

Escenarios de **Densificación Urbana** en la Ciudad de **Morelia, Michoacán**

**Entregable 4,
Reporte Final**

Noviembre, 2018

SEDATU

SECRETARÍA DE DESARROLLO
AGRARIO, TERRITORIAL Y URBANO



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

AMEXCID

AGENCIA MEXICANA
DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL
PARA EL DESARROLLO


IMPLAN
MORELIA MX
INSTITUTO MUNICIPAL DE PLANEACIÓN

 **CAPSUS**
Capital Sustentable

Elaborado para

el Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN), bajo la guía de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), el enlace de AMEXCID, y el financiamiento de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

Citar este documento como

CAPSUS SC. *Metodología para Evaluar los Beneficios de la Densificación Urbana en la Ciudad de Morelia, Michoacán*. CAPSUS Capital Sustentable, 2018.

Autores

Eduardo Denicia
Daniela Evia
Salvador Gómez
Tania Guerrero
Miguel Luis
Ricardo Ochoa
Socorro Román
Guillermo Velasco



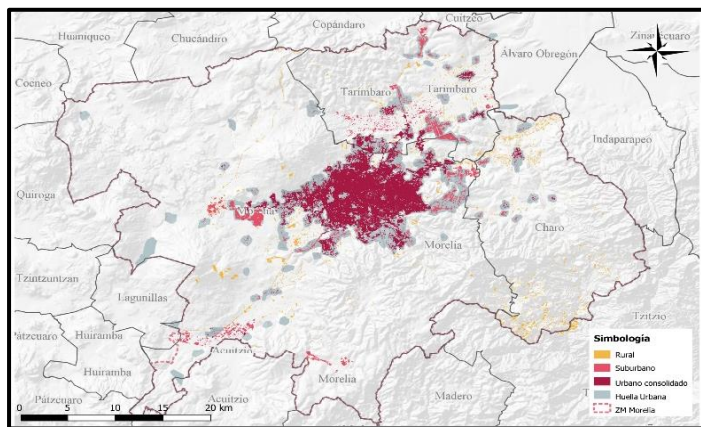
Green Tower - 1604

Boulevard Manuel Ávila Camacho 118,
Lomas de Chapultepec, Miguel Hidalgo
Ciudad de México, 11000
ideas@capsus.mx
www.capsus.mx
T: (52 55) 44 41 29 27

¿Cuál es la situación actual de Morelia en materia urbana?

El patrón de crecimiento de la ciudad de Morelia exhibe una forma urbana dispersa y se ha dado hacia las periferias pues los nuevos asentamientos se encuentran alejados de las zonas urbanas y suburbanas, además, se encuentran dispersos en la extensión territorial de la Zona Metropolitana de Morelia (ZMM), ver Figura 1.

Figura 1. Tipos de asentamientos humanos en Morelia



Lo anterior, ha sido reflejo de la falta de planeación y regulación del territorio y ha traído varios problemas asociados, como un costo mayor en el suministro de los servicios básicos e infraestructura, marginación de los nuevos asentamientos humanos, la ocupación de tierras no aptas para la urbanización, y los efectos negativos hacia el cambio climático derivados del incremento del uso energético, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y la pérdida de áreas naturales protegidas. En ese sentido, en la ciudad de Morelia, se están llevando a cabo acciones encaminadas a mejorar sus condiciones urbanas mediante el seguimiento e implementación de programas y políticas, a nivel estatal y nacional, establecidas por organismos como la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). Por ejemplo, el Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN) trabaja en la creación del Plan Municipal de Desarrollo Urbano

(PMDU), que está en consonancia con los programas a nivel estatal y nacional en aspectos de planeación urbana. En esa misma dirección, surge este proyecto como una forma de encontrar las estrategias adecuadas que permitan favorecer la toma de decisiones en materia de planeación urbana y en la creación del PMDU de Morelia, y que al mismo tiempo, se disminuyan los efectos adversos que contribuyen al cambio climático. Esta iniciativa ha sido posible gracias a la supervisión de la SEDATU, el enlace de AMEXCID, y el financiamiento de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

¿Qué se hizo en este proyecto?

Dadas las condiciones actuales de crecimiento urbano y sus consecuencias adversas en aspectos ambientales, sociales y económicos, y particularmente en su contribución al cambio climático, en este trabajo se establecen una serie de mecanismos basados en el diseño de acciones, planes de infraestructura y medidas de política pública (que en adelante serán llamadas palancas), que mejoren el futuro de la ciudad. Es así como se plantea una estrategia que consiste en la configuración de escenarios de crecimiento urbano que integren una serie de palancas para la ciudad de Morelia. Estos escenarios parten de un año base (2014), y son proyectados hacia un año horizonte (2038), en conformidad con el Plan de Gran Visión NExT 2041 de Morelia. Estos escenarios fueron planteados a partir de las problemáticas urbanas y posibles acciones de política identificadas en conjunto con los miembros del IMPLAN y la GIZ durante la primera misión llevada a cabo en la Ciudad de Morelia, los días 2 y 3 de agosto de 2018.

Posteriormente, los escenarios son evaluados a través de una serie de indicadores enmarcados en alguno de los tres pilares del desarrollo sustentable. El fin último, es favorecer el consenso de manera informada y basado en evidencias entre los diferentes actores involucrados en la toma de decisiones en materia de planeación urbana en Morelia, para mejorar las condiciones actuales de la ciudad y contribuir en la lucha contra el cambio climático.

¿Cómo se llevó a cabo?

Para realizar la evaluación y análisis de escenarios, se realizaron las siguientes acciones:

- 01** Definición de indicadores, métodos y palancas de política pública.
- 02** Recopilación de información tabular y espacial.
- 03** Configuración de escenarios.

Los escenarios más contrastantes fueron el “Tendencial”, Figura 2, donde el crecimiento se ha llevado a cabo siguiendo los patrones históricos de crecimiento urbano y no fue implementada ninguna medida de política pública, y “Distrito 4.0 densidad media”, Figura 3, donde se densifica el polígono correspondiente al Distrito 4.0., con un factor de 250 (hab/ha).

Figura 2. Configuración del escenario Tendencial

Escenario Tendencial	Nivel	Descripción del nivel
Acomodo de la población	1	De acuerdo con el crecimiento tendencial (2038)
Equipamiento urbano	0	Equipamiento urbano del año base
Transporte público	0	Rutas existentes en el año base
Código de eficiencia en edificaciones	0	En el 0% de las nuevas viviendas
Movilidad ciclista	0	Ciclovías existentes en el año base

Figura 3. Configuración del escenario 4.0 densidad alta

Distrito 4.0 densidad media	Nivel	Descripción del nivel
Acomodo de la población	7	De acuerdo con el Distrito 4.0 y densidad (225 hab/ha)
Equipamiento urbano	1	Nuevos espacios públicos
Transporte público	1	Nuevas rutas propuestas
Código de eficiencia en edificaciones	1	En el 15% de las nuevas viviendas
Movilidad ciclista	1	Nuevas ciclovías



¿Cuáles fueron los resultados?

Se diseñaron nueve escenarios, más el escenario base, con distintas configuraciones para conocer qué combinación de acciones de política pública presentan el mejor desempeño. Entre los resultados destacan los indicadores relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero y energía (estrechamente relacionados con el cambio climático), Figura 4, Los indicadores relacionados con los costos de infraestructura, Figura 5, y los indicadores de consumo de suelo y proximidad, Figura 6.

Figura 4. Desempeño de indicadores sobre GEI y energéticos

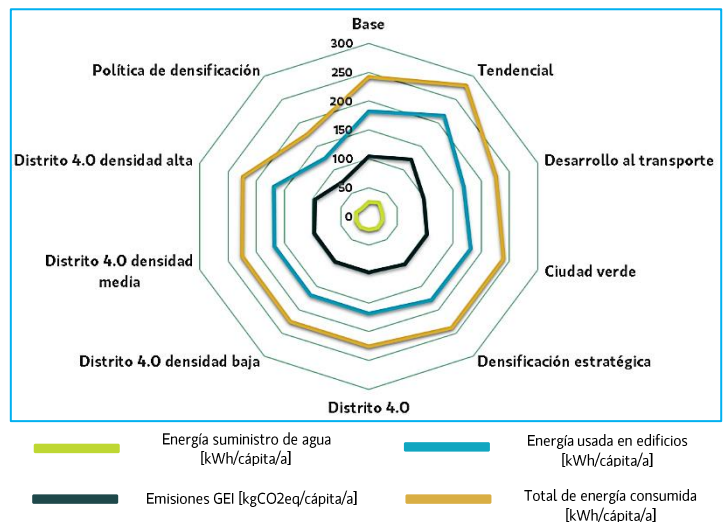


Figura 5. Desempeño de indicadores sobre costos de infraestructura



Figura 6. Desempeño de varios indicadores

ESCENARIO	CONSUMO DE SUELO [km ²]	HUELLA URBANA [km ²]	PROXIMIDAD A INSTITUCIONES DE SALUD [%]	PROXIMIDAD A TRANSPORTE PÚBLICO [%]
BASE	-	226.5	60.09%	60.19%
TENDENCIAL	101.69	328.19	55.82%	49.28%
DESARROLLO ORIENTADO AL TRANSPORTE	6.19	232.69	66.77%	63.63%
CIUDAD VERDE	28.38	254.58	65.63%	56.04%
DENSIFICACIÓN ESTRATÉGICA	28.38	254.58	63.73%	56.04%
DISTRITO 4.0 DENSIDAD ALTA	4.57	231.07	71.36%	67.21%

¿Qué aprendimos?

- i. Si no se lleva a cabo ningún programa de planeación urbana o medida de política pública, la ciudad de Morelia crecerá de manera desordenada ocasionando serios problemas en materia económica, social y contribuirá al cambio climático.
- ii. El modelo de crecimiento Tendencial de Morelia es fragmentado y disperso por lo que, en caso de no aplicarse las medidas de planeación adecuadas, se verá reflejado en grandes costos económicos, sociales y ambientales.
- iii. Las políticas orientadas a la densificación son las medidas que más beneficios traen en términos de los indicadores de consumo de suelo, emisiones de GEI y energéticos, costos de infraestructura, y proximidad a espacios públicos.
- iv. Además de la densificación estratégica, las medidas orientadas a mejorar el transporte público masivo y la implementación de un código verde en la construcción de las nuevas viviendas, son las mejores opciones para reducir los gastos energéticos en el suministro de servicios, la energía gastada en las edificaciones y en general, la energía per cápita consumida, al mismo tiempo que se disminuyen las emisiones de GEI, todo lo cual contribuye en gran medida en lucha contra el cambio climático.

- v. La inversión llevada a cabo en la búsqueda de las mejores estrategias de planeación urbana, además de permitir tomar decisiones informadas y basadas en evidencias, ofrece un valor agregado pues disminuye sustancialmente los costos económicos derivados de la mala planeación urbana, tales como aquellos relacionados con la infraestructura, suministro de servicios y mantenimiento de espacios públicos, por lo tanto, es vital invertir en este tipo de mecanismos.

¿Siguiendo pasos?

Planeación de medidas urbanas que resguarden la integridad de sus habitantes en caso de fenómenos naturales.

Instrumentación de medidas que permitan compartir los datos generados por las distintas agencias de planeación urbana, de una manera ágil, de modo que sus procesos sean más rápidos y eficientes, con la intención de favorecer el crecimiento sustentable de la ciudad de Morelia.



Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	4
2. Antecedentes	5
2.1. La dispersión urbana y sus consecuencias	5
2.2. Ciudad compacta y la emisión de gases de efecto invernadero	7
2.3. Contexto	10
2.3.1. Planeación Urbana en Morelia	10
3. Metodología	13
3.1. Etapa 1: Definición de indicadores, métodos y palancas de política pública	15
3.1.1. Palancas de política pública	16
3.1.2. Indicadores	19
3.2. Etapa 2: Recopilación de la información	21
3.2.1. Compilación de información tabular	21
3.2.2. Compilación de información espacial	21
3.3. Etapa 3: Definición de escenarios.	21
4. Resultados	29
5. Conclusiones y recomendaciones	43
Anexos	47
A. Conceptos y definiciones	49
B. Modelo de expansión tendencial	51
B.1. Modelos de expansión urbana	51
B.2. Modelo de expansión de la Ciudad de Morelia	51
B.3. Datos	53

B.3.1.	Mapas base de cobertura de suelo	54
B.3.2.	Variables explicativas	54
B.4.	Entrenamiento del modelo	55
B.5.	Validación del entrenamiento del modelo	56
B.6.	Validación espacial	57
B.7.	Simulación (2038)	57
C.	Indicadores: Métodos utilizados	59
C.1.	Proximidad a equipamiento urbano	59
C.2.	Consumo de suelo	60
C.3.	Densidad de población	61
C.4.	Proximidad a fuentes de empleo	61
C.5.	Proximidad a transporte público	62
C.6.	Costos de infraestructura	63
C.7.	Emisiones de GEI	65
C.8.	Consumo de energía	66
C.8.1.	Consumo de energía para suministro de agua	67
C.8.2.	Consumo de energía para alumbrado público	68
C.8.3.	Consumo de energía para recolección de residuos sólidos urbanos	70
C.8.4.	Consumo de energía para transporte urbano	72
C.8.5.	Consumo de electricidad en viviendas	74
C.9.	Consumo de agua	74
D.	Supuestos: Datos tabulares y fuentes utilizadas	77
	Bibliografía	78

Índice de figuras

1.1.	Zonificación de la Ciudad de Morelia	2
1.2.	Tipos de asentamientos en la Zona Metropolitana de Morelia . .	3
2.1.	Crecimiento histórico de la Zona Metropolitana de Morelia	6
3.1.	Resumen de la metodología del proyecto	15
3.2.	Listado de palancas para la Ciudad de Morelia	17
3.3.	Configuración del escenario Tendencial	22
3.4.	Configuración del escenario Distrito 4.0 cero emisiones	23
3.5.	Configuración del escenario Distrito 4.0 densidad baja	24
3.6.	Configuración del escenario Ciudad verde	24
3.7.	Configuración del escenario Desarrollo orientado al transporte .	25
3.8.	Configuración del escenario Densificación estratégica	25
3.9.	Configuración del escenario Política de densificación	26
3.10.	Configuración del escenario Distrito 4.0 densidad media	27
3.11.	Configuración del escenario Distrito 4.0 densidad alta	28
4.1.	Indicadores relacionados con el consumo de suelo	30
4.2.	Indicadores relacionados con la energía y las emisiones	33
4.3.	Indicadores relacionados con la proximidad a equipamiento urbano	35
4.4.	Indicadores correspondientes a los escenarios del polígono Distrito 4.0	37
4.5.	Indicadores relacionados con los costos de infraestructura	39
B.1.	Proceso de creación del modelo de expansión Tendencial para la Ciudad de Morelia	53
B.2.	Resultados de la Validación del Modelo	57
B.3.	Área de expansión 2014 vs. 2038 de la Zona Metropolitana de Morelia	58

Índice de tablas

3.1.	Listado de indicadores para la Ciudad de Morelia	20
3.2.	Principales fuentes de información utilizadas para los escenarios de la Ciudad de Morelia	21
C.1.	Tipos de equipamiento y distancia máxima recomendada	60
D.1.	Supuestos usados para Morelia	77

1. Introducción

Las ciudades mexicanas se caracterizan por un crecimiento urbano fragmentado, discontinuo y con patrones de dispersión en sus periferias. Aún con el gran crecimiento urbano, el aprovechamiento de la concentración de la población para desarrollar economías de aglomeración es limitado¹.

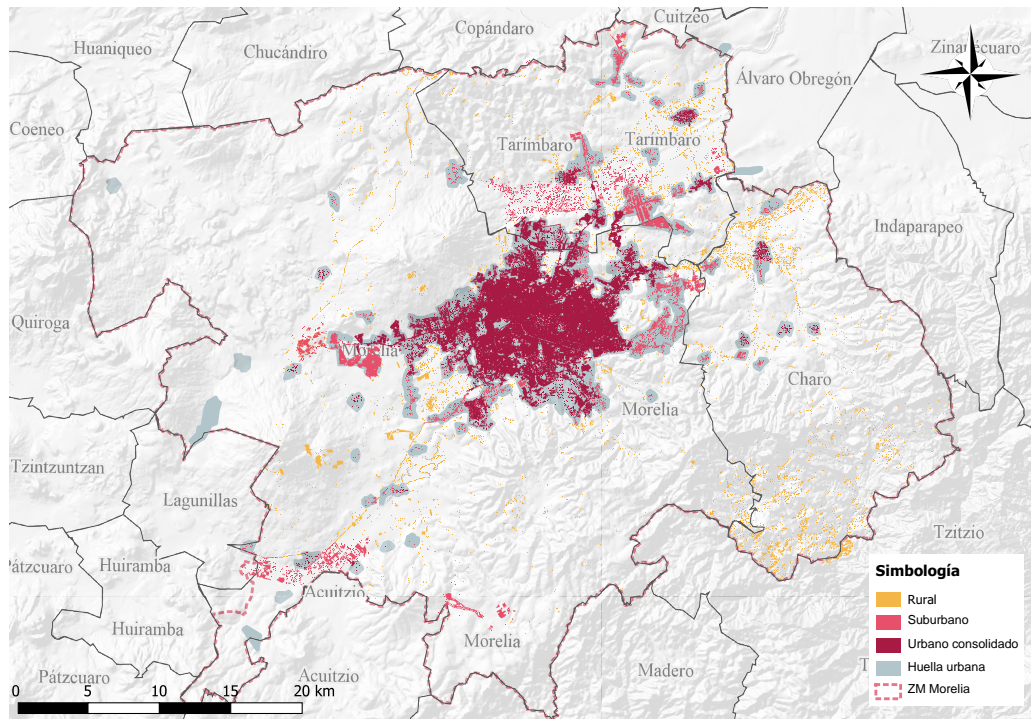
Paralelamente, existen condiciones de precariedad en muchos de los nuevos desarrollos habitacionales, pues carecen del suministro de servicios, equipamiento y del acceso a amenidades básicas. Lo anterior se debe a su ubicación lejana en relación con los núcleos urbanos [1], aunado a la inexistencia de un sistema efectivo de planeación urbana [2] y de un entendimiento más completo sobre los mecanismos que dan lugar a dichas circunstancias.

En la Ciudad de Morelia se presentan casos similares, ya que las tendencias de crecimiento se dan hacia las periferias; los asentamientos suelen considerarse como rurales y se caracterizan por la distancia que tienen con respecto al centro urbano, su forma dispersa y su cercanía con zonas naturales, alejadas de las zonas urbanas y suburbanas. En ese sentido, se pueden identificar tres grupos generales de asentamientos², identificados como: rural, suburbano y urbano consolidado, como se muestra en la Figura 1.1.

¹Este término hace referencia a las ventajas obtenidas por las empresas al estar ubicadas en una zona cercana unas de otras [1].

²Dicha clasificación se realizó con base en la Guía Metodológica para la Elaboración y Actualización de Programas Municipales de Desarrollo Urbano, editado por SEDATU, SEMARNAT y GIZ, donde a través de imágenes satelitales se hizo una distinción entre zonas en los asentamientos según su densidad y cercanía a los centros urbanos.

Figura 11: Zonificación de la Ciudad de Morelia



Dicha dispersión no solo se presenta en el ámbito rural, pues los asentamientos considerados como suburbanos no se encuentran únicamente en el perímetro de la zona urbana consolidada, sino que se encuentran dispersos en la extensión territorial de la Zona Metropolitana de Morelia (ZMM). Gracias a esta clasificación general, también se puede distinguir la tipología en los asentamientos que se han desarrollado tanto en el municipio como en la ZMM, que, como puede observarse en la Figura 1.2, han sido principalmente cuatro:

- A Asentamientos con traza regular (retícula),
- B Asentamientos densificados en manzanas largas y angostas,
- C Fraccionamientos alejados de la mancha urbana (residenciales y de interés social) y
- D Asentamientos irregulares y dispersos.

