

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Modelo computacional de sistemas urbanos para la
planeación de escenarios en la toma de decisiones de
políticas públicas

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

JAVIER SANDOVAL FÉLIX

Bajo la dirección de:

DR. MANUEL CASTAÑÓN PUGA

Co-dirigido por:

DRA. CARELIA GUADALUPE GAXIOLA

PACHECO

TIJUANA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

SEPTIEMBRE DEL 2018

*A Norma, por su apoyo,
a Paola, por su paciencia,
a Sofia, por su insistencia.*

Universidad Autónoma de Baja California
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FOLIO No. 262

Tijuana, B. C., a 15 de agosto de 2018

C. Javier Sandoval Félix
Pasante de: Doctor en Ciencias
Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción TESIS

Es propuesto, por los CC, Dres. Manuel Castañón Puga y Carelia Guadalupe
Gaxiola Pacheco

Quienes serán los responsables de la calidad de trabajo que usted presente,
referido al tema: Modelo computacional de sistemas urbanos para la planeación de
escenarios en la toma de decisiones de políticas públicas.

el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- MARCO TEÓRICO
- III.- METODOLOGÍA
- IV.- EL MODELO
- V.- ESTUDIO DE CASO
- VI.- RESULTADOS
- VII.- DISCUSIÓN
- VIII.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS E INGENIERÍA

Dr. Manuel Castañón Puga

Director de Tesis

Dr. José Luis González Vázquez

Sub-Director Secretario

Dra. Carelia Guadalupe Gaxiola Pacheco

Co-Director de Tesis

Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director

Agradecimientos

Hay personas que sin su apoyo y guía no hubiera sido posible esta tesis. Inicio agradeciendo al Dr. Manuel Castañón Puga por aceptar dirigir este trabajo y tener la visión de que debía de ser multidisciplinario, mostrando siempre interés por los aspectos urbanos y dominio en los temas de la complejidad y la computación. Mención aparte merecen sus consejos respecto al quehacer académico y la investigación. Igualmente agradezco al Dr. Alfonso X. Iracheta Cenecorta por aportar su experiencia panorámica de las ciudades mexicanas a esta investigación. Gracias a todos los integrantes de Comité de Tesis por sus aportaciones y apoyo.

Al andar el camino que significó esta investigación encontré el apoyo de profesionales e internautas que mas de una vez me empujaron hacia adelante. El principal fue el Dr. Fernando Sancho Caparrini del Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Sevilla quien de manera desinteresada y con profusas explicaciones me ayudó a entender el lenguaje de programación de Netlogo cada vez que lo necesité. Agradezco también a la comunidad virtual stackoverflow ya que en esta plataforma de libre intercambio de conocimiento encontré ayuda expedita y oportuna, marcando tendencia de lo que ahora son las nuevas formas de aprendizaje: accesible, asequible, a cualquier hora, en cualquier lugar, para cualquier tema.

Agradezco también a todos mis compañeros del programa de Doctorado en Ciencias

por su consideración a un servidor, que aunque fue naturalmente intermitente por causas de distancia, siempre fue estimulante intercambiar puntos de vista y verlos avanzar en sus proyectos.

Ya mas cercano al centro, agradezco a mi esposa e hijas, que por numerosas noches, fines de semana y vacaciones respetaron mis ausencias y en algunas de estas me interrumpieron solo para hacerme saber que me acompañaban en el camino.

Javier Sandoval Félix

Resumen

Este trabajo muestra un esfuerzo institucional para modelar y analizar políticas públicas establecidas en un Programa de Desarrollo Urbano oficial desde la perspectiva de sistemas complejos a través de un modelo basado en agentes, enfocándose en identificar cómo este Programa afecta el comportamiento espacial de la industria y el suelo vacante que es atractivo para esta actividad. Esta atracción resulta de procesos de aglomeración permitidos por un Programa de Desarrollo Urbano que, al hacerlo, inadvertidamente pueda atraer una urbanización desfavorable. A diferencia de usos de suelo físicos, estas zonas atractivas aparecen, crecen, disminuyen y surgen de nuevo a lo largo del tiempo en la forma de lagunas de atracción. El entender este fenómeno es vital para quienes desarrollan políticas públicas.

Para este ejercicio de evaluación, se diseñó un modelo basado en agentes para encontrar zonas atractivas para la industria. Dado que estas pueden surgir sin importar las regulaciones en materia de usos de suelo, funcionarios públicos esperan identificar lugares con una probabilidad alta para la violación de normatividad urbana e inclusive descubrir oportunidades inesperadas y ajustar las políticas públicas si este fuera el caso.

Los hallazgos indican que el programa de Desarrollo Urbano actual no está debidamente preparado para las expectativas del desarrollo industrial. También mostró los papeles que juegan la densidad de población, topografía, red vial y uso habitacional en las dinámicas de Suelo Atractivo. Por último, el proceso de diseñar y ejecutar el modelo funcionó como

un inesperado proceso de reflexión para los funcionarios públicos, al ayudarles a entender y adquirir nuevo conocimiento sobre el fenómeno industrial de Ensenada.

Abstract

This thesis shows an institutional effort to model and analyze public policies stated in an official Urban Development Program from a complex system approach through an agent-based model, focusing on identifying how this Program affects the spatial behavior of industry and the vacant land that is attractive for this activity. This attraction results from agglomeration processes allowed by an Urban Development Program that, in doing so, can inadvertently attract unfavorable urbanization. Unlike physical land uses, these attractive zones appear, grow, diminish and emerge again over time in the form of attraction pools. Understanding these phenomena is vital for policymakers.

For this evaluation exercise, an agent-based model was designed to find industry-attractive zones. Since these can arise without regard to regulations on land use, public officials hope to identify places with a high probability of violating urban regulations and even discover unexpected opportunities and adjust public policies if this were the case.

