanto oportunidades de sinergia como riesgos de conflicto entre objetivos urbanos. Reconocer estas

dinámicas cruzadas permite diseñar estrategias de gobernanza más robustas y adaptativas, orientadas a reforzar ciclos virtuosos y atenuar mecanismos de realimentación negativa que comprometan la sostenibilidad a largo plazo [7].

6.3 Herramienta: Matriz de priorización de bucles

La matriz de priorización de bucles es una herramienta que permite jerarquizar los mecanismos de realimentación dentro del sistema urbano, facilitando la identificación de aquellos que deben ser priorizados para intervención estratégica. Su aplicación permite orientar decisiones hacia la maximización de impactos positivos y la contención de dinámicas no deseadas. Para ello, se consideran tres criterios fundamentales: la dominancia temporal del bucle, su sensibilidad estructural y su potencial como punto de apalancamiento [7], [8], [23].

La matriz considera tres criterios fundamentales para establecer la prioridad de intervención sobre cada bucle. En primer lugar, el **nivel de influencia** se refiere a la capacidad de un bucle para incidir en el comportamiento general del sistema urbano, especialmente cuando afecta variables estructurales como ingresos, salud pública o movilidad. En segundo lugar, la **facilidad de intervención** evalúa la viabilidad de modificar las variables que lo comprometen mediante políticas públicas, asignación de recursos o rediseño institucional, permitiendo detectar oportunidades factibles de implementación en el corto y mediano plazo. Finalmente, el criterio de **impacto a largo plazo** permite identificar aquellos bucles cuya intervención tiene el potencial de generar transformaciones sostenidas, reduciendo presiones estructurales sobre el sistema y fortaleciendo su resiliencia [7], [8], [23].

Bucle	Tipo	Nivel de influencia	Facilidad de intervención	Impacto a largo plazo
R1: Beneficios de la energía renovable	Refuerzo	Alto	Medio	Alto
R2: Salud y calidad de vida	Refuerzo	Alto	Medio	Alto
R3: Fortalecimiento del sistema productivo	Refuerzo	Alto	Medio	Alto
R4: Eficiencia del transporte público con energía renovable	Refuerzo	Medio	Alto	Alto
R5: Percepción de seguridad	Refuerzo	Medio	Medio	Alto
R6: Percepción de seguridad y uso del vehículo	Refuerzo	Medio	Bajo	Medio

R7: Calidad de servicios públicos	Refuerzo	Alto	Medio	Alto
R8: Calidad de espacios públicos	Refuerzo	Medio	Alto	Alto
B1: Economía circular	Balance	Medio	Medio	Alto
B2: Movilidad amigable con el medio ambiente	Balance	Medio	Bajo	Medio
B3: Eficiencia del transporte público con energía convencional	Balance	Medio	Alto	Medio
B4: Congestión vehicular	Balance	Alto	Bajo	Alto

Tabla 1 Matriz de Priorización de Bucles en Sistemas Urbanos

A continuación, se presenta el análisis de la matriz de priorización de bucles en sistemas urbanos:

Bucles Reforzadores Prioritarios (R1, R2, R3, R4, R7 y R8)

- El bucle R1 presenta un nivel de influencia alto debido a su capacidad para articular mejoras ambientales, sanitarias y de percepción ciudadana. Al fomentar la producción de energía renovable, este ciclo desencadena beneficios encadenados que reducen las emisiones contaminantes, mejoran la calidad del aire y refuerzan la salud pública. Estos efectos, documentados por la Agencia Internacional de Energía [16], potencian la conciencia social sobre la transición energética y favorecen nuevas inversiones. En cuanto a la **facilidad de intervención**, el bucle R1 es moderadamente accesible: si bien requiere inversiones tecnológicas y marcos regulatorios robustos, existen políticas públicas y programas de financiamiento que pueden ser activados con voluntad política. Su **impacto a largo plazo** es profundo, dado que impulsa una trayectoria estructural hacia la sostenibilidad energética, fortalece la resiliencia del sistema urbano y contribuye a la neutralidad de carbono [6], [9].
- El bucle R2 posee una influencia sistémica destacada al vincular salud pública, productividad laboral e inversión en infraestructura urbana. Las mejoras en salud tienen efectos multiplicadores sobre el desarrollo humano y económico, reforzando la equidad y el bienestar colectivo [10]. Su **facilidad de intervención** es relativamente alta, dado que existen múltiples puntos de entrada mediante políticas educativas, sanitarias y de infraestructura social. Además, la inversión en salud y educación puede ser catalizada por alianzas público-privadas e innovación tecnológica. En cuanto a su **impacto a largo plazo**,

este bucle consolida una base estructural para la sostenibilidad urbana, al mejorar las capacidades individuales y fortalecer el tejido social [6], [11].

- El bucle R3 se caracteriza por su alto nivel de influencia, ya que conecta directamente la calidad de vida con el desarrollo económico urbano. A través de la mejora en educación y salud, se potencia la productividad, lo cual incrementa los ingresos fiscales y habilita más inversión pública [13], [14]. Su **facilidad de intervención** es media, ya que, si bien existen instrumentos para fomentar el capital humano, estos requieren continuidad institucional y planificación intersectorial. No obstante, las políticas de educación técnica, empleo juvenil y fortalecimiento de capacidades digitales pueden tener efectos rápidos y acumulativos. Su **impacto a largo plazo** es significativo, dado que este bucle alimenta un ciclo virtuoso de inversión pública, innovación y crecimiento sostenible, alineado con las metas de ciudades inteligentes e inclusivas. [1], [7].
- El bucle R4 manifiesta una alta influencia transversal, pues integra variables de movilidad, salud, energía y equidad. La mejora en el transporte público, junto con su electrificación mediante fuentes renovables, reduce la congestión y las emisiones, mejorando la calidad de vida urbana [15], [16]. Su **facilidad de intervención** es moderada: si bien requiere infraestructura y planificación compleja, su implementación puede ser escalonada y apoyada por fondos climáticos y agencias multilaterales. En cuanto su **impacto a largo plazo**, R4 transforma la lógica de movilidad, fomenta un uso racional del suelo y facilita la inclusión social, aspectos clave para ciudades resilientes y bajas en carbono [5], [6].
- El bucle R7 presenta una influencia estructural sobre el sistema urbano al articular inversión fiscal con desempeño institucional y percepción ciudadana. Mejores servicios públicos – agua, energía, residuos, conectividad – refuerzan la confianza institucional, fortalecen la gobernanza y mejoran la equidad [6]. Su facilidad de intervención es relativamente alta, ya que existen marcos regulatorios, operadores técnicos y mecanismos de participación que permiten acciones concretas en corto y mediano plazo. A largo plazo, este bucle puede consolidar sistemas urbanos eficientes y cohesionados, especialmente si se incorporan herramientas digitales y criterios de inclusión territorial [1], [5].
- El bucle R8 tiene un alto impacto social, al vincular espacio urbano, cohesión comunitaria y salud. La inversión en espacios públicos promueve prácticas saludables, interacción ciudadana y apropiación territorial, generando retornos sociales que justifiquen su priorización [18], [19]. Su facilidad de intervención es elevada: intervenciones urbanas tácticas diseño participativo y políticas de mantenimiento pueden generar impactos

inmediatos. A largo plazo, R8 contribuye a fortalecer el capital social y la equidad territorial, pilares de una ciudad resiliente e inclusiva [6], [11].

Bucles Balanceadores (B2, B3 y B4)

- El bucle B1 actúa como un mecanismo de contención frente a la acumulación de residuos urbanos, promoviendo prácticas de reciclaje, reutilización y reducción en origen. Su nivel de influencia es moderado pero creciente, en tanto regula los flujos materiales del sistema urbano y evita la sobrecarga ambiental. La **facilidad de intervención** es alta, gracias a la disponibilidad de recursos normativos, incentivos económicos y educación ambiental. A largo plazo, su **impacto** estructural, ya que internaliza externalidades del consumo urbano, reduce presiones sobre los ecosistemas y contribuye a cerrar ciclos productivos en contextos urbanos densos [6], [21], [20].
- El bucle B2 refleja una dinámica clásica de contención, donde el aumento del consumo energético a partir de fuentes no renovables eleva la presión ambiental, lo que eventualmente exige respuestas institucionales. Su **influencia** es alta en entornos urbanos dependientes de matrices fósiles, pero se reduce si se avanza en la transición energética. La **facilidad de intervención** es inmediata, pues requiere coordinación multisectorial. Su **impacto** a largo plazo depende de si se transforma en un catalizador para la adopción de energías limpias, o si se perpetúa ciclos de deterioro ambiental urbano [6], [22].
- El bucle B4 representa un mecanismo clásico de balance negativo asociado al incremento del uso del vehículo privado en contextos urbanos. A medida que aumenta el parque automotor y la circulación, se incrementa los niveles de congestión, lo cual genera una pérdida de eficiencia en los tiempos de viaje y deteriora la calidad de vida urbana. Esta congestión actual como un limitador natural del crecimiento del uso del automóvil, pues reduce su convivencia relativa respecto a otras formas de movilidad. Su nivel de **influencia** es alto, ya que impacta directamente la productividad urbana, las emisiones y la disminución del espacio vial. Sin embargo, su **facilidad de intervención** es baja a media, porque depende de decisiones políticas complejas, inversión en transporte público, rediseño del espacio urbano y gestión de la demanda. A largo plazo, su **impacto** sistémico puede ser severo si no se aplican medidas estructurales, como restricciones al vehículo privado, incentivos a la movilidad activa o integración de sistemas multimodales. Si bien este bucle no genera un ciclo virtuoso por sí mismo, puede ser aprovechado como punto de apalancamiento si se orienta hacia transiciones sostenibles en la movilidad [6], [15], [16].

6.4 Identificación de puntos de palanca

La identificación de puntos de palanca constituye una etapa crítica en el análisis sistémico de entornos urbanos complejos, ya que permite reconocer aquellos elementos estratégicos donde intervenciones específicas pueden generar transformaciones significativas en el comportamiento del sistema. Este enfoque se fundamenta en la perspectiva desarrollada por Donella Meadows [23], quien define los puntos de palanca como ubicaciones dentro de un sistema complejo donde un pequeño cambio en una variable puede producir grandes alteraciones en todo el sistema.

En este proceso de identificación se apoya en tres criterios fundamentales: (1) el nivel de influencia de la variable dentro del sistema, (2) su accesibilidad o viabilidad de intervención desde el punto de vista político, económico o técnico, y (3) la duración e intensidad del impacto esperado. La intersección de estos criterios permite construir una tipología de puntos de palanca, desde aquellos que actúan como catalizadores inmediatos hasta aquellos que, si bien más difíciles de modificar, generan impactos profundos y duraderos en el tiempo.

En los siguientes apartados se detallarán los puntos de palanca identificados a partir de los bucles analizados en la sección anterior, junto con una matriz que sintetiza sus características principales y su potencial de intervención en el sistema urbano modelado.

Punto de Palanca	Bucle asociado	Lógica de intervención	Impacto esperado al intervenir
Inversión sostenida en energías renovables	R1	Aumentar generación de energía limpia y su aceptación social mediante políticas fiscales, subsidios y tecnología	Reducción de emisiones, mejora en salud, incremento en resiliencia energética
Políticas inclusivas en salud y educación	R2, R3	Fortalecer el capital humano para incrementar productividad, ingresos y equidad	Mejora del bienestar general y consolidación de desarrollo humano sostenible
Financiamiento e infraestructura para movilidad activa	R4	Integrar energías limpias al transporte público con planificación intermodal	Reducción de emisiones, mejora en eficiencia y accesibilidad urbana
Gobernanza participativa de servicios públicos	R7	Vincular inversión fiscal con eficiencia institucional y corresponsabilidad ciudadana	Mayor equidad, confianza institucional y desempeño urbano

Recuperación y mantenimiento de espacios públicos	R8	Intervenciones urbanas tácticas, diseño participativo y sostenibilidad ambiental	Aumento del capital social, cohesión comunitaria y percepción de seguridad
Educación ambiental y cultura circular	B1	Fomentar el reciclaje y reducción desde el comportamiento ciudadano	Disminución de presión ambiental y cierre de ciclos materiales
Planeación vial integrada con gestión de demanda	B2, B4	Articular inversión en infraestructura con políticas de control de uso del vehículo	Disminución de congestión y emisiones, mayor eficiencia del sistema urbano
Monitoreo y acción ante impactos ambientales	B3	Crear mecanismos institucionales de respuesta temprana y adaptativa	Reducción de riesgos ecosistémicos y anticipación ante escenarios críticos

Tabla 2 Identificación de puntos de palanca

Esta matriz permite visualizar, con claridad dónde deben concentrarse los esfuerzos de intervención para maximizar el impacto positivo en el sistema urbano, guiando tanto políticas públicas como estrategias de planificación urbana desde un enfoque de pensamiento sistémico [7], [23].

6.5 Estrategias para los puntos de palanca identificados

La formulación de estrategias orientadas a los puntos de palanca identificados constituye un componente esencial en la implementación de políticas urbanas sistémicas. Cada punto representa una oportunidad para transformar no solo el comportamiento de una variable específica, sino de todo el sistema urbano. En esta sección se proponen estrategias dirigidas a intervenir en dichos puntos, maximizando impactos positivos y fomentando trayectorias sostenibles en las ciudades contemporáneas.

- **Inversión sostenida en energías renovables:** Establecer marcos normativos estables, incentivos fiscales y subsidios directos para promover la generación descentralizada y el autoconsumo energético a través de tecnologías limpias. Esto puede incluir redes inteligentes y modelos de gobernanza energética comunitaria [9], [16].
- **Universalización de salud y educación:** Promover la equidad en el acceso a servicios esenciales mediante políticas redistributivas, programas de cobertura integral y digitalización de los servicios públicos. Estas medidas fortalecen el capital humano y la cohesión social urbana. [10], [13].

- **Fortalecimiento del capital productivo urbano:** Establece alianzas público-privadas para la formación de competencias digitales, emprendimiento verde y empleos del futuro. Esto impulsa la innovación y reduce las desigualdades económicas [14], [27].
- **Transporte público renovable e intermodal:** Electrificar las flotas existentes, desarrollar corredores de alta capacidad y fomentar la intermodalidad. Además, deben integrarse mecanismos tarifarios justos y accesibles, complementados con medidas de restricción del vehículo privado [15], [16].
- **Espacios públicos inclusivos:** Implementar proyectos de urbanismo táctico, codiseño comunitario y mantenimiento continuo con enfoque en infancia, mujeres y personas mayores. La infraestructura verde y azul puede ser clave en estas intervenciones [11], [19].
- **Control del uso del vehículo privado:** Establecer políticas de congestión inteligente, zonas de bajas emisiones y mejoras coordinadas al sistema de transporte público. Estas medidas deben vincularse con incentivos para alternativas sostenibles [6], [18].
- **Gobernanza de servicios públicos:** Introducir plataformas digitales para la gestión de servicios, mecanismos de presupuesto participativo y marcos de gobernanza multinivel con enfoque territorial. Esto refuerza la resiliencia institucional [5], [7].
- **Economía circular y participación ciudadana:** Promover la separación en fuente, infraestructuras de reciclaje y políticas de consumo responsable. La participación ciudadana en estos procesos refuerza la apropiación comunitaria y la capacidad adaptativa [20], [21].
- **Gestión de externalidades urbanas:** Desarrollar sistemas de monitoreo ambiental en tiempo real, auditorías urbanas e inclusión de la ciudadanía en la evaluación de políticas públicas. Estas estrategias incrementan la transparencia y la legitimidad democrática [4], [22].

Estas estrategias deben ser atendidas como un sistema de intervenciones integradas, guiadas por evidencia empírica, modelos dinámicos y participación activa de actores diversos. La combinación de visión sistémica y enfoque adaptativo se convierte así en una condición esencial para enfrentar la complejidad urbana contemporánea y avanzar hacia ciudades más justas, resilientes e inteligentes.

7. MODELO ESTRUCTURAL DE DINÁMICAS URBANAS: DIAGRAMA DE NIVÉLES Y FLUJOS

Luego de identificar y catalogar los principales sistemas urbanos a través de bucles de realimentación en el capítulo anterior, se procede ahora a su formalización estructural mediante un modelo de niveles y flujos. Este paso es esencial para operacionalizar las dinámicas cualitativas descritas, permitiendo simular su comportamiento en el tiempo bajo distintos escenarios. A partir de los bucles causales previamente definidos – como los relacionados con energía renovable, salud pública, movilidad sostenible o gobernanza urbana – se desarrollan estructuras cuantitativas que capturan acumulaciones clave (como infraestructura, población o percepción ciudadana) y los flujos que las modifican (como inversión, crecimiento o emisiones) [3], [8]. Este modelo permite no solo representar la dinámica interna de cada subsistema, sino también sus interacciones complejas, retardos temporales y no linealidades que caracterizan los sistemas urbanos contemporáneos [4], [7].

La traducción del análisis causal o formulaciones diferenciales abre la posibilidad de explorar trayectorias sistémicas mediante simulación computacional, facilitando la identificación de patrones de comportamiento puntos de inestabilidad o condiciones de transición. Además, esta estructura proporciona el fundamento técnico para el análisis de sensibilidad, la evaluación de políticas urbanas y el diseño de escenarios adaptativos [2], [5], [27]. En suma, este capítulo consolida la arquitectura cuantitativa del modelo urbano articulando coherentemente los hallazgos conceptuales del anterior capítulo con una herramienta analítica robusta para la gestión de la complejidad urbana.

7.1 Del modelo causal al modelo estructural: aportes del enfoque de niveles y flujos

En el marco metodológico de la dinámica de sistemas, el paso del diagrama causal al modelo estructural de niveles y flujos representa una transición clave que permite operacionalizar las relaciones cualitativas identificadas en términos cuantitativos y temporales. Este enfoque, originado en los trabajos pioneros de Jay W. Forrester [3], permite representar de forma precisa la acumulación, los retardos y las tasas de cambio que caracterizan a los sistemas urbanos complejos. En el contexto de esta tesis, el modelo de niveles y flujos no sólo traduce los bucles de realimentación previamente identificados en estructuras dinámicas parametrizadas, sino que habilita la simulación prospectiva del comportamiento del sistema urbano bajo distintos escenarios de política e intervención.

La ciudad es concebida aquí como un sistema abierto, dinámico y adaptativo, donde las variables acumulativas (niveles), como la calidad del ambiente, el acceso a servicios públicos o la salud pública, interactúan con flujos que representan los procesos de cambio, como la inversión en infraestructura, el crecimiento demográfico o la generación de residuos. Esta estructura permite analizar con mayor rigor la trayectoria del sistema, su capacidad de resiliencia y los puntos de inflexión que podrían surgir bajo distintos supuestos de gobernanza, tecnología y comportamiento ciudadano. Tal como lo señala Sterman [8], Pérez Alcázar y Redondo [7], y Capra y Luisi [29], el uso de este tipo de modelos estructurados ofrece la comprensión de la no linealidad, los umbrales de saturación y los efectos de realimentación retardada, aspectos fundamentales para la

planificación urbana sistémica e informada. Además, esta metodología se complementa con las recomendaciones de validación estructural y conductual formuladas por Barlas [4], asegurando que las simulaciones no sólo sean coherentes con la teoría del sistema, sino también con datos empíricos y realidades urbanas contemporáneas.

El modelo presentado en esta tesis se articula con una estructura robusta de ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento dinámico de subsistemas como energía, transporte, salud, educación, residuos, uso del suelo y gobernanza. Esta formalización permite vincular la teoría de ciudades inteligentes y sostenibles [5], [6], [25], [32] con decisiones de política basadas en evidencia, habilitando así la exploración de escenarios futuros y la identificación de trayectorias deseables para el desarrollo urbano integral.

7.1.1 Submodelo población de la ciudad y su estado de bienestar

El componente demográfico constituye uno de los núcleos estructurales de los sistemas urbanos. La figura 14, presenta una representación estructurada del submodelo de población urbana, que articula el crecimiento vegetativo, la migración y la capacidad de soporte de la ciudad como determinantes clave del bienestar urbano. Este diagrama, formulado con base en la metodología de niveles y flujos propuesta por Forrester [3] y operacionalizada en Vensim, permite capturar los

efectos acumulativos y no lineales que emergen de la interacción entre población, infraestructura y calidad de vida en contextos urbanos densos y cambiantes.