Figura 1.2: Tipos de asentamientos en la Zona Metropolitana de Morelia

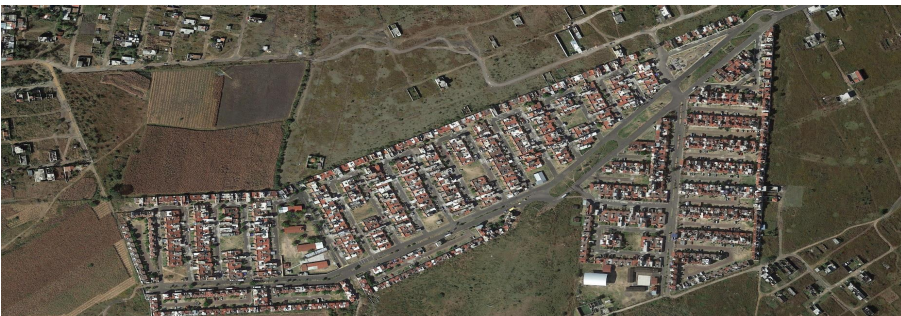
A)



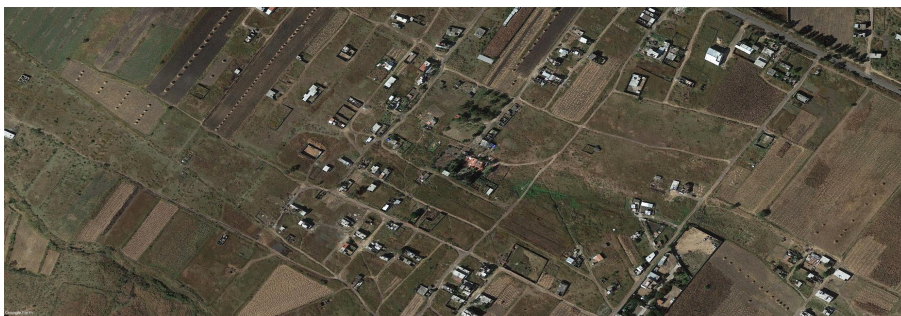
B)



C)



D)



Estos tipos de asentamientos se han presentado fragmentando la zona urbana, generando distintas tipologías de construcción y una morfología distinta a la que estaba establecida en los primeros asentamientos. La forma discontinua de la ciudad y la dispersión urbana son consecuencia de la falta de planeación y regulación del territorio. En ese sentido, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, se están llevando a cabo acciones encaminadas a mejorar sus condiciones urbanas mediante el seguimiento e implementación de programas y políticas, a nivel estatal y nacional, establecidas por organismos como la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). En el siguiente capítulo, se abordarán las características de la dispersión urbana y sus consecuencias, los beneficios de las ciudades compactas, la forma urbana y su relación con la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). También, se pondrán en contexto las acciones que están siendo llevadas a cabo por las autoridades del municipio de Morelia, por ejemplo, la implementación del Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU), en consonancia con los programas a nivel estatal y nacional en aspectos de planeación urbana.

1.1 Objetivos

El objetivo general es identificar el potencial de densificación urbana y proponer las medidas de mitigación derivadas para favorecer la toma de decisiones de manera informada y respaldadas por resultados numéricos, a través de la modelación de escenarios de crecimiento y densificación urbana para la Ciudad de Morelia. A continuación, se mencionan los objetivos particulares:

1. Identificar el potencial de densificación urbana en la Ciudad de Morelia.
2. Diseñar y configurar distintos escenarios de crecimiento urbano para Morelia.
3. Incluir como propuesta específica el Distrito 4.0 de Morelia.
4. Analizar el desempeño de los distintos escenarios propuestos a través de indicadores.
5. Proponer medidas de mitigación de emisiones de GEI.

2. Antecedentes

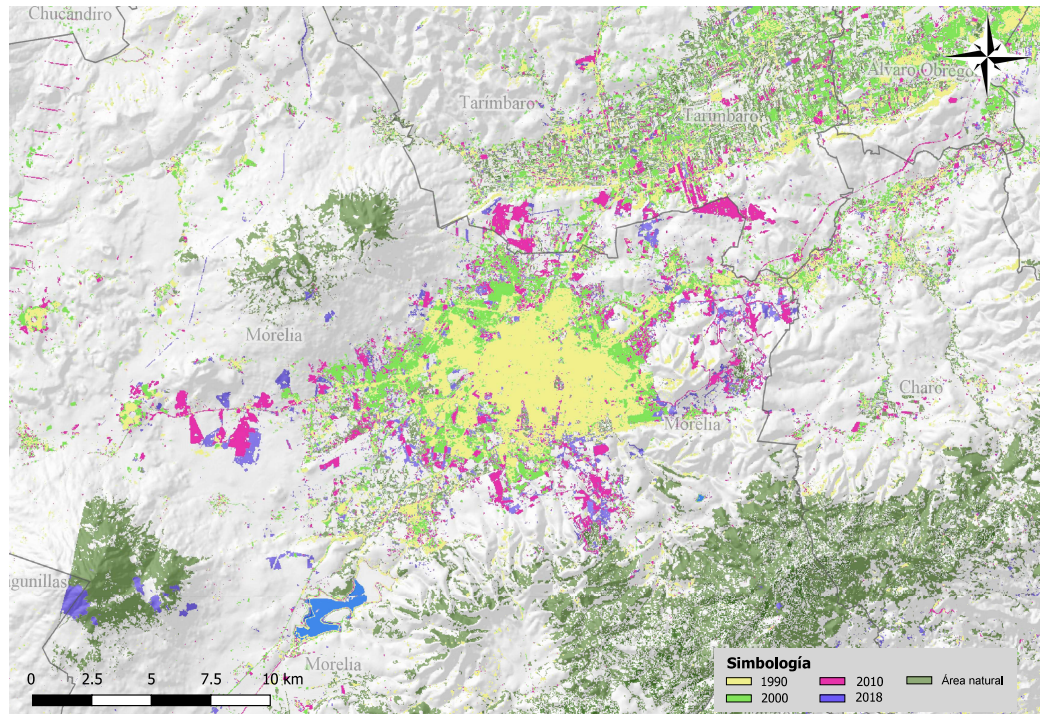
2.1 La dispersión urbana y sus consecuencias

La dispersión urbana es un fenómeno mundial que afecta a la mayoría de las ciudades con más de 100,000 habitantes. Esta dispersión implica una disminución en la densidad de las ciudades, así como un crecimiento expansivo [3]. Los ritmos en los que se presenta este fenómeno varían dependiendo de cada región. El caso mexicano es especialmente dramático, ya que entre 1980 y 2010 la población en las zonas urbanas se duplicó, mientras que la extensión de las mismas creció en promedio 10 veces [4].

Con respecto a la Zona Metropolitana de Morelia (ZMM)³, entre 1980 y 2010 la población aumentó 2.3 veces, mientras que su superficie lo hizo 6.2 veces [6, 7], como se puede observar en la Figura 2.1, lo que muestra un gran contraste entre población y densidad, pues si bien la población apenas se duplicó, la superficie urbana se triplicó. Asimismo, durante el periodo comprendido entre 1995 y 2010, la población del municipio de Morelia alcanzó los 150,000 habitantes, mientras que en su conjunto la ZMM creció hasta 200,000 habitantes [7], lo que indica que el mayor crecimiento demográfico de la ZMM lo aporta el municipio de Morelia.

³Integrada por los municipios de Morelia, Tarímbaro y Charo [5].

Figura 2.1: Crecimiento histórico de la Zona Metropolitana de Morelia



En la Figura anterior, también se puede observar que este crecimiento ha sido hacia las periferias, en zonas que no estaban consideradas para urbanizarse, presentando asentamientos humanos en zonas de reserva natural y alejadas de equipamientos y servicios que se obtienen en la urbe⁴.

Además, se ha experimentado un aumento en la intensidad y rapidez en el crecimiento de Morelia hacia sus periferias, específicamente, al exterior del anillo periférico, pues la superficie ocupada por asentamientos humanos aumentó en 43% en 10 años, reflejándose en una alta fragmentación del área construida [7]. Las causas de este crecimiento desordenado pueden ser atribuidas a la alta demanda de vivienda y la poca oferta de terrenos permitidos para urbanizar dentro de los núcleos urbanos.

Existen una serie de consecuencias asociadas a un crecimiento urbano disperso, las cuales se vinculan a un incremento en la generación de emisiones de GEI, y por ende, contribuyen con el cambio climático. Por ejemplo, una ciudad dispersa favorece el uso del automóvil particular sobre el transporte público, el cual

⁴El análisis de crecimiento de la mancha urbana y de los asentamientos humanos con el que se elaboró el mapa anteriormente citado, fue realizado a través de percepción remota, con base en imágenes satelitales recabadas de distintas épocas por los satélites Landsat 7 y 8, de acuerdo con la Guía Metodológica para la Elaboración y Actualización de Programas Municipales de Desarrollo Urbano, redactada por SEDATU, SEMARNAT y GIZ.

tiende a ser insuficiente para cubrir la superficie total de una ciudad extensa. Lo anterior tiene un impacto directo en el incremento del parque vehicular y el consumo de gasolina, que a su vez, empeora la calidad del aire.

Asimismo, la falta de una planeación urbana adecuada y la ineficiencia en la asignación de usos de suelo, entre otros aspectos, provoca que los centros logísticos, comercios, vivienda y otros usos compitan por la misma infraestructura vial, lo que produce un problema de congestión y grandes impactos en la economía y la calidad de vida de la población.

Por otra parte, ya sea a través de modificaciones a usos de suelo no urbanizables o de la venta irregular de terrenos, el crecimiento periférico ha contribuido a la urbanización de áreas naturales protegidas, zonas agrícolas y a la deforestación, por lo que la capacidad de recarga de los mantos acuíferos y la captura de carbono se han visto sensiblemente disminuidas.

Finalmente, con este tipo de crecimiento la recolección de residuos sólidos, su disposición y tratamiento se vuelve muy costoso e ineficiente. Igualmente, se requiere de mayores inversiones en las redes de abastecimiento de servicios y transporte público, lo que estresa las finanzas de la ciudad, deja zonas sin cobertura, e incrementa la ineficiencia en la distribución, entre otros aspectos. En ese sentido, los esfuerzos económicos, materiales y humanos destinados a desarrollar instrumentos de planeación urbana, deben ser considerados como una valiosa inversión que en nada serán comparable con las enormes pérdidas económicas, ambientales y en el bienestar social derivadas de una mala, o en su caso, inexistente planeación urbana.

2.2 Ciudad compacta y la emisión de gases de efecto invernadero

Una de las respuestas para solucionar el fenómeno de expansión y dispersión urbana ha sido el empleo del paradigma alternativo de la ciudad compacta⁵. Cabe mencionar que las áreas urbanas compactas se caracterizan por una alta densidad en el área construida, es decir, una alta proporción de la superficie terrestre cubierta por edificios y otras estructuras y superficies artificiales [8]. En ese sentido, el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 [9] establece varias líneas de acción para mejorar la planeación urbana, entre las cuales destacan el fomento a ciudades compactas con mayor densidad de población y

⁵Una ciudad compacta es aquella que presenta un uso eficiente del territorio de bajo impacto ambiental, que está cohesionada socialmente, cuenta con suficientes espacios públicos, mezclas de usos de suelo compatibles, alta diversidad social, está conectada a través de sistemas de movilidad sustentable y permite el desarrollo de la vida en comunidad.

actividad económica, evitar el crecimiento de las manchas urbanas en zonas inadecuadas, promover reformas en materia urbana, uso eficiente del suelo y zonificación, y fomentar la movilidad urbana mediante proyectos de transporte público masivo, entre otras. Por su lado, el Programa Sectorial de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano 2013-2018 plantea el aprovechamiento sustentable y equitativo del territorio nacional y sus recursos [10]. Aplicado correctamente, el modelo de densificación urbana hacia una ciudad compacta puede contribuir a la creación de ciudades más sustentables. Con las estrategias de densificación, se busca incidir en una mejor planeación urbana, reducir el impacto negativo hacia el cambio climático, aumentar la resiliencia de las ciudades y reducir la desigualdad social.

Además de la emisión de compuestos y GEI derivada de las actividades propias del quehacer humano, existen otros factores que contribuyen a la emisión de sustancias contaminantes al medio ambiente, como el crecimiento urbano. La forma urbana, es decir, la estructura espacial del uso de suelo urbano, así como los sistemas de transporte dentro de un área metropolitana, puede tener implicaciones en las emisiones de contaminantes en una ciudad [11].

Por otra parte, ciertas características urbanas tales como el tamaño, la densidad, y el diseño urbano pueden influir de manera considerable en la emisión de GEI. Por ejemplo, el tipo de vivienda aislada y de baja densidad requiere más energía para el suministro de servicios como calefacción o refrigeración, así como un gasto mayor para la distribución y transmisión de la energía eléctrica [12]. La relación entre el uso de energía en los hogares y la forma urbana enfatiza la necesidad de ciudades más compactas para la reducción de emisiones domésticas y de vehículos motorizados. En este sentido, la Ciudad de Morelia tiene un desafío mayor por superar, debido al fenómeno de la expansión acelerada de la mancha urbana [6] y sus emisiones correspondientes. Asimismo, los factores de transporte, como la intensidad de uso de las vías urbanas, presentan efectos negativos en los niveles de emisión de CO₂, lo que indica que el aumento en el grado de acoplamiento entre la estructura espacial urbana y la organización del tráfico pueden contribuir a reducir dichas emisiones [13].

Considerando lo anterior, las distancias recorridas desempeñan un rol fundamental para la reducción de emisiones y la adecuada planeación urbana. En ese sentido, el Plan Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU) 2014-2018, promueve la transición hacia un modelo de desarrollo sustentable e inteligente, mediante el fomento al crecimiento ordenado de las ciudades, de manera que “las distancias no representen una barrera para los

ciudadanos” [14]. Para lograr ese objetivo, el PNDU propone:

- Controlar la expansión de las manchas urbanas y consolidar las ciudades para mejorar la calidad de vida de los habitantes.
- Consolidar un modelo de desarrollo urbano que genere bienestar para los ciudadanos, garantizando la sustentabilidad social, económica y ambiental.
- Diseñar e implementar instrumentos normativos, fiscales, administrativos y de control para la gestión del suelo.
- Impulsar una política de movilidad sustentable que garantice la calidad, disponibilidad, conectividad y accesibilidad de los viajes urbanos.
- Evitar asentamientos humanos en zonas de riesgo y disminuir la vulnerabilidad de la población urbana ante desastres naturales.
- Consolidar la Política Nacional de Desarrollo Regional a partir de las vocaciones y potencialidades económicas locales.

Con la implementación de acciones como las propuestas por el PNDU, además de favorecer el crecimiento sustentable de las ciudades, también se promueve la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero y su impacto hacia cambio climático.

Por otro lado, la fragmentación o irregularidad de la forma urbana también aumenta las emisiones de GEI. Finalmente, Makido et al. [15] mencionan que las ciudades con formas menos fragmentadas y más compactas emiten menos GEI provenientes del transporte de pasajeros en comparación con las ciudades más dispersas. Además, las ciudades con formas menos complejas tienden a reducir sus emisiones de GEI per cápita provenientes del sector residencial, mientras que los asentamientos muy densos pero mononucleares pueden conducir a mayores emisiones per cápita. Lo anterior pone en evidencia la importancia de mantener una forma urbana compacta, multinuclear y con formas regulares.

En el caso de la Ciudad de Morelia, se plantea la necesidad de llegar a consensos entre los distintos actores involucrados, que permitan el diseño y planeación de políticas en materia urbana que favorezcan el desarrollo sustentable de la ciudad.

2.3 Contexto

2.3.1 Planeación Urbana en Morelia

Actualmente, el estado de Michoacán cuenta con un Plan de Desarrollo Integral (PLADIEM), compuesto por nueve ejes principales, entre los que destacan el desarrollo económico, inversión y empleo digno, innovación, productividad y competitividad, sustentabilidad ambiental, resiliencia y prosperidad urbana. Dicho plan pretende orientar al estado hacia una mejora económica sustantiva, a través del impulso a la producción interna y la inversión de fuentes externas, planteándose objetivos y líneas estratégicas que ayudarán a que se desarrolle de forma favorable dentro de los ejes que comprende [16].

El PLADIEM considera las condiciones actuales en las que se encuentra la entidad y los cambios que han surgido en los últimos años, recalca que se deben establecer acciones para mejorar la situación de Michoacán. En complemento con este plan se encuentran los planes sectoriales, que abarcan aspectos específicos para ser mejorados dentro del estado. Entre estos resaltan el Programa Sectorial de Desarrollo Económico, Programa Sectorial del Medio Ambiente del Estado de Michoacán de Ocampo y el Programa Sectorial de Desarrollo Territorial, Urbano y Movilidad del Estado de Michoacán.

Los planes y programas responden a una misma estructura que permite entender y explicar a fondo las estrategias específicas para cada una de las temáticas propuestas en el eje rector establecido en el Plan de Desarrollo Integral, con la finalidad de mejorar su implementación y seguimiento, incluyendo en cada una el diagnóstico, objetivo específico y los proyectos prioritarios que deberán atender las dependencias [17].

En lo que a Morelia respecta, cuenta con un Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU) que tiene una visión a futuro en línea con todos los planes sectoriales. Además, el PLADIEM se considera el primero de nueve planes y fue elaborado a partir de una consulta pública y la colaboración de dependencias y entidades de la administración pública municipal, permitiendo la elaboración de varias líneas temáticas y apartados que dieron forma a este Plan de Desarrollo Urbano, entre los que se encuentra el Proyecto “Morelia NExT 2041”.

El Plan de Gran Visión Morelia NExT 2041 (Nueva Economía por el Territorio) presenta un modelo territorial diseñado para Morelia con horizonte hacia el

año 2041. Los elementos centrales para la planeación de largo plazo de NExT son la economía basada en el conocimiento y la innovación para el desarrollo sostenible.

Los orígenes de NExT 2041 se fundamentan con la creación, en 2014, del Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN). Entre sus metas estuvo el establecimiento de un sistema de planeación participativa del desarrollo con visión a largo plazo y con la encomienda de trascender los periodos de gobierno de las administraciones municipales [7]. Adicionalmente, se buscó lograr que Morelia se fortaleciera como un “Territorio Inteligente” y encaminado hacia el desarrollo sostenible, diversificando su economía y elevando la habitabilidad territorial.

Tanto en el PLADIEM como en los Programas Sectoriales, el PMDU y el Proyecto Morelia NExT 2041, se busca crear espacios y oportunidades para el desarrollo sostenible, procurando el desarrollo equitativo, la cohesión social, la prosperidad económica y la protección ambiental [7].

A modo de ejemplo, en los ámbitos de Desarrollo Sustentable y Territorio, el Proyecto NExT 2041 cuenta con la siguiente estrategia:

- Anillo Morelia 500 (AM500): es una operación a largo plazo para la transformación del periférico e incluye iniciativas de movilidad urbana sostenible e integración funcional, dando soporte a proyectos de renovación urbana y densificación selectiva.

La estrategia está en concordancia con el Programa Sectorial de Desarrollo Territorial, Urbano y Movilidad del Estado de Michoacán, pues menciona dentro del subprograma sectorial, “proporcionar acceso a transportes seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos” [17].

Mientras tanto, en temas de innovación y economía, el Proyecto Morelia NExT 2041 enfoca el crecimiento económico en los procesos de innovación y con ello en la infraestructura y los espacios para que se lleve a cabo; por lo anterior, se encuentra en relación con el Programa Sectorial de Desarrollo Económico, a través de la siguiente estrategia:

- Distrito 4.0: es un proyecto de renovación urbana integral con la avenida Héroe de Nocupétaro como eje central para la creación de un eje creativo digital. Se plantea el rediseño de dicha avenida, el establecimiento de áreas para la economía del conocimiento, la densificación selectiva, conectividad transversal y el establecimiento de clústeres emergentes.

Impulsa la creación de condiciones y servicios para el mejoramiento y el aumento de la economía [19]. Sus componentes principales son la

infraestructura de conexión de banda ancha, big data, sistema de sensores de la ciudad, Wifi en espacios públicos, entre otros.

La existencia de dichas estrategias ofrece una oportunidad única para visualizar los impactos que la densificación urbana podría tener para Morelia. Considerando lo anterior y gracias a la coordinación de la AMEXID, el financiamiento de GIZ, la guía de la SEDATU y el apoyo del IMPLAN Morelia, nace el presente estudio sobre escenarios de densificación urbana y sus beneficios para mejorar la planeación urbana, la economía de la ciudad, la calidad de vida de sus habitantes y la lucha en contra del cambio climático.

3. Metodología

La metodología propuesta en este proyecto se enfoca en el proceso de análisis, modelación y evaluación de escenarios de crecimiento urbano y densificación para la Ciudad de Morelia. Esta metodología se centra en identificar las ventajas de la densificación urbana y las medidas de mitigación a llevarse a cabo, mediante la modelación de las condiciones futuras de la ciudad bajo diferentes supuestos o intervenciones, y evaluando cada uno de estos escenarios con diversos indicadores. La evaluación de los escenarios mediante un amplio conjunto de indicadores permite evidenciar la interdependencia que existe entre diferentes sectores y niveles de gobierno. También es posible identificar fácilmente los beneficios y desventajas de la implementación de ciertas medidas de política pública en cada escenario. El objetivo último es facilitar el consenso y la toma de decisiones de manera informada y basada en evidencias.

La modelación de escenarios se realiza a partir de un año base hacia un año horizonte. El año base es el año actual o el año más reciente con la mayor información disponible. El año horizonte es aquel hacia el que se desea proyectar el futuro de la ciudad. La definición del año horizonte depende principalmente de la disponibilidad de información del pasado de la ciudad. De manera general, se podrá proyectar hacia el futuro con un alto grado de confianza dependiendo de la cantidad de años resultante de la diferencia entre la observación más reciente y la más antigua disponible. De acuerdo con el análisis de la información llevado a cabo y la cantidad de datos disponibles, el año base es 2014 y el año horizonte 2038, para estar alineados en mayor medida con el Plan NExT 2041 de Morelia.