The findings indicate that the current Urban Development Program is not adequately prepared for the expectations of industrial development. It also showed the roles played by population density, topography, road network and housing use in the Attractive Land dynamics. Finally, the process of designing and executing the model functioned as an unexpected thought-provoking process for public officials, helping them to understand and acquire new knowledge about Ensenada's industry phenomena.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Acerca de esta investigación	8
1.2. Acerca de esta tesis	10
2. Marco teórico	12
2.1. Complejidad	18
2.2. Complejidad y políticas públicas	24
2.3. Sistemas complejos urbanos	27
2.4. Metodologías de modelado urbano.	32
2.4.1. Modelado computacional	34
2.4.2. Modelado computacional del crecimiento urbano	39
2.4.3. Modelos basado en agentes	40
2.4.4. Patrones Urbanos y el concepto de Suelo Atractivo	50
3. Metodología	56
3.1. La simulación como método	56

3.2. Información necesaria	57
3.3. Preparación de la información	58
3.3.1. Matriz de compatibilidad	59
3.3.2. Capas de información espacial	60
3.4. Verificación y validación del modelo	62
3.4.1. Verificación del modelo	63
3.4.2. Validación del modelo	63
3.4.3. Determinación del espacio muestral	64
3.5. Experimentos	64
4. El modelo	66
4.1. Generalidades del modelo	68
4.2. Conceptos de diseño	76
4.3. Detalles	77
5. Estudio de caso	80
5.1. Generalidades del modelo	80
5.2. Conceptos de diseño	82
5.3. Detalles	82
6. Resultados	88
6.1. Suelo Atractivo total	89
6.2. Porcentaje de Suelo Atractivo urbanizado	98

6.3. Cantidad de Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por compatibilidad . .	99
6.4. Cantidad de Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por uso de suelo	99
6.5. Industria diferenciada por compatibilidad	102
6.6. Estado del Suelo Atractivo	104
7. Discusión	106
7.1. Sobre los resultados de los experimentos	106
7.2. Sobre la experiencia del modelado: consejos para nuevos modeladores urbanos	109
7.2.1. Observación del fenómeno de la vida real.	111
7.2.2. Elaboración de teoría que explique el fenómeno.	112
7.2.3. Formalización de la teoría en un lenguaje de programación.	114
7.2.4. Ejecución del programa.	119
7.2.5. Análisis y representación resultados.	119
8. Conclusiones y trabajo futuro	121
8.1. Conclusiones	121
8.2. Trabajo futuro	123

Índice de figuras

1.	Ubicación de la ciudad de Ensenada	2
2.	Densidad poblacional de ciudades del mundo. Ensenada cuenta con 36 habitantes por hectárea de superficie urbana, ubicándose en el espectro de ciudades con baja densidad. Fuente: [1]	3
3.	Ciudad de Ensenada: superficie urbana necesaria para albergar la misma cantidad de población bajo dos escenarios de densidad: a) Escenario extensivo actual de 36 hab/ha, b) Escenario compacto hipotético de 85 hab/ha. Fuente: elaboración propia.	3
4.	Distribución espacial dispersa de la actividad industrial en el Centro de Población de Ensenada [2]	6
5.	Grado de incompatibilidad normativa de la actividad industrial en el Centro de Población de Ensenada [2]	7
6.	Esquema metodológico de elaboración del Programa Parcial de Desarrollo Urbano Maneadero-Punta Banda, Ensenada, B.C [3] en el que se integra el uso del análisis de redes y simulación urbana.	8

7.	Red de influencias entre factores críticos para el desarrollo urbano del Valle de Maneadero, Ensenada. El actuar sobre estos factores críticos implica un impacto significativo en el resto del sistema[3].	9
8.	Ámbitos de atención de esta investigación con la ciudad como elemento central.	10
9.	Evolución de la población urbana y rural en México. Se observa que el paso de un México predominantemente rural a predominantemente urbano se dio entre las décadas de los 70 y 80 [4].	13
10.	Ejemplo de diagnóstico urbano-rural basado en análisis de redes: relaciones e interacciones entre Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas al desarrollo de la localidad de Bahía de Los Ángeles, Ensenada, [5].	15
11.	Izquierda: Escenario sin aplicar políticas en donde se observa la urbanización del valle agrícola. Derecha: Escenario de aplicación de política pública para evitar la urbanización del valle agrícola, en donde se encierra en círculo la nueva urbanización que se genera fuera del mismo	18
12.	a) La palabra complejidad proviene de la raíz “plectere”, entrelazar: un tejido de elementos inseparables que constituyen un todo. b) Entramado carretetero del estado de Yucatán, México.	20
13.	a) Simplicidad, b) complejidad desorganizada, c) complejidad organizada. . .	20

14.	Macro-comportamientos que emergen del micro-comportamiento individual de sus componentes. Arriba, izquierda: una ave como componente básico. Arriba, derecha: del interactuar de cientos de aves emerge una parvada que se desplaza de manera coordinada como una sola unidad. Abajo, izquierda: el ser humano como componente básico. Abajo, derecha: cientos de decisiones individuales respecto a la selección de residencia en su conjunto generan macro patrones de segregación racial en la ciudad de Los Ángeles. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes: https://conceptodefinicion.de/wp-content/uploads/2017/12/Parvada.jpg y https://www.nytimes.com/interactive/2015/07/08/us/ce-race-map.html	22
15.	Resultado de una simulación urbana enfocada a identificar impactos urbanos en Ensenada, México [6]	36
16.	Las ciencias sociales computacionales. Fuente: elaboración propia en base a [7] y [8].	37
17.	Uso de modelos basados en agentes de acuerdo a escalas de tiempo y espacio. Traducido de [9]	42
18.	Tipos de autocorrelacion espacial. a) Positiva: cercanía espacial con atributos similares, b) Sin autocorrelacion, c) Negativa: cercanía espacial sin atributos similares.	43
19.	Historias de dos juegos de la vida partiendo de estados iniciales con solo una celda de variación entre ambos. Arriba: estado inicial de 7 celdas vivas en forma de H, que se estabiliza después de solo 6 generaciones. Abajo, estado inicial de 7 celdas vivas en forma de Pi, que se estabiliza hasta después de 172 generaciones. En amarillo se muestran celdas que algún momento estuvieron vivas, y en rosa celdas vivas finales.	45