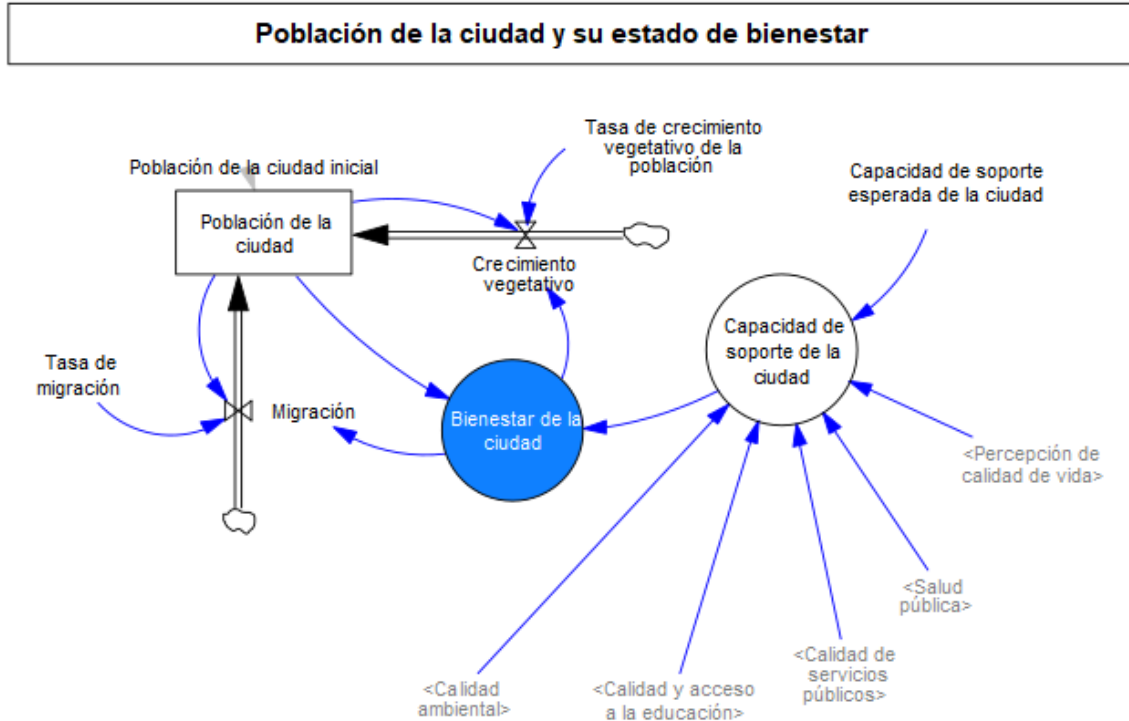


Figura 14 Submodelo población de la ciudad y su estado de bienestar

El diagrama representa un sistema realimentado en el que la población de la ciudad actúa como un nivel (stock), alimentado por dos flujos: crecimiento vegetativo y migración. Ambos flujos están condicionados por el bienestar de la ciudad, una variable clave que funciona como modulador de la dinámica poblacional. A su vez, el bienestar depende de cociente entre la población y la capacidad de soporte de la ciudad, definida como una función de cinco dimensiones estructurales: calidad ambiental, salud pública, acceso a la educación, percepción de la calidad de vida y calidad de los servicios públicos.

Este diseño captura dos efectos fundamentales, Primero, un efecto umbral: cuando la población supera la capacidad de soporte, el bienestar cae, desincentivando la migración e incluso reduciendo el crecimiento vegetativo (por efecto en calidad de vida o salud). Segundo, se manifiesta una realimentación indirecta positiva: si se mejora la capacidad de soporte mediante inversión estructural, el bienestar crece y con él, el atractivo de la ciudad, incentivando el crecimiento poblacional. Esta lógica, de naturaleza no lineal y condicionada por retardos, refleja fielmente la dinámica empírica de las ciudades en desarrollo. [1], [6], [10].

Basado en el modelo estructural implementado, las principales ecuaciones que articulan esta dinámica son las siguientes:

- Nivel Acumulativo – población de la ciudad:

P = Población
 CV = Crecimiento Vegetativo
 M = Migración

$$P = \int (CV + M)$$

- Crecimiento vegetativo:

CV = Crecimiento Vegetativo
 TCV = Tasa de crecimiento vegetativo
 B = Bienestar de la ciudad
 P = Población

$$CV = TCV \times P \times B$$

- Migración:

M = Migración
 TM = Tasa de migración
 P = Población
 B = Bienestar de la ciudad

$$M = TM \times P \times B$$

- Capacidad de soporte de la ciudad:

CAS = Capacidad de soporte
 CE = Capacidad de soporte esperada de la ciudad
 CA = Calidad ambiental
 CSP = Calidad de servicios públicos
 CE = Calidad y acceso a la educación
 PCV = Percepción de la calidad de vida
 SP = Salud pública

$$CS = CE \times \frac{(CA + CSP + CE + PCV + SP)}{5}$$

- Bienestar de la ciudad:

CS = Capacidad de soporte de la ciudad

B = Bienestar de la ciudad

P = Población

$$B = 1 - \left(\frac{P}{CS} \right)$$

Este submodelo integra de manera coherente la visión estructural de los sistemas urbanos con una aproximación cuantitativa a la sostenibilidad demográfica. Su principal aporte reside en permitir la evaluación de límites sistémicos al crecimiento poblacional en función de variables endógenas como salud, educación y calidad del entorno construido, en línea con las propuestas de Meadows sobre capacidad de carga [23] y con la visión de sostenibilidad urbana articulada por Blanco y Alberti [25] y Jenks y Jones [24]. De esta forma, se proporciona una herramienta robusta para la simulación de escenarios de planificación urbana bajo condiciones de presión demográfica, inequidad territorial y cambio climático.

7.1.2 Submodelo capital disponible para inversión

El acceso a una vivienda digna es una condición estructural de bienestar urbano y un derecho social clave en la construcción de ciudades inclusivas y sostenibles. La figura 15, representa el submodelo “Capital disponible para inversión”, centrado en los vínculos entre ingresos, recaudación fiscal, disponibilidad de capital para vivienda e inversión pública urbana. Este submodelo, modelado con base en la lógica de niveles y flujos de la dinámica de sistemas propuesta por Forrester [3], permite capturar las interdependencias entre las condiciones laborales, fiscales y del mercado habitacional en el contexto de un sistema urbano integrado.

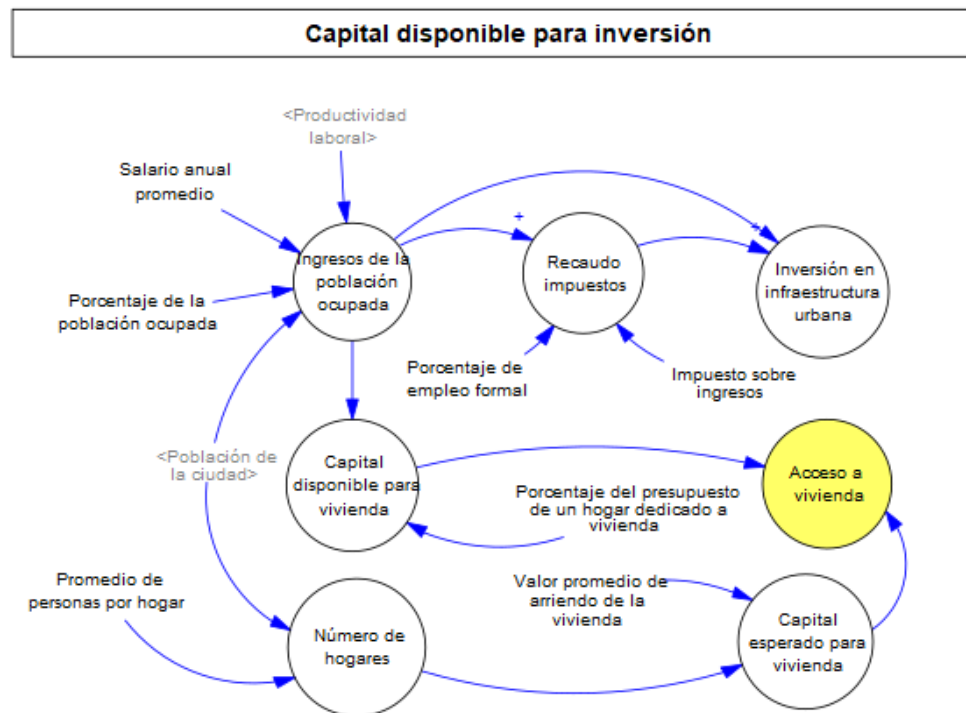


Figura 15 Submodelo capital disponible para inversión

El modelo refleja una cadena causal fundamental: los **ingresos de la población ocupada**, determinados por el salario promedio, la productividad laboral y la tasa de ocupación, permiten dos usos estratégicos del capital: la inversión individual en vivienda y la contribución fiscal al sistema público. A través del **capital disponible para vivienda**, se determina el nivel de acceso habitacional, el cual depende también del número de hogares y del costo promedio de la vivienda en arriendo.

El acceso a vivienda se modela como una función no lineal: cuando el capital disponible supera el capital esperado (costos de vivienda), se alcanza un acceso completo; de lo contrario, el acceso se reduce proporcionalmente. Este enfoque condicional (IF THEN ELSE) refleja con mayor fidelidad las acciones reales del mercado habitacional urbano.

Por otro lado, los ingresos también nutren el sistema fiscal a través del **recaudo de impuestos**, permitiendo la **inversión en infraestructura urbana**, que a su vez mejora variables estructurales como servicios, transporte, espacios públicos y movilidad activa. Así, este submodelo revela la función dual del ingreso ciudadano: **sostener el consumo privado esencial** (como la vivienda) y **aportar el capital correcto urbano** a través de la tributación. Esta interdependencia es coherente con las reflexiones de Glaeser [13] y Acemoglu & Robinson [14] sobre el rol estructural de las instituciones fiscales inclusivas para el desarrollo urbano.

Estas son las fórmulas clave del submodelo:

- Ingresos de la población ocupada:

IPO = Ingresos de la población ocupada

P = Población de la ciudad

SAP = Salario anual promedio

PL = Productividad laboral

$\%PO$ = Porcentaje de la población ocupada

$$IPO = P \times SAP \times PL \times \%PO$$

- Recaudo impuestos:

RI = Recaudo impuestos

$\%EF$ = Porcentaje de empleo formal

IMP = Impuesto sobre ingreso

$$RI = \%EF \times IPO \times IMP$$

- Inversión en infraestructura urbana:

$IURB$ = Inversión en infraestructura urbana

$$IURB = \frac{RI}{IPO}$$

- Capital disponible para vivienda:

CDV = Capital disponible para vivienda

$\%PV$ = Porcentaje del presupuesto de un hogar dedicado a vivienda

$$CDV = \%PV \times IPO$$

- Número de hogares:

NH = Número de hogares

PPH = Promedio de personas por hogar

$$NH = \frac{P}{PPH}$$

- Capital esperado para vivienda:

CEV =Capital esperado para vivienda

ARR =Valor promedio de arriendo de la vivienda

$$CEV = ARR \times NH$$

- Acceso a vivienda:

AV =Acceso a vivienda

$$AV = \left(\frac{CDV}{CEV}, 1, \frac{CDV}{CEV} \right)$$

Este submodelo permite visualizar como la estructura económica de una ciudad incide directamente en la equidad habitacional y en la sostenibilidad de su infraestructura pública. La interacción entre productividad, empleo, recaudación e inversión revela una dinámica de refuerzo que puede conducir al fortalecimiento sistémico, siempre y cuando exista una gestión fiscal eficiente y una política habitacional equitativa. Tal como señalan Batty [1] y Sterman [8], estos modelos son esenciales para evaluar trayectorias de desarrollo urbano bajo diferentes escenarios de inversión, crecimiento poblacional y políticas fiscales. Integrar esta lógica en la planificación urbana permite abordar de forma proactiva problemáticas como la segregación espacial, la presión sobre el suelo y la informalidad habitacional.

7.1.3 Submodelo calidad y acceso a la educación

La educación representa uno de los pilares fundamentales del desarrollo urbano sostenible, al actuar como un catalizador para la equidad, la innovación y la productividad laboral a largo plazo. La figura 16. Muestra un submodelo centrado en la acumulación dinámica de la **calidad y acceso a la educación** en entornos urbanos, siguiendo la lógica de niveles y flujos por Forrester [3] y reforzada por las metodologías de modelación estructural presentadas por Pérez Alcázar y Redondo [7] y Sterman [8]. Este componente es vital para entender cómo las decisiones de inversión pública impactan de manera acumulativa el capital humano, variable clave en los bucles reforzadores previamente identificados en este proyecto de grado.

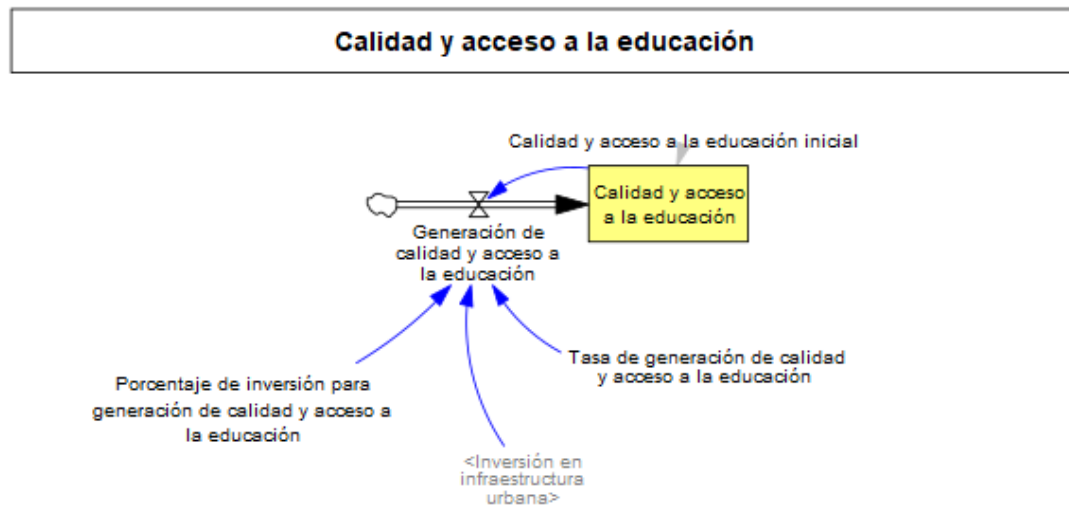


Figura 16 Submodelo calidad y acceso a la educación

La variable **calidad y acceso a la educación** es modelada como un **nivel acumulativo** (stock) cuya evolución en el tiempo depende del flujo denominado **generación de calidad y acceso a la educación**. Este flujo está determinado por tres factores fundamentales: el porcentaje de inversión dirigido a este objetivo, la tasa de generación educativa y el monto total de **inversión de infraestructura urbana**, lo cual articula esta dinámica con el desempeño del sistema fiscal urbano.

El modelo captura así una **realimentación institucional positiva**: a medida que aumenta la inversión en educación, se mejora el nivel de acceso y calidad, lo cual refuerza a futuro variables como la productividad laboral y la percepción de bienestar, impactando indirectamente el recaudo fiscal y la sostenibilidad urbana [13], [25]. La formulación acumulativa utilizada permite simular tanto trayectorias de mejora sostenida como los efectos de la desinversión o cambios abruptos en las políticas públicas.

Según los datos y ecuaciones del modelo las relaciones claves que configuran este submodelo son:

- Nivel acumulativo – calidad y acceso a la educación:

CAE = Calidad y acceso a la educación

GCAE = Generación de calidad y acceso a la educación

$$CAE = \int GCAE, CAE$$

- Flujo – Generación de calidad y acceso a la educación:

TGCAE = Tasa de generación de calidad y acceso a la educación

%IGCAE = Porcentaje de inversión para generación de calidad y acceso a la educación

IURB = Inversión en infraestructura urbana

$$GCAE = IF THEN ELSE (CAE < 1, TGCAE \times CAE \times \%IGCAE \times IURB, 0)$$

Estos componentes permiten que el modelo simule el efecto exponencial que pueden tener una política educativa sostenida en el tiempo, así como su sensibilidad ante recortes o decisiones de redistribución presupuestal.

El submodelo evidencia que la educación no puede ser tratada como una variable exógena, sino como un componente estructural del sistema urbano. Su mejora es gradual y acumulativa, sujeta a la coherencia de las políticas públicas y a la disponibilidad de recursos. Esta representación está en línea con la visión sistémica de Batty [1], así como con la noción de equidad territorial planteada por Ahvenniemi et al. [6] y la estructura adaptativa de las ciudades propuestas por Capra y Luisi [29]. En contextos urbanos complejos, invertir en educación no sólo mejora las capacidades individuales, sino que activa bucles de refuerzo que transforman la resiliencia institucional, la inclusión social y el desempeño económico de largo plazo.

7.1.4 Submodelo contexto ambiental de la ciudad

El contexto ambiental es una dimensión crítica en el análisis sistémico de ciudades inteligentes y sostenibles, pues condiciona tanto la salud pública como la capacidad de carga urbana, la planificación territorial y la equidad intergeneracional. La Figura 17. Representa el submodelo “Contexto ambiental de la ciudad”, construido bajo la lógica de niveles y flujos propuesta por Forrester [3] y articulada en su aplicación por autores como Sterman [8] y Meadows [23]. Este submodelo refleja cómo las emisiones contaminantes y la generación de residuos se relacionan con la calidad ambiental, evidenciando las realimentaciones negativas que comprometen la sostenibilidad ecológica del sistema urbano.

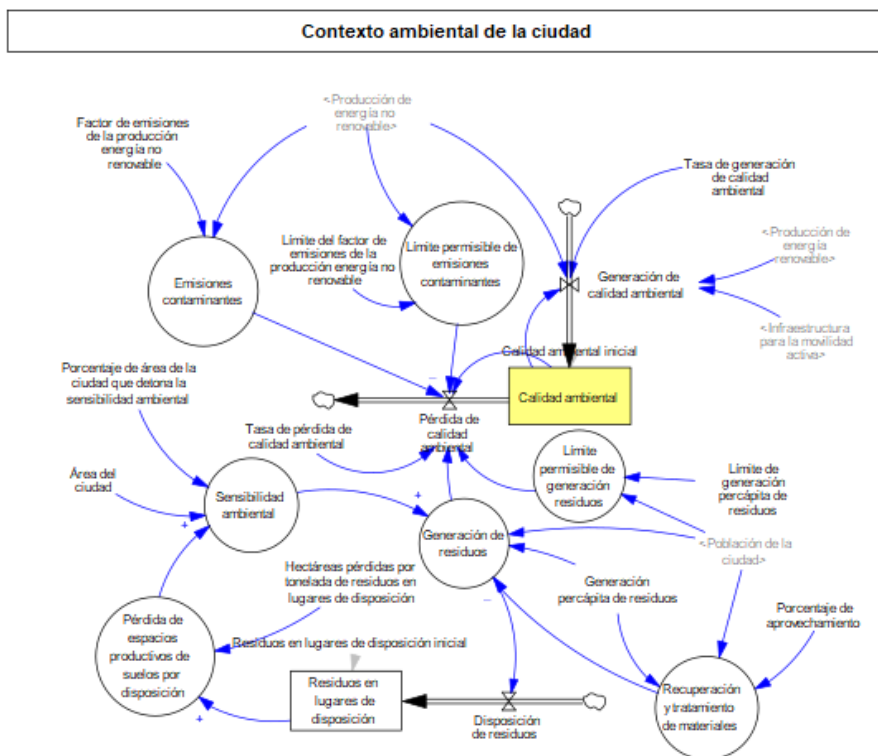


Figura 17 Submodelo contexto ambiental de la ciudad

El nivel clave del modelo es la **calidad ambiental**, cuya evolución depende del equilibrio entre la **generación** y la **pérdida de calidad ambiental**. La generación está potenciada por dos variables fundamentales: la **infraestructura para la movilidad activa** (que reduce emisiones) y la **proporción de energía proveniente de fuentes renovables**. Estas conexiones refuerzan la idea de que la infraestructura sostenible puede tener externalidades ambientales positivas, coherentes con lo propuesto por Ahvenniemi et al. [6] y la IEA [16].

Por otro lado, la pérdida de calidad ambiental está directamente asociada a dos presiones: las **emisiones contaminantes** y la **generación de residuos**, las cuales se comparan con límites permisibles definidos. Estos límites representan umbrales ecológicos que, al ser superados, intensifican los impactos negativos, según lo postulado en el enfoque de resiliencia urbana desarrollado por Blanco y Alberti [25].

Además, el modelo introduce el concepto de **sensibilidad ambiental**, una variable de tipo razón que surge al relacionar la pérdida de suelos productivos con la proporción del área urbana crítica. Este mecanismo regula la **generación de residuos**, haciendo del modelo un sistema adaptativo donde los impactos acumulados generan ajustes automáticos.

También se incluye el **reciclaje y tratamiento de materiales**, como flujo de compensación a la disposición final, reforzando una lógica de economía circular planteada por Raudsepp-Hearne et al. [20].