El primer escenario a modelar será el escenario Tendencial, el cual pronostica cómo será la ciudad en el año horizonte (2038) si la ciudad continúa creciendo como lo ha venido haciendo. Esta proyección se realiza mediante algoritmos

estadísticos y redes neuronales artificiales⁶. Estos utilizan información espacial de tres momentos en el tiempo, así como una serie de variables explicativas que han detonado los cambios de suelo urbano⁷, para aprender de las tendencias históricas en los cambios de uso de suelo y densidades de población. Una vez que las redes neuronales aprenden estas relaciones, pueden predecir cuáles son las áreas con alta probabilidad de urbanizarse o cuáles serán los cambios en las densidades de población hacia el futuro. La metodología detallada se puede consultar en el Anexo B. El resultado final es un mapa mostrando la mancha urbana pronosticada para el año horizonte (ver Figura B.3 del Anexo B).

Otros escenarios adicionales se pueden crear de acuerdo con los intereses y problemáticas identificados para la Ciudad de Morelia, los cuales pueden ser comparados contra el escenario tendencial para evaluar qué pasaría si no se implementan cambios de política pública en el futuro. También se pueden realizar comparaciones entre estos escenarios adicionales, con el propósito de saber qué conjunto de políticas públicas incluidas en estos dan mejores resultados.

Para la Ciudad de Morelia, se desarrollaron escenarios con diferentes configuraciones de acciones o propuestas de política pública y densificación estratégica, siguiendo el PMDU 2013-2018 y el efecto de las zonas de desarrollo prioritario incluidas en el proyecto NExT 2041.

Cada escenario está compuesto por una serie de diferentes intervenciones, llamadas palancas de política pública. Las palancas de política pública son proyectos, programas, instrumentos o políticas, que tienen como objetivo modificar el futuro de una ciudad. Una palanca de política pública es una analogía a un elemento que puede activarse o desactivarse y que resulta en la aplicación de una acción de gobierno. Estas pueden significar posibles cambios de uso de suelo, intervenciones a escala urbana u otros proyectos específicos de interés para el gobierno local y federal.

La metodología se desarrolla en cuatro etapas (ver Figura 3.1). Cada una fue diseñada para promover la apropiación por parte de los actores locales y para asegurar que todos los métodos y cálculos sean replicables, transparentes y escalables.

⁶Las redes neuronales artificiales son modelos matemáticos que están inspirados en el funcionamiento de las neuronas del cerebro. Entre sus posibles aplicaciones se encuentran la clasificación y reconocimiento de patrones de texto, voz, imágenes, etc.

⁷También llamadas variables predictivas, reflejan características geográficas, socioeconómicas, o físicas del ambiente urbano, para encontrar causas de cambio.

Figura 3.1: Resumen de la metodología del proyecto

ETAPA 1 : Definición de indicadores, métodos y palancas de política pública.

- **Paso 1.1:** Definición de las palancas para la Ciudad de Morelia.
- **Paso 1.2:** Definición de indicadores para medir impactos de cada palanca.
- **Paso 1.3:** Definición de métodos necesarios para generar indicadores.

ETAPA 2 : Recopilación de la información.

- **Paso 2.1:** Compilación de información tabular.
- **Paso 2.2:** Compilación de información espacial.
- **Paso 2.3:** Desarrollo de métodos para calcular palancas adicionales.

ETAPA 3 : Definición de escenarios.

- **Paso 3.1:** Desarrollo de escenarios preliminares.
- **Paso 3.2:** Retroalimentación y mejora de escenarios.
- **Paso 3.3:** Análisis de escenarios finales.

ETAPA 4 : Resultados.

- **Paso 4.1:** Redacción del reporte final.
- **Paso 4.2:** Presentación de resultados.

3.1 Etapa 1: Definición de indicadores, métodos y palancas de política pública

Durante esta etapa se realizó un encuentro en la Ciudad de Morelia, Michoacán, los días 2 y 3 de agosto de 2018, con actores de la “*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH*” (GIZ) y del Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN)⁸ con la finalidad de adaptar los procedimientos a sus principales intereses.

Se trabajó con la identificación de las preocupaciones urbanas en la Ciudad de Morelia y sus posibles soluciones (palancas de política pública). Se obtuvo una lista de palancas identificadas por los actores como relevantes modificaciones para mejorar las futuras condiciones de la Ciudad de Morelia.

⁸Auribel Villa - Protección del Clima en la Política Urbana en México (GIZ), Pedro Cital - Director General, Pedro Alveano - Subdirector Técnico y María Luisa Melgoza - Directora de Gestión de la Planeación (IMPLAN).

CAPSUS identificó los métodos e indicadores existentes (o por desarrollar) para cada palanca propuesta, así como la información requerida en cada caso. Posteriormente, dicha lista se fue priorizando de acuerdo con la disponibilidad de los métodos y de la información requerida, así como de su relevancia.

Los métodos de cálculo de los indicadores se adaptaron a las palancas de política pública para reflejar correctamente sus impactos. A continuación, se describen las palancas de política pública utilizadas en este trabajo. También se especifican los indicadores resultantes y sus métodos de cálculo. La Sección 3.3 describe los escenarios que se crearon a partir de estas palancas de política pública.

3.1.1 Palancas de política pública

Las palancas de política pública son proyectos, programas, instrumentos o políticas, que tienen como objetivo modificar el estado de una ciudad. A través de su simulación es posible identificar el impacto que tendría su implementación, así como su relación o interacción con otras palancas, permitiendo a las partes interesadas tomar decisiones informadas y conformar consenso en relación con las prioridades de la Ciudad de Morelia.

Las palancas de política pública para la Ciudad de Morelia, definidas en conjunto con los actores locales, pueden ser observadas en la Figura 3.2.

Figura 3.2: Listado de palancas para la Ciudad de Morelia



Acomodo de población

Nivel	Descripción de la palanca
0	De acuerdo al año base (2014)
1	De acuerdo al área de expansión predicha (2038)
2	Desarrollo orientado al transporte
3	Distrito 4.0 cero emisiones
4	Densidad estratégica
5	Distrito 4.0 densidad baja
6	Política de densificación
7	Distrito 4.0 densidad media
8	Distrito 4.0 densidad alta



Equipamiento urbano

Nivel	Descripción de la palanca
0	Equipamiento urbano del año base
1	Nuevos espacios públicos



Transporte público

Nivel	Descripción de la palanca
0	Rutas existentes en el año base
1	Nuevas rutas propuestas



Código de eficiencia en edificaciones

Nivel	Descripción de la palanca
0	En el 0% de las nuevas viviendas
1	En el 15% de las nuevas viviendas
2	En el 30% de las nuevas viviendas



Movilidad ciclista

Nivel	Descripción de la palanca
0	Ciclovías existentes en el año base
1	Nuevas ciclovías

Para cada palanca se identificaron una serie de estrategias específicas para mejorar el desempeño de los indicadores afectados. A continuación, se describen dichas estrategias en relación con cada palanca.

Acomodo de población

De acuerdo con el año base (2014). Se refiere a las condiciones, en relación con la población, en el año del cual se parte (año base) para hacer la predicción hacia el futuro (año horizonte). Además, es útil como punto de comparación con otras palancas de acomodo de población.

De acuerdo con el área de expansión predicha (2038). El crecimiento urbano se ha dado de manera tendencial, siguiendo los patrones de crecimiento históricos de la población.

Desarrollo Orientado al Transporte. Se da prioridad al acomodo de población en zonas cercanas a sistemas de transporte estructurado.

Distrito 4.0 cero emisiones. Estrategias de redensificación de polígonos prioritarios establecidos en el PMDU, en este caso, el Distrito 4.0.

Densidad estratégica. Se da prioridad al acomodo de población en polígonos conformados por zonas habitacionales y de uso mixto.

Distrito 4.0 densificación baja. Se acomoda la población en el polígono correspondiente al Distrito 4.0., además se establece una densidad uniforme de 100 habitantes por hectárea.

Política de densificación. Se redensifican los polígonos establecidos dentro de la Política de densificación retomados del PMDU, con una densidad alta y media, de 400 y 224 habitantes por hectárea respectivamente, de acuerdo con las densidades medias consensuadas por la GIZ, el IMPLAN y CAPSUS.

Distrito 4.0 densificación media. Se acomoda la población en el polígono correspondiente al Distrito 4.0, con una densidad media de 224 habitantes por hectárea.

Distrito 4.0 densificación alta. Se acomoda la población en el polígono correspondiente al Distrito 4.0, con una densidad de 400 habitantes por hectárea.

Equipamiento urbano

Equipamiento urbano del año base. Mismo equipamiento urbano del año base.

Nuevos espacios públicos. Incluye un incremento en el equipamiento urbano (construcción de parques y parques lineales).

Transporte público

Rutas existentes en el año base. Mismas rutas existentes que en el año base.

Rutas nuevas propuestas. Inclusión de nuevas líneas propuestas de transporte estructurado.

Código de eficiencia en edificaciones

Ninguna medida de eficiencia energética.

Mejoras en la eficiencia energética de las edificaciones. Implementación de medidas de eficiencia energética en el reglamento de construcción en el 15% y 30% de las nuevas viviendas.

Movilidad ciclista

Ciclovías existentes en el año base. No hay aumento en el número de ciclovías.

Nuevas ciclovías. Extensión de la red de ciclovías.

3.1.2 Indicadores

Después de definir la lista de palancas o acciones de política pública, es necesario diseñar una estrategia que permita comparar y evaluar el desempeño de estas, y con base en eso, establecer cuáles palancas podrían ser implementadas para la planeación urbana y la solución de problemas en la Ciudad de Morelia, Michoacán.

La evaluación debe estar basada en datos cuantitativos para poder medir el desempeño de las acciones de política pública modeladas de una manera objetiva. En ese sentido, para determinar la sustentabilidad o no en las políticas públicas en materia urbana se pueden usar ciertas unidades de medida denominadas indicadores. Los indicadores pueden ayudar a tomar mejores decisiones y a llevar a cabo acciones más eficaces, ya que simplifican, clarifican y ponen disponible la información para los encargados de la toma de decisiones y los hacedores de las políticas públicas [20]. El valor agregado de esta metodología radica en que las decisiones estarán basadas en evidencias y no solo en opiniones.

De acuerdo con la OCDE, (1993) [21] un indicador es un parámetro, o un valor derivado de otros parámetros, que provee información para describir un fenómeno. Los indicadores son herramientas que simplifican la complejidad de los fenómenos y proporcionan una guía hacia el desarrollo sustentable [22]. Los componentes básicos de un indicador son los datos [23]. La utilidad de los

indicadores radica en que anticipan y evalúan condiciones y tendencias, facilitan información de advertencia para prevenir daños económicos, ambientales y sociales, ayudan en la formulación de estrategias, simplifican ideas y ofrecen apoyo en la toma de decisiones [24].

Teniendo en cuenta lo mencionado en los párrafos anteriores, se ha diseñado una guía que permite evaluar de manera confiable las condiciones actuales de la Ciudad de Morelia (año base), además de medir el impacto de las acciones de política pública (palancas) proyectadas hacia el año 2038 (año horizonte), encaminadas a la solución de los problemas urbanos de la ciudad, y alineadas al cumplimiento de los compromisos establecidos en los planes de desarrollo municipal.

La lista de indicadores cubre las tres esferas de la sustentabilidad. Incluye indicadores ambientales como las emisiones de gases de efecto invernadero, sociales, como el porcentaje de los habitantes de la ciudad dentro del radio de servicio de diversos equipamientos urbanos, y económicos como, el costo para el suministro de los servicios básicos.

La Tabla 3.1 muestra los indicadores seleccionados para evaluar el desempeño de los escenarios y palancas de política para la Ciudad de Morelia.

Tabla 3.1: Listado de indicadores para la Ciudad de Morelia

	Indicador	Unidades
1	Consumo de suelo *	[km ²]
2	Densidad de población **	[habitantes/km ²]
3	Proximidad a equipamiento urbano **	[%]
4	Proximidad a fuentes de empleo **	[%]
5	Proximidad a transporte público **	[%]
6	Proximidad a equipamiento de salud **	[%]
7	Proximidad a escuelas **	[%]
8	Proximidad a espacio cultural **	[%]
9	Costos de infraestructura ***	[MXN]
10	Emisiones de GEI *	[kgCO ₂ eq/cápita/año]
11	Consumo de energía *	[kWh/cápita/año]
12	Proximidad a ciclovías **	[%]
13	Consumo de agua *	[m ³ /cápita/año]

Indicador Ambiental *, Indicador Social **, Indicador Económico ***

En el Anexo C, se encuentra una descripción completa que incluye los métodos de cálculo y fuentes de información utilizadas para construir cada uno de los indicadores.

3.2 Etapa 2: Recopilación de la información

En esta etapa se compilan los datos necesarios para el cálculo de los indicadores y la modelación de las palancas de política pública. Entre los elementos compilados se incluyen datos espaciales y tabulares.

3.2.1 Compilación de información tabular

El primer paso fue la recopilación de información tabular que sirve para definir parámetros y criterios base que serán utilizados para generar los cálculos. Gracias al apoyo del IMPLAN y de la GIZ, se compiló información de la Ciudad de Morelia. El Anexo D muestra la lista de datos base utilizados para el proyecto, así como las referencias de las fuentes de información utilizadas.

3.2.2 Compilación de información espacial

Se utilizan distintas fuentes de información pública para generar los indicadores espaciales que funcionan en conjunto con las bases de datos tabulares. Las principales fuentes de información utilizadas para el desarrollo de los escenarios se mencionan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Principales fuentes de información utilizadas para los escenarios de la Ciudad de Morelia

Información	Fuente
Población total	Censo de Población y Vivienda 2010 [25]
Proyección de crecimiento poblacional	México en Cifras: Proyecciones de la Población 2010-2050 [26].
Superficie construida	Global Human Settlement Layer [27]
Equipamiento urbano	IMPLAN Morelia 2018 y [28]
Traza urbana	IMPLAN Morelia 2018, AGEB urbanas del Censo de Población y Vivienda 2010 [25]
Factor de emisiones de electricidad	Factor de emisión para el cálculo de emisiones indirectas por consumo de electricidad para el periodo 2015 [29]

De forma paralela a la construcción de esta base de datos, se fueron adaptando los métodos de cálculo.

3.3 Etapa 3: Definición de escenarios.

La creación de escenarios tiene como finalidad comparar ágilmente posibles futuros de una ciudad. Al modelar escenarios es posible pronosticar cómo será una ciudad si se toman ciertas decisiones en el presente y cuáles serían sus potenciales implicaciones.

Un escenario representa una combinación específica de palancas de política pública. Es posible tener escenarios que incluyan únicamente una palanca de

política pública y escenarios que combinen varias palancas. Esto permite a los tomadores de decisiones analizar fácilmente las implicaciones de una medida en particular, o de un conjunto de acciones, y comparar claramente un escenario contra otro.






El proceso para la conformación y análisis de escenarios se puede sintetizar en tres pasos:

1. Desarrollo de escenarios preliminares
2. Retroalimentación y mejora de escenarios
3. Análisis de escenarios finales

Para la Ciudad de Morelia se diseñaron nueve escenarios. El primer escenario permitirá comparar el crecimiento de la ciudad replicando los patrones históricos de expansión urbana, es decir, en este escenario no se lleve a cabo ninguna acción de política pública (escenario Tendencial), contra escenarios que incorporan un crecimiento compacto, con desarrollo orientado en el transporte, favoreciendo la infraestructura verde y siguiendo los lineamientos estipulados por el PMDU, los planes sectoriales y nacionales. Los escenarios alternativos son los siguientes:






- Escenario Tendencial: este escenario representa las condiciones de la ciudad proyectadas hacia el año horizonte (2038) suponiendo que no se aplique ninguna acción de política pública. Este escenario hace una proyección basada en las tendencias históricas en los cambios de uso de suelo y en las densidades de población observadas. Es importante para hacer comparaciones con otros escenarios más retadores y así, poder evaluar los resultados de ciertas acciones o políticas públicas implementadas. La configuración del escenario Tendencial se muestra en la Figura 3.3.

Figura 3.3: Configuración del escenario Tendencial

Escenario Tendencial		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	1	De acuerdo con el crecimiento tendencial (2038)
	Equipamiento urbano	0	Equipamiento urbano del año base
	Transporte público	0	Rutas existentes en el año base
	Código de eficiencia en edificaciones	0	En el 0% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	0	Ciclo vías existentes en el año base

- Distrito 4.0 cero emisiones: este escenario incorpora acciones de política pública que promueven el uso de la tecnología, mejoran la infraestructura del transporte público y las ciclovías, implementa acciones de edificación verde y prioriza la densificación urbana sustentable. Todo esto localizado en un polígono estratégico llamado Distrito 4.0. En la Figura 3.4 se muestra cada una de las categorías de política pública y las palancas que configuran este escenario.






Figura 3.4: Configuración del escenario Distrito 4.0 cero emisiones

Distrito 4.0 cero emisiones		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	3	De acuerdo con el Distrito 4.0
	Equipamiento urbano	1	Nuevos espacios públicos
	Transporte público	1	Nuevas rutas propuestas
	Código de eficiencia en edificaciones	1	En el 15% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	1	Nuevas ciclovías

- Distrito 4.0 baja densidad: este escenario tiene la misma configuración del Distrito 4.0, pero incorpora una variación que consiste en incluir una densidad de población de 100 habitantes por hectárea⁹ en el polígono correspondiente al Distrito 4.0. Esta variación permite conocer el desempeño de las políticas implementadas en función de la densificación de la población. En la Figura 3.5 se muestra cada una de las categorías de política pública y las palancas que configuran al Distrito 4.0 baja densidad.






⁹En conformidad con la densidad baja validada por los miembros del IMPLAN y de la GIZ presentes durante el encuentro llevado a cabo los días 2 y 3 de Agosto del presente año en la Ciudad de Morelia.

Figura 3.5: Configuración del escenario Distrito 4.0 densidad baja

Distrito 4.0 baja densidad		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	5	De acuerdo con el Distrito 4.0 y densidad (100 hab/ha)
	Equipamiento urbano	1	Nuevos espacios públicos
	Transporte público	1	Nuevas rutas propuestas
	Código de eficiencia en edificaciones	1	En el 15% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	1	Nuevas ciclovías


- **Ciudad Verde:** en este escenario se favorece el uso de las ecotecnologías, la infraestructura verde, la rehabilitación de espacios públicos y la creación de un parque lineal. En la Figura 3.6 se muestra cada una de las categorías de política pública y las palancas que configuran a este escenario.

Figura 3.6: Configuración del escenario Ciudad verde

Ciudad Verde		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	4	En zonas habitacionales e industriales
	Equipamiento urbano	1	Nuevos espacios públicos
	Transporte público	0	Rutas existentes en el año base
	Código de eficiencia en edificaciones	2	En el 30% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	0	Ciclovías existentes en el año base






- **Desarrollo Orientado al Transporte:** se rehabilitan y amplían ciclovías y rutas de transporte público; además, se prioriza la densificación urbana en zonas cercanas a transporte y fuentes de empleo. La configuración de este escenario se muestra en la Figura 3.7.

Figura 3.7: Configuración del escenario Desarrollo orientado al transporte

Desarrollo orientado al transporte		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	2	En zonas cercanas a transporte y empleo
	Equipamiento urbano	0	Equipamiento urbano del año base
	Transporte público	1	Nuevas rutas propuestas
	Código de eficiencia en edificaciones	0	En el 0% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	1	Nuevas ciclovías






- **Densificación estratégica (ciudad compacta):** se promueve el crecimiento compacto a lo largo de la ciudad, considerando los usos de suelo permitidos para la urbanización, facilitando la densificación inteligente. En la Figura 3.8 se muestra cada una de las categorías de política pública y las palancas que configuran al escenario de Densificación estratégica.

Figura 3.8: Configuración del escenario Densificación estratégica

Densificación estratégica		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	4	En zonas habitacionales e industriales
	Equipamiento urbano	0	Equipamiento urbano del año base
	Transporte público	0	Rutas existentes en el año base
	Código de eficiencia en edificaciones	0	En el 0% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	0	Ciclovías existentes en el año base

- **Política de Densificación:** en este escenario se incrementa la densidad de población a partir de los polígonos propuestos en el PMDUM, para establecer una política de densificación, generando áreas de densificación media y alta en polígonos estratégicos con el propósito de mostrar los efectos de una ciudad densa. En la Figura 3.9 se muestra la configuración del escenario.
- **Distrito 4.0 densidad media:** el escenario cuenta con la misma configuración que el Distrito 4.0 cero emisiones y Distrito 4.0 baja densidad, pero a diferencia de estos, cuenta con una densidad de 225 habitantes por hectárea, localizada en el polígono estratégico del Distrito 4.0. Este aumento de densidad permite conocer los beneficios de las densidades altas dentro de la zona urbana y su relación con los

Figura 3.9: Configuración del escenario Política de densificación

Política de densificación		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	6	En polígonos prioritarios
	Equipamiento urbano	0	Equipamiento urbano del año base
	Transporte público	0	Rutas existentes en el año base
	Código de eficiencia en edificaciones	0	En el 0% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	0	Ciclo vías existentes en el año base






equipamientos y servicios que se encuentran próximos. Se puede observar su configuración en la Figura 3.10.