20.	Clasificación de modelos de cambio de uso de suelo. El nuevo uso de suelo: I) Independiente: no tiene relación con el uso de suelo anterior, II) Dependiente: depende del uso de suelo anterior, III) Histórico: depende de varios usos de suelo anteriores, IV) Multivariable: depende de otras variables de la misma ubicación, V) Geográfico: depende de los usos de suelo vecinos [10].	46
21.	Secuencia ordenada de una partida de ajedrez y del crecimiento de una mancha urbana: ¿se podrán extraer las reglas de comportamiento observando su evolución?	47
22.	Tipos de vecindades: a) Von Neumann, b) Moore, c) Moore Extendida . . .	49
23.	Principales factores usados para simular el crecimiento urbano con Autómatas Celulares. Adaptado de [11].	50
24.	Taxonomía de Netlogo. Fuente: elaboración propia en base a [12], [13], [14] .	51
25.	Comportamiento espacial del Suelo Atractivo: a) Surgimiento, b) Desaparición, c) Crecimiento, d) Reducción, e) Desplazamiento.	54
26.	La lógica de la simulación como método. Traducido de [15]	57
27.	Proceso de modelado y simulación de acuerdo a [16]	57
28.	Interfaz del modelo elaborado en Netlogo. 1) Cargado de datos y ejecución del modelo, 2) Parámetros de condiciones iniciales del modelo, 3) Estados del Suelo Atractivo, 4) Visualización de capas de información, 5) Pantalla de resultados espaciales, 6) Gráficos de resultados cuantitativos, 7) Exportación de resultados espaciales.	67
29.	Secuencia del modelo	73
30.	a) Vecindad de Moore, b) Vecindad Von-Neumann	78

31.	Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo. Los renglones son usos de suelo y las columnas son subsectores. Las compatibilidades se muestran en verde y las incompatibilidades en rojo [1]	81
32.	Sectores y subsectores de la ciudad de Ensenada [1]	83
33.	Mapas probabilísticos. a) 10 iteraciones, b) 50 iteraciones, c) 100 iteraciones, d) 500 iteraciones. Las zonas más claras indican mayor probabilidad de urbanización a futuro. Después de 50 iteraciones, la variabilidad de estas zonas no es significativa.	84
34.	Estado inicial del modelo, en el cual se muestra la extensión espacial de la ciudad de Ensenada y el Suelo Atractivo para industria en compatibilidad (verde) e incompatibilidad (rojo) con el PDUCPE.	85
35.	Patrones de superficie urbana resultantes con diferentes valores de la variable Umbral: a) 1, b) 2, c) 4 y d) 8.	87
36.	Ejemplo de evolución por año de Suelo Atractivo por año: a) t=0, b) t=3, c) t=6, d) t=10. Verde: Suelo Atractivo compatible con la industria, rojo: Suelo Atractivo incompatible con la industria, naranja: industria.	90
37.	Comportamiento de Suelo Atractivo en un periodo de 10 años.	91
38.	Comportamiento de Suelo Atractivo bajo escenarios de densidad de población en un periodo de 10 años.	92
39.	Mapa probabilístico de formación de Suelo Atractivo. Verde: compatible con el PDUCPE, rojo: incompatible con el PDUCPE. Tonalidad oscura: menor probabilidad, tonalidad clara: mayor probabilidad.	94

40.	Mapa probabilístico de Industria en Suelo Atractivo. Verde: compatible con el PDUCPE, rojo: incompatible con el PDUCPE. Tonalidad oscura: menor probabilidad, tonalidad clara: mayor probabilidad.	95
41.	Ocupación de Suelo Atractivo por usos industriales bajo diferentes escenarios de porcentaje de cumplimiento normativo en un periodo de 10 años.	96
42.	Ocupación industrial de acuerdo a diferentes porcentajes de cumplimiento de la normatividad urbana en materia de compatibilidad de usos de suelo de acuerdo al PDUCPE. a) 0 %, b) 50 %, c) 75 % y d) 100 %. En círculo naranja se encierra industria incompatible, en círculo amarillo se encierra industria compatible.	97
43.	Comportamiento porcentual de Suelo Atractivo urbanizado en un periodo de 10 años bajo diferentes escenarios de densidad de población.	98
44.	Comportamiento promedio de Suelo Atractivo urbanizado en un periodo de 10 años: Incom Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por industria, Com Non Ind: Suelo Atractivo compatible urbanizado por usos no industriales, Incom Non Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por usos no industriales, Ind non AL: Industria ubicada fuera de Suelo Atractivo.	100
45.	Comportamiento promedio de Suelo Atractivo urbanizado en un periodo de 10 años bajo diferentes escenarios de densidad de población: Incom Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por industria, Com Non Ind: Suelo Atractivo compatible urbanizado por usos no industriales, Incom Non Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por usos no industriales, Ind non AL: Industria ubicada fuera de Suelo Atractivo.	101
46.	Comportamiento promedio de Suelo Atractivo urbanizado por diferentes usos de suelo en un periodo de 10 años.	102