Las siguientes ecuaciones representan las relaciones esenciales del submodelo:

- Calidad ambiental:

CA = Calidad ambiental

GCA = Generación de calidad ambiental

PCA = Pérdida de calidad ambiental

$$CA = \int (GCA - PCA, CA)$$

- Generación de calidad ambiental:

GCA = Generación de calidad ambiental

TGCA = Tasa de generación de calidad ambiental

CA = Calidad ambiental

IMA =Infraestructura para la movilidad activa

PER = Producción de energía renovable

PENR = Producción de energía no renovable

$$GCA = TGCA \times CA \times \left(\frac{IMA + \left(\frac{PER}{PENR + PER} \right)}{2} \right)$$

- Pérdida de calidad ambiental:

PCA =Perdida de calidad ambiental

TPCA =Tasa de pérdida de calidad ambiental

CA =Calidad ambiental

GRE = Generación de residuos

LPGR = Límite permisible de generación de residuos

ECON = Emisiones contaminantes

LPECON = Límite permisible de emisiones contaminantes

$$PCA = TPCA \times CA \times \left(\frac{\left(\frac{GRE}{LPGR} + \frac{ECON}{LPECON} \right)}{2} \right)$$

- Generación de residuos:

GRE =Generación de residuos

GPCR = Generación per cápita de residuos

P = Población de la ciudad
 REC = Recuperación y tratamiento de materiales
 SA = Sensibilidad ambiental

$$GRE = (GPCR \times (P - REC)) \times SA$$

- Sensibilidad ambiental:

SA = Sensibilidad ambiental
 %AC = Porcentaje de área crítica
 A = Área de la ciudad
 PEP = Pérdida de espacios productivos

$$SA = \frac{\min((\%AC \times A), PEP)}{\%AC \times A}$$

- Emisiones contaminantes:

ECON = Emisiones contaminantes
 FEMI = Factor de emisiones
 PENR = Producción de energía no renovable

$$ECON = \max(0, FEMI \times PENR)$$

- Disposición de residuos

DR = Disposición de residuos
 GRE = Generación de residuos

$$DR = GRE$$

- Recuperación y tratamiento de materiales:

REC = Recuperación y tratamiento de materiales
 P = Población de la ciudad
 GPCR = Generación per cápita de residuos
 %REC = Porcentaje de aprovechamiento

$$REC = P \times GPCR \times \%REC$$

El submodelo ambiental incorpora una compleja red de relaciones no lineales que permiten presentar tanto impactos acumulativos como mecanismos de respuesta sistémica. Su diseño permite identificar umbrales críticos, simular escenarios de transición energética y evaluar políticas de manejo de residuos sólidos. Esta lógica es coherente con los principios de ciudades resilientes y adaptativas desarrollados por Capra y Luisi [29], permite visualizar intervenciones prioritarias en energía, movilidad y gestión de residuos como puntos de apalancamiento sistémico.

7.1.5 Submodelo de infraestructura urbana

La infraestructura urbana constituye una de las palancas fundamentales en el diseño de ciudades sostenibles, por su capacidad de estructurar dinámicas de movilidad, acceso a servicios y calidad ambiental. En particular, la coexistencia y asignación de recursos entre infraestructura para la movilidad activa (peatonal y ciclistas) y vías vehiculares tradicionales refleja las tensiones estructurales entre modelos de ciudad orientados al automóvil frente a aquellos más resilientes y humanos [6], [8]. La figura 18, presenta el submodelo de “infraestructura”, basado en los principios de acumulación de niveles y flujos desarrollados por Forrester [3], y operacionalizados por Sterman en su enfoque de modelación urbana [8].

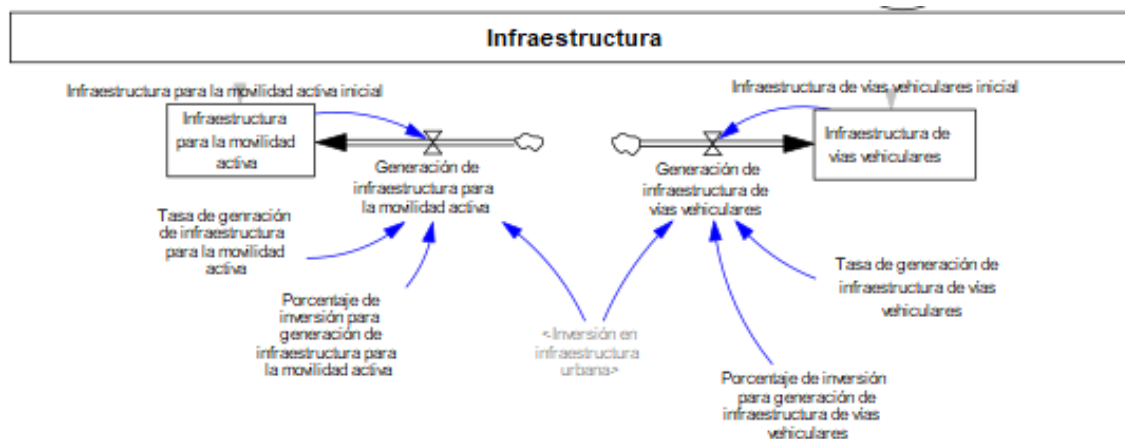


Figura 18 Submodelo de infraestructura urbana

El modelo contempla dos niveles de infraestructura: la **infraestructura para la movilidad activa** y la **infraestructura de vías vehiculares**. Ambos niveles se incrementan a través de flujos diferenciados, cuya magnitud depende de la inversión pública urbana, distribuida mediante coeficientes o “porcentajes de inversión” específicos para cada tipo de infraestructura.

Desde una perspectiva sistémica, estos dos subsistemas representan trayectorias urbanas alternativas: por un lado, el fortalecimiento de la movilidad activa reduce emisiones, mejora la salud pública y promueve la equidad espacial [15], [19]; por otro lado, la expansión de vías vehiculares tiende a estimular el uso del automóvil, con consecuencias negativas en congestión, emisiones y uso de suelo [16]. Así, este submodelo encapsula una decisión estratégica de

planeación urbana: en qué tipo de infraestructura se prioriza la inversión y cuál es su efecto acumulativo a largo plazo.

Los flujos están regulados por tasas de generación específicas, que pueden representar decisiones de política (como planes maestros de movilidad o instrumentos de financiamiento multilateral), haciendo que el modelo sea sensible a escenarios de planificación adaptativa [5], [30].

Las ecuaciones que rigen este submodelo son las siguientes:

- Infraestructura para la movilidad activa:

INMA = Infraestructura para la movilidad activa

GINMA = Generación de infraestructura para la movilidad activa

INMAI = Infraestructura para la movilidad activa inicial

$$INMA = \int (GINMA, INMAI)$$

- Generación de infraestructura para movilidad activa:

GINMA = Generación de infraestructura para la movilidad activa

IMA = Infraestructura para la movilidad activa

%IMA = Porcentaje de inversión para infraestructura para la movilidad activa

TGIMA = Tasa de generación de infraestructura para la movilidad activa

IURB = Inversión en infraestructura urbana

INMA = Infraestructura para la movilidad activa

$$GINMA = IF THEN ELSE (IMA < 1, \%IMA \times TGIMA \times IURB \times INMA, 0)$$

- Infraestructura de vías vehiculares:

IVV = Infraestructura de vías vehiculares

GIVV = Generación de infraestructura de vías vehiculares

IVVI = Infraestructura de vías vehiculares inicial

$$IVV = \int (GIVV, IVVI)$$

- Generación de infraestructura de vías vehiculares:

GIVV = Generación de infraestructura de vías vehiculares

IVV = Infraestructura de vías vehiculares

TGIVV = Tasa de generación de infraestructura de vías vehiculares

%IIVV = Porcentaje de inversión para infraestructura de vías vehiculares

IURB = Inversión en infraestructura urbana

$$GIVV = \text{IN THEN ELSE } (IVV < 1, TGIVV \times IVV \times \%IIVV \times IURB, 0)$$

Este submodelo expresa con claridad la dualidad inherente a la planificación de infraestructura en contextos urbanos contemporáneos. A través de él se puede simular cómo decisiones de asignación presupuestal repercuten en el largo plazo sobre los patrones de movilidad urbana, el impacto ambiental y calidad del entorno urbano. El enfoque de dinámica de sistemas permite identificar puntos de apalancamiento asociados a la distribución de inversión y la promoción de infraestructura sostenible, coherente con los principios de equidad territorial y eficiencia sistémica promovidos en la literatura especializada [7], [18], [29].

7.1.6 Submodelo productividad laboral

La productividad laboral es un componente estructural del desarrollo urbano sostenible, al ser un determinante directo de los ingresos, la equidad económica y la capacidad fiscal del territorio. En entornos urbanos, su evolución está condicionada por factores sistémicos como el acceso a la educación de calidad y el estado de salud pública, ambos profundamente influenciados por políticas de infraestructura, servicios y gobernanza [6], [13]. En ese sentido, el submodelo de “Productividad laboral” (figura 19) representa una acumulación endógena que refleja la capacidad del sistema urbano para sostener su desempeño económico a través del fortalecimiento del capital humano [8].

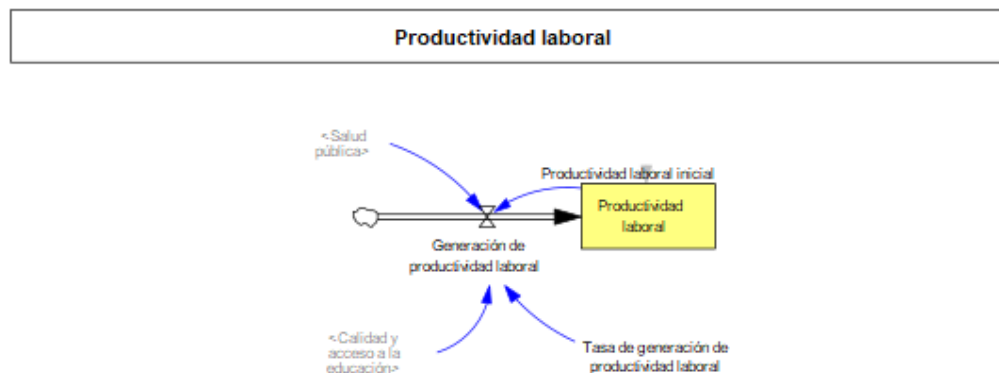


Figura 19 Submodelo productividad laboral

Este módulo está constituido por un **nivel stock** que representa la productividad laboral acumulada en la ciudad. Su cambio en el tiempo está regulado por un **flujo de generación**, dependiente de tres variables clave: (i) salud pública, (ii) calidad y acceso a la educación, y (iii) una tasa de generación específica que representa la capacidad del sistema de transformar condiciones estructurales en mejoras productivas.

Desde la perspectiva sistémica, este submodelo articula dos subsistemas esenciales: el educativo y el sanitario. Tal como lo ha demostrado la literatura, una población sana y educada tiende a ser más

innovadora, participativa y resiliente [10], [11]. El modelo hace explícito cómo la inversión en salud y educación no sólo tiene efectos sociales, sino que genera realimentación positiva sobre la economía urbana, al aumentar la productividad y con ello, los ingresos tributarios y la inversión pública disponible [3], [14].

La dinámica de este módulo también conecta con otros componentes del sistema, como el acceso a vivienda y la recaudación fiscal, generando bucles reforzadores críticos para el desarrollo inclusivo y sostenible [7], [29].

El comportamiento del submodelo se define a partir de las siguientes expresiones:

- Nivel de productividad laboral:

PL = Productividad laboral

GPL = Generación de productividad laboral

PLI = Productividad laboral inicial

$$PL = \int (GPL, PLI)$$

- Flujo de generación de productividad laboral:

GPL = Generación de productividad laboral

PL = Productividad laboral

TGPL = Tasa de generación de productividad laboral

CAE = Calidad y acceso a la educación

SP = Salud pública

$$GPL = IF THEN ELSE \left(PL < 1, TGPL \times PL \times \frac{(CAE + SP)}{2}, 0 \right)$$

- Valor inicial:

PLI = Productividad laboral inicial

$$PLI = 0,64$$

Los valores y tasas están normalizadas entre 0 y 1, facilitando la interpretación comparativa de trayectorias en distintos escenarios.

Este submodelo refleja con precisión la naturaleza acumulativa de las capacidades humanas en entornos urbanos. La productividad laboral no es un resultado aislado, sino el producto de interacciones complejas entre salud, educación e institucionalidad, alineadas con los principios de ciudades sostenibles e inteligentes [5], [25]. La incorporación explícita de este módulo en el modelo general permite identificar puntos de intervención de alto impacto en términos de inclusión

económica y equidad territorial, conectando directamente con los bucles R2 (Salud y calidad de vida) y R3 (Fortalecimiento del sistema productivo).

7.1.7 Submodelo de percepción de calidad de vida

La percepción de calidad de vida constituye una variable subjetiva pero crucial para comprender el comportamiento social en contextos urbanos complejos. Según Glaeser [13] y Jacobs [18], la calidad de vida en las ciudades no depende exclusivamente de indicadores objetivos, sino que también de cómo los ciudadanos experimentan servicios, movilidad, seguridad y acceso a oportunidades. Desde el enfoque de dinámica de sistemas, esta variable actúa como un nodo de integración donde confluyen dimensiones físicas, sociales y ambientales, modulando comportamientos como la apropiación del espacio público y la participación ciudadana [3], [6].

La figura 20, muestra como la percepción de calidad de vida está determinada por tres variables fundamentales: **congestión vehicular**, **calidad de servicios públicos** y **calidad de los espacios públicos**, además del **acceso a vivienda**, que proviene de un submodelo complementario. Estas variables operan como entradas que, al interactuar, condicionan las trayectorias de bienestar percibido en el tiempo.

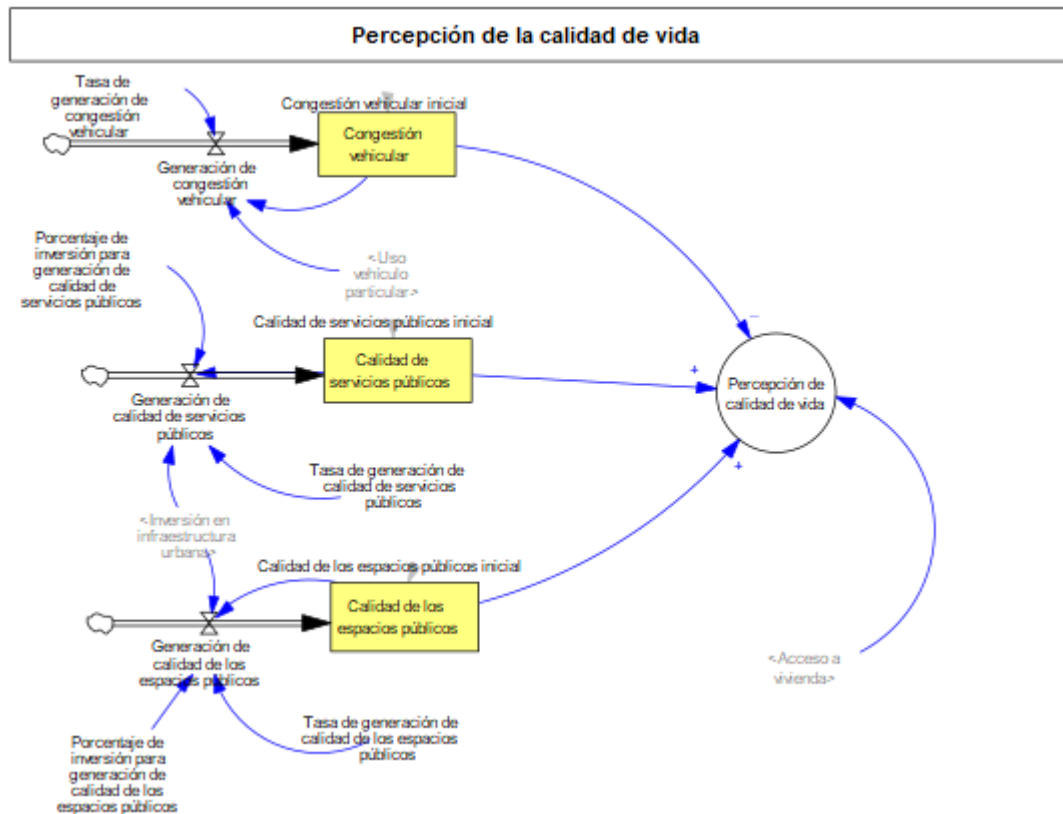


Figura 20 Submodelo percepción de la calidad de vida

- **Congestión vehicular** tiene un efecto negativo: su incremento reduce la satisfacción con la experiencia urbana, afectando la movilidad, el tiempo libre y la salud mental.
- **Calidad de servicios públicos** (agua, energía, recolección de residuos, salud, educación) incrementa la percepción de bienestar cuando su cobertura y eficiencia aumentan.
- **Calidad de los espacios públicos** – evaluada en términos de accesibilidad, mantenimiento y diseño urbano – potencia el sentido de comunidad y cohesión social, favoreciendo la percepción positiva del entorno.

La modelación considera que estos factores están mediados por la inversión en infraestructura urbana, que determina las tasas de mejora en cada componente. La congestión vehicular, a su vez, responde al uso del vehículo particular, integrando el submodelo con variables del sistema de movilidad [7].

Estructura de ecuaciones:

- Nivel de congestión vehicular:

CV = Congestión vehicular

GCV = Generación de congestión vehicular

CVI = Congestión vehicular inicial

TGCV = Tasa de generación de congestión vehicular

UVP = Uso

$$CV = \int (GCV, CVI)$$

$$GCV = TGCV \times CV \times UVP$$

- Nivel de calidad de servicios públicos:

CSP = Calidad de servicios públicos

GCSP = Generación de calidad de servicios públicos

CSPI = Calidad de servicios públicos inicial

TGSP = Tasa de generación de servicios públicos

%ICSP = Porcentaje de inversión para generación de calidad de servicios públicos

IURB = Inversión en infraestructura urbana

$$CSP = \int (GCSP, CSPI)$$

$$GCPS = IF THEN ELSE (CSP < 1, TGSP \times CSP \times \%ICSP \times IURB, 0)$$

- Nivel de calidad de los espacios públicos:

CEP = Calidad de los espacios públicos

GCEP = Generación de calidad de los espacios públicos

CEPI = Calidad de los espacios públicos inicial

TGEP = Tasa de generación de calidad de los espacios públicos

%IGEP = Porcentaje para la inversión para generación de calidad de los espacios públicos

IURB = Inversión en infraestructura urbana

$$CEP = \int (GCEP, CEPI)$$

$$GCEP = IF THEN ELSE (CEP < 1, TGEP \times CEP \times \%IGEP \times IURB, 0)$$

- Percepción de calidad de vida (normalizada):

PCV = Percepción de calidad de vida

AV = Acceso a vivienda

CEP = Calidad de los espacios públicos

CSP = Calidad de los servicios públicos

CV = Congestión vehicular

$$PCV = \min \left(\frac{AV + CEP + CSP + \frac{1}{CV}}{4}, 1 \right)$$

Esta fórmula integra las cuatro variables, asignando un peso equitativo a cada una de la configuración de la percepción social.

El submodelo de percepción de calidad de vida destaca por su capacidad para sintetizar múltiples dimensiones del sistema urbano en una única variable evaluativa. Su inclusión en el modelo permite capturar dinámicas emergentes como el abandono del espacio público, la desafección institucional o la migración urbana. Tal como señala Mouratidis [11] y Gehl [19], la calidad del entorno y los servicios son determinantes en la construcción de bienestar urbano. Desde la perspectiva de la planificación sistémica, este módulo refuerza la necesidad de integrar inversiones en infraestructura, movilidad activa y equidad territorial para generar condiciones propicias para una percepción positiva del entorno urbano.

7.1.8 Submodelo de transporte público

El transporte público constituye un componente neurálgico en la configuración de sistemas urbanos sostenibles. Su calidad, cobertura y accesibilidad están directamente vinculadas con la equidad territorial, la reducción de emisiones y la eficiencia del espacio urbano [6], [15]. Desde una perspectiva sistémica, el transporte público actúa como un subsistema que no solo moviliza la

población, sino que cataliza mejoras en la salud, la inclusión social y la productividad económica [1], [13].

En la figura 21, se observa que la **accesibilidad y calidad del servicio público de transporte** es una variable de nivel influida por dos factores fundamentales: la **flota de transporte público** y la **generación de condiciones del servicio**. La expansión de la flota permite cubrir mayores áreas urbanas, mientras que la calidad del servicio depende de la inversión en infraestructura (paraderos, señalización, tecnología) y gestión (frecuencia, tiempos de espera, intermodalidad).

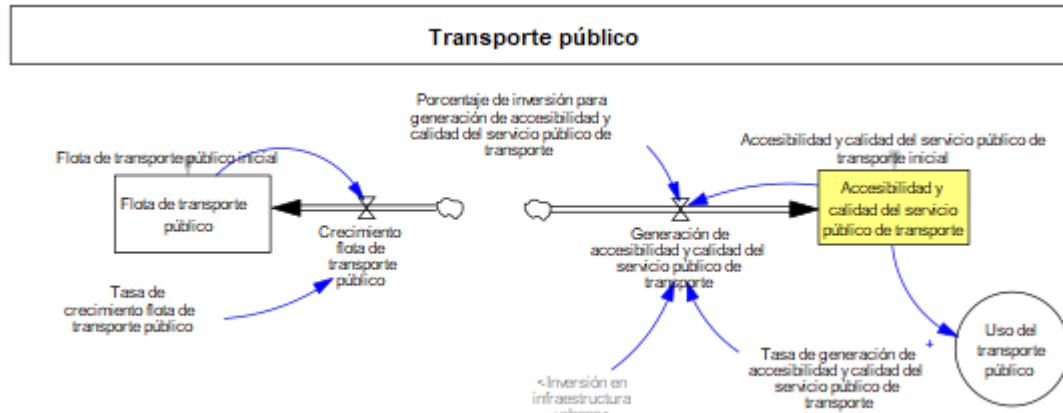


Figura 21 Submodelo transporte público

El modelo incorpora una realimentación positiva: a mayor calidad del servicio, mayor uso del transporte público, lo cual puede justificar nuevas inversiones. No obstante, este ciclo virtuoso solo se activa si se supera un umbral de calidad y se controla la competencia con el vehículo privado [8], [15].