Figura 3.10: Configuración del escenario Distrito 4.0 densidad media

Distrito 4.0 densidad media		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	7	De acuerdo con el Distrito 4.0 y densidad (225 hab/ha)
	Equipamiento urbano	1	Nuevos espacios públicos
	Transporte público	1	Nuevas rutas propuestas
	Código de eficiencia en edificaciones	1	En el 15% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	1	Nuevas ciclovías

- Distrito 4.0 densidad alta: el escenario cuenta con la misma configuración que el Distrito 4.0 cero emisiones, pero a diferencia de este, cuenta con una densidad de 400 habitantes por hectárea, localizada en el polígono estratégico del Distrito 4.0. Este aumento de densidad permite conocer los beneficios de las densidades altas dentro de la zona urbana y su relación con los equipamientos y servicios que se encuentran próximos. Se puede observar su configuración en la Figura 3.11.

Figura 3.11: Configuración del escenario Distrito 4.0 densidad alta

Distrito 4.0 densidad alta		Nivel	Descripción del nivel
	Acomodo de la población	8	De acuerdo con el Distrito 4.0 y densidad (400 hab/ha)
	Equipamiento urbano	1	Nuevos espacios públicos
	Transporte público	1	Nuevas rutas propuestas
	Código de eficiencia en edificaciones	1	En el 15% de las nuevas viviendas
	Movilidad ciclista	1	Nuevas ciclovías

Estos escenarios fueron planteados a partir de las problemáticas urbanas y posibles palancas de política identificadas en conjunto con los miembros del IMPLAN, la GIZ y demás actores durante la primera misión llevada a cabo en la Ciudad de Morelia. La metodología para la obtención del escenario Tendencial proyectado a 2038 puede ser consultada en el Anexo B.

El análisis de los indicadores de los escenarios resultantes y la comparación entre ellos será abordada en el siguiente capítulo.

4. Resultados

La Ciudad de Morelia, Michoacán, presenta una tendencia de crecimiento dispersa y discontinua, rompiendo con su forma urbana y creciendo de forma acelerada en cuanto al consumo territorial.

A través de los resultados obtenidos en los escenarios de crecimiento urbano y densificación, se han obtenido importantes hallazgos que se presentan a continuación. En primera instancia, se analizan los indicadores relacionados con el consumo de suelo, ver Figura 4.1.

En el esquema se observa que el área del escenario base en la zona Metropolitana de Morelia es de 226.5 km², mientras que en el escenario Tendencial es de 328.19 km², lo que representa un aumento de 44.89% con respecto del año base. Contrastantemente, la población solo aumentó en 90,269 habitantes, lo que representa el 9.3%. Lo anterior muestra un aumento de la mancha urbana que tiende a crecer en las periferias de la ciudad. Aquel escenario ocurriría si no se implementa alguna acción de política pública, es decir, que todo siga sin ningún cambio, siguiendo las tendencias de crecimiento observadas hasta la fecha.

Figura 4.1: Indicadores relacionados con el consumo de suelo



Se puede evaluar también el desempeño de otros escenarios que implementan medidas de política más retadoras. En ese sentido, al comparar el escenario “Tendencial” con los escenarios, “Distrito 4.0 Cero Emisiones” y “Desarrollo Orientado al Transporte”, se observa que en los dos últimos escenarios el aumento en el área urbana ha sido muy sutil, 2.01% y 2.73% respectivamente. Eso trae implicaciones en la densidad de población, pues pasa de 2,955 hab/km² en el escenario Tendencial, a casi 4,200 hab/km² en los dos escenarios restantes, mejorando de manera importante indicadores como la proximidad a servicios y espacios públicos, las emisiones de GEI, y el consumo energético.

Aunado a los escenarios antes mencionados, se encuentra el escenario “Densificación estratégica” con un aumento del 12.52% en consumo de suelo, si bien no tuvo un crecimiento reducido, es mucho menor comparado con el escenario Tendencial. Esto se debe a que su política de densificación prioriza el acomodo de población en zonas estratégicas para uso habitacional y mixto y no cuenta con alguna restricción de espacios, salvo lo ya establecido, como puede observarse en su configuración, Figura 3.8.

La huella urbana que se genera a partir de este crecimiento poblacional con respecto al tiempo representa un problema importante, debido al aumento en la demanda que tiene la ciudad en cuanto a servicios, infraestructura y equipamientos, pues los costos se incrementan por las intervenciones urbanas debido al incremento de distancias y zonas que deberán cubrirse con amenidades y servicios básicos. Por lo tanto, el crecimiento de la población en zonas periféricas de las ciudades acarrea consecuencias negativas, que van desde los altos costos de abastecimiento de infraestructura, hasta la calidad de la vida urbana que se desarrolla a partir del crecimiento desordenado. Idealmente se debe tener una ciudad compacta, ordenada y densa en zonas habitacionales, permitiendo una mejor relación entre los usos de suelo que se desarrollen y optimizando los recursos que se han dispuesto para ella.

Las distintas configuraciones que se han establecido para los escenarios están en función de las propuestas que se recibieron como intervenciones para mejorar la urbanización de la ZMM. Gracias a ellas se puede contar con una comparación entre las posibilidades que llegan a desarrollarse en la ciudad, y por lo tanto, se determinará hacia dónde dirigir el crecimiento, según las correlaciones que se han establecido entre escenarios.

Cabe mencionar que estas relaciones existentes entre el consumo de suelo, la densidad de población, la generación de residuos y el consumo de energía son directas, por lo que los escenarios muestran resultados acordes con las

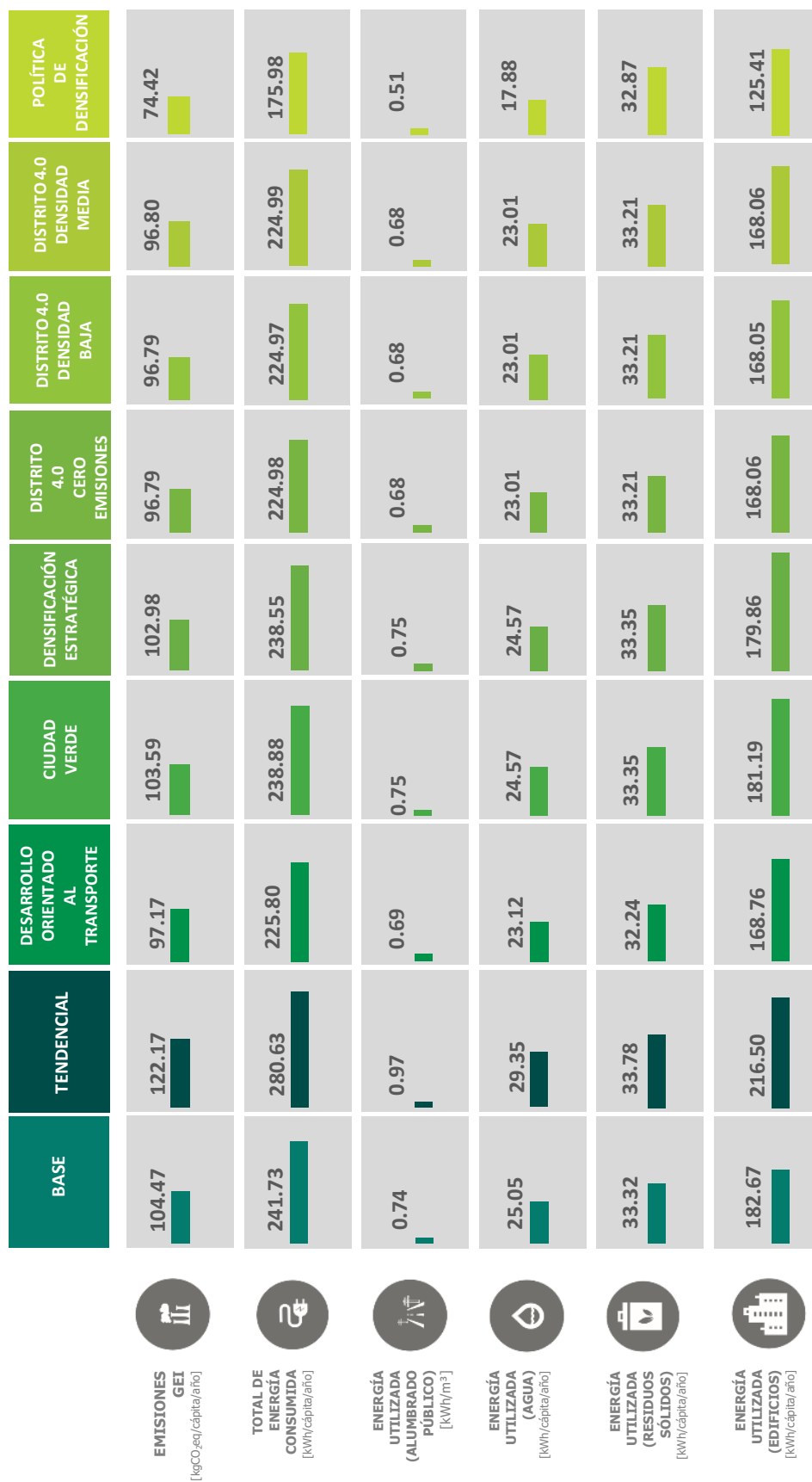
características que se han modelado para cada uno de ellos, ver Figura 4.2.

A continuación, se da un panorama de cómo se comporta el consumo de energía y las emisiones por escenario. En el escenario Tendencial, que no cuenta con ninguna política pública para el mejoramiento, la incorporación o implementación de nuevas tecnologías para la reducción de emisiones y la eficiencia energética, se muestran resultados que prueban que no tener control sobre el crecimiento de la población y de los asentamientos humanos dentro del territorio, genera un consumo energético mucho mayor, comparado con una ciudad planeada y densa en zonas estratégicas donde se puede obtener una mejora en la generación de emisiones de GEI, y reducir los consumos energéticos y de servicios.

La Figura 4.2 muestra que los escenarios sobresalientes por sus altas emisiones y consumos energéticos son los escenarios Tendencial, inmediato de la Ciudad Verde. Si bien este último incorpora medidas de edificación verde, su área de expansión es mayor en comparación con los demás escenarios, provocando que su desempeño sea poco viable en el ámbito energético. Sin embargo, el escenario correspondiente a “Política de densificación”, cumple con los objetivos antes planteados, al tener una disminución de GEI, comparado con el escenario Base, reduce las emisiones y el consumo de energía, mientras que el escenario Tendencial, como se ha mencionado, va en aumento, generando un gran impacto en la generación de GEI.

En seguida se encuentran los escenarios correspondientes al Distrito 4.0 Cero emisiones, de baja y media densidad, que tienen emisiones GEI similares, y que por lo tanto son menores a los escenarios Tendencial y Base, pudiendo ser tomados como una medida de planificación dentro de la Ciudad de Morelia a manera de aminorar las emisiones y el consumo energético.

Figura 4.2: Indicadores relacionados con la energía y las emisiones



Los escenarios “Distrito 4.0 Cero emisiones” y “Política de densificación” tienen una configuración similar, por lo que resulta sencillo realizar un análisis comparativo. Tomando en cuenta la Figura 4.1, ambos escenarios tienen un consumo de suelo igual a 4.57 km², pero difieren en la densidad de población, contando con 4,198 y 5,621 hab/km² respectivamente, por lo cual se genera una desigualdad en el consumo de energía y las emisiones que se generan en un escenario y otro, mostrando mejores resultados el escenario con mayor densidad.

Densificar una zona dentro del territorio permite mejorar de muchas maneras la calidad de una ciudad, logrando una eficiencia energética y una reducción de residuos sólidos, que permite, además, acortar el tiempo de traslados de estos, provocando una disminución de energía utilizada y una baja en la emisión de GEI.

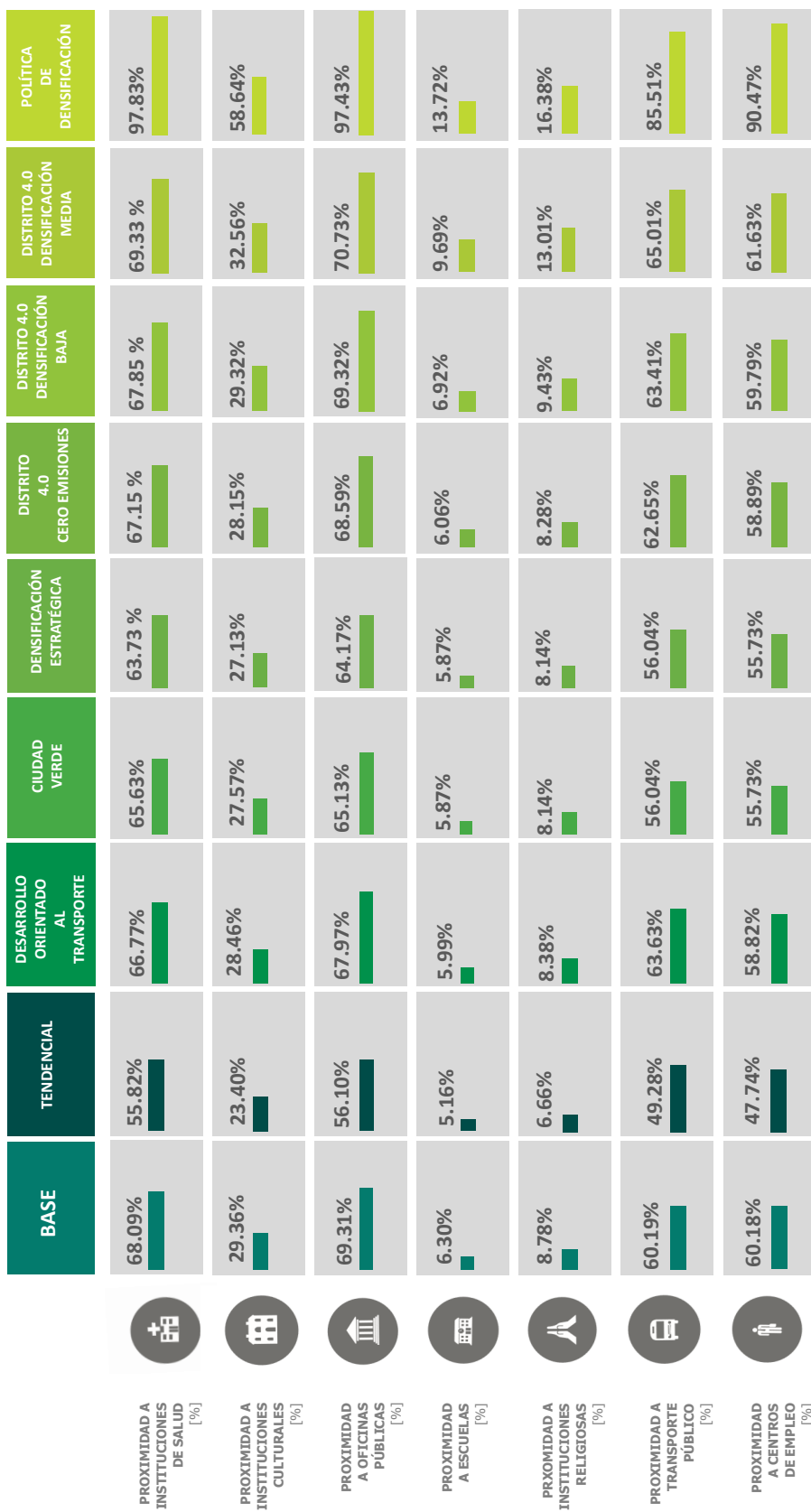
Sin embargo, es importante recalcar que densificar una zona no siempre es la mejor solución para reducir las emisiones o el consumo de energía, pues también se han de considerar los costos y acciones específicas que se deberán realizar para brindar los servicios a grandes grupos de población. En ese sentido, con la mejora o ampliación en la red de transporte público, en la red carretera, o en la red de ciclovías, se puede atender la demanda de los habitantes de la ciudad que se encuentren dentro de una zona densa, y por ende, lograr una mejora en el desempeño de los indicadores.

Para reducir el consumo energético, la emisión de GEI y mejorar las condiciones de la población, suministrando servicios públicos de calidad, no basta densificar zonas dentro de la mancha urbana, sino que es necesario orientar el crecimiento hacia zonas que cuenten con las características necesarias para garantizar que las políticas propuestas generen resultados óptimos para el territorio y su población.

Sumado a esto, se debe considerar la capacidad que puede soportar una ciudad para la densificación y las características de los servicios actuales, para mejorar las propuestas en la incorporación de nuevos, así como la proximidad de equipamientos que forman parte importante dentro del cálculo de las emisiones y el consumo energético por las actividades y los requerimientos que tiene cada uno.

Así, en relación con los indicadores de proximidad a espacios públicos, en la Figura 4.3 y los esquemas anteriores se puede obtener un análisis completo donde se atienden las relaciones e interrelaciones que existen en la ciudad y sus complementos de forma conjunta, generando resultados precisos y factibles.

Figura 4.3: Indicadores relacionados con la proximidad a equipamiento urbano



Se puede observar, a partir del esquema anterior, que el escenario Tendencial tiene un desempeño menor, comparado con los escenarios restantes, mientras que el escenario Distrito 4.0 Densificación media, cuenta con mayor proximidad a espacios públicos. Esto se debe a que se densifica estratégicamente el polígono que comprende a dicho distrito, generando que la población pueda acceder fácilmente a estos.

Lo anterior sucede ya que gran cantidad de habitantes se encuentran ubicados en una zona más pequeña, por lo cual, la cercanía a espacios públicos es mayor. Es importante señalar que todos los escenarios "Distrito 4.0" comparten las mismas palancas, cambiando solo la densidad de población en cada uno, por tal motivo los resultados de proximidad y demás indicadores son similares entre sí. No obstante, puede notarse entre estos la diferencia clara entre un escenario más densificado que otro, pues el aprovechamiento de las proximidades a equipamiento, instituciones o amenidades en general, es mucho mayor.

Mientras tanto, el escenario "Desarrollo Orientado al Transporte" cuenta con resultados que, del mismo modo, resultan útiles para el desarrollo de una urbe, ya que las proximidades a transporte público alcanzan el 63.63%. En contraste con las dimensiones territoriales que abarca, es adecuado dentro de la ciudad, pues favorece a la cercanía y accesibilidad a los centros de empleo y, a su vez mejora las conexiones existentes entre los usos de suelo y las necesidades que tiene la población.

Sin embargo, el escenario que tiene los resultados más convenientes en proximidad, como en otros indicadores es "Política de densificación", ya que cuenta con una mayor densidad y un reducido aumento de área, generando que más personas tengan facilidades para acceder a los equipamientos y servicios.

Los porcentajes de proximidad más altos son a instituciones de salud, oficinas públicas, transporte público y a centros de empleo, lo cual indica que existe una deficiencia de instituciones culturales y centros educativos, dejando una brecha para la elaboración de propuestas que mejoren el abastecimiento de equipamientos.

Por lo tanto, se puede definir como escenario sobresaliente a "Política de densificación", pues contiene los resultados óptimos en los indicadores que aquí se establecen. No obstante, es necesario señalar que la población que en este escenario se ha modelado, es distinta a la que se ha proyectado para los demás escenarios hasta el año 2038, debido a que se requería cumplir con la densidad que se ha propuesto previamente en el PMDU y el Proyecto Morelia

NExT 2041.

Los escenarios correspondientes al Distrito 4.0 se evaluarán según la densificación que se ha asignado a cada uno y que son las siguientes:

- Baja: 100 habitantes por hectárea
- Media: 225 habitantes por hectárea
- Alta: 400 habitantes por hectárea

Mientras que el escenario llamado “Distrito 4.0 cero emisiones” tiene una densidad distinta, otorgada a partir del acomodo de población realizado previamente.