47. Compatibilidad de industria bajo diferentes escenarios de densidad de población en un periodo de 10 años. 103

48. Comportamiento promedio de estados del Suelo Atractivo en un periodo de 10 años. 105

49. Proceso del modelado. 111

Índice de tablas

1.	Características, temas, métodos y herramientas de la Complejidad. Fuente: elaboración propia	23
2.	Temas de investigación de las políticas públicas y temas de la Complejidad con que se han abordado. Fuente: elaboración propia.	26
3.	Temas de investigación de los sistemas urbanos complejos y metodologías utilizadas. Fuente: elaboración propia.	31
4.	Principales autores relacionados al tema de sistemas urbanos complejos consultados para esta investigación, y su formación profesional. Fuente: elaboración propia.	33
5.	Aproximaciones de modelado computacional. Adaptado de [17]	40
6.	Factores atractivos por tipo de uso de suelo. Fuente: elaboración propia en base a autores citados.	55
7.	Capas de información espacial necesarias para el modelo	58
8.	Información necesaria del Programa de Desarrollo Urbano	59
9.	Entidades y variables del modelo	70
10.	Matriz de adyacencia	74

Capítulo 1

Introducción

La ciudad de Ensenada es una localidad costera frente al Océano Pacífico ubicada en el estado de Baja California, México, a unos 80 kms de la frontera con los E.U.A (Fig. 1). Sus inicios datan de 1882 cuando ocupó un pequeño asentamiento que fue expandiéndose gracias a las actividades pesqueras y turísticas sobre una planicie costera que al día de hoy se encuentra totalmente ocupada, quedando solo sin urbanizar un amplio valle agrícola, otra de las actividades predominantes de la ciudad. En la década de los 80 se tuvo un importante crecimiento hacia áreas cerriles, una característica que al día de hoy representa un reto a la ciudad por el cada vez mas difícil acceso a suelo de pendientes moderadas para la urbanización al ocuparse totalmente la planicie inicial. Esta expansión ha derivado en una superficie urbana actual cercana a las 10,000 hectáreas con aproximadamente 380,000 habitantes, en donde en un periodo de veinte años la población se multiplicó por 2 pero la mancha urbana se multiplicó 3.75 veces. Lo anterior se ha manifestado en la característica baja densidad de población de la ciudad que actualmente es de 36 hab/ha (Fig. 2 y Fig. 3), muy por debajo de recomendaciones nacionales o internacionales de 100 o más habitantes por hectarea. Este escenario de crecimiento extensivo y de baja densidad se nutre por la ausencia de aplicación de políticas públicas en la materia, los pobres ejemplos de crecimiento vertical que se han



Figura 1: Ubicación de la ciudad de Ensenada

realizado y la fácil adquisición de un automovil, típico de ciudades fronterizas con los E.U.A., teniendo actualmente Ensenada un alto índice de motorización de 2.08 habitantes por auto [1] en comparación de los 14.73 hab/auto de America Latina. Esto en el pasado facilitó la movilidad individual pero cada vez se complica mas ante la falta de una estructura vial primaria completa y un servicio de transporte público con urgentes necesidades de mejora.

Respecto a las políticas públicas que se han diseñado para atender esta problemática urbana, han tenido un carácter discontinuo en el tiempo, apareciendo a saltos, primero en 1977 con la Ley del Plan Regulador para la Ciudad de Ensenada, luego en 1980 con el primer Programa de Desarrollo Urbano y su posterior actualización 1995. En el 2005 se funda el Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada (IMIP) como el ente consultor del municipio en materia de planeación urbana y regional, quien publica en el 2009 el último instrumento de planeación para la ciudad: el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de

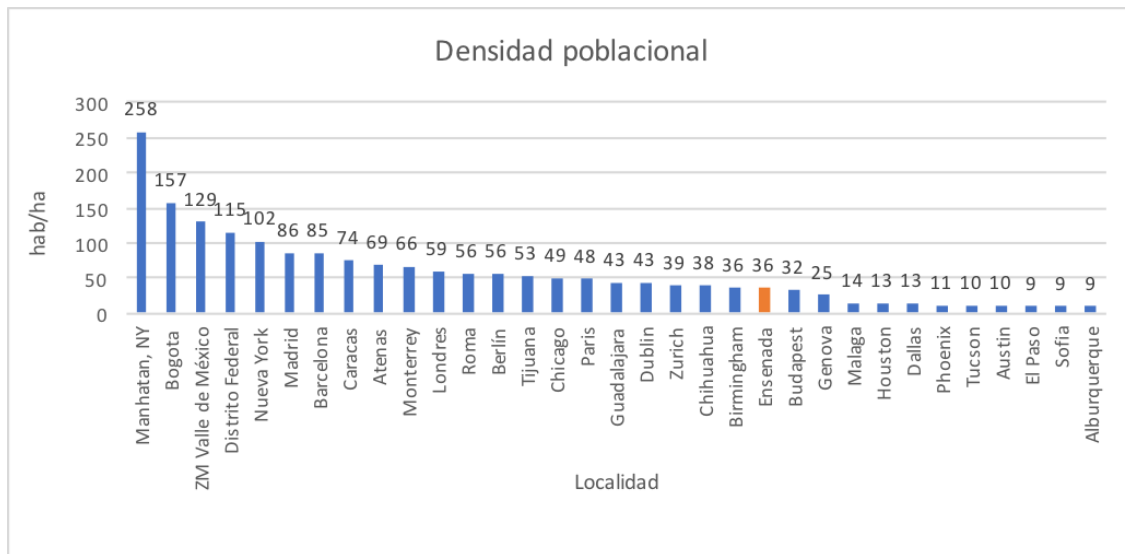


Figura 2: Densidad poblacional de ciudades del mundo. Ensenada cuenta con 36 habitantes por hectárea de superficie urbana, ubicándose en el espectro de ciudades con baja densidad. Fuente: [1]



Figura 3: Ciudad de Ensenada: superficie urbana necesaria para albergar la misma cantidad de población bajo dos escenarios de densidad: a) Escenario extensivo actual de 36 hab/ha, b) Escenario compacto hipotético de 85 hab/ha. Fuente: elaboración propia.