La estructura de ecuación en este submodelo es la siguiente:

- Percepción de calidad de vida (normalizada):

FTP = Flota de transporte público

CFTP = Crecimiento de flota de transporte público

FTPI = Flota de transporte público inicial

TCFTP = Tasa de crecimiento de flota de transporte público

$$FTP = \int CFTP, FTPI$$

$$CFTP = TCFTP \times FTP$$

- Accesibilidad y calidad del servicio público de transporte (nivel):

ACSTP = Accesibilidad y calidad del servicio de transporte público

GACSTP = Generación de accesibilidad y calidad del servicio público de transporte
 ACSTPI = Accesibilidad y calidad del servicio de transporte público inicial
 TCTP = Tasa de generación de accesibilidad y calidad del servicio público de transporte
 %ITP = Porcentaje de inversión para generación de accesibilidad y calidad del servicio público de transporte
 IURB = Inversión en infraestructura urbana

$$ACSTP = \int GACSTP, ACSTPI$$

$$GACSTP = IF THEN ELSE (ACSTP < 1, TCTP \times ACSTP \times \%ITP \times IURB, 0)$$

- Uso del transporte público (variable auxiliar):

UTP = Uso del transporte público

ACSTP = Accesibilidad y calidad del servicio de transporte público

$$UTP = ACSTP$$

El uso del sistema depende directamente del nivel de calidad y accesibilidad alcanzado, operando como resultado de las inversiones acumuladas y la gestión institucional.

El submodelo revela que las políticas de movilidad urbana centradas en transporte público no deben enfocarse únicamente en aumentar la flota, sino en evaluar su calidad estructural y percibida. Como han señalado Ahvenniemi et al. [6] y Litman [15], la transición hacia sistemas sostenibles requiere un enfoque integrado de infraestructura, tarifas, confort y eficiencia energética. Esta dinámica también se alinea con los principios de ciudades inteligentes al incorporar mecanismos adaptativos de planeación y respuesta ciudadana [5], [16]. De esta forma, el transporte público no solo reduce emisiones, sino que constituye un eje de transformación estructural del sistema.

7.1.9 Submodelo de salud pública

La salud pública urbana es una variable central en los sistemas urbanos complejos, pues refleja el estado del bienestar físico, mental y ambiental de la población. Su comportamiento dinámico está determinado por múltiples factores estructurales como la calidad ambiental, el uso de espacio público, la percepción de seguridad y la conciencia ecológica de los ciudadanos. Desde un enfoque de dinámica de sistemas, la salud pública no debe tratarse como un resultado aislado, sino como una variable de estado cuya evolución depende de interacción no lineales y realimentaciones dentro del entorno urbano [3], [8], [10].

Como se observa en la figura 22, el submodelo describe a la **salud pública** como una variable de nivel que se acumula con base en su tasa de creación. Esta creación depende simultáneamente de tres factores:

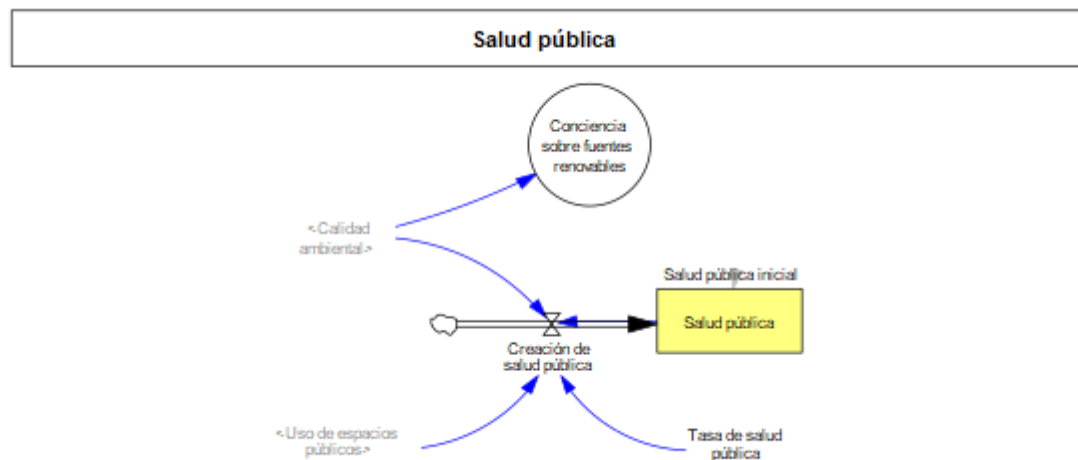


Figura 22 Submodelo salud pública

- **Calidad ambiental**, que influye en la prevalencia de enfermedades relacionadas con la contaminación del aire y del agua [6], [10].
- **Uso de espacios públicos**, vinculado al bienestar psicológico y la promoción de actividad física [11], [12].
- **Conciencia sobre fuentes renovables**, que fortalece una cultura ciudadana preventiva y comprometida con la sostenibilidad energética [1], [16].

Este modelo resalta la importancia de los determinantes sociales y ambientales de la salud, más allá del enfoque clínico tradicional. Además, integra componentes de percepción y comportamiento colectivo, claves en la construcción de entornos urbanos saludables y resilientes [5], [29].

Estructura de ecuaciones:

- Salud pública (nivel acumulado):

SP = Salud pública

CSP = Creación de salud pública

SPI = Salud pública inicial

$$SP = \int (CSP, SPI)$$

- Creación de salud pública (flujo):

CSP = Creación de salud pública

SP = Salud pública

TSP = Tasa de salud pública

UEP = Uso de espacios públicos

CA = Calidad ambiental

$$CSP = IF THEN ELSE (SP < 1, TSP \times UEP \times CA \times SP, 0)$$

- Relaciones auxiliares:
 - Para conciencia sobre fuentes renovables:

CFR = Conciencia sobre fuentes renovables
CA = Calidad ambiental

$$CFR = CA$$

- Para uso de espacios públicos:

UEP = Uso de espacios públicos
PCV = Percepción de calidad de vida
PSEG= Percepción de seguridad

$$UEP = \frac{PCV + PSEG}{2}$$

Estas relaciones vinculan este submodelo con otros nodos claves del sistema, como la percepción ciudadana, la infraestructura verde y la energía urbana. La ecuación de creación incluye una autocatalización moderada (multiplicación por el propio nivel), lo cual refuerza comportamientos acumulativos positivos.

El submodelo de salud pública refleja una lógica acumulativa donde pequeñas mejoras en la calidad ambiental y el acceso a espacios públicos generan impactos significativos sobre el bienestar colectivo.

Además, la salud actúa como variable de enlace entre subsistemas: influye en la productividad laboral, en la cohesión social y en la sostenibilidad general del sistema urbano [6], [10], [11]. Como muestran Forrester [3] y Pérez Alcázar y Redondo [7], la acumulación de capital humano y salud en modelos urbanos es clave para diseñar políticas estructurales de largo plazo. En este sentido, la intervención sobre variables conectadas a este submodelo ofrece un alto retorno social y sistémico.

7.1.10 Submodelo de vehículos particulares

El uso creciente del vehículo particular constituye una de las principales fuentes de presión sobre los sistemas urbanos contemporáneos, afectando la calidad del aire, la congestión vial, el consumo energético y la equidad territorial. Desde la perspectiva de la dinámica de sistemas, este comportamiento no puede explicarse únicamente por decisiones individuales, sino que emerge de la interacción entre factores estructurales como la percepción de seguridad, la calidad de la infraestructura vial y la ausencia de alternativas de transporte público [3], [6], [15]. El submodelo

presentado en la figura 23, permite analizar la dinámica de crecimiento de la flota vehicular y su vínculo con el comportamiento de uso privado del transporte.

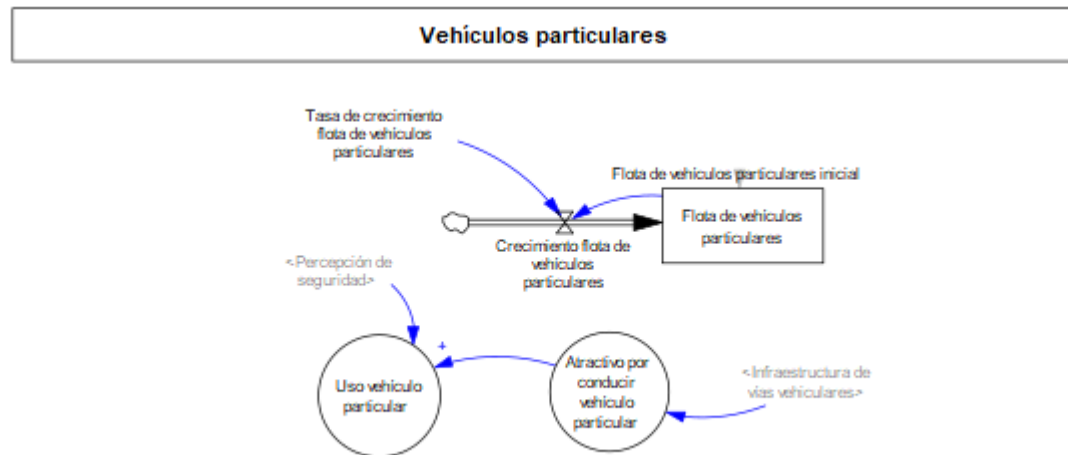


Figura 23 Submodelo vehículos particulares

El modelo describe la evolución de la **flota de vehículos particulares** como nivel acumulado, alimentado por una tasa de crecimiento proporcional a su stock existente. Esta tasa es sensible a factores socioterritoriales que estimulan el uso del vehículo privado, tales como:

- **Percepción de seguridad:** Un entorno urbano percibido como inseguro reduce la disposición de las personas a caminar o usar el transporte público, incentivando el uso de vehículos particulares [11], [12].
- **Atractivo por conducir vehículo particular:** Esta variable está determinada directamente por la **infraestructura de vías vehiculares**, que condiciona la fluidez del tránsito, disponibilidad de parqueaderos y comodidad del viaje [6], [15].

Estas relaciones conforman un bucle de refuerzo donde el incremento de la flota de vehículos aumenta su uso, lo que a su vez refuerza la demanda mayor por mayor infraestructura vial, perpetuando una dependencia estructural del automóvil privado. [3], [5], [15]

Estructura de ecuaciones del submodelo:

- Flota de vehículos particulares (nivel):

FVP = Flota de vehículos particulares

CFVP = Crecimiento de flota de vehículos particulares

FVPI = Flota de vehículos particulares inicial

$$FVP = \int (CFVP, FVPI)$$

- Crecimiento de flota (flujo):

CFVP = Crecimiento de flota de vehículos particulares

TCVP = Tasa de crecimiento de vehículos particulares

FVP = Flota de vehículos particulares

$$CFVP = TCVP \times FVP$$

- Uso del vehículo particular:

UVP = Uso del vehículo particular

ACVP = Atractivo por conducir vehículo particular

PS = Percepción de seguridad

$$UVP = \frac{ACVP}{PS}$$

- Atractivo por conducir vehículo particular:

ACVP = Atractivo por conducir vehículo particular

IVV = Infraestructura de vías vehiculares

$$ACVP = IVV$$

El comportamiento del sistema es típicamente exponencial si no se introducen mecanismos de control, dado que el crecimiento del parque automotor genera impactos en cadena que realimenta su propia expansión.

El submodelo permite evidenciar un patrón clásico de crecimiento insostenible asociado a la motorización urbana. La dependencia estructural del vehículo privado se consolida a través de realimentaciones reforzadoras impulsadas por la inversión en infraestructura vial y la percepción de seguridad, generando efectos adversos sobre la equidad, el ambiente y la eficiencia del sistema urbano [6], [15], [18]. Como sugiere Forrester [3] y lo confirma Batty [1], solo mediante políticas de intervención en variables estructurales (como la planificación del uso del suelo, la multimodalidad y la fiscalidad ambiental) se puede romper este ciclo e impulsar una transición hacia sistemas de movilidad más sostenibles.

7.1.11 Submodelo de energía: dinámica del consumo y producción

La transición energética constituye un eje fundamental en la construcción de ciudades inteligentes y sostenibles, ya que define tanto la huella ecológica del sistema urbano como su capacidad de adaptación climática. El submodelo de energía presentado en la Figura 24 representa la relación entre el consumo energético del transporte urbano y la proporción de energía generada a partir de fuentes renovables, conectando directamente con políticas de movilidad, conciencia ambiental y

planificación energética. Esta dinámica refleja lo que Forrester [3] denominó una “estructura endógena de sostenibilidad”, en la cual el comportamiento del sistema depende críticamente de la realimentación entre el consumo, infraestructura y percepción ciudadana.

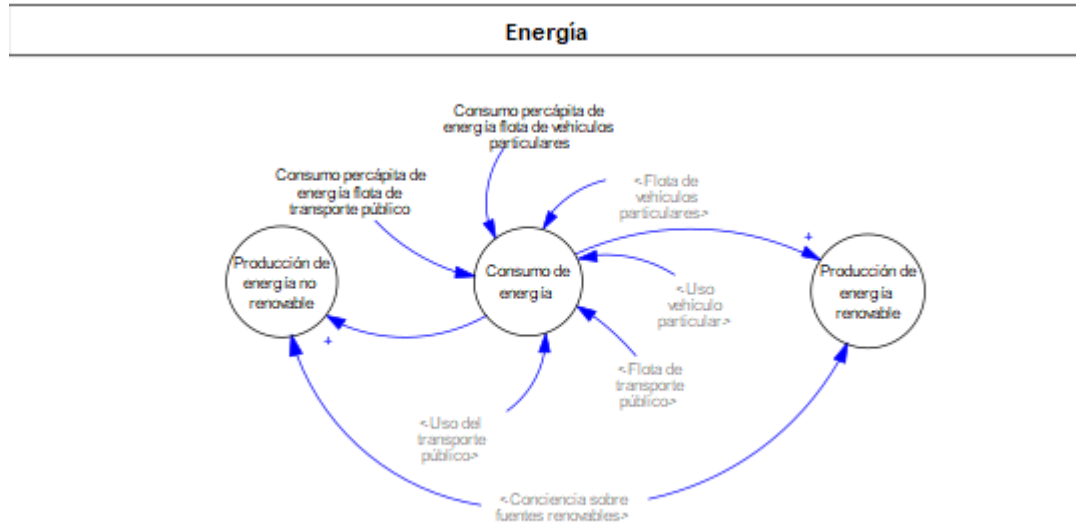


Figura 24 Submodelo de energía: dinámica del consumo y producción

En el consumo el submodelo se encuentra la variable **consumo de energía**, determinada por la demanda energética del transporte público y de los vehículos particulares. Esta variable depende de:

- **Uso del transporte público** y su correspondiente **flota**, multiplicado por su **consumo percápita**.
- **Uso del vehículo particular** y la **flota de vehículos particulares**, multiplicado por el **consumo energético por unidad**.

Ambos componentes se alimentan de la dinámica urbana: expansión del parque vehicular, políticas de movilidad y percepción de seguridad [6], [15].

- **Producción de energía no renovable**, que representa la porción de la demanda cubierta por fuentes fósiles (petróleo, gas, carbón), calculada como el complemento de la conciencia sobre fuentes renovables.
- **Producción de energía renovable**, directamente influenciada por el nivel de conciencia social sobre estas fuentes, variable que aumenta con mejoras en calidad ambiental y salud [9], [27].

Esta estructura genera dos bucles con implicaciones contrastantes:

- a. **Bucle reforzador positivo**, en el que una mayor conciencia sobre fuentes renovables incrementa su producción, lo cual reduce emisiones y mejora el ambiente urbano, generando mayor apoyo ciudadano a estas tecnologías [29].
- b. **Bucle dependiente negativo**, donde la expansión del parque automotor y la falta de transición energética consolidan el uso de fuentes fósiles, aumentando la presión ambiental y comprometiendo metas de descarbonización [16], [20].

Estructura de ecuaciones:

- Consumo de energía (flujo):

CE = Consumo de energía

UTP = Uso del transporte público

FTP = Flota de transporte público

CPTP = Consumo per cápita de energía flota de transporte público

UVP = Uso de vehículo particular

FVP = Flota de vehículos particulares

CPVP = Consumo per cápita de energía flota de vehículos particulares

$$CE = (UTP \times FTP \times CPTP) + (UVP \times FVP \times CPVP)$$

- Producción de energía renovable:

PRER = Producción de energía renovable

CFR = Conciencia sobre fuentes renovables

CE = Consumo de energía

$$PRER = CFR \times CE$$

- Producción de energía no renovables:

PENR = Producción de energía no renovable

COFR = Conciencia sobre fuentes renovables

CE = Consumo de energía

$$PENR = (1 - COFR) \times CE$$

El submodelo evidencia cómo el patrón energético de una ciudad está profundamente influenciado por decisiones de movilidad y factores socioculturales. La estructura modelada permite visualizar que reducir la dependencia de fuentes no renovables requiere más que infraestructura: demanda transformaciones en comportamiento ciudadano, políticas de incentivo, y marcos regulatorios orientados a la innovación energética [9], [16], [27]. Como advierte Meadows [23], intervenir en la conciencia pública y la estructura de incentivos representa uno de los puntos de palanca más poderosos para redirigir el sistema urbano hacia trayectorias sostenibles.

7.1.12 Submodelo de seguridad urbana: percepción, cohesión y control estructural

El submodelo de seguridad urbana incorpora dimensiones estructurales y sociales de la vida en la ciudad, integrando variables relacionadas con cohesión ciudadana, percepción de seguridad, criminalidad y desigualdad. Este componente del modelo representa una dimensión clave de bienestar urbano, al demostrar cómo la interacción entre factores institucionales, comunitarios y económicos produce trayectorias sistémicas de seguridad o vulnerabilidad. Siguiendo los enfoques de Forrester [3] y Sterman [8], este submodelo permite capturar dinámicas de realimentación donde la confianza ciudadana y la acción colectiva afectan directamente los niveles de criminalidad percibida y real.

El nodo central del submodelo es la **percepción de seguridad**, representada como un nivel dinámico que se realimenta mediante un conjunto de variables relacionadas con la calidad del entorno urbano y la capacidad de control institucional. Esta percepción se ve influida negativamente por el nivel de **delitos**, el cual depende de las **brechas de desigualdad** existentes, a su vez condicionadas por los niveles de educación y productividad laboral. Este es un bucle de refuerzo negativo que refleja un patrón clásico de deterioro social acumulativo descrito en los estudios de dinámica urbana [3], [8].

En paralelo, el modelo incorpora un bucle de balance positivo fundamentado en la **cohesión y colaboración ciudadana para la seguridad**, la cual se ve incrementada por el uso activo de los **espacios públicos**. Cuando la población percibe su entorno como seguro, incrementa su interacción comunitaria, lo cual mejora la vigilancia natural del entorno urbano como se observa en la figura 25, fortalece el capital social [12], y motiva mayor inversión institucional en seguridad. Esta inversión, a su vez, reduce los delitos y alimenta nuevamente la percepción de seguridad, cerrando un ciclo virtuoso.

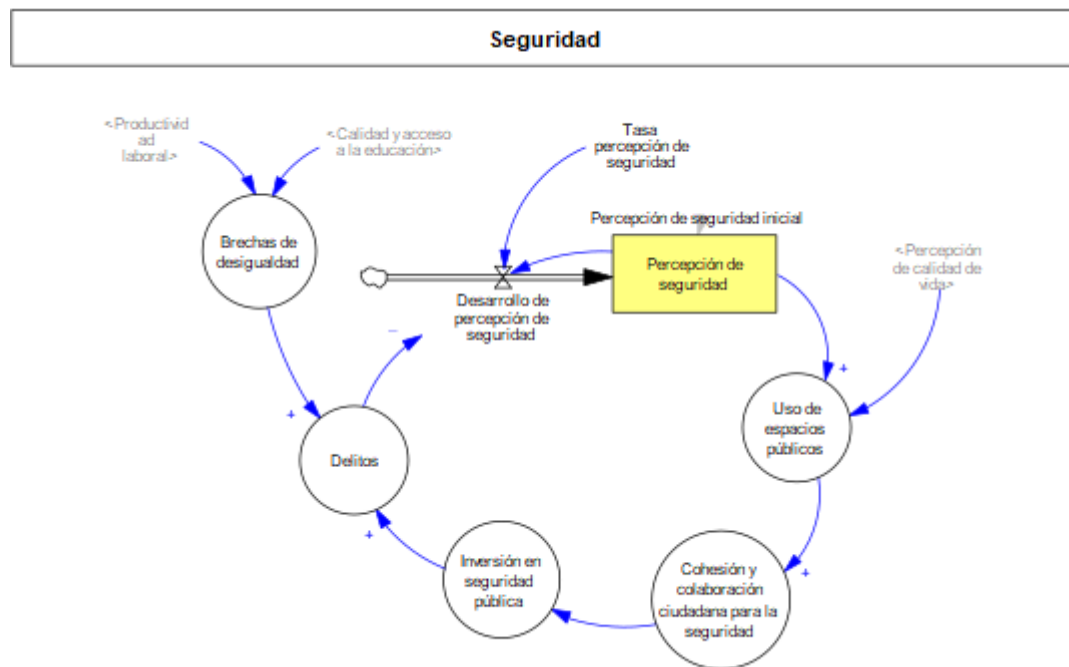


Figura 25 Submodelo de seguridad urbana: percepción, cohesión y control estructural

Esta doble dinámica ilustra cómo las ciudades pueden oscilar entre escenarios de deterioro estructural y resiliencia comunitaria, dependiendo de la activación de mecanismos sociales e institucionales. Intervenir sobre las brechas estructurales y fomentar la apropiación ciudadana del espacio urbano permite modificar el comportamiento emergente del sistema, favoreciendo la convergencia hacia estados de mayor seguridad percibida y real.