Figura 4.4: Indicadores correspondientes a los escenarios del polígono Distrito 4.0

Indicador	Base	Tendencial	Distrito 4.0	Distrito 4.0 densidad baja	Distrito 4.0 densidad media	Distrito 4.0 densidad alta
CONSUMO DE SUELO [km ²]		101.69	4.57	4.57	4.57	4.57
CONSUMO DE SUELO (INRC) [%]		44.89%	2.01%	2.01%	2.01%	2.01%
INFILL AREA [km ²]		41.5	14.0	14.0	10.25	10.25
HUELLA URBANA [km ²]	226.5	328.19	231.07	231.07	231.07	231.07
DENSIDAD DE POBLACIÓN [pop/km ²]	3,884.21	2,955.59	4,198.04	4,198.13	4,197.89	4,227.99
INSTITUCIONES DE SALUD [%]	68.09%	55.82%	67.15%	67.85%	69.33%	71.36%
INSTIRUCIONES CULTURALES [%]	29.36%	23.40%	28.15%	29.32%	32.56%	37.03%
OFICINAS PÚBLICAS [%]	69.31%	56.10%	68.59%	69.32%	70.73%	72.67%
ESCUELAS [%]	6.30%	5.16%	6.06%	6.92%	9.69%	13.51%
INSTIRUCIONES RELIGIOSAS [%]	8.78%	6.66%	8.28%	9.43%	13.01%	17.93%
TRANSPORTE PÚBLICO [%]	60.19%	49.28%	62.65%	63.41%	65.01%	67.21%
CENTROS DE EMPLEO [%]	60.18%	47.74%	58.89%	59.79%	61.63%	64.17%
EMISIONES GHG [kgCO ₂ eq/cápita/a]	104.47	122.17	96.79	96.79	96.80	96.17
TOTAL [kWh/cápita/a]	241.73	280.63	224.98	224.97	224.99	223.61
ALUMBRADO PÚBLICO [kWh/m ²]	0.74	0.97	0.68	0.68	0.68	0.68
ENERGÍA/AGUA [kWh/cápita/a]	25.05	29.35	23.01	23.01	23.01	22.85
RESIDUOS SÓLIDOS [kWh/cápita/a]	33.32	33.78	33.21	33.21	33.21	32.20
EDIFICIOS [kWh/cápita/a]	182.67	216.50	168.06	168.05	168.06	166.87

La Figura 4.4, incorpora todos los indicadores que se analizaron en los escenarios restantes y como se ha mencionado, los provenientes del Distrito 4.0, además del escenario Tendencial y el Base. Esto se ha realizado con la finalidad de analizar la factibilidad de las densidades en un solo polígono estratégico dentro de la mancha urbana.

Los hallazgos más relevantes que se han encontrado en esta comparación son que a pesar de contar con un consumo de suelo idéntico, las proximidades y el

consumo energético han mejorado en aquellos escenarios con más alta densidad. Un claro ejemplo de lo mencionado es la proximidad a Instituciones de Salud, pues en el escenario Distrito 4.0 Densidad baja se tiene un porcentaje igual a 67.85%, mientras que en el escenario de Densificación alta aumenta a 71.36%.

Otro ejemplo importante en cuanto a proximidades es al Transporte público, pues es un de los elementos más importantes dentro de la vida urbana. En el escenario con Densificación media es igual a 65.01%, 2.20% menor que el resultado del escenario con Densificación Alta. Los cambios se deben a que una masa más grande de población puede aprovechar los servicios que se brindan cerca de sus residencias, incentivado en este caso, el uso del transporte público sobre el particular.

En el ámbito de las emisiones y el consumo energético también se encuentran diferencias que, aunque parezcan mínimas son importantes. Muestra de ello es en el total de energía consumida por escenario, mientras que el escenario de Densidad baja tuvo un consumo igual a 224.97 kwh/cápita/año, el gasto del Distrito 4.0 Densidad alta fue de 226.61 kwh/cápita/año. Si se consideran estas mediciones en el costo equivalente, para abastecer a la ciudad de energía, alumbrado público y demás disposiciones, se tendrá que resulta más económico tener una ciudad compacta, que una ciudad dispersa.

En el caso de las emisiones GEI generadas por escenario, donde se nota una diferencia altamente considerable es entre los escenarios Tendencial y cualquier escenario densificado, pues se tiene una disminución de casi 26 kmCO₂eq/cápita/año. Esta se debe a muchos factores, tales como la utilización del automóvil, la cantidad de residuos sólidos generados y por supuesto a la implementación de medidas que mejoren la eficiencia y las emisiones causadas por la vida en las urbes.

Como se ha mencionado a lo largo de este capítulo, los distintos escenarios se han configurado a través de propuestas de políticas públicas y se han evaluado hasta este momento sus indicadores de consumo de suelo, emisiones de GEI, consumo energético y porcentajes a proximidades. Sin embargo, existen también indicadores que permiten medir el costo de infraestructura que se deberá cubrir por escenario planteado.

En la Figura 4.5, se pueden observar los resultados de este indicador por escenario y por momento de implementación correspondiente. Por ejemplo, se muestra la cantidad, en pesos, que deberá designarse para abastecer a los habitantes de servicios básicos, según su densidad poblacional y extensión territorial.

Figura 4.5: Indicadores relacionados con los costos de infraestructura

ESCENARIO	COSTO DE INFRAESTRUCTURA	COSTO INFRAESTRUCTURA PROPUESTA	COSTO DE MEJORA DE INFRAESTRUCTURA
BASE	0.00	0.00	0.00
TENDENCIAL	3,437,750,334.22	2,896,866,657.65	540,883,676.57
DESARROLLO ORIENTADO AL TRANSPORTE	210,548,489.95	176,335,968.24	342,12,521.71
CIUDAD VERDE	906,217,716.11	808,467,654.08	97,750,062.03
DENSIFICACIÓN ESTRATÉGICA	906,217,716.11	808,467,654.08	97,750,062.03
DISTRITO 4.0 CERO EMISIONES	312,653,434.29	130,186,651.83	182,466,782.45
DISTRITO 4.0 DENSIFICACIÓN BAJA	312,653,434.29	130,186,651.83	182,466,782.45
DISTRITO 4.0 DENSIFICACIÓN MEDIA	263,778,403.28	130,186,651.83	133,591,751.44
DISTRITO 4.0 DENSIFICACIÓN ALTA	263,778,403.28	130,186,651.83	133,591,751.44
POLÍTICA DE DENSIFICACIÓN	846,205,856.22	130,186,651.83	716,019,204.38

Se puede notar que el escenario “Tendencial” refleja un costo más elevado que el resto de escenarios, ya que requiere de una mayor implementación en redes de agua, drenaje y luz eléctrica, para cubrir las necesidades de la población que se albergará en el territorio, además de una mayor cantidad de materiales requeridos para brindar esta infraestructura, debido a la extensión que abarca su desarrollo.

En contraste con los resultados del escenario anterior se encuentra el “Distrito 4.0 Densificación alta” que muestra el costo total más bajo de los escenarios modelados. Además el costo de infraestructura propuesta también es menor que en el escenario “Tendencial”. Además, al considerar el consumo de suelo y su densidad, se define como el más eficiente.

Este indicador va en línea con los resultados previamente analizados, pues los escenarios que cumplen con una alta densidad y una reducida expansión, han tenido los costos más bajos en implementación de infraestructura nueva y en el mantenimiento y mejoramiento de la ya existente. Esto se debe al poco consumo de suelo que se tuvo, ya que son pocas las áreas que deberán integrar las nuevas redes de infraestructura.

Así que, los beneficios de las ciudades compactas generan también una disminución en los costos de implementación de infraestructura y servicios, pues en su mayoría, el territorio actual habitado ya cuenta con ellos, por lo que deja a los nuevos asentamientos como los únicos que requerirán una implementación. Mientras tanto, las áreas actuales que solo serán densificadas podrán aprovechar las instalaciones.

Por todo lo anterior, resulta conveniente incentivar y apoyar a los organismos que colaboran con acciones para mejorar la planeación urbana en las ciudades, pues la reducción en los gastos de las necesidades básicas es sustancial a lo largo de los años, generando beneficios al disminuir el gasto económico, que podrá ser destinado a otras medidas en favor de la ciudad. Para cerrar este apartado, se hace mención que, en este se pueden consultar el desempeño de cada escenario en términos de indicadores de una manera transparente y replicable. Esto tiene la función de evaluar las acciones de política pública, compararlas entre sí y rediseñar otros escenarios con las configuraciones adecuadas que se adapten a las necesidades de la Ciudad de Morelia. Favorecerán el diseño del Plan Municipal de Desarrollo y eventualmente, al diseño de planes estatales y a nivel nacional de una manera informada y congruente, para la mejora de la ciudad.

Para cerrar este apartado, se hace mención que, en este se pueden consultar el desempeño de cada escenario en términos de indicadores de una manera

transparente y replicable. Esto tiene la función de evaluar las acciones de política pública, compararlas entre sí y rediseñar otros escenarios con las configuraciones adecuadas que se adapten a las necesidades de la Ciudad de Morelia. Favorecerán el diseño del Plan Municipal de Desarrollo y eventualmente, al diseño de planes estatales y a nivel nacional de una manera informada y congruente, para la mejora de la ciudad.

5. Conclusiones y recomendaciones

Mediante el diseño de escenarios de desarrollo urbano y densificación que implementan medidas de política pública, es posible comparar y evaluar los beneficios o desventajas que presentan dichas acciones (palancas), a través de un conjunto de indicadores, que están enmarcados en alguno de los tres pilares de la sustentabilidad (económico, social y ambiental). Gracias a esta metodología, se pueden crear consensos de manera ágil y rápida entre los diferentes entes de gobierno y demás tomadores de decisiones, en materia de planeación urbana. Dichos consensos derivarán en políticas públicas que mejoren las condiciones actuales de las ciudades de manera informada y basado en evidencias.

En este proyecto se evaluaron una serie de palancas de política pública implementadas en distintos escenarios, con la intención de conocer qué acciones son las que pueden generar más beneficios para el crecimiento sustentable de Morelia. Basados en el desempeño de los indicadores se obtuvo que el escenario con el mejor desempeño fue el Distrito 4.0 densificación media, cuya configuración de palancas de política incluye la densificación estratégica del polígono correspondiente al Distrito 4.0, el desarrollo de nuevos espacios públicos, la instalación de nuevas rutas de transporte público y de ciclovías propuestas, así como la puesta en marcha de un código de eficiencia en edificaciones.

Por su parte, el escenario Distrito 4.0 Densificación baja, que cuenta con la misma configuración del escenario anterior pero con una densidad de 100 habitantes por hectárea, fue el segundo mejor escenario. Los indicadores de cercanía a instituciones de salud, oficinas públicas e instituciones culturales fueron los de mejor desempeño en este escenario. Esto debido a que el polígono prioritario tuvo una mayor densidad de población, por lo tanto, un mayor número de habitantes puede acceder a los espacios públicos y servicios.

El escenario Desarrollo Orientado al Transporte tuvo el mejor desempeño en cuanto a la cercanía a transporte, sin embargo, en otros indicadores, como la generación de emisiones y el consumo energético, fue superado por los escenarios del Distrito 4.0. Esto significa que no basta con implementar una sola medida de manera aislada. Se tienen que considerar otros aspectos como la densidad de la población, la mejora en el equipamiento urbano, o la implementación de medidas de eficiencia en edificaciones.

De este modo, a partir de estas observaciones que se tienen con los resultados de la implementación de palancas de política pública dentro de los distintos escenarios propuestos, queda claramente evidenciado que las mejores opciones para la vida en las urbes es la densificación en zonas específicas y estratégicas, pues mejora la capacidad de aprovechamiento de los elementos que se tienen cercanos.

Las ciudades compactas y densas no solo se benefician en la reducción del consumo de suelo, además ayudan a disminuir los costos en infraestructura y amenidades básicas para desarrollarse dentro de ellas, dejando mayores extensiones de cobertura de servicios, equipamientos, espacios públicos, etc.

Se recomienda además, añadir medidas que mejoren las emisiones y el consumo de energía, tales como códigos verdes en las edificaciones, reducción de residuos, implementación de medios de transporte público masivo, como BRT o metro, y la promoción de vehículos no motorizados que favorezcan la reducción de contaminantes y de GEI.

En conjunto, todas las medidas implementadas, favorecerán a crear ciudades óptimas para el desarrollo de los habitantes que se encuentran en ellas, pues al contar con suelos mixtos y equipamientos suficientes, se reducen las distancias para acceder a las amenidades, generando que la población opte por opciones no motorizadas para llegar a sus destinos, mejorando la apropiación del espacio, disminuyendo las emisiones y acortando los tiempos de traslado.

Se debe considerar también al momento de establecer las densidades correspondientes a cada uso de suelo, las capacidades que tiene el territorio y sus recursos para soportarlas, por ello se recomienda realizar previamente estudios de suelo, que permitan conocer sus características específicas y con base en estas, tomar las decisiones pertinentes al establecer los usos y las densidades que tendrá el suelo urbanizado.

Sin omitir que, para este establecimiento de suelos mixtos se deben considerar los suelos agrícolas y aquellos destinados a parques o áreas verdes, puesto que benefician y favorecen a los objetivos de la reducción de emisiones GEI, el aumento de la captura de carbono y a propiciar la recreación de la población.

Así, basados en los resultados obtenidos mediante la implementación de esta metodología para el modelado de escenarios de densificación y crecimiento urbano para la Ciudad de Morelia, se concluye que las mejores estrategias de política pública son la densificación estratégica en polígonos prioritarios que cuenten con acceso a servicios y espacios públicos, con vías de comunicación y acceso al transporte público, así como la implementación de medidas de eficiencia en las nuevas edificaciones. Además, se recomienda un análisis de la ciudad para detectar los sitios más adecuados (con mayor rezago, con mayor densidad de población, etc.) para la instalación de nuevos servicios, espacios públicos, medios de transporte y medidas de eficiencia y ahorro energético (captación de agua de lluvia, secuestro de carbono, techos verdes, etc.); los cuales deberán ser propuestos y evaluados a través de esta metodología con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes y que además, sirvan como base para el diseño de los Planes Municipales de Desarrollo Urbano.

Finalmente, si no se lleva a cabo ningún programa de planeación urbana o medida de política pública, la ciudad de Morelia crecerá de manera desordenada ocasionando serios problemas en materia económica, social y contribuirá al cambio climático.

El modelo de crecimiento Tendencial de Morelia es fragmentado y disperso por lo que, en caso de no aplicarse las medidas de planeación adecuadas, se verá reflejado en grandes costos económicos, sociales y ambientales.

Las políticas orientadas a la densificación son las medidas que más beneficios traen en términos de los indicadores de consumo de suelo, emisiones de GEI y energéticos, costos de infraestructura, y proximidad a espacios públicos.

Además de la densificación estratégica, las medidas orientadas a mejorar el transporte público masivo y la implementación de un código verde en la construcción de las nuevas viviendas, son las mejores opciones para reducir los gastos energéticos en el suministro de servicios, la energía gastada en las edificaciones y en general, la energía per cápita consumida, al mismo tiempo que se disminuyen las emisiones de GEI, todo lo cual contribuye en gran medida en lucha contra el cambio climático.

La inversión llevada a cabo en la búsqueda de las mejores estrategias de planeación urbana, además de permitir tomar decisiones informadas y basadas en evidencias, ofrece un valor agregado pues disminuye sustancialmente los costos económicos derivados de la mala planeación urbana, tales como aquellos relacionados con la infraestructura, suministro de servicios y mantenimiento de espacios públicos, por lo tanto, es vital invertir en este tipo de mecanismos.

De esta manera, teniendo las medidas una base sólida de planteamientos y propuestas, así como una continuidad se logrará mejorar la planificación del municipio, aumentando los beneficios de equipamientos y la cobertura de servicios, estableciendo límites de consumo de suelo, promoviendo las densidades y usos que mejor convengan al territorio.

Se señala que, esta metodología también se puede adaptar a otras ciudades y estados del país, y puede considerarse como apoyo en la elaboración de los Planes de Desarrollo y estrategias de planificación urbana a nivel estatal y nacional, de una manera informada y basada en evidencias, incentivando a las instituciones a la práctica, el fomento y desarrollo de ciudades compactas.

ANEXOS

A. Conceptos y definiciones

Año base. Se denomina año base a aquel año seleccionado como punto de partida para modelar el futuro de una ciudad. El año base debe contar con la información más reciente y completa disponible para realizar el análisis de la ciudad. En el caso de este proyecto, 2014 es el año base.

Año horizonte. El año horizonte hace referencia al periodo hacia el cual se proyectarán los escenarios. Basados en la disponibilidad de datos, para este proyecto se utiliza como horizonte el año 2038.

Parches artificializados. Polígonos obtenidos por procesos de percepción remota, que representan superficies con cobertura ocupada por estructuras edificadas, es decir: áreas residenciales, complejos industriales y comerciales, transporte y estructuras vinculadas a las carreteras principales, puertos y aeropuertos, así como los movimientos de tierras y sitios de extracción [30].

Huella urbana. Área de influencia entre los “parches artificializados del suelo urbano” no mayor a 200m [30].

Palanca de política pública. Una palanca de política pública es un proyecto, programa, instrumento o política que tiene como objetivo modificar las condiciones actuales de una sociedad o, en este caso, de una ciudad. Las palancas de política pública son útiles para simular los posibles efectos de su activación o de su interacción con otras palancas antes de tomar la decisión de aplicarlas. Al modelar sus efectos, las partes interesadas pueden tomar decisiones informadas y conformar consenso en relación con las prioridades para cada zona metropolitana.

Indicador. Los indicadores son valores numéricos que describen una condición específica de la ciudad. Tienen como objetivo proporcionar información cuantitativa de forma clara y concreta. Son variables dependientes que se construyen con información histórica, presente o proyectada a futuro. Son importantes porque permiten entender las

implicaciones de la implementación de determinada política pública bajo distintas perspectivas.

Método. Los métodos pueden definirse como procedimientos de cálculo, funciones o programas que permiten transformar palancas de política pública en indicadores. Los métodos reciben el “estado” de las palancas de política pública y una base de datos, y transforman dichos insumos en información útil para la toma de decisiones en la forma de indicadores. La base de datos se compone de datos espaciales y constantes.

Escenarios urbanos. Los escenarios urbanos son posibles “condiciones futuras” de una ciudad, resultantes de la proyección de información estadística y de la modelación de determinadas palancas de política pública.

B. Modelo de expansión tendencial

B.1 Modelos de expansión urbana

Los modelos de expansión urbana son una combinación de herramientas matemáticas y computacionales para la simulación y predicción de patrones de expansión urbana [31]. Pueden modelar escenarios que ayudan al entendimiento y creación de consensos entre los tomadores de decisiones en relación con políticas urbanas específicas. Estas políticas pueden incluir planes de inversión en transporte e infraestructura, políticas de cambio de uso de suelo y vivienda, entre otras.

Los modelos de expansión también pueden ser usados para evaluar, espacialmente, planes territoriales, crear sinergias entre varias iniciativas, desarrollar soluciones integradas y a crear consensos multi-nivel, entre otros.

B.2 Modelo de expansión de la Ciudad de Morelia

En un ejercicio anterior se realizó una simulación preliminar con horizonte hacia el año 2030. Debido a que al momento se dispone de una mayor cantidad de datos, para la entrega final se realizó una proyección hacia el año 2038, con la intención de conocer cómo se expandiría la ciudad suponiendo que no se implemente ninguna medida de política pública que dé solución a algún problema en específico. En otras palabras, esta predicción está basada en un crecimiento tendencial y siguiendo los patrones de crecimiento de años anteriores.

Dicha simulación se llevó a cabo mediante el lenguaje de programación R y su paquetería denominada LULCC (Land Use Land Cover Change), que hace uso de redes neuronales artificiales y de algoritmos estadísticos para predecir los cambios de uso de suelo o en la densidad de población.