Población de Ensenada (PDUCPE). En aquel entonces el PDUCPE detectó 4 grandes factores críticos que necesitaban atenderse: la movilidad, el espacio público, las reservas territoriales y un sistema de seguimiento, evaluación y actualización de la planeación. A pesar de que el PDUCPE identificó puntualmente estos factores, también implementó una estrategia que a la larga resultó fallida y que complicó a dos de estos factores: los relacionados con el sistema de seguimiento y las reservas territoriales, en particular las dedicadas a la actividad industrial. Cuando el Programa estaba en las etapas finales de su elaboración, al mismo tiempo se llevaba a cabo una mesa de trabajo interinstitucional que pretendía adquirir 1,000 hectareas de suelo en el sector noreste de la ciudad para desarrollar principalmente industria. Dado que el tiempo de la publicación del PDUCPE estaba próximo y la compra del suelo aún distante, se decidió no indicar gráficamente en el sector noreste ninguna reserva territorial de suelo industrial en la nueva carta urbana para evitar procesos de especulación en lo que se presuponia una inminente compra de las mismas. Después de la publicación del PDUCPE y años adelante, se disolvió la mesa de trabajo, no se compraron las reservas territoriales ni tampoco apareció delimitado el suelo destinado para uso industrial en la carta urbana precisamente en la zona que desde entonces ha tenido el mayor crecimiento urbano. En retrospectiva, esta fallida estrategia trajo incertidumbre jurídica a la industria y limitó significativamente la oferta de suelo para esta actividad. Si se suma que Ensenada ha consumido su planicie costera y ahora quedan remanentes entre una topografía abrupta, y que el suelo está en manos de un número reducido de propietarios que dictan altos precios en la compra de suelo, es que tenemos para la actividad industrial un complicado panorama de desarrollo. Tan es así, que en el 2017 el Cabildo de Ensenada instruyó al IMIP que elaborará un Programa Sectorial de Desarrollo Industrial [2] que pusiera orden a la industria y que a la vez delimitara claramente las necesarias reservas territoriales. A través de su diagnóstico, el Programa de Desarrollo Industrial mostró claramente la delicada situación industrial en la ciudad: una indiscriminada distribución de esta actividad en el centro de población por falta de espacios adecuadamente

ubicados, delimitados y habilitados (Fig. 4) donde el 87 % de los predios industriales son menores a una hectárea, contrario a las 10 has recomendadas [18], una alta incompatibilidad normativa del 48 % con el PDUCPE al estar contigua a usos habitacionales y comerciales (Fig. 5) y un 59 % de la industria ubicada sobre vialidades locales cuando lo indicado es que sea sobre vialidades de primer orden.

A pesar de los esfuerzos técnicos, el Programa de Desarrollo Industrial aún no se publica, pero en año de 2018 el gobierno municipal inició la actualización del PDUCPE, por lo que se pretende aprovechar esta oportunidad de planeación y evaluar la normatividad en materia de usos de suelo industrial a manera de establecer el necesario orden para esta actividad, entre otros aspectos. A la par, y desde hace ya una década, el IMIP ha atravesado una serie de experiencias y capacitaciones que han ido afinando sus procesos de planeación, con un particular interés en la utilización de lo que a su juicio pueden ser los mejores enfoques y herramientas que los puedan enriquecer. Es por ello que en los últimos años ha utilizado de manera experimental una serie de herramientas de índole computacional que han sido preliminarmente exitosas en ayudar a entender fenómenos urbanos que al parecer no se pudieran haber vislumbrado de otra manera [19], [5], [20], [6], [21] (Fig. 6 y Fig. 7). De manera natural todos estos ejercicios han caído dentro del campo de los sistemas complejos, y en el uso de sus herramientas, el modelado computacional, enfoque bajo el cual ahora se analizará el fenómeno de urbanización por actividades industriales en el marco de la actualización del PDUCPE. El motivo de su uso es que el modelado computacional ofrece la posibilidad de tener un *laboratorio urbano in-silico* dentro del cual se pueden realizar experimentos en total libertad y de acuerdo a los intereses de investigación sin mayor costo que el del equipo de computo y sin consecuencia en el mundo real. El objetivo será elaborar un modelo computacional que ayude en la identificación y análisis del surgimiento de zonas atractivas a la industria como resultado de la aglomeración espacial de condiciones propicias para este uso, y la posterior ocupación de las mismas.