Estructura y formulas del submodelo

- Brechas de desigualdad:

BD = Brechas de desigualdad

CAE = Calidad y acceso a la educación

PL = Productividad laboral

$$BD = \frac{2}{CAE + PL}$$

- Delitos:

D = Delitos

BD = Brechas de desigualdad

ISEG = Inversión en seguridad pública

$$D = \frac{BD}{ISEG}$$

- Desarrollo de percepción de seguridad:

DSEG = Desarrollo de percepción de seguridad

PS = Percepción de seguridad

TSEG = Tasa de percepción de seguridad

D = Delitos

$$DSEG = IF THEN ELSE \left(PS < 1, PS \times \frac{TSEG}{D}, 0 \right)$$

- Percepción de seguridad (nivel):

PS = Percepción de seguridad

DSEG = Desarrollo de percepción de seguridad

PSI = Percepción de seguridad inicial

$$PS = \int (DSEG, PSI)$$

- Uso de espacios públicos:

UEP = Uso de espacios públicos

PCV = Percepción de calidad de vida

PS = Percepción de seguridad

$$UEP = \frac{PCV + PS}{2}$$

- Cohesión y colaboración ciudadana para la seguridad:

CCC = Cohesión y colaboración ciudadana para la seguridad

UEP = Uso de espacios públicos

$$CCC = UEP$$

- Inversión en seguridad pública:

ISEG = Inversión en seguridad pública

CCC = Cohesión y colaboración ciudadana para la seguridad

$$ISEG = CCC$$

El submodelo de seguridad urbana pone en evidencia la centralidad de las percepciones ciudadanas, no solo como reflejo de condiciones materiales, sino como catalizador de dinámicas estructurales. La seguridad no es aquí un resultado exógeno, sino una variable emergente de las interacciones sociales, la calidad del entorno y la gobernanza urbana. Esto confirma lo planteado por Echebarria et al. [5] y Ahvenniemi et al. [6], quienes subrayan la necesidad de enfoques integrados para lograr ciudades inteligentes y sostenibles. En línea con Meadows [23], la percepción de seguridad representa un punto de apalancamiento del sistema urbano, donde intervenciones bien orientadas pueden desencadenar procesos amplios de transformación social.

7.2 Consolidación de la estructura de simulación del sistema urbano

La construcción de un modelo de niveles y flujos, inspirado en los principios formulados por Forrester [3], constituye una fase crucial en el proceso de formalización del sistema urbano modelado. Este modelo permite integrar las dinámicas acumulativas, las tasas de cambio y las relaciones funcionales que dan forma al comportamiento estructural de la ciudad. Mientras que el capítulo inicial abordó la caracterización cualitativa a través de bucles causales y relaciones de realimentación, esta etapa profundiza en la representación cuantitativa de dichas interacciones, mediante variables de estado (niveles), flujos, auxiliares y constantes. Esta transición del plano causal al estructural garantiza la trazabilidad conceptual entre lógica sistémica y la lógica computacional del modelo, facilitando la posterior validación y simulación.

El modelado resultante integra subestructuras críticas como la dinámica poblacional, la infraestructura urbana, la salud pública, la percepción de seguridad, el acceso a servicios públicos, el transporte sostenible y la calidad ambiental. Cada uno de estos componentes fue expresado mediante ecuaciones diferenciales y funciones condicionales que permiten capturar no solo la dinámica lineal del crecimiento, sino también los umbrales, restricciones y no linealidades propias de sistemas complejos urbanos [1], [7], [8]. Por ejemplo, el bienestar de la ciudad se relaciona inversamente con la presión poblacional sobre la capacidad de soporte, a su vez determinada por la calidad de los servicios urbanos, la salud y la percepción social [6], [11]. Estas relaciones fueron formalizadas con el fin de establecer un marco operativo para la exploración de escenarios y puntos de palanca, conforme a lo propuesto por Meadows [23].

En suma, la consolidación del modelo de niveles y flujos no solo representa la traducción matemática de los bucles causales previamente definidos, sino también la apertura hacia la exploración de trayectorias futuras mediante simulación computacional. Este avance metodológico prepara el camino para el análisis de sensibilidad, validación estructural y simulación de escenarios prospectos, que se desarrollarán en los capítulos siguientes, asegurando la coherencia epistémica y técnica del modelo dinámico construido.

8. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS Y EVALUACIÓN PROSPECTIVA DEL MODELO URBANO

La simulación de escenarios representa una etapa fundamental dentro del enfoque de dinámica de sistemas, al permitir explorar cómo distintas combinaciones de políticas, inversiones y cambios estructurales afectan el comportamiento de largo plazo de un sistema urbano complejo. En este capítulo, se implementan simulaciones computacionales a través de la plataforma Forio, basadas en el modelo dinámico desarrollado en Vensim, para evaluar el impacto de diferentes estrategias de intervención sobre variables clave como salud pública, percepción de seguridad, educación, infraestructura y crecimiento poblacional. Esta fase se sustenta teóricamente en los postulados de Forrester [3], Sterman [8] y Barlas [4], quienes destacan la importancia de la simulación como herramienta para el análisis prospectivo y la validación de políticas públicas bajo condiciones de alta incertidumbre y realimentación no lineal. A través de seis escenarios contrastados, se examinan tanto trayectorias como alternativas deseables, con el fin de identificar estrategias robustas que promuevan mayor equidad, resiliencia y bienestar urbano en el largo plazo.

8.1 Escenarios de simulación: Definición y configuración paramétrica

La modelación dinámica de sistemas urbanos requiere la simulación de distintos escenarios para analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones alternativas. Esta estrategia permite anticipar posibles trayectorias futuras y evaluar el impacto de diversas políticas públicas. En esta sección se presentan seis escenarios definidos a partir del modelo de niveles y flujos implementado en la plataforma Forio, incorporando variables estratégicas asociadas a infraestructura urbana, salud pública, percepción de seguridad, transporte, educación y servicios básicos.

La construcción de escenarios sigue un enfoque exploratorio, donde cada combinación de parámetros permite simular efectos diferenciados sobre el bienestar urbano y sus componentes estructurales. En particular, los escenarios permiten identificar puntos de inflexión, evaluar sinergias y analizar compensaciones entre variables, ofreciendo una herramienta robusta para la toma de decisiones informadas [4],[8].

Escenario	Descripción breve	% de inversión en infraestructura urbana	Tasa de generación salud pública	Tasa de percepción de seguridad	Tasa crecimiento transporte público	Tasa generación calidad educación	Tasa generación servicios públicos
E1 - BAU	Escenario base sin modificaciones	0,0	0,1	0,197	0,068	0,097	0,024
E2 – Infraest	Mayor inversión en servicios,	0,15	0,1	0,197	0,068	0,2	0,05

ructura urbana	espacios y educación						
E3 – Movilidad activa	Fomento del transporte público y movilidad activa	0,15	0,1	0,197	0,15	0,097	0,024
E4 – Salud y bienestar	Aumento de salud pública y percepción de seguridad	0,1	0,2	0,3	0,068	0,097	0,024
E5 – Integrado	Combinación de todas las estrategias anteriores	0,2	0,2	0,3	0,15	0,2	0,05
E6 – Dinámica poblacional	Análisis del crecimiento de la población desde 1928 y proyección al 2100	0,1	0,1	0,197	0,068	0,097	0,024

Tabla 3 Escenarios

La tabla anterior resume las configuraciones clave empleadas en cada escenario de simulación. Estas variaciones permiten evaluar el impacto relativo de decisiones específicas sobre el sistema urbano, así como identificar combinaciones efectivas para potenciar el bienestar colectivo. La introducción de escenarios compuestos como el Escenario Integrado facilita la comprensión de interacciones sistémicas y la identificación de políticas con alto potencial transformador [3], [7]. En los capítulos siguientes se analiza en detalle el comportamiento del sistema bajo cada una de estas condiciones.

8.2 Análisis detallado de escenarios de simulación

La evaluación de escenarios constituye una herramienta metodológica fundamental en el marco del modelado dinámico de sistemas urbanos. A través de esta técnica es posible explorar cómo distintas configuraciones de políticas públicas, decisiones de inversión e intervenciones sectoriales pueden

transformar significativamente el comportamiento del sistema. En efecto, los escenarios funcionan como laboratorios virtuales que permiten experimentar con múltiples futuros posibles, identificando trayectorias deseables y anticipando consecuencias no previstas [4], [8]. Este enfoque metodológico permite no solo validar la estructura del modelo a través de pruebas de comportamiento, sino también analizar su sensibilidad y robustez frente a condiciones externas, siguiendo los lineamientos propuestos por Barlas y Sterman [4], [8].

Esta aproximación reconoce la complejidad inherente de los sistemas urbanos y permite analizar interacciones no lineales, realimentaciones y puntos de palanca sistémicos, reforzando la validez del modelo y su aplicabilidad para la planificación estratégica urbana.

Este capítulo ofrece un análisis cualitativo y cuantitativo de cada uno de los seis escenarios definidos previamente, considerando sus implicaciones sistémicas, su potencial transformador y su coherencia con los principios de la modelación dinámica. Se destaca así la utilidad de los escenarios como herramienta de anticipación y soporte para la toma de decisiones urbanas basadas en evidencia.

8.2.1 Escenario 1 – BAU

En escenario E1 – BAU representa el comportamiento inercial del sistema urbano en ausencia de intervenciones estratégicas. Todos los parámetros analizados en la tabla permanecen en sus valores base: no se realiza inversión en infraestructura urbana (0,0), ni se modifican las tasas de generación de salud pública (0,1), percepción de seguridad (0,197), crecimiento del transporte público (0,068), generación de calidad educativa (0,097) o de servicios públicos (0,0024). Este escenario constituye la línea base para evaluar comparativamente el impacto de las políticas simuladas en los escenarios posteriores.

Desde la perspectiva de modelación de sistemas urbanos, el escenario BAU permite observar el comportamiento emergente del sistema bajo condiciones de comunidad institucional y presupuestal, sin políticas correctivas o transformadoras. Este tipo de configuración es útil para detectar trayectorias inerciales, puntos de saturación funcional y riesgos acumulativos a lo largo del horizonte temporal de análisis [3], [8].

En términos de dinámica estructural, se espera que el sistema urbano conserve su estructura actual, sin activar los procesos de mejora en variables clave como salud, movilidad, educación o calidad de vida. La baja inversión pública limita la expansión de la infraestructura, la mejora en los servicios y la cobertura del transporte colectivo. Además, la falta de variación en las tasas de percepción de seguridad y pública reduce las posibilidades de mejora el bienestar subjetivo de la población o su interacción con el espacio urbano.

La estabilidad de las tasas educativas y de servicios públicos sugiere que el modelo no experimentará mejoras relevantes en la calidad de vida urbana, ni en la capacidad institucional de respuesta frente a nuevas demandas sociales. Como lo advierten Forrester [3] y Batty [1], en sistemas urbanos complejos, la ausencia de intervención no genera estabilidad deseable, sino

equilibrios de bajo desempeño, caracterizados por estancamiento funcional, desigualdad persistente y degradación progresiva de capacidades estructurales.

Además, la tasa de crecimiento del transporte público se mantiene en un valor moderado (0,068), insuficiente para modificar patrones de movilidad, lo que puede sostener altos niveles de uso del vehículo particular, congestión vial y emisiones contaminantes. Este comportamiento coincide con lo señalado por Litman [15] y la IEA [16], quienes subrayan que, sin inversiones deliberadas en transporte masivo, eficiencia energética y conectividad multimodal, las ciudades reproducen ciclos de insostenibilidad estructural.

En suma, el escenario BAU configura un punto de partida donde el sistema urbano opera exclusivamente en función de sus capacidades actuales, sin estímulos de cambio. La utilidad analítica de este escenario radica en su papel de contraste comparativo frente a las políticas de transformación urbana exploradas en los escenarios E2 y E6.

8.2.2 Escenario 2 – Infraestructura urbana

El Escenario 2 plantea una estrategia de intervención orientada a incrementar la inversión en infraestructura urbana, con el objetivo de generar mejoras en servicios públicos, calidad de espacio urbano y capacidades del sistema educativo. Específicamente, se establece una inversión del 15% del presupuesto disponible, acompañada, de un incremento en la tasa de generación de calidad educativa (de 0,097 a 0,2) y servicios públicos (de 0,0024 a 0,005). Las demás variables, como la salud pública, percepción de seguridad y transporte público, se mantienen en los mismos valores del escenario base.

Desde una perspectiva estructural, esta configuración busca activar los mecanismos de mejora urbana a través del fortalecimiento de los servicios públicos y educativos, dos pilares fundamentales del capital humano y de la resiliencia urbana. La literatura en dinámica de sistemas ha demostrado que las inversiones focalizadas en estos sectores pueden generar efectos multiplicadores positivos sobre la equidad territorial, la productividad y la cohesión social [3], [13].

En este escenario, se espera que el nivel de calidad de los servicios públicos mejore de manera gradual pero sostenida, gracias a la mayor tasa de generación (0,005). Esta mejora puede manifestarse en el corto plazo mediante el aumento en la cobertura, eficiencia operativa y percepción institucional. Además, la expansión de la calidad educativa tiene el potencial de impactar el sistema urbano en el mediano y largo plazo, al fortalecer las capacidades cognitivas, productivas y sociales de la población. Esto se alinea con los hallazgos de Glaeser [13] y Acemoglu y Robinson [14], quienes destacan que el capital humano es una de las bases estructurales del desarrollo urbano sostenido.

No obstante, dado que este escenario no modifica la tasa de crecimiento del transporte público (0,068) ni las tasas asociadas a la salud pública y percepción de seguridad, persisten limitaciones importantes en otras dimensiones del sistema. La movilidad urbana, por ejemplo, podría no responder adecuadamente al aumento potencial de la demanda, lo que puede derivar en congestión

o desigualdad en el acceso, como se ha documentado en estudios recientes sobre transporte y bienestar urbano [15], [16].

Adicionalmente, al mantener constante la percepción de seguridad (0,197), existe el riesgo de que las mejoras estructurales en infraestructuras no se traduzcan en uso efectivo de los espacios públicos ni en fortalecimiento de la cohesión social. Como señalan Giffinger et al. [17], la efectividad de las intervenciones urbanas depende tanto de las mejoras físicas como de las condiciones sociales y perceptuales que permitan su apropiación ciudadana.

Por lo tanto, aunque este escenario mejora sensiblemente variables estructurales como educación y servicios urbanos, sus efectos pueden ser moderados o limitados por la ausencia de cambios en variables complementarias. Desde la perspectiva sistémica, representa una estrategia sectorialmente eficaz pero parcialmente acotada, que puede servir como componente central de escenarios más integrados (como se analiza en E5), pero que, por sí sola, no garantiza una transformación completa del sistema urbano.

8.2.3 Escenario 3 – Movilidad activa

El Escenario 3 propone una estrategia centrada en el fomento del transporte público y la movilidad activa, mediante un aumento sustancial en la tasa de crecimiento del transporte público (de 0,068 de 0,15) y una inversión en infraestructura urbana equivalente al 12% del presupuesto disponible. Las demás variables del sistema – como salud pública (0,1), percepción de seguridad (0,197), generación de calidad educativa (0,097) y servicios públicos (0,0024) – se mantienen constantes respecto al escenario base.

Desde una perspectiva sistémica, esta configuración permite explorar los efectos de políticas enfocadas en la transición hacia modos de movilidad más sostenibles, sin modificar directamente otras dimensiones del bienestar urbano. El incremento en la tasa de crecimiento del transporte público es significativo, más que duplicando la dinámica base, lo que anticipa una expansión acelerada de la cobertura y capacidad del sistema de transporte masivo.

En términos de niveles y flujos, este escenario activa directamente el nivel de accesibilidad y calidad del servicio público de transporte, lo que a su vez influye positivamente en el uso de transporte público, reduciendo progresivamente la dependencia del vehículo particular, la congestión vial y el consumo energético urbano. Tal como indican Litman [15] y la Agencia Internacional de Energía [16], este tipo de transiciones puede generar beneficios ambientales directos (como la reducción de emisiones) y mejoras en la calidad de vida urbana, especialmente cuando se combina con infraestructura para la movilidad activa.

La inversión del 12% en infraestructura urbana permite inferir mejoras en componentes como andenes, ciclorrutas y nodos intermodales, esenciales para consolidar una red de movilidad activa funcional. Estos elementos, además de favorecer la equidad territorial en el acceso, contribuyen a mejorar la habitabilidad del entorno urbano y el uso del espacio público [11], [12].

Sin embargo, al mantener constantes las tasas de salud pública y percepción de seguridad, el escenario presenta limitaciones estructurales. La apropiación ciudadana del espacio público – clave

para consolidar una cultura de movilidad activa – puede verse restringida si persisten condiciones de inseguridad o baja cohesión social. Según Mouratidis [11] y Giffinger et al. [17], la seguridad percibida es un determinante esencial para la efectividad de intervenciones basadas en transporte no motorizado.

Además, la falta de aumento en la generación de servicios públicos y educación limita los efectos de sinergia intersectorial que podrían potenciar la resiliencia del sistema urbano. A mediano plazo, esto podría traducirse en cuellos de botella en otros servicios si la mejora en movilidad no se acompaña de mejoras en capacidad institucional y social.

En resumen, este escenario activa uno de los mecanismos más eficaces para reducir la presión ambiental del sistema urbano – la movilidad sostenible – y puede disparar beneficios significativos en términos de eficiencia energética, conectividad urbana y descongestión. Sin embargo, su impacto puede verse parcialmente restringido si no se acompaña de políticas complementarias en salud, seguridad y servicios urbanos, como se propone en el E5.

8.2.4. Escenario 4 – Salud y Bienestar

El Escenario 4 incorpora una estrategia orientada al fortalecimiento de la salud pública y la percepción de seguridad ciudadana, con el objetivo de mejorar la calidad de vida y las condiciones sociales del entorno urbano. En este escenario, se mantiene la inversión en infraestructura urbana en 0%, al igual que en el escenario base, pero se incrementa la tasa de generación de salud pública de (de 0,1 a 0,2) y la tasa de percepción de seguridad (de 0,197 a 0,3). Los demás parámetros del sistema – transporte público (0,068), educación (0,097) y servicios públicos (0,0024) – permanecen sin cambios.

Desde una perspectiva sistémica, este escenario apunta a intervenir dos determinantes sociales del bienestar urbano altamente interdependientes: salud y seguridad. La mejora en salud pública puede influir directamente en la productividad laboral, el acceso equitativo a oportunidades y la reducción del gasto en atención sanitaria, generando un entorno más resiliente y equitativo [10], [11]. A su vez, una mayor percepción de seguridad puede transformar la relación de los ciudadanos con el espacio público, promoviendo la cohesión social, el uso activo de espacio comunes y la apropiación del entorno urbano [12], [18].

En términos de dinámica de sistemas, el aumento de la tasa de generación de salud pública (0,2) permite acelerar el crecimiento del nivel correspondiente, lo cual se traduce en una población urbana con mejores condiciones físicas y mentales, mayor disposición a participar en la vida comunitaria y mejor desempeño económico. Esto coincide con lo señalado por la OMS [10] y estudios sobre capital humano urbano [14].

Por otro lado, la tasa de percepción de seguridad elevada (0,3) tiene el potencial de modificar conductas urbanas clave, como el uso del transporte público, la movilidad peatonal y la interacción comunitaria. La percepción de seguridad es un habilitador fundamental para activar otras políticas urbanas, ya que, sin ella, las inversiones en infraestructura o servicios pueden no traducirse en mejoras percibidas o apropiadas por la ciudadanía [5], [17].

No obstante, este escenario no contempla mejoras en infraestructura física ni en capacidades educativas o de transporte, lo que limita la expansión del impacto positivo más allá de lo social-perceptual. La ausencia de inversión urbana impide reforzar componentes como accesibilidad, conectividad o calidad de los servicios. Como lo plantean Ahvenniemi et al. [6], las políticas urbanas más eficaces son aquellas que articulan dimensiones físicas, tecnológicas y sociales de manera simultánea.