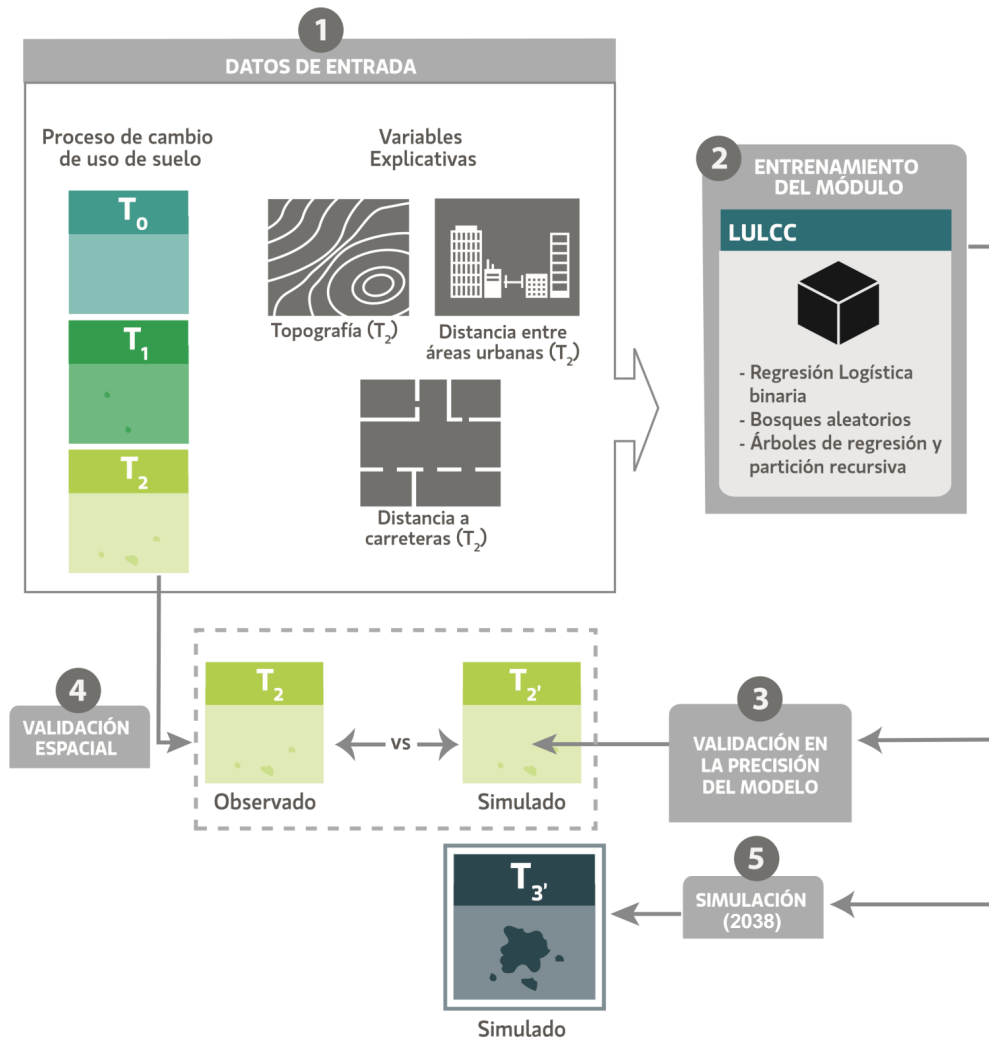
El proceso llevado a cabo para obtener el modelo de expansión proyectado para el año 2038 para la Ciudad de Morelia, puede resumirse de la siguiente manera:

1. Datos de entrada: se requiere de un conjunto de mapas base de la ciudad, con las observaciones históricas de la cobertura de usos de suelo o distribución de la población observadas en tres años distintos¹⁰ (T_0 , T_1 y T_2). Esos datos son complementados con un conjunto de variables (representadas mediante mapas espaciales) que reflejan características geográficas, socioeconómicas o físicas del ambiente urbano, esto con la finalidad de encontrar patrones de causalidad de por qué se ha llevado a cabo el cambio en determinado uso de suelo. Por ejemplo, la cercanía a áreas ya urbanizadas, a carreteras y un relieve plano pueden incentivar nuevas áreas urbanas.
2. Entrenamiento del modelo: los modelos de expansión urbana son creados mediante algoritmos estadísticos y redes neuronales artificiales. Las redes neuronales aprenden las relaciones entre las variables explicativas y los cambios en los mapas base. Al finalizar esta etapa, se obtiene un modelo entrenado para predecir cambios de uso de suelo a futuro y un coeficiente que indica si el modelo tiene un ajuste estadísticamente válido. El coeficiente de ajuste del modelo tiene un valor entre 0 y 1, siendo 1 la máxima precisión.
3. Validación de la precisión del modelo: una vez que el modelo ha sido entrenado, se realiza su validación de éste comparando el mapa base T_2 observado con el mapa T'_2 simulado.
4. Validación espacial: después de validar el poder de predicción del modelo, se procede a hacer una validación espacial, es decir, una prueba de qué tan preciso será el modelo para asignar espacialmente los píxeles con el área predicha de expansión o cambio de usos de suelo. En este caso, se compara el resultado obtenido de la simulación (mapa T'_2) contra el mapa base T_2 .
5. Simulación: finalmente, se obtiene la simulación del año objetivo (T_3), también llamado año horizonte.

La Figura B.1 sintetiza este proceso. En las siguientes secciones se detalla cada una de las etapas.

¹⁰No hay restricción en cuanto a la continuidad de los años observados.

Figura B.1: Proceso de creación del modelo de expansión Tendencial para la Ciudad de Morelia



B.3 Datos

La simulación se realiza a partir de imágenes ráster, las cuales pueden ser de tipo discreto o continuo. Las primeras corresponden a objetos que tienen límites conocidos y definibles, por ejemplo un lago dentro del paisaje que lo rodea; mientras que las segundas se caracterizan por representar fenómenos que varían progresivamente a medida que se mueven por una superficie desde un origen, tales como la elevación.

Para esta simulación, se consideraron las siguientes clasificaciones:

- Mapas base de coberturas de suelo (datos discretos)¹¹
- Variables explicativas (datos continuos)

B.3.1 Mapas base de cobertura de suelo

Los mapas base son los insumos de mayor importancia, toda vez que contienen la información de las coberturas del suelo con las cuales se simularán las transformaciones.

Se usaron imágenes satelitales¹² para hacer una clasificación de los distintos tipos de asentamientos humanos basados en la Guía Metodológica para la Elaboración y Actualización de Programas Municipales de Desarrollo Urbano, editado por SEDATU, SEMARNAT y GIZ, así como otras imágenes satelitales conocidas como capa global de asentamientos humanos GHS, que contienen el nivel de área construida en los periodos 1990, 2000 y 2014 (T_0 , T_1 y T_2), con lo cual se cuenta con una diferencia de 24 años a partir del año base, de modo que se puede proyectar hacia el año 2038¹³.

B.3.2 Variables explicativas

Las variables explicativas son factores que conducen o inciden en la manera en que se han transformado los distintos usos de suelo o el crecimiento y densidad de la población.

Para la Ciudad de Morelia se usaron las siguientes variables explicativas:

1. Topografía.
2. Distancia hacia carreteras.
3. Distancia entre áreas urbanas.

Para obtener la topografía se retomó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), elaborado por el INEGI en el año 2017. La distancia a carreteras se generó a partir de la Red Nacional de Caminos del año 2016, desarrollada por el Instituto Mexicano del Transporte en colaboración con el INEGI. Por último, para obtener la distancia entre áreas urbanas, se extrajeron los polígonos correspondientes a asentamientos humanos de la capa de coberturas del suelo y se calculó la distancia entre estos¹⁴.

¹¹Obtenidos a partir de la Guía Metodológica para la Elaboración y Actualización de Programas Municipales de Desarrollo Urbano, editado por SEDATU, SEMARNAT y GIZ, y de las imágenes satelitales de GHS.

¹²De los satélites Landsat 7 y Landsat 8.

¹³A solo tres años de diferencia del plan Morelia NExT 2041.

¹⁴La resolución de las tres variables explicativas fue ajustada al tamaño de la capa de GHS y los mapas clasificados mediante la Guía Metodológica.

B.4 Entrenamiento del modelo

El entrenamiento del modelo es llevado a cabo mediante los algoritmos estadísticos de regresión logística, bosques aleatorios y árboles de regresión y particiones recursivas.

El método de Regresión Logística busca establecer una relación entre una variable dependiente con respecto a una o más variables independientes. El resultado o variable dependiente es dicotómica, por lo que el objetivo del modelo es evaluar la probabilidad de convertirse en una de las categorías de salida a partir de un conjunto de predictores [32]. Es decir, intenta predecir la probabilidad de que una observación pertenezca a cada uno de los dos grupos. Para que tengan sentido las relaciones de causa y efecto, deben existir diversas observaciones disponibles en el tiempo.

Por otra parte, el método de Bosques Aleatorios se compone de una colección de árboles de decisión que se utilizan para controlar la varianza. Este método se puede describir como un conjunto (colección) de modelos que utilizan *bootstraps* de muestreo agregados para construir diferentes árboles de decisión, para luego combinar estos modelos en una clasificación final. De hecho, se le considera como un clasificador de referencia debido a su excelente desempeño [33]. El método Bosques aleatorios tiene varias ventajas: puede manejar un gran número de variables, se entrena rápidamente, generalmente es robusto en el tratamiento de datos atípicos y con ruido, y proporciona una forma de calcular la importancia que cada variable tiene en el modelo.

Por último, para el método de Árboles de Regresión y Partición Recursiva se entiende que la partición recursiva es un proceso paso a paso, en el cual se construye un árbol de decisiones dividiendo cada nodo del árbol en dos nodos secundarios. Una característica a destacar de este método es que debido a que el algoritmo solicita una secuencia de preguntas booleanas jerárquicas (por ejemplo, sea $X_j \leq \theta_j$, donde θ_j es un valor umbral), es relativamente simple entender e interpretar los resultados [34]. Para hacer crecer un árbol, el algoritmo inicia con el nodo raíz, el cual consiste en el conjunto de aprendizaje. Usando el criterio de “bondad de división” para una sola variable, el algoritmo de árbol encuentra la mejor división en el nodo raíz para cada una de las variables, X_1 a X_r . La mejor división en el nodo raíz se define entonces como la que tiene el valor más grande de g sobre todas las r divisiones para cada variable en el nodo.

Como resultado de cada uno de estos algoritmos obtenemos un valor de

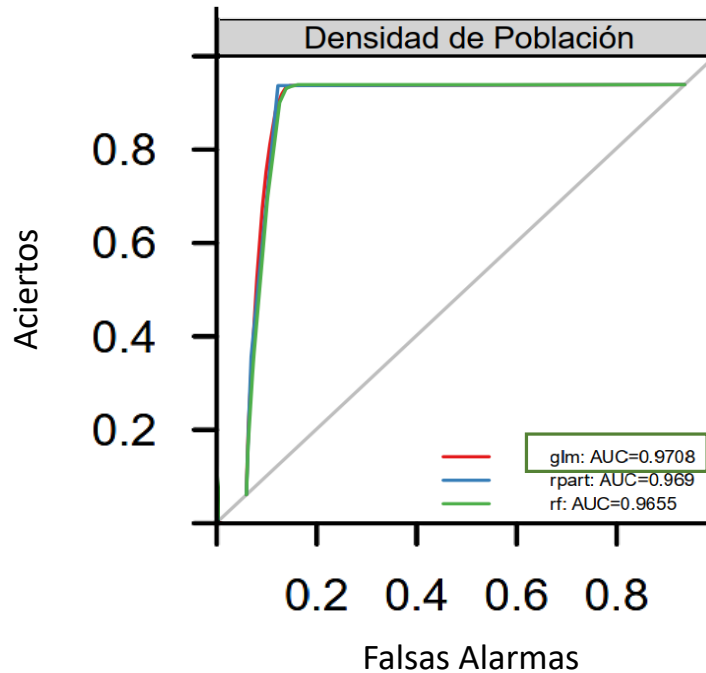
ajuste del modelo. Este valor indica la proporción en la que el modelo está interpretando correctamente las transiciones entre los usos de suelo/densidades y su relación con las variables explicativas.

B.5 Validación del entrenamiento del modelo

El modelo generado en la fase de entrenamiento es evaluado para conocer su porcentaje o grado de exactitud en cuanto a la predicción en los cambios de uso de suelo o densidad. El entrenamiento es realizado considerando las observaciones de los años T_0 y T_1 , dando como resultado una simulación para el T_2' . Posteriormente, se realiza la validación entre T_2 y T_2' , es decir entre datos observados y datos simulados.

La validación se realiza considerando el área bajo la curva. Este método permite evaluar el desempeño de los modelos estadísticos mediante el análisis de su predicción en relación con las celdas en las cuales habrá cambios en el uso de suelo entre dos puntos en el tiempo. Es decir, evalúa qué tan bien los modelos predicen los pixeles o celdas en los cuales habrá un cambio entre dos momentos en el tiempo. En este sentido, podemos obtener valores entre 0.5 y 1, donde 1 indica un ajuste perfecto, pues lo ha hecho correctamente el 100% de las veces, mientras que los valores cercanos a 0.5 son menos precisos [35]. En la Figura B.2 se muestran los porcentajes con el grado de exactitud para la predicción en el cambio de densidad de la población, mediante tres diferentes algoritmos estadísticos. Se puede observar que el algoritmo con la mejor precisión es regresión logística con un 0,9708/1.

Figura B.2: Resultados de la Validación del Modelo



glm: Regresión Logística, *rpart*: Árboles de Regresión, *rf*: Bosques Aleatorios.

B.6 Validación espacial

Para la validación espacial se retoman los modelos de uso de suelo espacialmente explícitos -es decir, que dependen del espacio-, los cuales se validan comparando el mapa inicial observado (T_0), contra dos mapas, el mapa final observado (T_2) y el mapa final simulado (T'_2). Este procedimiento da como resultado fuentes de acuerdo y desacuerdo entre los tres mapas, de tal forma que una puntuación de 1 (o 100%) indica un acuerdo perfecto y una puntuación de cero indica que no hay acuerdo [36].

El porcentaje de exactitud obtenido contra el mapa simulado (T'_2) es del 83%, dando una media de 0.9004 entre el poder predictivo del modelo y la asignación espacial.

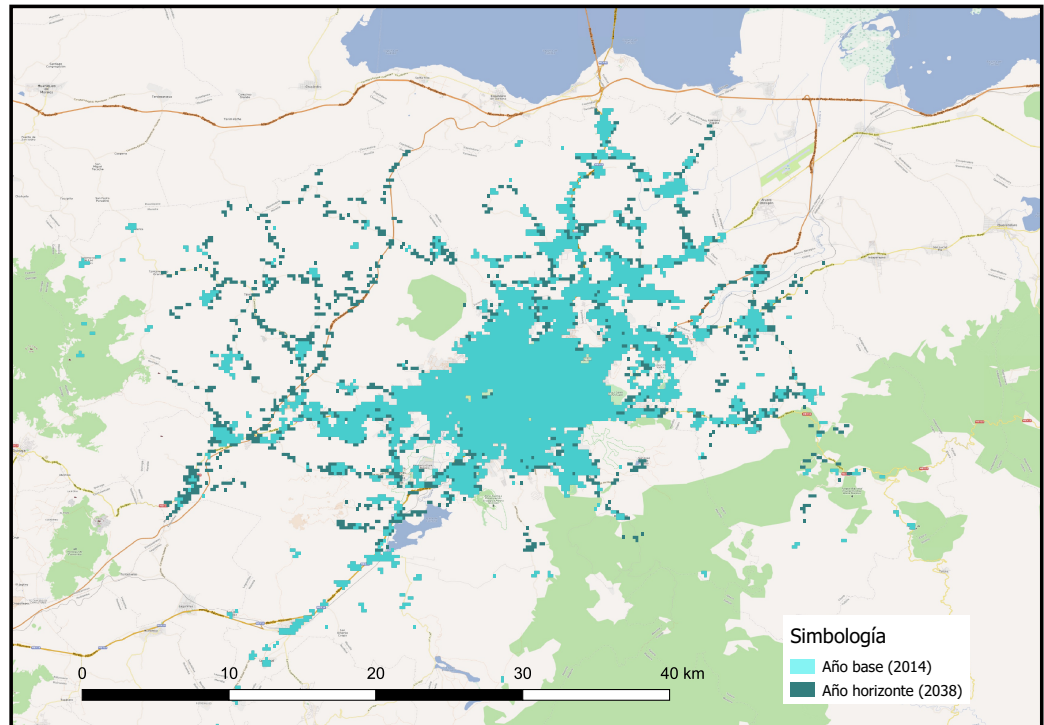
B.7 Simulación (2038)

Una vez que el desempeño de los modelos es evaluado (entrenamiento del modelo y validación espacial), se realiza la simulación para el año 2038. La

expansión de área urbana de la Zona Metropolitana de Morelia en el año base (2014) es de aproximadamente 226.5 km², mientras que la expansión resultante del año horizonte (2038) tiene una superficie aproximada de 328.19 km².

La Figura B.3 muestra la zona urbana en el año 2014 y su crecimiento proyectado para el año 2038.

Figura B.3: Área de expansión 2014 vs. 2038 de la Zona Metropolitana de Morelia



C. Indicadores: utilizados

Métodos

Los indicadores seleccionados para analizar los escenarios de densificación urbana en la Ciudad de Morelia consideran los siguientes métodos de cálculo y fuentes de información:

C.1 Proximidad a equipamiento urbano

Descripción

Porcentaje de la población con acceso a cada uno de los siguientes equipamientos urbanos y amenidades públicas: escuelas (primaria, secundaria o preparatoria), universidades, centros de salud (clínicas y hospitales), guarderías, edificios públicos, espacios culturales (centros comunitarios, bibliotecas, teatros), lugares de culto, mercados, instalaciones deportivas y espacios públicos. Se calcula un indicador para cada servicio urbano o amenidad.

Unidades de medición

Porcentaje de la población total de la ciudad [%]

Metodología

Se calcula un indicador para cada uno de los siguientes tipos de amenidad: escuela, universidad, centro de salud, guardería, edificio público, espacio cultural, lugar de culto, mercado, espacio público y deportivo. La proximidad para cada tipo de equipamiento se calcula dividiendo la población (**pop_prox_{am_i}**) que vive entre la distancia máxima recomendada para ese tipo de equipamiento (**max_dist_i**), entre la población total de la ciudad (**tot_pop**). La Tabla C.1 muestra la distancia máxima considerada para cada indicador.

Fórmula

$$\text{amen_prox}_i = (\text{pop_prox_am}_i) / \text{tot_pop}$$

Tabla C.1: Tipos de equipamiento y distancia máxima recomendada

Tipo	Equipamiento	Distancia máxima
Escuela primaria	Escuela primaria pública	1,000 m
Espacio deportivo	Campo deportivo o canchas, alberca	500 m
Equipamiento de salud	Clínica, médico, hospital	1,500 m
Guardería	Guardería pública	700 m
Espacio cultural	Centro comunitario, biblioteca, instalaciones sociales, teatro	1,000 m
Espacio público	Parque, jardín, espacio público	700 m
Tienda de abasto	Comercio de abarrotes, supermercado y minisuper	700 m

$$\text{pop_prox_am}_i = \sum \text{pop si distancia al equipamiento} \leq \text{max_dist}_i$$

Datos y fuentes de información utilizadas

- tot_pop: 879,774 habitantes en 2014 [37] y 970,043 habitantes proyectados para 2038 (incremento de 90,269 habitantes) [38].
- footprint_base: 226.50 km², área del polígono formado por las AGEB urbanas del Censo de Población y Vivienda 2010 [25].

C.2 Consumo de suelo

Descripción

Cantidad de suelo que se estima cambiará de no urbano a urbano entre el año base y el año horizonte¹⁵.

Unidades de medición

km²

Metodología

El consumo de suelo (**land_consumption_km**) se calcula mediante la diferencia entre la huella urbana del año horizonte (**footprint_km2**) y la huella urbana del año base (**footprint_base**). La huella de la ciudad se refiere a la superficie construida total de una ciudad, incluyendo calles, espacios abiertos y predios baldíos.

La huella urbana de la ciudad en el año horizonte se calcula de acuerdo con las condiciones de cada escenario.

Fórmula

$$\text{land_consumption_km} = \text{footprint_km2} - \text{footprint_base}$$

¹⁵El único escenario que puede expandirse sin restricciones es el escenario Tendencial. Los escenarios que utilizan otras palancas de acomodo de población no se expanden en áreas naturales protegidas ni en zonas de producción agrícola.

Datos y fuentes de información utilizadas

- footprint_base: 226.5 km², área del polígono formado por las AGEB urbanas del Censo de Población y Vivienda 2010 [25].

C.3 Densidad de población

Descripción

Número total de habitantes por área construida de ciudad, expresada como habitantes por kilómetro cuadrado.

Unidades de medición

habitantes/km²

Metodología

La densidad de población (**dens_pop**) se calcula dividiendo el número total de habitantes de la ciudad (**tot_pop**) entre el área total en kilómetros cuadrados de la huella urbana de la ciudad (**footprint_km2**). La huella de la ciudad se refiere a la superficie construida total de una ciudad, incluyendo calles, espacios abiertos y predios baldíos. La huella urbana de la ciudad en el año horizonte se calcula de acuerdo con las condiciones de cada escenario.

Fórmula

$$\text{dens_pop} = \text{tot_pop} / \text{footprint_km}^2$$

Datos y fuentes de información utilizadas

- tot_pop: 879,774 habitantes en 2014 [37] y 970,043 habitantes proyectados para 2038 (incremento de 90,269 habitantes) [38].
- footprint_km2: Calculada de acuerdo con el escenario. Para el resto de los escenarios se calcula conforme a las palancas de planificación del crecimiento urbano.

C.4 Proximidad a fuentes de empleo

Descripción

Porcentaje de la población que vive a una distancia caminable de las áreas de la ciudad con una densidad de empleo igual o mayor a 10 empleos por hectárea.

Unidades de medición

Porcentaje de la población total de la ciudad [%]

Metodología

Este indicador identifica las áreas de la ciudad en donde se concentra el empleo y después cuantifica la población que vive cerca a estas áreas como un porcentaje de la población total de la ciudad. Este proceso se divide en 4 etapas:

En primer lugar, la densidad de empleo es cuantificada para cada manzana urbana o punto de análisis dentro de una retícula de 250x250 metros. La densidad de empleo (**job_density**) se mide a partir del número de empleos en un radio de 1,000 metros dividido entre el área de ese círculo (314.16 hectáreas).