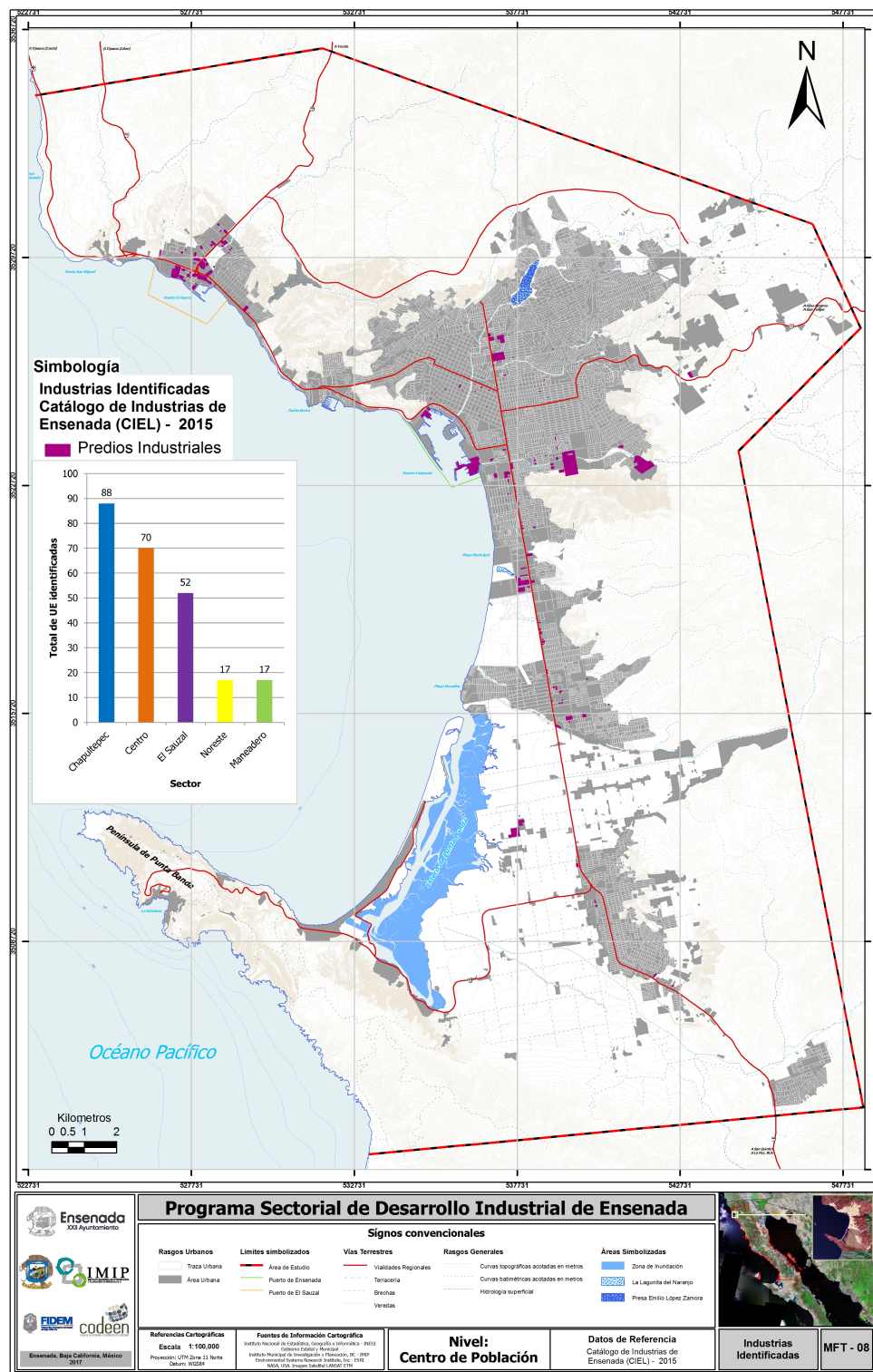


Figura 4: Distribución espacial dispersa de la actividad industrial en el Centro de Población de Ensenada [2]

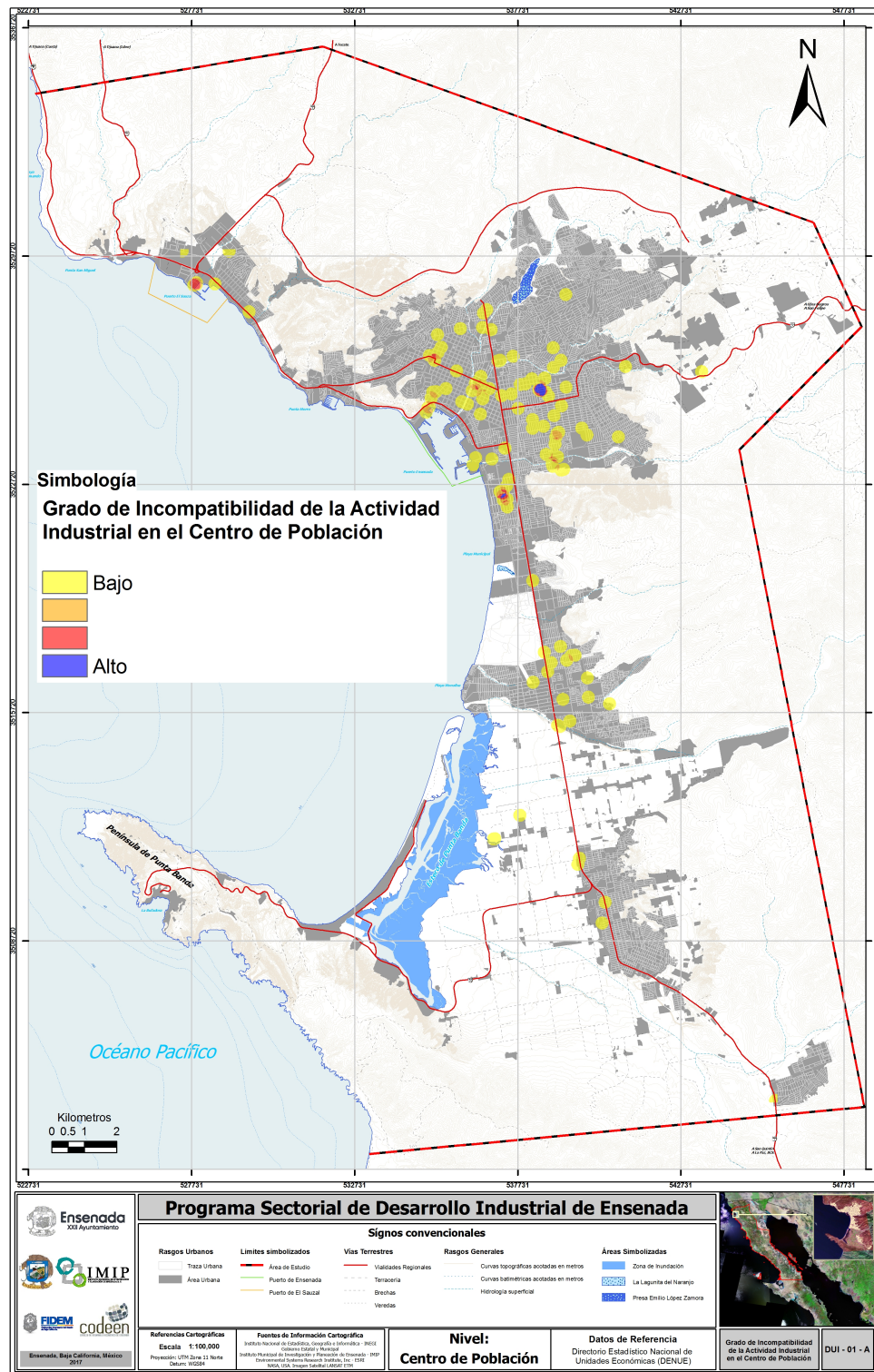


Figura 5: Grado de incompatibilidad normativa de la actividad industrial en el Centro de Población de Ensenada [2]