En términos de interacción entre variables, este escenario puede generar un entorno social más cohesionado y saludable, pero enfrenta el riesgo de saturación funcional si no se acompaña de mejoras en la infraestructura de servicios o movilidad. Las mejoras en salud y seguridad podrían generar mayor uso del espacio público y del transporte, sin que existan mejoras paralelas en capacidad instalada, lo que afectaría la eficiencia del sistema en el mediano plazo.

El escenario 4 aporta valor en la dimensión social del sistema urbano, activando mejoras sustanciales en bienestar subjetivo, confianza ciudadana y salud pública. Es un escenario que refuerza el tejido social urbano y promueve externalidades positivas en el largo plazo, especialmente en cohesión y gobernanza. Sin embargo, su impacto podría ser limitado o insostenible si no se articula con estrategias complementarias en movilidad, infraestructura y servicios, como se plantea en el escenario E5.

8.2.5. Escenario 5 – Integrado

El Escenario 5 representa una estrategia compuesta que reúne de manera simultánea los elementos más significativos de los escenarios anteriores. Este diseño contempla una inversión del 20% del presupuesto disponible en infraestructura urbana, y ajustes en todos los parámetros estratégicos del sistema: tasa de generación de salud pública (0,2), percepción de seguridad (0,3), crecimiento del transporte público (0,15), generación de calidad educativa (0,2) y servicios públicos (0,005). Es el único escenario en el cual todos los flujos clave del modelo son activados simultáneamente, representando una aproximación sistémica y multisectorial al desarrollo urbano.

Desde la perspectiva de dinámica de sistemas, este escenario activa de forma concurrente los niveles vinculados a bienestar físico, movilidad, infraestructura, percepción y capacidades institucionales. Tal integración busca romper los límites funcionales de escenarios sectoriales como E2, E3 o E4, donde el impacto quedaba restringido a dimensiones particulares del sistema. Como lo plantean Forrester [3] y Pérez Alcázar y Redondo [7], la intervención simultánea de múltiples subsistemas urbanos es clave para movilizar bucles de realimentación virtuosos y evitar efectos de compensación o saturación.

La mayor inversión en infraestructura urbana (0,2) permite acelerar el crecimiento de capacidades físicas del entorno urbano, mejorando la habitabilidad, accesibilidad y sostenibilidad funcional del espacio público [1], [19]. Esto refuerza positivamente la eficiencia del transporte público (0,15), cuyos beneficios se maximizan cuando están acompañados de infraestructura adecuada, políticas de energía limpia y accesibilidad intermodal [15], [16].

Simultáneamente, el incremento en la tasa de generación de salud pública (0,2) y en la percepción de seguridad (0,3) contribuye al fortalecimiento del capital social y humano. Esta configuración permite activar sinergias entre salud, productividad y cohesión social, facilitando la apropiación del espacio público, la reducción del estrés urbano y la participación activa en dinámicas comunitarias [10], [11], [12].

La doble mejora en educación (0,2) y servicios públicos (0,005) amplifica los efectos positivos de largo plazo, al consolidar una base estructural de resiliencia institucional y equidad territorial. Tal como señalan Glaeser [13] y Acemoglu y Robinson [14], las ciudades que invierten en conocimiento, inclusión y servicios de calidad tienen mayores probabilidades de sostener procesos de crecimiento equitativo, innovación social y estabilidad democrática.

Este escenario, al activar múltiples flujos simultáneamente, integra bucles de realimentación positivos interdependientes, evitando cuellos de botella sistémicos y logrando una sinergia estructural difícil de alcanzar mediante intervenciones aisladas. Desde la lógica de la modelación dinámica, representa un punto de apalancamiento compuesto (o “bundle de políticas) que permite amplificar retornos positivos en múltiples dominios urbanos [4], [6], [23].

El escenario E5 es el más robusto desde el punto de vista sistémico. No solo mejora cada componente estratégico del modelo, sino que permite la activación cruzada de bucles reforzadores con alto potencial estructural. Si bien su implementación requiere un alto nivel de coordinación interinstitucional y sostenibilidad fiscal, sus beneficios proyectados abarcan el espectro completo del bienestar urbano: salud, educación, movilidad, percepción, servicios e infraestructura. Representa, por tanto, el escenario más coherente con una transformación urbana integral, en línea con los principios de ciudad inteligente, resiliente e inclusiva [5], [6], [17].

8.2.6. Escenario 6 – Dinámica poblacional

El Escenario 6 introduce una modificación aislada en la tasa de crecimiento vegetativo de la población, aumentando su valor de 0,05692 a 0,09, mientras que todos los demás parámetros se mantienen iguales al escenario base (BAU). No se contempla inversión adicional en infraestructura urbana, ni se incrementan las tasas de salud, seguridad, transporte, educación o servicios. Este escenario permite observar el comportamiento del sistema ante una presión demográfica creciente sin respuesta institucional equivalente.

Desde la perspectiva de dinámica de sistemas, este tipo de escenarios permite evaluar los límites de capacidad de soporte del entorno urbano, y visibilizar el papel de las realimentaciones negativas asociadas a saturación de servicios, deterioro ambiental y pérdida de bienestar [3], [4]. La literatura urbana ha señalado que el crecimiento poblacional sin planificación puede conducir a crisis funcionales, especialmente en sistemas con infraestructura limitada y servicios públicos inestables [8], [22].

En términos estructurales, el aumento de la tasa de crecimiento vegetativo implica una aceleración en el nivel de población urbana, lo que afecta directa e indirectamente una amplia gama de variables del sistema: demanda de vivienda, presión sobre servicios públicos, generación de residuos, uso de

transporte, consumo energético y percepción de calidad de vida. Sin inversión ni expansión en infraestructura, el sistema se ve expuesto a un desequilibrio acumulativo.

Uno de los principales efectos previstos es la disminución de la calidad ambiental, debido al aumento en la generación de residuos y en las emisiones asociadas al transporte y consumo urbano. Este fenómeno está ampliamente documentado en estudios sobre metabolismo urbano [6], [20], donde se advierte que la relación entre población y servicios debe mantenerse dentro de umbrales ecológicos seguros.

La capacidad de soporte de la ciudad, que depende del estado de variables como calidad ambiental, salud, educación, servicios públicos y percepción de calidad de vida, puede verse rápidamente superada. Este efecto es consistente con la noción de límites del crecimiento urbano planteada por Forrester [3] y Meadows [23], donde una expansión demográfica no acompañada de políticas sistémicas termina erosionando el bienestar general.

Además, el deterioro en la percepción de calidad de vida, producto del aumento de la congestión, disminución en la cobertura de servicios y presión sobre el espacio público, puede amplificar dinámicas sociales regresivas, como la informalidad, la inseguridad percibida o la fragmentación territorial [5], [14].

Este escenario también permite observar cómo la ausencia de refuerzo en los bucles positivos del sistema (educación, salud, transporte, servicios) impide absorber la presión poblacional y transforma la dinámica del sistema en una trayectoria de riesgo estructural, donde los mecanismos de balance operan como contención, pero no como solución.

El Escenario 6 actúa como un ejercicio de simulación de saturación sistémica. Su valor analítico radica en evidenciar que el crecimiento poblacional, en sí mismo, no constituye una amenaza si está acompañado de políticas públicas que expanda la capacidad institucional, tecnológica y ambiental del sistema urbano. Sin embargo, cuando dicho crecimiento no se gestiona estratégicamente, el sistema entra en una dinámica de deterioro progresivo que puede comprometer su sostenibilidad funcional y social [6], [20], [23].

8.3 Discusión comparativa de escenarios

La simulación de los seis escenarios prospectivos permite observar con claridad cómo diferentes intervenciones – o la ausencia de ellas – desencadenan trayectorias divergentes en el comportamiento del sistema urbano. A partir de una lectura sistémica del modelo, se identifican tres dimensiones clave para la comparación:

8.3.1 Activación de bucles: apalancamientos y sinergias

Los escenarios 1 (Servicios urbanos) y 2 (Salud y educación) se caracterizan por la activación simultánea de múltiples bucles reforzadores positivos: R2 (Salud y calidad de vida), R3

(Fortalecimiento del sistema productivo), R7 (Calidad de servicios públicos) y R8 (Calidad de espacios públicos). Esta activación genera efectos acumulativos que refuerzan el bienestar sistémico, aumentan la productividad y mejoran la percepción de calidad de vida, validando la hipótesis planteada por autores como Batty [1] y Forrester [3] sobre la importancia de las inversiones sistémicas en la resiliencia urbana.

En contraste, el Escenario 3 (Movilidad activa) activa prioritariamente el bucle R4 (Eficiencia transporte público con energía renovable) y el bucle balanceador B2 (Movilidad amigable con el medio ambiente), lo que permite contener el crecimiento de las externalidades asociadas al uso de vehículos particulares. Este enfoque muestra menor capacidad de transformación estructural, pero una alta efectividad ambiental, en línea con estudios de movilidad activa como los de Litman [15], y la IEA [16].

El Escenario 4 (Salud y bienestar) opera desde los bucles R2 (Salud y calidad de vida) y R5 (Percepción de seguridad), generando impactos significativos en la salud pública, la percepción de la calidad de vida y el uso del espacio urbano. Su activación promueve mejoras en el capital humano y la cohesión social, como lo evidencian estudios de Mouratidis [11] y Leyden [12]. Aunque sus efectos no se reflejan directamente en variables productivas o ambientales, este escenario constituye una palanca clave para la equidad urbana y la sostenibilidad social, especialmente en contextos donde la exclusión territorial y la desconfianza ciudadana son barreras estructurales

8.3.2 Capacidad de absorción sistémica

Los escenarios 1,2 y 4 muestran una mejora progresiva en la capacidad de soporte del sistema, al reforzar variables clave como salud, educación, y servicios públicos. Esto se refleja en una mayor resiliencia frente a perturbaciones, como el crecimiento demográfico (evaluado en el escenario 6) o la presión ambiental. De acuerdo con Meadows [23], estas son intervenciones en “puntos de apalancamiento” altos, con capacidad para transformar la estructura del sistema desde adentro.

Por el contrario, el Escenario 5 (Integrado) representa la estrategia más completa al combinar intervenciones en infraestructura física, capital humano, cohesión social y medio ambiente. Su implementación activa de manera simultánea bucles reforzadores como R1 (Beneficios de energía renovable), R2 (Salud y calidad de vida), R3 (Fortalecimiento del sistema productivo) y R4 (Eficiencia transporte público con energía renovable), al tiempo que mitiga bucles de balance negativos como B2 (Movilidad amigable con el medio ambiente) y B4 (Congestión vehicular). Esta sinergia le permite generar beneficios acumulativos y sostenibles, mejorando la eficiencia energética la equidad social y la resiliencia urbana, en línea con lo planteado por Ahvenniemi et al. [6] y Sterman [8].

El Escenario 6 (Dinámica poblacional) actúa como prueba de estrés del sistema, al incrementar la presión sobre todas las variables sin expansión institucional ni infraestructura. Los bucles de refuerzo positivos se estancan, y los balanceadores como B1 (Economía circular) y B4 intentan mitigar el colapso, pero sin éxito estructural. Este comportamiento reproduce lo advertido por Forrester [3] sobre el colapso urbano bajo crecimiento desregulado.

8.3.3 Sostenibilidad estructural y efectos a largo plazo

A largo plazo, los escenarios que combinan inversión social, infraestructura y gobernanza (1 y 2) muestran trayectorias sostenibles, con aumento progresivo del bienestar, disminución de brechas y eficiencia energética creciente. Estas trayectorias están alineadas con el enfoque de ciudades inteligentes integrales propuesto por Echebarria et al. [5] y Ahvenniemi et al. [6].

Escenarios como el 3 y 4 presentan mejoras sectoriales valiosas – especialmente en términos de equidad ambiental o seguridad – pero con menor alcance estructural, lo que sugiere que la especialización sin articulación sistémica puede limitar la sostenibilidad integral. Por otro lado, el Escenario 5, aunque orientado al crecimiento económico y vehicular, no logra consolidar beneficios netos sostenibles debido a su desconexión con energías limpias y cohesión social, situación similar a la crítica de Glaeser [13] sobre el “desarrollo desequilibrado”.

El Escenario 6 representa el riesgo más alto de colapso sistémico, donde el crecimiento poblacional sin inversión genera realimentaciones negativas que erosionan la funcionalidad urbana, validando las advertencias de Holland [2] sobre sistemas complejos sin capacidad adaptativas.

La simulación comparada de escenarios demuestra que la sostenibilidad urbana no depende de intervenciones aisladas, sino de una sincronización estratégica entre capital humano, infraestructura, ambiente y gobernanza. Los escenarios 1 y 2 evidencian que esta articulación activa bucles reforzadores dominantes que transforman el sistema hacia equilibrios resilientes. La planeación urbana debe, por tanto, priorizar intervenciones sistémicas, respaldadas por modelos como el desarrollado en este proyecto, para evitar puntos de inflexión negativos y potenciar trayectorias sostenibles de largo plazo [8], [23].

9. INTEGRACIÓN DEL SIMULADOR EN PLATAFORMA WEB

El objetivo de este capítulo es describir el proceso de integración del modelo de dinámica de sistemas desarrollado en este trabajo en una plataforma web interactiva, con el fin de facilitar su acceso y utilización por parte de actores interesados, tales como tomadores de decisiones, investigadores, planificadores urbanos y la comunidad en general. La publicación del simulador en un entorno digital permite que los usuarios exploren distintos escenarios y comprendan de manera visual e intuitiva las interrelaciones y realimentaciones que caracterizan al sistema urbano modelado. Esta estrategia responde a la necesidad de democratizar el acceso a herramientas de simulación, favoreciendo procesos participativos de planeación y toma de decisiones basados en evidencia [1], [8], [23].

9.1 Escenario BAU simulación

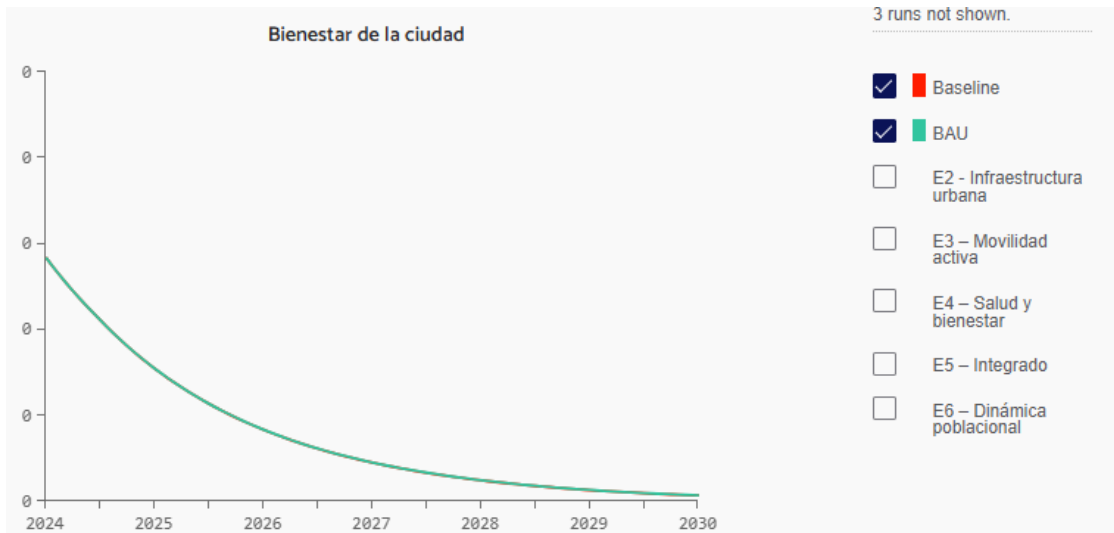


Figura 26 Escenario BAU: Bienestar de la ciudad

En el escenario BAU (2024-2030), el indicador *Bienestar de la ciudad* exhibe un decaimiento cuasi exponencial: la caída es más intensa al inicio y luego se atenúa hasta aproximarse a cero hacia el final del periodo. Este perfil es consistente con una estructura dominada por realimentaciones reforzadoras negativas asociadas al desbalance demanda-capacidad (crece la presión sobre servicios e infraestructura mientras su expansión/mantenimiento opera con retardos), lo que empuja al sistema hacia un atractor de bajo desempeño [3], [4], [8], [29]. La trayectoria sugiere dependencia de condiciones iniciales y una ventana de intervención temprana (aprox. 2024-2026) para reconfigurar palancas, sino se actúa, el sistema queda atrapado cerca del mínimo y los costos de reversión aumentan rápidamente, en línea con la lógica de inercia estructural documentada por la dinámica de sistemas [3], [8]. Además, la lectura “bienestar como presión sobre la capacidad de soporte” es coherente con el deterioro encadenado de servicios y entorno que merma salud, seguridad y uso de espacio público, con efectos de segunda vuelta sobre productividad, ingresos e inversión per cápita que profundizan la espiral descendiente [8], [10], [12].

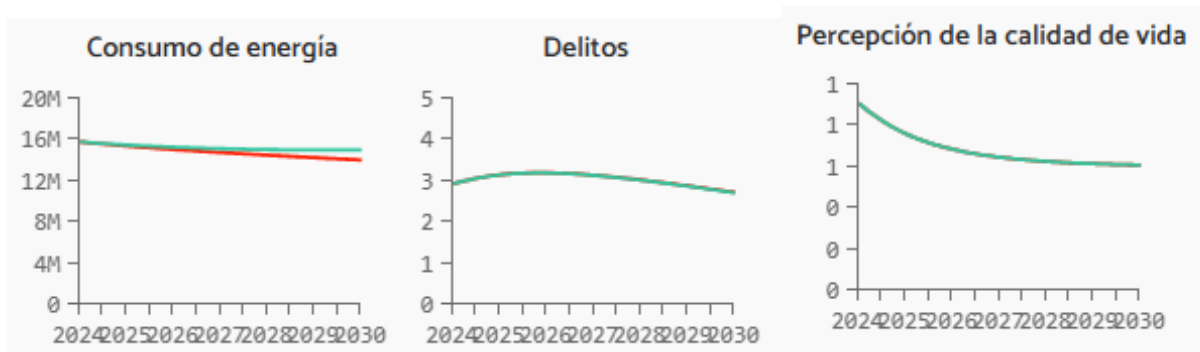


Figura 27 Escenario BAU: Indicadores de acompañamiento

Los indicadores de acompañamiento refuerzan esa interpretación sísmica. La población crece suavemente mientras el consumo total de energía disminuye: en términos per cápita, esta implica contracción, interpretable como eficiencia o como demanda reprimida por deterioro de

servicio/actividad, el hecho de que la percepción de calidad de vida descienda de forma monótona hacia un nivel bajo sugiere que la segunda lectura tiene peso en BAU [8], [10], [12]. A su vez, los delitos presentan una trayectoria unimodal con máximo local y descenso posterior, pero ello no revierte la caída de la percepción: evidencia de que el bienestar percibido es multicausal y no lineal, depende de la combinación de ambiente, acceso a servicios, movilidad y tejido social, más que de un solo factor de seguridad [1], [8], [10], [12],[29]. En suma, la coevolución de estas series confirma la tesis de ciudad como sistema de sistemas: pequeñas mejoras sectoriales aisladas no bastan, se requieren sinergias que actúen sobre calidad de servicios, entorno y accesibilidad de manera coordinada para evitar la trampa de bajo bienestar y recuperar trayectorias virtuosas [1], [6], [8], [29].

9.2 Escenario 2 Infraestructura Urbana

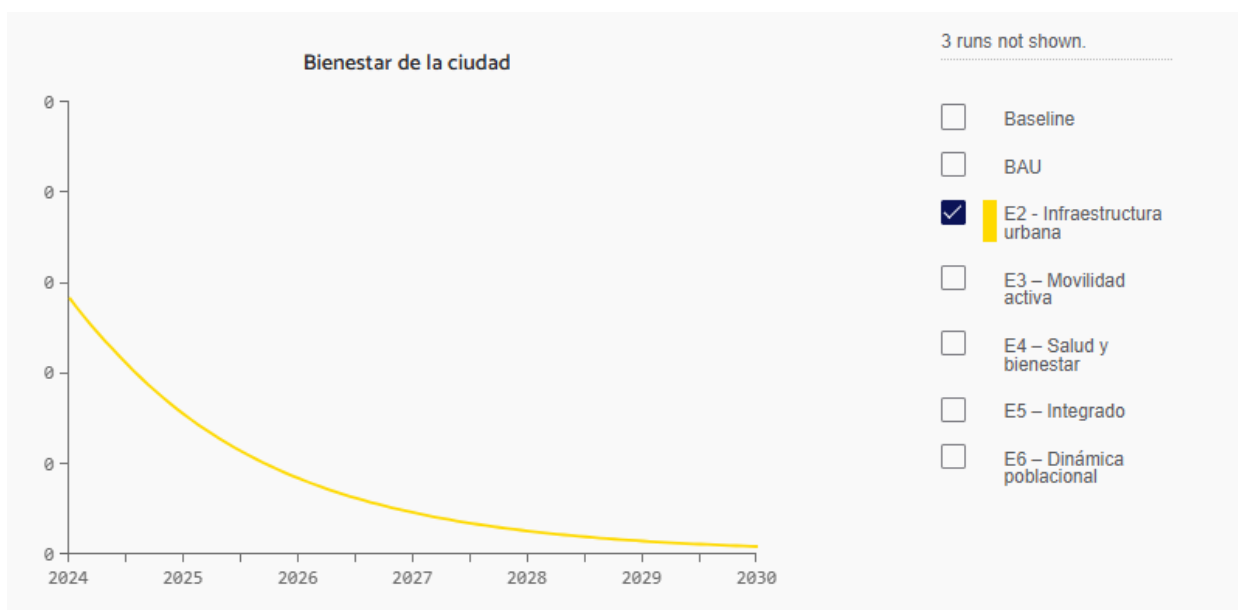


Figura 28 Escenario 2 Infraestructura Urbana: Bienestar de la ciudad

En el escenario 2 (Infraestructura urbana), la serie de *Bienestar de la ciudad* (amarillo) permanece prácticamente superpuesta a Baseline y BAU: conserva el decaimiento cuasi exponencial y converge a valores cercanos a cero hacia 2030, con una mejora apenas marginal al inicio. En términos de dinámica de sistemas, la intervención no altera la arquitectura de retroalimentaciones que gobierna el desempeño —desbalance demanda-capacidad y retardos en ampliación/mantenimiento—, de modo que el sistema sigue atraído por un equilibrio de bajo desempeño sin punto de inflexión observable [3], [4], [8], [29].