En segundo lugar, un *buffer* de la distancia máxima recomendada (**max_dist_job**) es creado desde el centro de cada punto de análisis con una densidad de trabajo igual o mayor que la densidad de trabajo mínima recomendada (**min_job_density**).

En tercer lugar, se suma la población (**pop**) de todas las manzanas y los puntos de análisis contenidos en el buffer. Esta es la población que vive cerca de las áreas con alta densidad de empleo (**pop_prox_job**).

La cuarta etapa consiste en dividir este rango de población entre la población total de la ciudad (**tot_pop**) para obtener el porcentaje de población que vive cercana al empleo (**job_prox**).

Fórmula

$$\text{job_prox} = \text{pop_prox_job} / \text{tot_pop}$$

pop_prox_job = \sum pop si la distancia al más cercano de los puntos donde $\text{job_density} > \text{min_job_density}$ es igual o menor que max_dist_job

C.5 Proximidad a transporte público

Descripción

Porcentaje de la población que vive a una distancia caminable del transporte público. Se considera que la población está dispuesta a caminar hasta 800 metros para un transporte estructurado como el metro o BRT y hasta 300 metros para un transporte no estructurado como camiones, micros y combis.

Unidades de medición

Porcentaje de la población total de la ciudad [%]

Metodología

La proximidad al transporte público (**transit_prox**) es calculada al dividir la población (**pop_prox_transit**) que vive dentro de la distancia máxima

recomendada a una estación pública de transporte (**max_dist_transit**), entre la población total (**tot_pop**).

Primero, se crea un buffer de la distancia máxima recomendada (**max_dist_transit**) desde el centro de cada estación pública de transporte.

En segundo lugar, se agrega la población (**pop**) de todos los barrios o bloques contenidos en el buffer para obtener la población que vive cerca del transporte público (**pop_prox_transit**).

En tercer lugar, esta población es dividida entre la población total de la ciudad (**tot_pop**) para obtener así el porcentaje de la población que vive cerca del transporte público (**transit_prox**).

Fórmula

$$\text{transit_prox} = \text{pop_prox_transit} / \text{tot_pop}$$

$$\text{pop_prox_transit} = \sum \text{pop si distancia al transporte} \leq \text{max_dist_transit}$$

Datos y fuentes de información utilizadas

- max_dist_transit: 300 m, considerada como distancia máxima que los habitantes están dispuestos a caminar para abordar el transporte público no estructurado.
- tot_pop: 879,774 habitantes en 2014 [25] y 970,043 habitantes proyectados para 2038 (incremento de 90,269 habitantes) [38].
- footprint_base: 226.5 km², área del polígono formado por las AGEB urbanas del Censo de Población y Vivienda 2010 [25].

C.6 Costos de infraestructura

Descripción

Inversión total requerida para la construcción de las vialidades vehiculares y peatonales, la red de agua y drenaje, alumbrado público y la red eléctrica de los kilómetros cuadrados que se expandirá la ciudad, así como la inversión requerida para incrementar la capacidad de las redes de agua, drenaje y electricidad existentes en las áreas de la ciudad donde su población se duplique.

Unidades de medición

MXN

Metodología

Los costos por infraestructura (**infrastructure_costs**) son la suma de los

costos generados para expandir la ciudad (**infrastructure_new_costs**) y los requeridos para incrementar la capacidad de la infraestructura existente en las zonas intraurbanas donde aumenta la población (**infrastructure_infill_costs**).

Para calcular los costos de expansión (**infrastructure_new_costs**) se genera un costo paramétrico por construir las vialidades y redes de infraestructura de un kilómetro cuadrado de nueva ciudad y se multiplica por los kilómetros cuadrados totales que crecerá la ciudad en el año horizonte (**land_consumption_km**). El costo por kilómetro cuadrado se compone de la suma de los costos paramétricos por construir un kilómetro de calle primaria (**cost_prim_road**), secundaria (**cost_sec_road**), terciaria (**cost_ter_road**), red de agua potable (**cost_water**), red de drenaje (**cost_swge**), red eléctrica (**cost_elec**) y red de alumbrado público (**cost_light**), multiplicados por los kilómetros lineales que existen por cada kilómetro cuadrado de ciudad en el año base (**prim_road_km2 + sec_road_km2 + ter_road_km2**).

Los costos de mejoramiento intraurbano (**infrastructure_infill_costs**) se considera la suma de los costos paramétricos para duplicar la capacidad de un kilómetro lineal de red de agua (**retro_watr**), drenaje (**retro_swge**) y electricidad (**retro_elec**), multiplicada por la suma de los kilómetros lineales que existen por cada kilómetro cuadrado de ciudad en el año base (**prim_road_km2 + sec_road_km2 + ter_road_km2**) y por los kilómetros cuadrados de ciudad a mejorar (**infill_area_km2**). El área total a mejorar es la suma de aquellas manzanas urbanas donde la población entre el año base y el año horizonte se duplica.

Fórmulas

$$infrastructure_costs = infrastructure_new_costs + infrastructure_infill_costs + infrastructure_costs_consolidation$$

$$infrastructure_new_costs = ((cost_prim_road * prim_road_km2 + cost_sec_road * sec_road_km2 + cost_ter_road * ter_road_km2) + (cost_light + cost_water + cost_swge + cost_elec) * (prim_road_km2 + sec_road_km2 + ter_road_km2)) * land_consumption_km$$

$$infrastructure_infill_costs = (retro_watr + retro_swge + retro_elec) * (prim_road_km2 + sec_road_km2 + ter_road_km2) * infill_area_km2$$

Donde:

$$prim_road_km2 = prim_road_km / footprint_base$$

$$sec_road_km2 = sec_road_km / footprint_base$$

$$ter_road_km2 = ter_road_km / footprint_base$$

Datos y fuentes de información utilizadas

- cost_prim_road: 7,594,952 MXN/km
- cost_sec_road: 5,895,742 MXN/km
- cost_ter_road: 3,964,822 MXN/km
- cost_light: 103,370,345 MXN/km
- cost_water: 675,000 MXN/km
- cost_swge: 579,276 MXN/km
- cost_elec: 3,726,435 MXN/km
- land_consumption_km: ver Sección C.2

C.7 Emisiones de GEI

Descripción

Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por persona al año relacionadas con el consumo de energía en alumbrado público, suministro de agua municipal, recolección de residuos sólidos urbanos, electricidad en las viviendas y traslado de los habitantes en transporte público o privado.

Unidades de medición

kgCO₂eq/cápita/año

Metodología

Las emisiones promedio anuales de GEI por persona (**ghg_tot**) son el resultado de multiplicar el consumo anual de energía por el factor de emisión de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) de cada tipo de energía. Los factores de emisión se refieren a la cantidad liberada por unidad de energía consumida. Para el factor de energía eléctrica (**carbon_factor_elect**) se utiliza el correspondiente a la mezcla eléctrica nacional. Los factores de gasolina (**carbon_factor_gasoline**) y diésel (**carbon_factor_diesel**) se utilizan para estimar las emisiones del consumo de combustibles en el transporte.

Los tipos de energía considerados son: electricidad para suministrar agua municipal (**energy_water**), electricidad para alumbrado público (**energy_lighting**), electricidad promedio consumida en las viviendas de la ciudad (**energy_buildings**), energía por el diésel consumido por los camiones del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos (**energy_swaste**), energía por el diésel (**energy_diesel**) y gasolina (**energy_gasoline**) consumidos por transporte público o privado dentro de la ciudad para

transportar personas. El cálculo de energía consumida por cada tipo se describe en el indicador Consumo de energía (Sección C.8). Todos los consumos de energía son anualizados y por persona, es decir, sus unidades son kWh/cápita/año, por lo que el resultado de emisiones también es anual y per cápita.

Fórmula

$$ghg_{tot} = (energy_water + energy_lighting + energy_buildings) * carbon_factor_elect + energy_gasoline * carbon_factor_gasoline + (energy_diesel + energy_swaste) * carbon_factor_diesel - carbon_sec/tot_pop$$

Datos y fuentes de información utilizadas

- emission_fact: 0.458 kgCO₂eq/kWh [29].
- carbon_factor_gasoline: 0.25 kgCO₂eq/kWh [39].
- carbon_factor_diesel: 0.27 kgCO₂eq/kWh [39].
- energy_water, energy_lighting, energy_buildings, energy_swaste, energy_gasoline, energy_diesel: se obtienen conforme al cálculo de las secciones C.8.1, C.8.2, C.8.5, C.8.3, C.8.4 correspondientemente.

C.8 Consumo de energía

Descripción

Energía total promedio consumida por persona al año en alumbrado público, suministro de agua municipal, manejo de residuos sólidos urbanos, electricidad en las viviendas y traslado de los habitantes en transporte público o privado.

Unidades de medición

Kilowatt hora por persona al año [kWh/cápita/año]

Metodología

El cálculo de la energía consumida (**energy_consumption**) abarca la energía que se requiere para proporcionar el servicio de alumbrado público (**energy_lighting**), suministro de agua municipal (**energy_water**) y recolección de basura (**energy_swaste**), así como la energía eléctrica consumida en promedio por las viviendas de la ciudad (**energy_buildings**) y por los habitantes para transportarse dentro de la ciudad (**ener_transport**) ya sea en transporte público o privado. El cálculo de cada uno de estos consumos se describe como un sub-indicador por separado en las secciones C.8.1, C.8.2, C.8.3, C.8.4, C.8.5.

Fórmula

$ener_consumption = energy_water + energy_lighting + energy_swaste + ener_transport + energy_buildings$

Datos y fuentes de información utilizadas

- energy_water, energy_lighting, energy_buildings, energy_swaste, energy_gasoline, energy_diesel: se obtienen conforme al cálculo de las secciones C.8.1, C.8.2, C.8.5, C.8.3, C.8.4 correspondientemente.

C.8.1 Consumo de energía para suministro de agua

Descripción

Consumo anual per cápita de energía eléctrica requerida para suministrar el volumen de agua consumido por las viviendas de la ciudad. Incluye las pérdidas de agua debido a las fugas de la red de suministro municipal.

Unidades de medición

Kilowatt hora por persona al año [kWh/cápita/año]

Metodología

El consumo anual de energía para suministrar agua (**energy_water**) se calcula multiplicando la energía requerida para suministrar y distribuir un metro cúbico de agua (**water_factor**), por la suma del volumen de agua total consumido por las viviendas de la ciudad (**tot_water * tot_pop**) y el volumen de agua perdido por fugas, y dividiendo finalmente por la población total de la ciudad (**tot_pop**) para obtener un valor per cápita. El cálculo del consumo de agua de las viviendas se explica en la sección

Las pérdidas se estiman de acuerdo con los kilómetros de la red de agua municipal de la ciudad. Los kilómetros de calles que habrá en el año horizonte se calculan sumando los kilómetros de vialidades primarias, secundarias y terciarias existentes por kilómetro cuadrado en el año base (**prim_road_km2 + sec_road_km2 + ter_road_km2**) y multiplicando este total por la superficie en kilómetros cuadrados que se proyecta como huella urbana en el año horizonte (**footprint_km2**). Los kilómetros totales de vialidades se multiplican por el factor de pérdidas (loss) que reporta el organismo operador de agua para obtener las pérdidas anuales promedio.

Fórmula

$energy_water = water_factor * (tot_water * tot_pop + footprint_km2 * (prim_road_km2 + sec_road_km2 + ter_road_km2) * loss) / tot_pop$

Donde:

$prim_road_km2 = prim_road_km / footprint_base$

$sec_road_km2 = sec_road_km / footprint_base$

$ter_road_km2 = ter_road_km / footprint_base$

Datos y fuentes de información utilizadas

- water_factor: 2.07 kWh/m³ [40]
- loss: 12,812.50 m³/km/año
- tot_water: calculada en el indicador C.9 Consumo de agua.
- tot_pop: 879,774 habitantes en 2014 [37] y 970,043 habitantes proyectados para 2038 (incremento de 90,269 habitantes) [38].
- footprint_km2: Calculada de acuerdo con el escenario.
- prim_road_km: 9.15 km (longitud total de vialidades dentro de la mancha urbana del año base clasificadas como *primary*, *primary_link*, *trunk*, *trunk_link*, *motorway*, *motorway_link*)
- sec_road_km: 1925.61 km (longitud total de vialidades dentro de la mancha urbana del año base clasificadas como *secondary*, *secondary_link*)
- ter_road_km: 111.636 km (longitud total de vialidades dentro de la mancha urbana del año base clasificadas como *tertiary*, *residential*, *unclassified*, *tertiary_link*, *construction*, *path*, *road*, *service*, *track*, *cycleway*)
- footprint_base: 226.5 km², área del polígono formado por las AGEB urbanas del Censo de Población y Vivienda 2010 [25].

C.8.2 Consumo de energía para alumbrado público

Descripción

Consumo promedio anual per cápita de energía eléctrica para alumbrar todas las calles de la ciudad. Considera que todas las calles que se construyan entre el año base y el año horizonte contarán con alumbrado público.

Unidades de medición

Kilowatt hora por persona al año [kWh/cápita/año]

Metodología

Para obtener el consumo per cápita de energía para alumbrado público (**energy_lighting**) se calcula primero la energía requerida de acuerdo con el número total de luminarias (**tot_bulb**), cuántas de éstas son LED (**num_led**),

el consumo (voltaje) de los focos LED (**volt_led**) y de los convencionales (**volt_bulb**), el número promedio de horas al día que las luminarias están encendidas (h) y los 365 días para calcular la energía anual que requiere la iluminación de las calles.

Este total se divide por el total de kilómetros de vialidades primarias, secundarias y terciarias en la ciudad (**prim_road_km+sec_road_km+ter_road_km**) para obtener la energía promedio requerida para alumbrar un kilómetro de calle.

Debido a que no se conoce el número preciso de kilómetros de vialidades que la ciudad tendrá en un futuro, este número se estima multiplicando los kilómetros cuadrados que se proyecta que la ciudad tendrá en el año horizonte (**footprint_km2**) por los kilómetros de las vialidades primarias, secundarias y terciarias por kilómetro cuadrado que tiene la ciudad en el año base (**prim_road_km2+sec_road_km2+ter_road_km2**).

Por último, la energía requerida por kilómetro de calle se multiplica por el estimado de kilómetros de calle y se divide entre la población total (**tot_pop**) para obtener el consumo de energía anual per cápita para alumbrado público.

Fórmula

$$energy_lighting = ((tot_bulb - num_led) * volt_bulb + num_led * volt_led) * hours_day * 365 / (prim_road_km + sec_road_km + ter_road_km + ped_road_km) * (prim_road_km2 + sec_road_km2 + ter_road_km2) * footprint_km2 / tot_pop$$

Donde:

$$prim_road_km2 = prim_road_km / footprint_base$$

$$sec_road_km2 = sec_road_km / footprint_base$$

$$ter_road_km2 = ter_road_km / footprint_base$$

Datos y fuentes de información utilizadas

- volt_bulb: 0.28 kW
- volt_led: 0.139 kW
- hours_day: 12 horas
- tot_pop: 879,774 habitantes en 2014 [25] y 970,043 habitantes proyectados para 2030 (incremento de 90,269 habitantes) [38].
- footprint_km2: Calculada de acuerdo con el escenario.
- prim_road_km: 9.15 km (longitud total de vialidades dentro de la mancha

urbana del año base clasificadas como *primary*, *primary_link*, *trunk*, *trunk_link*, *motorway*, *motorway_link*)

- *sec_road_km*: 1,925.61 km (longitud total de vialidades dentro de la mancha urbana del año base clasificadas como *secondary*, *secondary_link*)
- *ter_road_km*: 111.363 km (longitud total de vialidades dentro de la mancha urbana del año base clasificadas como *tertiary*, *residential*, *unclassified*, *tertiary_link*, *construction*, *path*, *road*, *service*, *track*, *cycleway*)
- *footprint_base*: 226.5 km², área del polígono formado por las AGEB urbanas del Censo de Población y Vivienda 2010 [25].

C.8.3 Consumo de energía para recolección de residuos sólidos urbanos

Descripción

Promedio per cápita anual del consumo de energía asociado al sistema de gestión de residuos sólidos de la ciudad, incluyendo recolección, transporte y energía consumida tanto en el vertedero como en las estaciones de transferencia.

Unidades de medición

Kilowatt hora por persona al año [kWh/cápita/año]

Metodología

La energía consumida asociada al sistema de gestión de residuos (**energy_waste**) abarca la energía consumida en cada paso del sistema de gestión: la recolección de los residuos sólidos (**collection_energy**), su transporte a la estación de transferencia y/o vertedero (**transport_energy**), la energía consumida en la estación de transferencia (**TS_energy**) y la energía utilizada en el vertedero (**landf_energy**). El resultado de la suma es dividido entre la población total (**tot_pop**).

El primer paso consiste en calcular la energía utilizada durante la etapa de recolección (**collection_energy**). Esto incluye la eficiencia del camión recolector (**truck1_ef**) en litros de diésel consumido por km, multiplicado por la densidad de diésel (**diesel_den**), el valor calorífico del diésel (**diesel_cv**) y el total de kilómetros recorridos en un año, el cual se estima multiplicando los kilómetros de las vialidades primarias por km² (**prim_road_km2**) por el porcentaje de vías primarias utilizadas por el camión (**prim_road_fact**) mas los kilómetros de vialidades secundarias por km² (**second_road_km2**) multiplicados por el porcentaje de vías secundarias utilizadas por el camión (**sec_road_fact**) mas los kilómetros de vialidades terciarias por km²

(ter_road_km2) multiplicados por el porcentaje de vías terciarias utilizadas por el camión **(ter_road_fact)**.

Todo lo demás es multiplicado por el número de veces que el camión recolecta basura a la semana **(collections)** y por las semanas del año. Después, este resultado es multiplicado por el total de área urbanizada **(footprint_km2)** para obtener la energía utilizada por el camión al año.

Adicionalmente, es importante agregar la energía utilizada por el sistema de compactación del camión, para poder realizar este cálculo es necesario multiplicar la eficiencia de compactación en m³ de diésel por los m³ de basura **(comp_ef)** por la densidad de diésel **(diesel_den)** y el valor calorífico de diésel **(diesel_cv)**.

Después se multiplica el resultado por el total de población **(tot_pop)** multiplicado por la generación de residuos por persona por día **(waste_per)** multiplicado por 365 días al año y al final se divide entre la densidad de residuos **(waste_density)**.

La segunda etapa es la energía utilizada por el transporte de residuos **(transport_energy)** del centro de la ciudad a las estaciones de transferencia y de las estaciones de transferencia al vertedero, de no existir estaciones de transferencia se asume que el transporte se lleva a cabo del centro de la ciudad al área del vertedero. La primera parte asume que no existen estaciones de transferencia e incluye la eficiencia del camión recolector **(truck1_ef)** convertida en m³ por kilómetro multiplicado por la densidad del diésel **(diesel_den)** y el valor calorífico del diésel **(diesel_cv)**.

Después se multiplica por el volumen total de residuos recolectado al año **(tot_wvol)** dividido entre la capacidad del camión colector **(truck1_cap)**, multiplicado por el promedio de las distancias del centro de la ciudad al vertedero o vertederos **(dist_land)**.

La segunda parte del cálculo asume que existe una o más estaciones de transferencia, por lo tanto se repite el proceso de la primera parte pero multiplicado por el promedio de las distancias del centro de la ciudad a las estaciones de transferencia **(dist_ts)** mas la eficiencia del camión de la estación de transferencia **(truck2_ef)** convertida a m³ por kilómetro multiplicado por la densidad del diésel **(diesel_den)** y el valor calorífico del diésel **(diésel_cv)** multiplicado por la población total **(tot_pop)**, la generación de residuos por persona al día **(waste_per)** multiplicado por 365 días al año y dividido entre la capacidad del camión de la estación de transferencia **(truck2_cap)** multiplicado por el promedio de las distancias desde las estaciones de transferencia al vertedero **(dist_tsland)**.

La tercera etapa es la energía consumida en las estaciones de transferencia (**TS_energy**) la cual incluye la multiplicación de la población total (**tot_pop**) por los residuos generados por persona al día (**waste_per**) multiplicado por 365 días al año, multiplicado por la energía consumida por la maquinaria de segregación de residuos (**energy_tonTS**).

La cuarta y última etapa consisten en el cálculo de energía consumida en el vertedero. Este cálculo se obtiene al multiplicar la población total (**tot_pop**) por la generación de residuos por persona al día (**waste_per**) multiplicado por 365 días al año, dividido entre la eficiencia del vertedero en toneladas al año (**land_ef**), el resultado se multiplica por la eficiencia de los camiones utilizados en el vertedero (**trucks3_ef**).