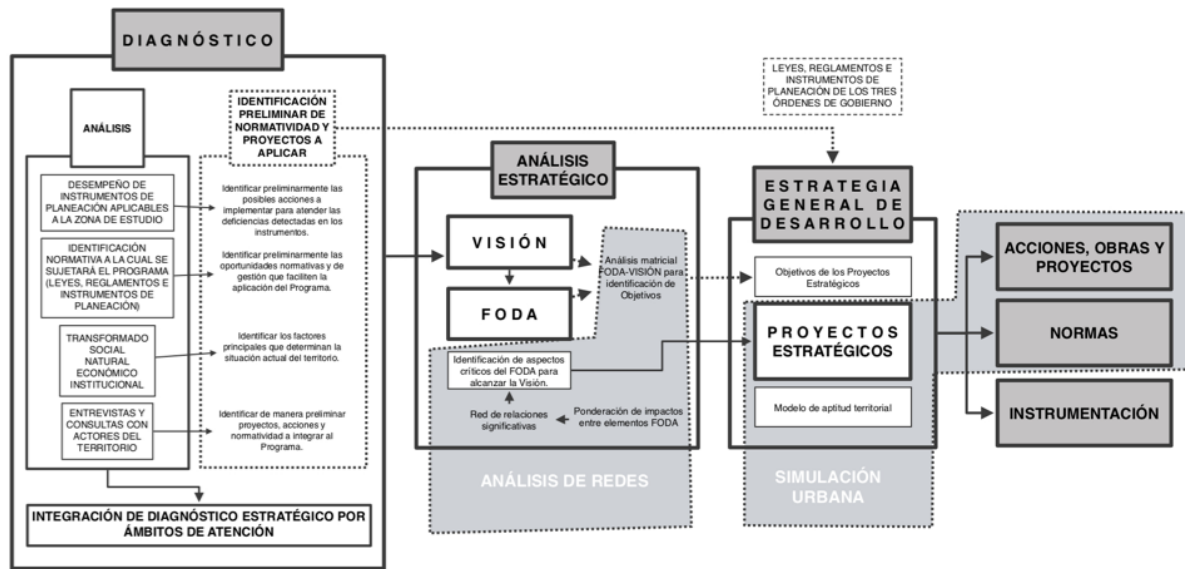


Figura 6: Esquema metodológico de elaboración del Programa Parcial de Desarrollo Urbano Maneadero-Punta Banda, Ensenada, B.C [3] en el que se integra el uso del análisis de redes y simulación urbana.

1.1. Acerca de esta investigación

El objetivo general de esta investigación es identificar el comportamiento espacial futuro tanto de la ocupación del suelo por la industria como del suelo vacante que atrae a esta actividad, generado por la aglomeración de ciertas condiciones territoriales y del grado de cumplimiento de políticas públicas en materia de desarrollo urbano. Particularmente es de interés identificar donde hay mayor probabilidad de surgimiento de nueva industria, cuál sería su apego al cumplimiento de la normatividad urbana y la competencia que tendría con otros usos de suelo por ocupar un mismo suelo atractivo. Dada su relevancia, también es de interés conocer el comportamiento espacial del suelo atractivo a la industria y su posterior ocupación bajo diferentes escenarios de densidad poblacional. Para responder las interrogantes anteriores, se introduce el concepto de Suelo Atractivo el cual se simula a través de un modelo computacional basado en agentes, en la modalidad de autómatas celulares. Con esta investigación se pretende abrir camino al campo del análisis de políticas públicas en

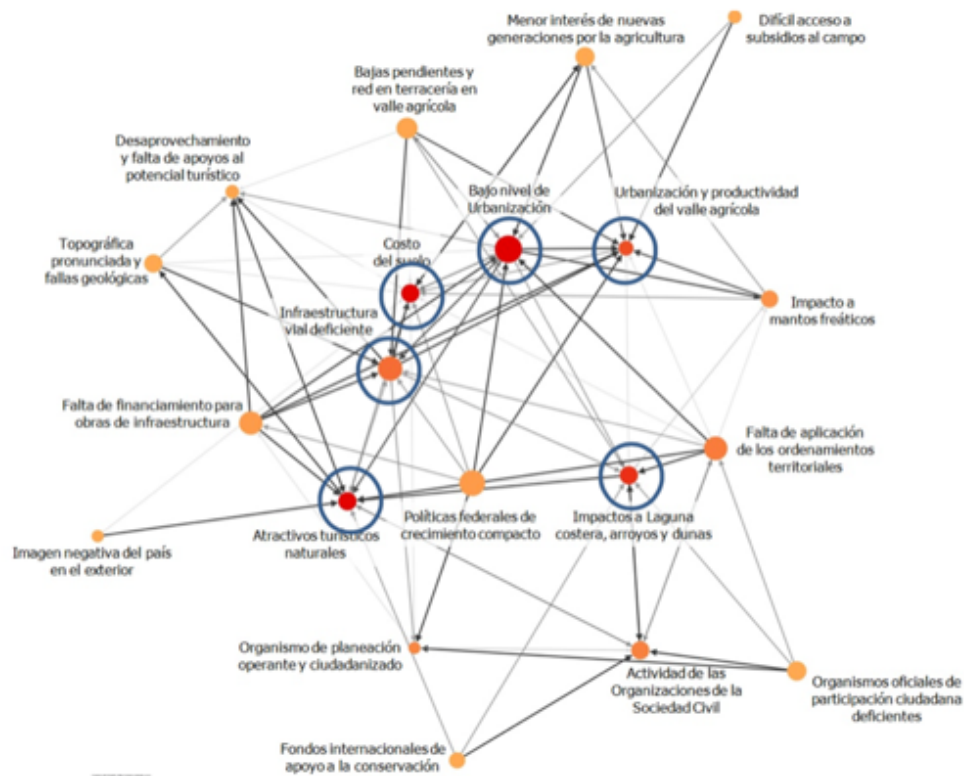


Figura 7: Red de influencias entre factores críticos para el desarrollo urbano del Valle de Maneadero, Ensenada. El actuar sobre estos factores críticos implica un impacto significativo en el resto del sistema[3].