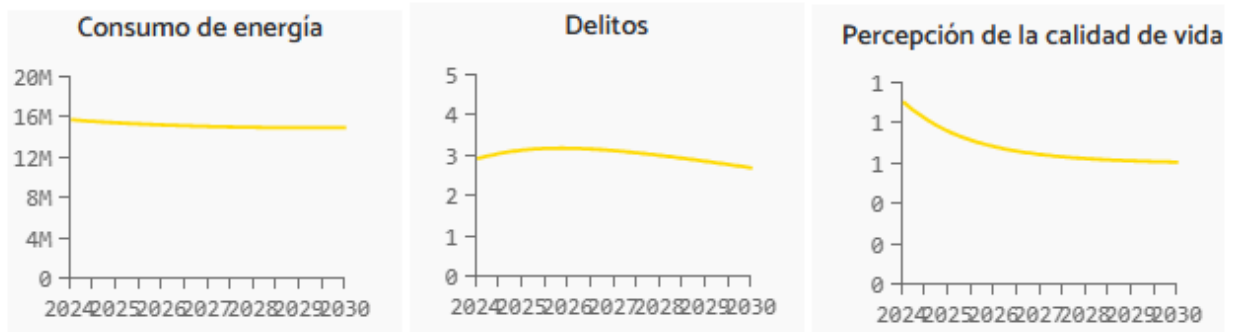


Figura 29 E2 Indicadores de acompañamiento

Los indicadores de acompañamiento matizan este diagnóstico: el consumo total de energía descende, pero E2 queda ligeramente por encima de BAU hacia 2030, lo que sugiere demanda inducida/efecto rebote propio de incrementos de capacidad [9]; los delitos describen una trayectoria unimodal con máximo local y descenso posterior prácticamente idéntica entre escenarios, señal de que la expansión física no modifica por sí sola los determinantes estructurales de seguridad [33]; la percepción de calidad de vida cae monótonamente y con convexidad hacia un nivel bajo estable, recordando que el bienestar percibido es multicausal (salud, ambiente, acceso a espacio público, movilidad, tejido social) y no responde linealmente a aumentos aislados de oferta [10], [12]; y la población mantiene un crecimiento suave casi invariante, por lo que E2 es demográficamente neutro. En conjunto, las series confirman la pertinencia de leer la ciudad como sistema de sistemas: aumentar capacidad sin reconfigurar interdependencias y co-beneficios no revierte la tendencia del bienestar; se requiere actuar sobre puntos de palanca combinados y coordinar intervenciones para evitar la trampa de bajo desempeño [1], [6], [8], [29].

9.3 Escenario 3 Movilidad activa

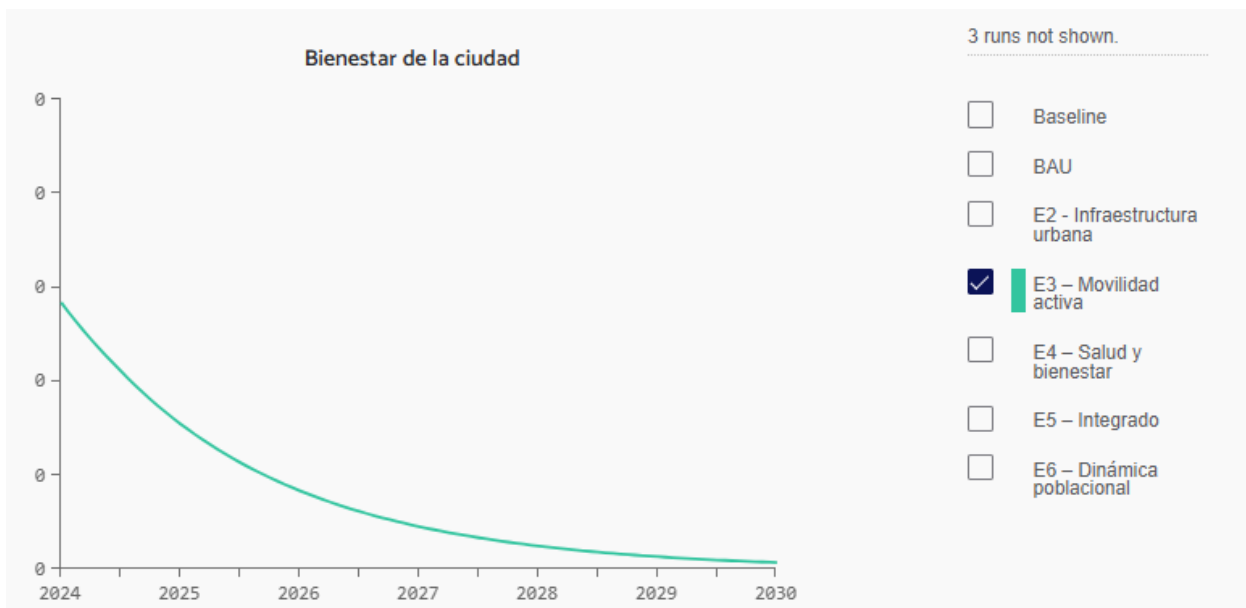


Figura 30 Escenario 3 Movilidad activa: Bienestar de la ciudad

La trayectoria del *Bienestar de la ciudad* (línea magenta) es casi calcada a Baseline/BAU: mantiene el decaimiento cuasi exponencial y converge a valores próximos a cero hacia 2030, con desviaciones marginales que no configuran punto de inflexión ni cambio de régimen. En términos de dinámica de sistemas, la intervención no altera la arquitectura de retroalimentaciones dominante —desbalance demanda–capacidad y retardos en expansión/mantenimiento—, por lo que el sistema sigue atraído por un equilibrio de bajo desempeño [3], [4], [8], [29].

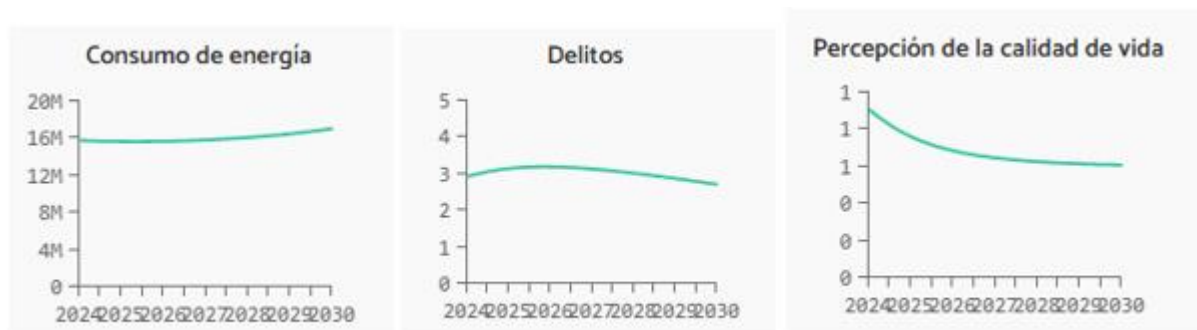


Figura 31 E3 Indicadores de acompañamiento

A diferencia de E2, el consumo total de energía en S3 aumenta hacia 2030 y se ubica por encima de los demás escenarios, de modo que, con una población casi invariante, la intensidad energética per cápita también crece; ello sugiere demanda inducida/efecto rebote y la propagación de externalidades que no se traducen en bienestar agregado [8], [9]. Los delitos presentan una trayectoria unimodal con máximo local y descenso posterior, muy similar entre escenarios, lo que confirma que la expansión de ciertas capacidades no modifica por sí sola los determinantes estructurales de seguridad sin arreglos de gobernanza y diseño socioespacial complementarios [33]. Por su parte, la percepción de calidad de vida continúa monótonamente decreciente y convexa hacia un nivel bajo estable, evidencia de la multicausalidad del bienestar (salud, ambiente, espacio público, accesibilidad) y de su no linealidad respecto a cambios sectoriales aislados [10], [12]. En conjunto, S3 confirma la pertinencia de leer la ciudad como sistema de sistemas: incrementos de actividad/capacidad sin reconfigurar interdependencias y co-beneficios ambientales y sociales difícilmente revierten la tendencia del bienestar; se requiere actuar sobre puntos de palanca combinados y coordinados [1], [6], [8], [29].

9.4 Escenario 4 Salud y bienestar

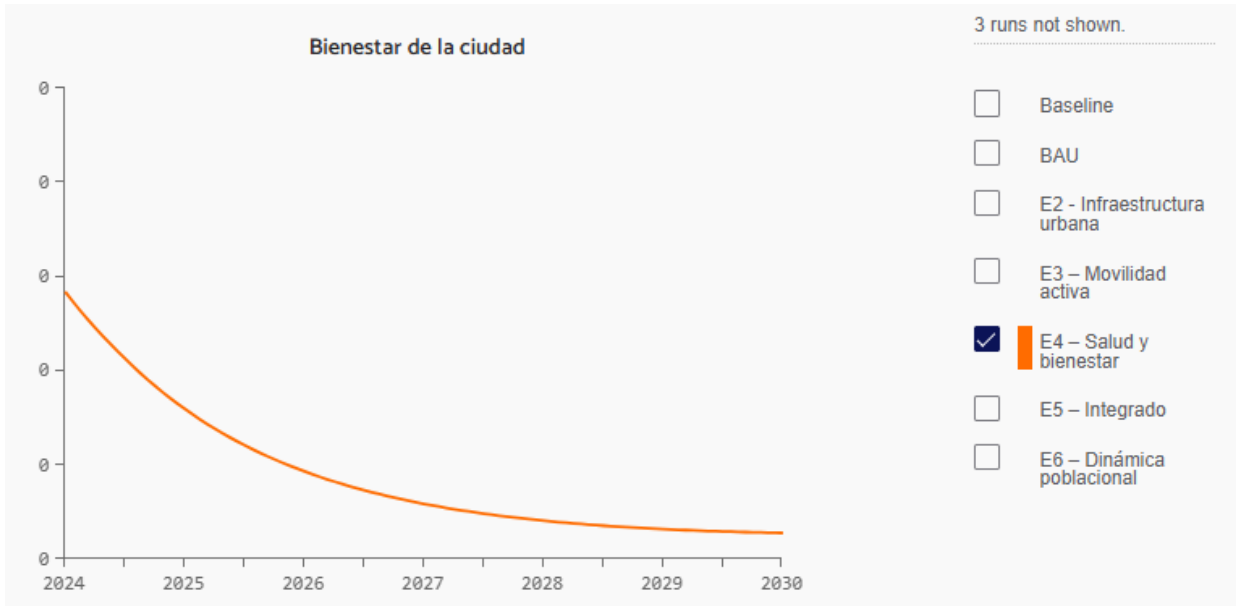


Figura 32 Escenario 4 Salud y bienestar: Bienestar de la ciudad

La trayectoria de *Bienestar de la ciudad* (rojo) mantiene la forma monótonamente decreciente y convexa, pero muestra un desfase positivo sostenido frente a BAU/E2/E3: la caída inicial es menos pronunciada y el nivel de cierre en 2030 es mayor, lo que indica que las intervenciones de salud, ambiente y tejido social mitigan la dominancia de los bucles que empujan al sistema hacia el atractor de bajo desempeño (desbalance demanda–capacidad y retardos), aunque sin llegar a un cambio de régimen ni a un punto de inflexión creciente [3], [4], [8], [29]. En clave sistémica, E4 activa co-beneficios (salud pública, calidad ambiental, cohesión) que amortiguan la espiral descendente bienestar–productividad–inversión, extendiendo el “tiempo de semicaída” del bienestar respecto a los otros escenarios [8], [10], [12].

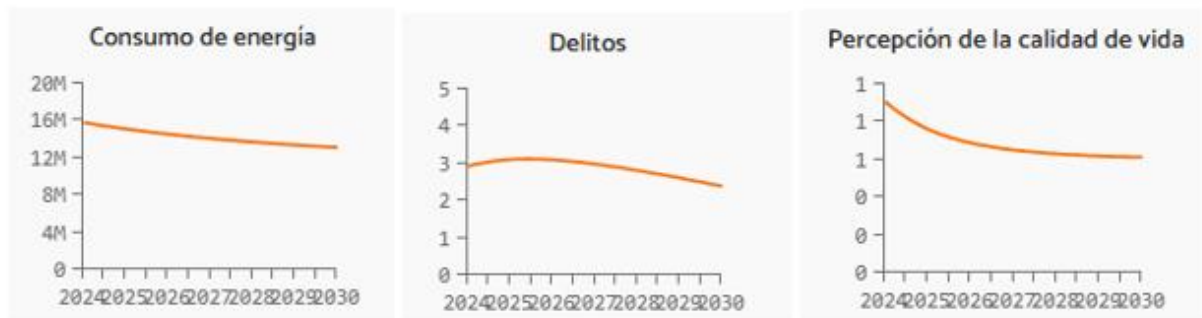


Figura 33 E4 Indicadores de acompañamiento

Con población prácticamente invariante entre escenarios, el consumo total de energía en E4 cae por debajo de BAU/E2/E3 hacia 2030, lo que implica una disminución per cápita consistente con eficiencias y sustituciones de comportamiento asociadas a entornos más saludables (menor exposición térmica, mayor uso de espacio público, prácticas menos intensivas) y menor exposición

a efectos rebote [8], [9], [10]–[12]. Los delitos exhiben una trayectoria unimodal con máximo local y descenso posterior y alcanzan el nivel más bajo en E4 al final del periodo, en línea con los determinantes sociales de la seguridad (cohesión, espacio público de calidad, bienestar percibido) [10], [12]. Por su parte, la percepción de calidad de vida sigue una senda monótonamente decreciente pero en niveles superiores a los de los otros escenarios, confirmando que el bienestar es multicausal y no lineal y que las intervenciones de salud y ambiente reconfiguran parcialmente las interdependencias del sistema sin sustituir la necesidad de actuar sobre puntos de palanca adicionales (capacidad efectiva, movilidad y gobernanza intersectorial) para lograr un cambio estructural duradero [1], [6], [8], [23], [29].

9.5 Escenario 5 Integrado

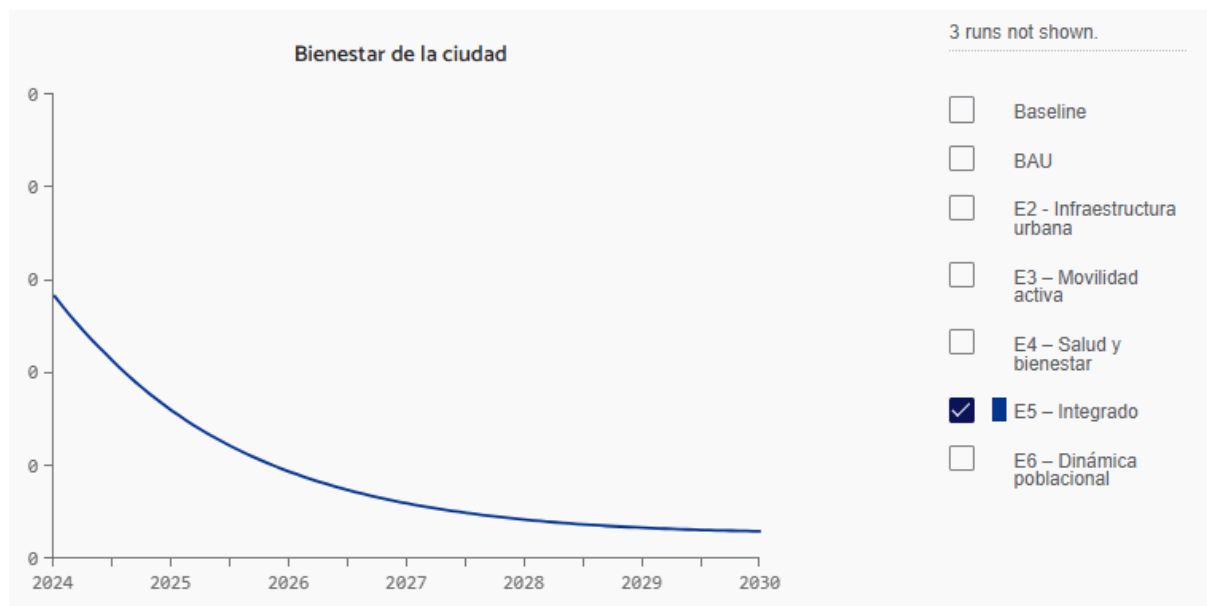


Figura 34 Escenario 5 Integrado: Bienestar de la ciudad

La serie de *Bienestar de la ciudad* (E5) conserva la forma monótonamente decreciente y convexa, pero exhibe el mejor desempeño agregado de todos los escenarios: un desfase positivo sostenido frente a BAU/E2/E3 y por encima de E4 hacia 2030. En términos de dinámica de sistemas, ello indica que la combinación de medidas (salud–ambiente–movilidad activa–capacidad urbana) altera parcialmente la arquitectura de retroalimentaciones que empuja al sistema hacia el atractor de bajo desempeño —desbalance demanda–capacidad y retardos—, extendiendo el tiempo de semicaída del bienestar, aunque sin producir aún un cambio de régimen (no hay punto de inflexión creciente) [3], [4], [8], [29]. La mejora es coherente con la activación simultánea de co-beneficios (mejor aire, más actividad física, mayor uso/valor del espacio público, cohesión social) que reducen la pérdida de bienestar por múltiples vías [10], [12].

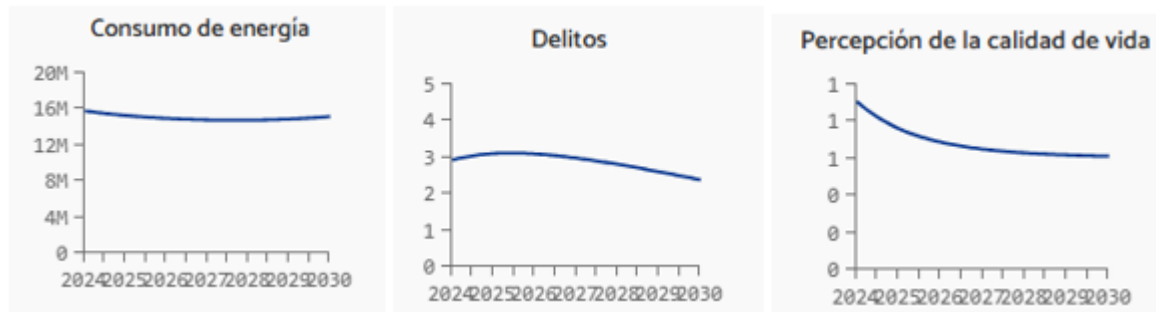


Figura 35 E5 Indicadores de acompañamiento

Con población prácticamente invariante entre escenarios, E5 muestra la mayor reducción del consumo total de energía hacia 2030; en términos per cápita, esto sugiere eficiencias técnicas y sustituciones de comportamiento (p. ej., desplazamientos activos y entornos térmicamente más confortables), con menor exposición a efectos rebote que en E2/E3 [8], [9]. Los delitos siguen una trayectoria unimodal con máximo local y descenso posterior y convergen a los niveles más bajos bajo E5–E4, lo que apunta a determinantes sociales de la seguridad (calidad de espacio público, salud y capital social) actuando conjuntamente [10], [12]. La percepción de calidad de vida continúa decreciendo, pero se estabiliza en niveles superiores a BAU/E2/E3 (y comparable a E4), confirmando que el bienestar es multicausal y no lineal y que las intervenciones coordinadas rinden más que los incrementos sectoriales aislados [1], [5], [6], [8], [29]. En suma, E5 evidencia que la integración de palancas reconfigura interdependencias y trade-offs, mejora la trayectoria del bienestar y acerca al sistema a un equilibrio más alto, aunque para revertir la tendencia se requerirían palancas adicionales o mayor intensidad de las actuales.