Fórmula

$$energy_swaste = (collection_energy + transport_energy + TS_energy + landf_energy) / tot_pop$$

$$collection_energy = truck1_ef / 1000 * diesel_den * diesel_cv * (prim_road_km2 * prim_road_fact / 100 + sec_road_km2 * sec_road_fact / 100 + ter_road_km2 * ter_road_fact / 100) * collections * 52 * footprint_km2 + comp_ef / 1000 * diesel_den * diesel_cv * tot_pop * waste_per * 365 / 1000 / waste_density$$

$$transport_energy = (((truck1_ef / 1000) * diesel_den * diesel_cv) * (((tot_pop * waste_per * 365) / 1000)) / truck1_cap) * dist_land + (((truck1_ef / 1000) * diesel_den * diesel_cv) * (((tot_pop * waste_per * 365) / 1000)) / truck1_cap) * dist_ts + (((truck2_ef / 1000) * diesel_den * diesel_cv) * (((tot_pop * waste_per * 365) / 1000)) / truck2_cap) * dist_tsland$$

$$TS_energy = ((tot_pop * waste_per * 365) / 1000) * energy_tonTS$$

$$landf_energy = (((tot_pop * waste_per * 365) / 1000)) / land_ef * truck3_ef$$

C.8.4 Consumo de energía para transporte urbano

Descripción

Promedio total de energía consumida por persona durante un año en traslados dentro de la ciudad, ya sea en transporte público o vehículo privado.

Unidades de medición

Kilowatt hora por persona al año [kWh/cápita/año]

Metodología

El consumo de energía asociado al transporte (**energy_transport**) es calculado al sumar la energía consumida según el tipo de combustible disponible para los vehículos de transporte de la ciudad (**energy_diesel** y

energy_gasoline) dividido entre la población total (**tot_pop**). El consumo general en la ciudad, por tipo de combustible, es la suma de la energía consumida en todos los puntos de análisis de la ciudad. La energía asociada al transporte por tipo de combustible en cada punto de análisis fue calculado al multiplicar los costos incurridos de cada tipo de combustible (**transport_cost_diesel y gasoline**) por persona, multiplicado por la población en el punto de análisis, por un factor que los convierta a energía. Este factor combina el valor calorífico del diésel y de la gasolina (**diesel_cv y gasoline_cv**) así como la densidad del diésel y de la gasolina.

El costo del transporte asociado a cada tipo de combustible fue calculado al multiplicar el transporte (**transport_cost**) por la fracción que representa cada tipo de transporte de todo el conjunto (**gasoline_transp_frac y diesel_transp_frac**). Los costos del transporte fueron calculados para cada punto de análisis aplicando un modelo de regresión lineal multivariable desarrollado con inversión e información proveniente de México. Las unidades resultantes del modelo son los costos incurridos por hogar al trimestre en pesos mexicanos. Como las unidades deseadas son en la divisa local, por persona y por año, este resultado se multiplica por los 4 trimestres del año, el tipo de cambio de la divisa deseada (**IDMXN_exrate**), la inflación promedio del peso mexicano desde la fecha en que se desarrolló el modelo hasta la fecha actual (**avge_inflation**) y finalmente se divide entre el tamaño promedio de las familias en la ciudad (**hu_size**).

Fórmula

$$\mathbf{energy_transport} = (\text{sum}(\mathbf{energy_diesel}_i) + \text{sum}(\mathbf{energy_gasoline}_i)) / \mathbf{tot_pop}$$

$$\mathbf{energy_diesel} = \text{sum}(\mathbf{energy_diesel}_i) / \mathbf{tot_pop}$$

$$\mathbf{energy_gasoline} = \text{sum}(\mathbf{energy_gasoline}_i) / \mathbf{tot_pop}$$

$$\mathbf{energy_diesel}_i = \mathbf{pop}_i * \mathbf{transport_cost_diesel}_i * (\mathbf{diesel_cv} / \mathbf{diesel_cost} * \mathbf{diesel_density} / 1000)$$

$$\mathbf{energy_gasoline}_i = \mathbf{pop}_i * \mathbf{transport_cost_gasoline}_i * (\mathbf{gasoline_cv} / \mathbf{gasoline_cost} * \mathbf{gasoline_density} / 1000)$$

$$\mathbf{transport_cost_diesel}_i = \mathbf{transport_cost}_i * \mathbf{diesel_transp_frac} / 100$$

$$\mathbf{transport_cost_gasoline}_i = \mathbf{transport_cost}_i * \mathbf{gasoline_transp_frac} / 100$$

$$\mathbf{transport_cost}_i = \max(0, [4 / \mathbf{IDMXN_exrate} * (1 + \mathbf{avge_inflation} / 100) * (-620.06 + 3.06 * \mathbf{transit_distance} + (-19.10) * \mathbf{job_density_avge} + (-0.69) * \mathbf{pop_density_avge} + 213.09 * \mathbf{avge_area} + 661.16 * \mathbf{socioeco_level})] / \mathbf{hu_size})$$

C.8.5 Consumo de electricidad en viviendas

Descripción

Promedio anual de consumo de energía en viviendas per cápita.

Unidades de medición

Kilowatt hora por persona al año [kWh/cápita/año]

Metodología

La energía anual consumida por persona en la vivienda (**energy_buildings**) refleja el ahorro de energía esperado al implementar un código de edificación verde en los hogares que serán construidos entre el año base y el año horizonte (**HU_new**). Esto se estima multiplicando el número de viviendas existentes en el año base (**HU_existing**) por el promedio de consumo de energía por vivienda establecido como línea base (**ener_baseline**), más la multiplicación de las viviendas nuevas (**HU_new**) por el porcentaje de penetración del código de edificación verde (**GBC_pen/100**) por la reducción de consumo de energía por hogar (**GBC_ener**), más la multiplicación de viviendas nuevas (**HU_new**) por el porcentaje que no implemente el código de edificación verde (**1-GBC_pen/100**) por la línea base definida para el consumo de energía de las viviendas (**ener_baseline**). El volumen resultante se divide entre la población total (**tot_pop**) para obtener el consumo de energía anual de la vivienda per cápita (**energy_buildings**).

El número de viviendas nuevas (**HU_new**) se estima por la diferencia entre la población total en el año horizonte (**tot_pop_h**) y el total de población en el año base (**tot_pop_b**) dividido entre el número promedio de habitantes por vivienda.

Fórmula

$$\text{energy_buildings} = (\text{HU_existing} * \text{ener_baseline} + (\text{HU_new} * (1 - \text{GBC_pen}/100) * \text{ener_baseline} + \text{HU_new} * \text{GBC_pen}/100 * \text{GBC_ener})) / \text{tot_pop}$$
$$\text{HU_existing} = \text{HU_tot_b}$$
$$\text{HU_new} = (\text{tot_pop_h} - \text{tot_pop_b}) / \text{hu_size}$$

C.9 Consumo de agua

Descripción

Volumen total promedio que se consume por habitante al año en las viviendas de la ciudad.

Unidades de medición

m³/cápita/año

Metodología

El volumen total de agua per cápita consumido anualmente (**tot_water**) refleja el ahorro de agua esperado al implementar un código de edificación sustentable en parte de las viviendas nuevas que serán construidas entre el año base y el año horizonte (**HU_new**). Este cálculo se estima al multiplicar el número de viviendas existentes en el año base (**HU_existing**) por el consumo promedio de agua por vivienda establecido como línea base (**HU_water0**), más la multiplicación de las viviendas nuevas (**HU_new**) por el porcentaje de penetración del código de edificación sustentable (**GBC_pen /100**) por la reducción de consumo de agua por vivienda (**HU_water1**), más la multiplicación de las viviendas nuevas (**HU_new**) por el porcentaje que no implemente el código de edificación sustentable (**1-GBC_pen/100**) por la línea base definida para el consumo de agua de la vivienda (**HU_water0**). El volumen total de agua es entonces dividido por el total de población (**tot_pop**) para obtener el consumo de agua anual per cápita. El número de viviendas nuevas (**HU_new**) se calcula mediante la diferencia de la población del año horizonte (**tot_pop_h**) y la población total del año base (**tot_pop_b**) dividido entre el promedio de habitantes por vivienda (**hu_size**)

Fórmula

$$\text{tot_water} = ((\text{HU_existing} * \text{HU_water0}) + (\text{HU_new} * (1 - (\text{GBC_pen}/100)) * \text{HU_water0} + (\text{HU_new} * (\text{GBC_pen}/100) * \text{HU_water1})) + \text{others_water} * \text{pop_inc}) / \text{tot_pop}$$
$$\text{HU_existing} = \text{HU_tot_b}$$
$$\text{HU_new} = (\text{tot_pop_h} - \text{tot_pop_b}) / \text{hu_size}$$
$$\text{pop_inc} = \text{tot_pop_h} / \text{tot_pop_b}$$

D. Supuestos: Datos tabulares y fuentes utilizadas

Tabla D.1: Supuestos usados para Morelia

Descripción	Valor	Unidades	Categoría	ID	Palanca	Referencia
Área construida promedio por vivienda (solo interior) (eco-popu)	48	m ²	building_norms	hu_sqm5	0	[41]
Área construida promedio por vivienda (solo interior) (tradicional)	60	m ²	building_norms	hu_sqm4	0	[41]
Área construida promedio por vivienda (solo interior) (viv-media)	91	m ²	building_norms	hu_sqm3	0	[41]
Área construida promedio por vivienda (solo interior) (viv-residen)	200	m ²	building_norms	hu_sqm2	0	[41]
Área construida promedio por vivienda (solo interior) (viv-residen-plus)	250	m ²	building_norms	hu_sqm1	0	[41]
Costo promedio de construcción (eco-popu)	4500	MXN/m ²	costs	constr_cost5	0	[42]
Costo promedio de construcción (tradicional)	10567	MXN/m ²	costs	constr_cost4	0	[42]
Costo promedio de construcción (viv-media)	10567	MXN/m ²	costs	constr_cost3	0	[42]
Costo promedio de construcción (viv-residen)	12068	MXN/m ²	costs	constr_cost2	0	[42]
Costo promedio de construcción (viv-redicen-plus)	12068	MXN/m ²	costs	constr_cost1	0	[42]
Construcción de alumbrado público	103370345	MXN/km	costs	cost_light	0	[43]
Construcción de red de agua potable	772368	MXN/km	costs	cost_watr	0	[44]
Costo de Diésel por litro	20.48	MXN/L	costs	diesel_cost	0	[45]
Costo que paga el municipio por kWh de electricidad consumida por el alumbrado público	3	MXN/kWh	costs	elighting_cost	0	[43]
Energía anual adicional contabilizada por km ² consolidado	514912	MXN	costs	energy_fee	0	[43]
Costo que paga el municipio por kWh de electricidad consumida para proveer de agua potable	2	MXN/kWh	costs	ewater_cost	0	[43]
Promedio de inflación de (dic 2010/2012) a Ago 2017 in Mexico	27.84	%	general	avge_inflation	0	[46]
Valor calorífico neto del Diésel (NET CV)	12.2	kWh/kg	general	diesel_cv	0	[47]
Densidad del Diésel	832	kg/m ³	general	diesel_den	0	[47]
Costo promedio del precio de la gasolina (90 y 95 octanos, división 50/50)	19.42	MXN/L	general	gasoline_cost	0	[48]
Valor calorífico neto de la Gasolina (NET CV)	12.19	kWh/kg	general	gasoline_cv	0	[39]
Densidad de la Gasolina	676.13	kg/m ³	general	gasoline_den	0	[39]
Longitud total de vialidades peatonales en la ciudad	95.58267024	km	general	ped_road_km	0	[38]
Longitud total de vialidades primarias en la ciudad	363.7724607	km	general	prim_road_km	0	[38]
Longitud total de vialidades secundarias en la ciudad	187.3720102	km	general	sec_road_km	0	[38]
Longitud total de vialidades terciarias en la ciudad	3456.584282	km	general	ter_road_km	0	[38]
Emissiones de gases de efecto invernadero por kWh de diésel	0.26751	kgCO2eq/kWh	ghg_emissions	carbon_factor_diesel	0	[39]
Emissiones de gases de efecto invernadero por kWh de gasolina	0.24906	kgCO2eq/kWh	ghg_emissions	carbon_factor_gasoline	0	[39]
Factor de emisión en Mexico	0.458	kgCO2/kwh	ghg_emissions	emission_fact	0	[29]

Continúa en la siguiente página

Descripción	Valor	Unidades	Categoría	ID	Palanca	Referencia
Promedio de energía consumida por vivienda establecidas como línea base	7576	kWh/yr per hu	green_b_code	ener_baseline	0	
Reducción de consumo de energía por vivienda implementando medidas de códigos de edificios verdes	10466	kWh/yr per hu	green_b_code	GBC_ener	0	
Porcentaje de penetración en viviendas con medidas de edificios verdes	0	%	green_b_code	GBC_pen	0	
Porcentaje de penetración en viviendas con medidas de edificios verdes	15	%	green_b_code	GBC_pen	1	
Porcentaje de penetración en viviendas con medidas de edificios verdes	30	%	green_b_code	GBC_pen	2	
Demananda de agua por vivienda establecidas como línea base	184.45	m ³ /yr per hu	green_b_code	HU_water0	0	[43]
Eficiencia de demanda de agua por vivienda	95.91	m ³ /yr per hu	green_b_code	HU_water1	0	[43]
Incremento de población entre el año base y el año horizonte	90269	inhabitants	population	pop_increase	0	[38]
Distancia promedio entre el centro de la ciudad y el vertedero	14.5	km	waste	dist_land	0	[49]
Energía usada por la estación de transferencia por cada tonelada de segregación de residuos	0	kWh/ton	waste	energy_tonTS	0	[50]
Residuos sólidos totales colectados por año en el año base	506539	ton/yr	waste	tot_wvol_base	0	[46]
Capacidad del camión colector	1.7	ton	waste	truck1_cap	0	[43]
Eficiencia del camión colector	0.84	L/km	waste	truck1_ef	0	
Capacidad del camión de transferencia	22	ton	waste	truck2_cap	0	[43]
Total de residuos sólidos generados por persona por día	1.2	kg/day	waste	waste_per	0	[51]

Fin de la tabla

Bibliografía

- [1] ONU-Habitat. Índice de prosperidad urbana en la República Mexicana. page 2017, 2016.
- [2] Yoonhee Kim and Bontje Zangerling. *Mexico Urbanization Review*. World Bank Group, 2016.
- [3] S. Angel. *Planeta de Ciudades*. Universidad del Rosario/Lincoln Institute of Land Policy, 2014.
- [4] SEDESOL. La expansión de las ciudades 1980-2010, 2012.
- [5] SEDESOL, CONAPO, and INEGI. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015, 2015.
- [6] SEDESOL. La expansión de las ciudades 1980-2010. Technical report, Secretaría de Desarrollo Social, México, 2013.
- [7] Ayuntamiento de Morelia. Morelia NEXt 2041. PLAN DE GRAN VISIÓN, 2016.
- [8] C. Y. Jim. Green-space preservation and allocation for sustainable greening of compact cities. *Cities*, 21(4):311–320, 2004.
- [9] Gobierno Federal. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, 2014.
- [10] SEDATU. Programa Sectorial de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano 2013-2018, 2013.
- [11] Jinpei Ou, Xiaoping Liu, Xia Li, and Yimin Chen. Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis. *Landscape Ecology*, 28(10):1889–1907, 2013.
- [12] Elisabeth M. Hamin and Nicole Gurrán. Urban form and climate change: Balancing adaptation and mitigation in the U.S. and Australia. *Habitat International*, 33(3):238–245, 2009.

- [13] Shaojian Wang, Xiaoping Liu, Chunshan Zhou, Jincan Hu, and Jinpei Ou. Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form, and transportation networks on CO₂ emissions in China's megacities. *Applied Energy*, 185:189–200, 2017.
- [14] SEDATU and DOF. PROGRMA Nacional de Desarrollo Urbano 2014-2018, 2014.
- [15] Yasuyo Makido, Shobhakar Dhakal, and Yoshiki Yamagata. Relationship between urban form and CO₂ emissions: Evidence from fifty Japanese cities. *Urban Climate*, 2:55–67, 2012.
- [16] Gobierno del Estado Michoacán. Plan de Desarrollo Integral del Estado de Michoacán 2012-2015, 2015.
- [17] SEDETUM. Programa sectorial de Desarrollo Territorial, Urbano y Movilidad del Estado de Michoacán 2015 -2021, 2015.
- [18] IMPLAN. Plan Municipal de Desarrollo 2015-2018, 2015.
- [19] Gobierno del Estado Michoacán. Programa sectorial de desarrollo económico 2015-2021, 2015.
- [20] Eduardo Pérez-Denicia. *Opciones energéticas encaminadas al logro del desarrollo sustentable*. PhD thesis, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., 2017.
- [21] OECD. OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews - A synthesis report by the Group on the State of the Environment. (93):1–39, 1993.
- [22] Stephen Morse. Developing Sustainability Indicators and Indices. *Sustainable Development*, 23(2):84–95, 2015.
- [23] Lu Huang, Jianguo Wu, and Lijiao Yan. Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. *Landscape Ecology*, 30(7):1175–1193, 2015.
- [24] Rajesh Kumar Singh, H. R. Murty, S. K. Gupta, and A. K. Dikshit. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15(1):281–299, 2012.
- [25] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censo de Población y Vivienda 2010, 2010.
- [26] Consejo Nacional de Población (CONAPO). México en Cifras: Proyecciones de la Población 2010-2050, 2015.

- [27] European Comission. GHSL - Global Human Settlement Layer, 2018.
- [28] INEGI. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas 2011 (DENUE), 2011.
- [29] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Factor de emisión para el cálculo de emisiones indirectas por consumo de electricidad para el periodo 2015, cuando el proveedor sea comisión federal de electricidad, 2016.
- [30] SEDATU, SEMARNAT, and GIZ. Guía Metodológica para la Elaboración y Actualización de Programas Municipales de Desarrollo Urbano, 2017.
- [31] Lien Poelmans and Anton Van Rompaey. Computers , Environment and Urban Systems Complexity and performance of urban expansion models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(1):17–27, 2010.
- [32] David Aaron Maroof. Binary Logistic Regression. *Statistical Methods in Neuropsychology*, pages 67–75, 2012.
- [33] Joaquín Abellán, Carlos J. Mantas, Javier G. Castellano, and Serafin Moral-García. Increasing diversity in random forest learning algorithm via imprecise probabilities. *Expert Systems with Applications*, 97:228–243, 2018.
- [34] Alan Julian Izenman. Recursive Partitioning and Tree-Based Methods. *Modern Multivariate Statistical Techniques*, pages 281–314, 2013.
- [35] S. Moulds, W. Buytaert, and A. Mijic. An open and extensible framework for spatially explicit land use change modelling: The lulcc R package. *Geoscientific Model Development*, 8(10):3215–3229, 2015.
- [36] Robert Gilmore Pontius, Smitha Peethambaram, and Jean Christophe Castella. Comparison of three maps at multiple resolutions: A case study of land change simulation in cho don district, Vietnam. *Annals of the Association of American Geographers*, 101(1):45–62, 2011.
- [37] SEDATU and CONAVI. Sistema Nacional de Información e Indicadores de Vivienda. SNIIV 2.0, 2018.
- [38] CAPSUS. Elaborado por CAPSUS., 2018.
- [39] Department, Energy Business, and Strategy Industrial. Uk government ghg conversion factors for company reporting / factores de conversión para el reporte de compañías en el reino unido.
- [40] Banco Interamericano de Desarrollo. Índices GEI para el uso del agua en la vivienda en México. 1, 2014.

- [41] SHF. Estadísticas de Vivienda, 2017.
- [42] CMIC. Costos por m2 de construcción., 2018.
- [43] Gobierno Michoacan.
- [44] ESMAP. Evaluación Rápida del Uso de la Energía, Mérida, Yucatán, México. Technical report, Secretaría de Energía, Banco Mundial, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), 2015.
- [45] GasolinaMX. Precio de la gasolina en México, 2018.
- [46] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. *INEGI*, jan 2016.
- [47] Grupo Energéticos, 2018.
- [48] Gasolina, 2018.
- [49] Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental, 2018.
- [50] Eunomia Research & Consulting. Kerbside Collections Options : Wales. Technical Report January, 2011.
- [51] SEMARNAT. Residuos. page 380, 2016.

Green Tower - 1605
Boulevard M. Ávila Camacho 118,
Lomas de Chapultepec, Miguel Hidalgo
Ciudad de México, 11000

Tel. +52 (55) 44 41 29 27
www.capsus.mx
ideas@capsus.mx

SEDATU
SECRETARÍA DE DESARROLLO
AGRARIO, TERRITORIAL Y URBANO



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

AMEXCID
AGENCIA MEXICANA
DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL
PARÁ EL DESARROLLO


IMPLAN
MORELIA MX
INSTITUTO MUNICIPAL DE PLANEACIÓN

 **CAPSUS**
Capital Sustentable