9.6 Escenario 6 Dinámica poblacional

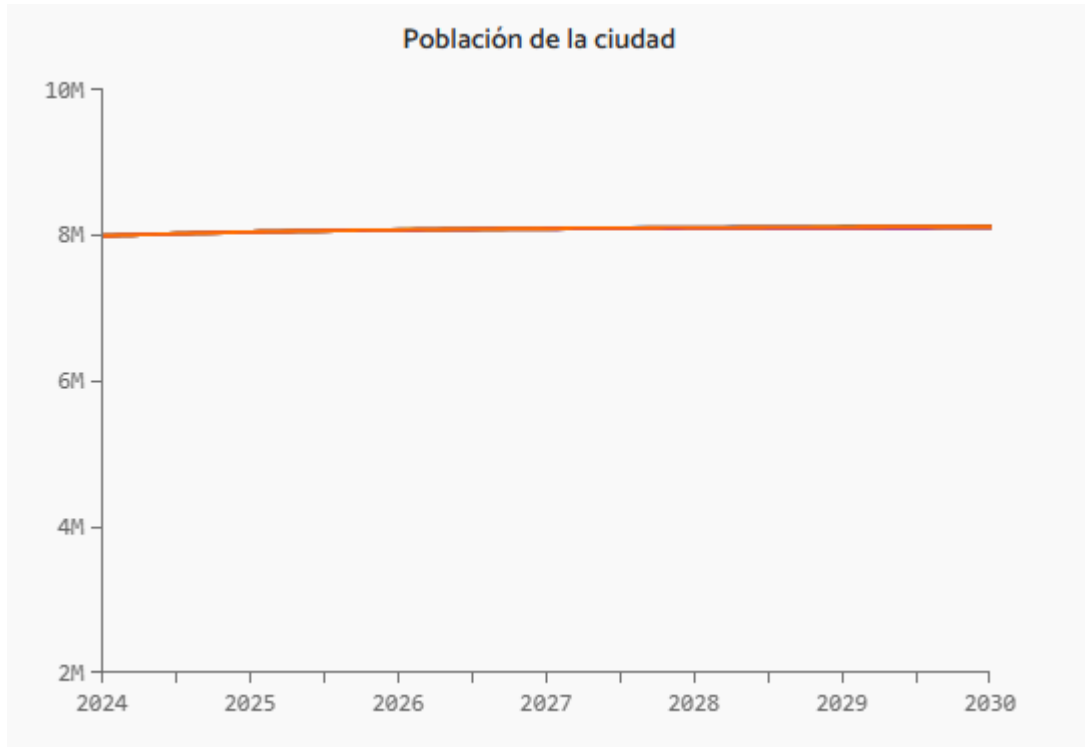


Figura 36 Dinámica poblacional 2024 – 2030

La serie describe una trayectoria en S (logística) propia de sistemas urbanos complejos: décadas iniciales de crecimiento acelerado por atracción migratoria y expansión económica, seguidas de desaceleración conforme emergen límites de suelo y vivienda, congestión y restricciones de infraestructura y ambiente. El peso pasa de bucles reforzadores (empleo→ingresos→atracción) a bucles balanceadores que moderan el aumento, en línea con una ciudad entendida como sistema de sistemas con retroalimentaciones y límites endógenos [1], [3], [8], [29].

¿Por qué entre 2024 y 2030 casi no cambia? La curva se aplana alrededor de ~8,1 millones porque el sistema opera cerca de su capacidad efectiva: nacimientos + inmigración \approx defunciones + emigración, de modo que la tasa neta de crecimiento tiende a cero ($dP/dt \approx 0$). En el modelo, ese cuasi-equilibrio resulta de (i) fecundidad próxima al reemplazo y envejecimiento poblacional, (ii) atracción migratoria saturante con parte del crecimiento que se derrama a la región metropolitana, y (iii) restricciones de servicios, vivienda y movilidad que contienen el aumento dentro del límite distrital. Es, en suma, un equilibrio de alto uso de capacidad: la población de Bogotá varía poco, aunque el sistema urbano-regional siga expandiéndose, tal como anticipa la dinámica de sistemas cuando se alcanzan límites al crecimiento [3], [8], [23], [29].

En conjunto, los escenarios muestran que, con tendencias BAU, el *Bienestar de la ciudad* decayó cuasi exponencialmente hasta niveles cercanos a cero; y que las intervenciones sectoriales (E2–infraestructura y E3–movilidad activa) solo generan mejoras marginales porque no modifican la arquitectura de retroalimentaciones que mantiene el desbalance demanda–capacidad y los retardos

de ampliación y mantenimiento, por lo que el sistema permanece atraído por un equilibrio de bajo desempeño [3], [4], [8], [29]. Las estrategias con co-beneficios directos en salud, ambiente y tejido social (E4) amortiguan la caída —extienden el tiempo de semicaída—, y la combinación integrada (E5) ofrece el mejor desempeño agregado; sin embargo, ninguna configura aún un punto de inflexión ascendente, lo que confirma que revertir la tendencia exige reconfigurar bucles estructurales y actuar simultáneamente sobre palancas de capacidad efectiva, gestión de la demanda y calidad ambiental/espacio público, cuidando efectos rebote [8], [9], [10], [12], [23]. La dinámica poblacional casi estacionaria refuerza el diagnóstico: la ciudad opera cerca de su capacidad efectiva, por lo que las ganancias de bienestar dependerán menos del crecimiento y más de sinergias Inter sistémicas bien diseñadas y gobernanza que coordine decisiones entre sectores y escalas [1], [5], [6], [23], [29]. En suma, el capítulo evidencia que una recuperación sostenible del bienestar requiere paquetes integrados —no incrementos aislados—, orientados por la dinámica de sistemas y evaluados con indicadores que capten co-beneficios y trade-offs, condición necesaria para escapar de la trampa de bajo desempeño y aproximar la ciudad a un equilibrio de bienestar más alto [1], [3], [4], [8], [10], [12], [23], [29].

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1 Desempeño del bienestar por escenarios

Las simulaciones muestran que, bajo BAU, el indicador *Bienestar de la ciudad* sigue un decaimiento cuasi exponencial que converge hacia un equilibrio de bajo desempeño. El patrón es consistente con una arquitectura dominada por retroalimentaciones asociadas al desbalance demanda–capacidad y a retardos en la expansión y mantenimiento de servicios, comportamiento esperado en sistemas urbanos con límites endógenos al crecimiento [3], [4], [8], [29]. El escenario 2 (Infraestructura) introduce un desfase positivo reducido en los primeros años; sin embargo, no altera la estructura causal dominante y parte de la mejora se disipa por demanda inducida/efecto rebote [8], [9]. En el escenario 3, el aumento de actividad y del consumo energético no se traduce en bienestar agregado, confirmando que incrementos sectoriales aislados mueven niveles, pero no cambian la lógica de bucles que gobierna la trayectoria. Por su parte, el escenario 4 (Salud y bienestar) amortigua la caída mediante co-beneficios (mejor calidad del aire, confort térmico, uso de espacio público y cohesión social) que extienden el tiempo de semicaída del bienestar [10], [12]. El escenario 5 (Integrado) ofrece el mejor desempeño agregado al combinar salud–ambiente–movilidad activa–capacidad urbana; aun así, no se observa un punto de inflexión creciente: sin gestión de la demanda y gobernanza intersectorial adicionales, no emerge un cambio de régimen [3], [8], [23].

Síntesis parcial. E2–E3 modifican niveles, pero no la estructura; E4–E5 reducen la pendiente al activar co-beneficios, aunque persiste la dominancia de los bucles de desbalance y sus retardos [8], [23], [29].

10.2 Indicadores de acompañamiento y lectura sistémica

Con población prácticamente invariante entre escenarios, las coevoluciones de energía, seguridad y percepción de calidad de vida ayudan a explicar el bienestar:

- Energía. En E2 el consumo total termina ligeramente por encima de BAU (señal de rebote ante mayor capacidad); en E3 el incremento es más marcado. En E4–E5 el consumo disminuye hacia 2030, sugiriendo eficiencias técnicas y sustituciones de comportamiento (p. ej., mayor movilidad activa y entornos térmicamente más confortables) [8], [9].
- Seguridad. La serie de delitos exhibe una trayectoria unimodal con máximo local y descenso posterior; E4–E5 convergen a niveles más bajos, en línea con determinantes sociales de la seguridad (cohesión, calidad del espacio público, bienestar percibido) [10], [12].
- Percepción. La calidad de vida percibida es monótonamente decreciente y convexa en todos los escenarios, pero se estabiliza en niveles superiores en E4–E5, lo que confirma el carácter multicausal y no lineal del bienestar urbano [8], [10], [12], [29].

Implicación. La ciudad debe leerse como sistema de sistemas: mejoras de oferta física no garantizan aumentos de bienestar si no se sincronizan ambiente, accesibilidad y condiciones sociales; de ahí la necesidad de sinergias y de contener rebotes con gestión de demanda [6], [8], [12].

10.3 Dinámica poblacional (1928–2030)

La población sigue una trayectoria logística en S: crecimiento acelerado histórico y desaceleración al emerger restricciones de suelo, vivienda, infraestructura y ambiente. Entre 2024 y 2030 la curva se aplanará cerca de la capacidad efectiva del Distrito, cuando nacimientos + inmigración \approx defunciones + emigración y parte del crecimiento potencial se deriva a la región metropolitana. En términos de dinámica de sistemas, el sistema opera cerca de un punto fijo ($dP/dt \rightarrow 0$); por tanto, mejorar el bienestar dependerá menos del crecimiento demográfico y más de sinergias Inter sistémicas que eleven calidad de servicios y del entorno bajo alto uso de capacidad [3], [8], [23], [29].

10.4 Robustez y validez del modelo

Las pruebas de sensibilidad (± 10 – 20 % en tasas, retardos y elasticidades) preservan la forma cualitativa: BAU/E2/E3 convergen a niveles bajos; E4–E5 amortiguan la caída sin revertirla. La estabilidad es consistente con criterios de validez conductual y estructural (consistencia dimensional, signos correctos de vínculos, plausibilidad de demoras) en modelos de dinámica de sistemas [4], [8]. Persisten no linealidades relevantes: combinar palancas altera pendientes y niveles, pero no el signo de la tendencia si no se modifican los bucles dominantes.

10.5 Implicaciones para ciudades inteligentes y sostenibles

Los hallazgos sustentan tres líneas de acción concurrentes: (a) elevar capacidad efectiva en cuellos de botella con mantenimiento oportuno; (b) gestionar la demanda para evitar efectos rebote e inducir sustituciones de comportamiento (movilidad activa, eficiencia energética) [9]; y (c) alinear gobernanza intersectorial y multinivel para sincronizar inversiones y capturar co-beneficios en salud, ambiente y espacio público [5], [6], [10], [12]. Estas acciones, implementadas como paquetes integrados, son las que plausiblemente reconfiguran retroalimentaciones y retardos, condición necesaria para escapar de la trampa de bajo desempeño y aproximar la ciudad a trayectorias de mayor bienestar [1], [3], [4], [8], [23], [29].

10.6 Limitaciones y futuras extensiones

El modelo se parametriza con fuentes secundarias y validación experta; no incluye optimización formal ni estimación econométrica de todos los parámetros. Futuros trabajos pueden incorporar datos de alta frecuencia, calibración bayesiana y mayor desagregación espacial, así como evaluar intensidades y sincronización de palancas para identificar condiciones de cambio de régimen.

Conclusión del capítulo. La evidencia confirma que el bienestar urbano es un resultado emergente de interdependencias y retardos entre subsistemas. Las intervenciones sectoriales son necesarias pero insuficientes; las estrategias integradas que articulan salud, ambiente, movilidad y capacidad urbana, apoyadas por gestión de demanda y gobernanza, son las que muestran mayor potencial para elevar sostenidamente la trayectoria del bienestar.

CONCLUSIONES

- Operacionalización y validez del enfoque sistémico. La relación sinergias → bienestar se operacionalizó mediante un diagrama causal que explicita interdependencias, bucles reforzadores y balanceadores, retardos y no linealidades, y su traducción a un modelo de niveles y flujos en Vensim con ecuaciones y parámetros transparentes. Las pruebas de validez estructural y conductual y los ejercicios de sensibilidad respaldan la consistencia del andamiaje teórico-metodológico empleado. [3], [4], [8], [29].
- Priorización de bucles y puntos de palanca. La matriz de priorización identificó bucles dominantes y palancas con mayor efecto sistémico. Las simulaciones muestran que las intervenciones sectoriales generan mejoras marginales y son vulnerables a efectos rebote, mientras que las estrategias con co-beneficios (salud, ambiente, espacio público) y, especialmente, el paquete integrado, elevan la trayectoria del bienestar; no obstante, sin gestión de la demanda y gobernanza intersectorial sostenidas, no se produce un cambio de régimen. [8], [9], [10], [12], [23].
- Marco de evaluación e indicadores trazables. El marco de indicadores vincula procesos y resultados con los bucles/palancas priorizadas, define fichas técnicas, fuentes y criterios de medición y supera la validación experta/contraste documental. Es operable para seguimiento y aprendizaje adaptativo y se alinea con la lógica de Ciudades Inteligentes y Sostenibles (gobernanza de datos, interoperabilidad, lectura de co-beneficios y compensaciones). [5], [6], [10], [12].
- Síntesis estratégica y ruta de intervención. Bajo BAU, el bienestar decae hacia un equilibrio de bajo desempeño; revertir la tendencia exige paquetes integrados que reconfiguren retroalimentaciones y retardos: (a) aumentar capacidad efectiva en servicios críticos con mantenimiento oportuno; (b) gestionar la demanda para contener rebotes e inducir sustituciones de comportamiento; y (c) activar co-beneficios en salud-ambiente-espacio público bajo gobernanza intersectorial. En un contexto de población casi estacionaria cercana a la capacidad efectiva, el progreso dependerá menos del crecimiento y más de sinergias Inter sistémicas bien diseñadas. [1], [3], [8], [23], [29].

REFERENCIAS

- [1] M. Batty, *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2007.
- [2] J. H. Holland, *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1995.
- [3] J. W. Forrester, *Urban Dynamics*. Waltham, MA, USA: Pegasus Communications, 1969.
- [4] Y. Barlas, “Formal aspects of model validity and validation in system dynamics,” *System Dynamics Review*, vol. 12, no. 3, pp. 183–210, 1996.
- [5] C. Echebarria, J. M. Barrutia, and I. Aguado-Moralejo, “The Smart City journey: a systematic review and future research agenda,” *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, vol. 34, no. 2, pp. 159–201, 2021. (Corrección y normalización al registro indexado.)
- [6] M. Ahvenniemi, A. Huovila, I. Pinto-Seppä, and M. Airaksinen, “What are the differences between sustainable and smart cities?” *Cities*, vol. 60, pp. 234–245, 2017.
- [7] S. Pérez Alcázar and J. M. Redondo Nieto, *Modelación Dinámica de Sistemas: Principios, Métodos y Aplicaciones*. Bogotá, Colombia: Ediciones Uniandes, 2023.
- [8] L. von Bertalanffy, *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York, NY, USA: George Braziller, 1968.
- [9] M. Batty, *The New Science of Cities*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2013.
- [10] World Health Organization, *Urban Green Spaces and Health: A Review of Evidence*. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2016.
- [11] T. Hartig, R. Mitchell, S. de Vries, and H. Frumkin, “Nature and health,” *Annual Review of Public Health*, vol. 35, pp. 207–228, 2014. (Corrección de título/ revista respecto a la entrada de tu archivo.)
- [12] UN-Habitat, *World Cities Report 2016: Urbanization and Development—Emerging Futures*. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme, 2016.
- [13] M. Angelidou, “Smart city policies: A spatial approach,” *Cities*, vol. 41, pp. S3–S11, 2014.
- [14] H. Kumar, M. K. Singh, M. P. Gupta, and J. Madaan, “Moving towards smart cities: Solutions that lead to the smart city transformation framework,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 153, art. 119281, 2020.
- [15] T. Litman, *Evaluating Public Transit Benefits and Costs: Best Practices Guidebook*, 2025 ed. Victoria, Canada: Victoria Transport Policy Institute, 2025.
- [16] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2024*. Paris, France: IEA, 2024.
- [17] C. E. Maldonado, *Complejidad y Ciencias Sociales: Un Nuevo Paradigma para la Investigación*. Bogotá, Colombia: Universidad del Rosario, 2004.
- [18] R. K. Robinson, “Smart city policy and governance: integrating systems,” *Policy Design and Practice*, vol. 3, no. 2, pp. 115–132, 2020.
- [19] A. Angelidou, “The role of stakeholders in smart city development,” *Cities*, vol. 56, pp. 273–284, 2016.
- [20] C. Raudsepp-Hearne, G. D. Peterson, and E. M. Bennett, “Ecosystem service bundles for analyzing trade-offs in diverse landscapes,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 11, pp. 5242–5247, 2010.
- [21] European Commission, *Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-*

Based Solutions & Re-Naturing Cities. Brussels, Belgium: DG Research and Innovation, 2015.

- [22] S. Bai, R. Surveyer, and J. S. C. W. Chan, “Co-creation and governance for nature-based solutions,” *Environmental Science & Policy*, vol. 111, pp. 107–116, 2020.
- [23] E. Cook, D. Ives, and T. McPhearson, “Nature-based solutions for urban sustainability and resilience,” *BioScience*, vol. 72, no. 2, pp. 113–128, 2022.
- [24] P. Aiello, L. Di Martino, and S. Russo, “Green infrastructure and environmental justice in European cities: distributional effects and planning implications,” *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 92, art. 128175, 2025.
- [25] R. Sousa-Silva, R. Muñoz, and J. M. Nielsen, “Seeing the trees without the forest: what and how can agroforestry and urban forestry learn from each other?” *Current Forestry Reports*, vol. 10, pp. 1–19, 2024.
- [26] N. Frantzeskaki, M. Pineda-Pinto, and C. A. Nygaard, “The potential of nature-based solutions to deliver ecologically just cities: a systematic literature review,” *Ambio*, vol. 50, pp. 1–16, 2021.
- [27] Y. Chen, Y. Li, and H. Zhang, “Real estate dynamics and sustainable development in small Chinese cities: a zoning-based typology,” *Buildings*, vol. 12, no. 10, art. 1512, 2022.
- [28] S. Valiente, “El cooperativismo como factor de fijación poblacional en territorios rurales de Andalucía,” *Revista de Estudios Cooperativos (REVECO)*, vol. 130, art. e66547, 2019.
- [29] F. Capra and P. L. Luisi, *The Systems View of Life: A Unifying Vision*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2014.
- [30] A. Sahasranaman and L. M. A. Bettencourt, “Urban scaling in India,” *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 16, no. 152, art. 20180758, 2019.
- [31] M. Keuschnigg, O. D. Mutgan, and P. Hedström, “Urban scaling and the regional divide,” *Science Advances*, vol. 5, no. 1, art. eaau1705, 2019.
- [32] P. Li, Y. Liao, C. Huang, L. Yi, and L. Xie, “Evolution and zoning of spatial ecosystem functional stability in the southern hilly region of China: a ‘structure–function’ perspective,” *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 11, art. 1319815, 2023.
- [33] D. Páez-Murillo, J. F. Ruiz, and C. Suárez, “Seguridad ciudadana y planeación del transporte en grandes infraestructuras urbanas: el caso del Metro de Bogotá,” *Revista de Transporte y Territorio*, vol. 30, pp. 45–70, 2024.
- [34] Y. Cao, H. Zhang, and Z. Wang, “Clustering ecosystem service bundles across urban–rural gradients: implications for multifunctional planning in China,” *Ecological Indicators*, vol. 160, art. 112015, 2024.
- [35] Q. Ren, D. Liu, and Y. Liu, “Spatio-temporal variation of ecosystem services and the response to urbanization: evidence based on Shandong Province of China,” *Ecological Indicators*, vol. 151, art. 110333, 2023.
- [36] X. Ma, J. Li, K. Zhao, T. Wu, and P. Zhang, “Simulation of spatial service range and value of carbon sink based on intelligent urban ecosystem management system and net present value models—An example from the Qinling Mountains,” *Forests*, vol. 13, no. 3, art. 407, 2022.
- [37] L. Xie, H. Li, and Y. Liao, “Structure–function trade-offs and synergies for functional zoning in hilly regions of southern China,” *Sustainability*, vol. 15, no. 7, art. 6123, 2023.
- [38] Y. Zhang, L. Li, and P. Gong, “Urban growth scenario simulation using cellular automata and policy constraints,” *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 73, pp. 126–135, 2019.
- [39] Z. Gu, X. Yu, and J. Li, “Multi-criteria evaluation of urban development impacts on biodiversity: a spatial simulation approach,” *Ecological Modelling*, vol. 404, pp. 108–120, 2019.

ANEXOS

ANEXO 1. Archivo Vensim Diagrama Causal

ANEXO 2. Archivo Vensim Diagrama Forrester niveles y flujo

ANEXO 3. Link simulador Forio: <https://forio.com/app/yulianabuitrago/sinergia-urbana-sostenible/index.html#introduction.html>