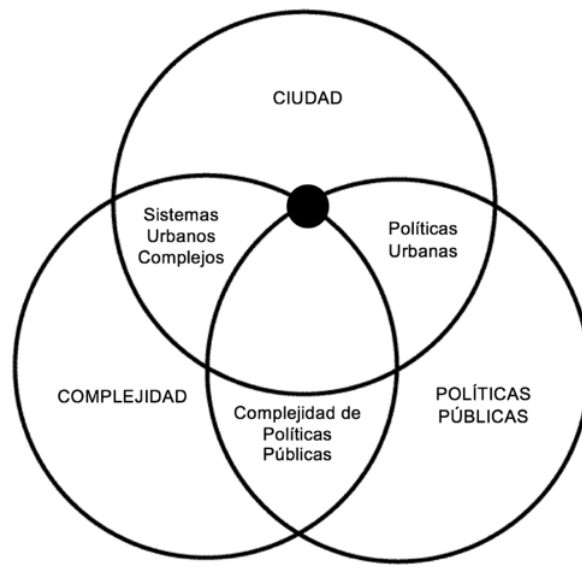


Figura 8: Ámbitos de atención de esta investigación con la ciudad como elemento central.

materia de desarrollo urbano a través del modelado computacional, práctica que en México es virtualmente inexistente (Fig. 8).

1.2. Acerca de esta tesis

Después de caracterizar brevemente la problemática de la ciudad de Ensenada que da origen a esta investigación, en el capítulo 2 se pone de manifiesto la necesidad de ampliar el campo de conocimiento de las ciudades en México, trascendiendo la visión de planeación de arriba-hacia-abajo que ha predominado hasta hace pocos años, y el ampliar el proceso de la planeación en donde se incluya el entendimiento de las ciudades como compuestas por un gran número de componentes que están relacionados entre sí y que interactúan de manera intensa. Esta visión es importante en el contexto del diseño y aplicación de políticas públicas ya que, en este contexto de interrelación, no se sabe con certeza cuales pudieran ser sus efectos indirectos y no intencionados. Se introduce el concepto de complejidad, cuáles son sus temas de investigación, métodos y herramientas y cómo se han aplicado al tema de las ciudades y

a las políticas públicas, haciendo una extensa revisión bibliográfica de casos de aplicación. Prosigue con un breve repaso sobre el tema del modelado y sus herramientas computacionales, incluyendo la perspectiva de las ciencias sociales computacionales. Finalmente, se trata el tema de una de las metodologías más utilizadas por el enfoque de sistemas urbanos complejos: los autómatas celulares. El capítulo concluye con el tema de patrones urbanos y el concepto de Suelo Atractivo. El capítulo 3 explica la metodología a utilizar, aclarando las condiciones bajo las cuales debe de prepararse la información con que se debe alimentar al modelo, así como los experimentos que se realizaran con el mismo. El capítulo 4 describe a detalle el modelo a través del protocolo ODD, el cual es un protocolo estandarizado para explicar modelos basados en agentes, explicando sus generalidades, su diseño, flujo, conceptos de diseño y detalles. El capítulo 5 es la aplicación del modelo al caso de la ciudad de Ensenada, detallando las particularidades de este modelo en base al protocolo ODD. El capítulo 6 demuestra los resultados de cada uno de los experimentos llevados a cabo en el caso de estudio de Ensenada respecto al comportamiento de Suelo Atractivo para la actividad industrial. El capítulo 7 es una discusión de los resultados y concluye con una reflexión, a manera de consejos dedicados a nuevos modeladores urbanos, sobre lo que fue la experiencia del presente trabajo de investigación desde la perspectiva de un planificador urbano. En el capítulo 8 presenta las conclusiones y el trabajo futuro a realizar.

Capítulo 2

Marco teórico

De acuerdo a información de la Organización de las Naciones Unidas, hace apenas un siglo una de cada diez personas de la población mundial vivía en un área urbana. En contraste, a principios del siglo XXI fueron cinco de cada diez, pasando la humanidad por primera vez en su historia de ser predominantemente rural a predominantemente urbana; y se tiene proyectado que para el año 2050 casi tres cuartas partes estarán viviendo en ciudades. Adicionalmente, se estima que entre 2010 y 2015 se agregaron diariamente 200,000 personas a zonas urbanas existentes, y de este total el 91 % sucedió en países en vías de desarrollo [22]. Por lo mismo, se ha llegado a denominar al siglo XXI como el siglo de las ciudades [23]. En el caso de América Latina su paso a ser predominantemente urbana fue en los años 60 y se espera que para el año 2050 el 85 % de su población viva en ciudades. La transición a lo urbano en México ya sucedió entre las décadas de los 70 y 80 (Fig. 9), donde el 77.8 % ya vive en ciudades.

Pero, aunque el fenómeno de urbanización ya es global, la atención que se le ha dado a su estudio no ha sido igual. A diferencia de los países en donde se originó la revolución industrial y que desde el siglo XIX realizaron importantes esfuerzos para estudiar y ordenar los grandes

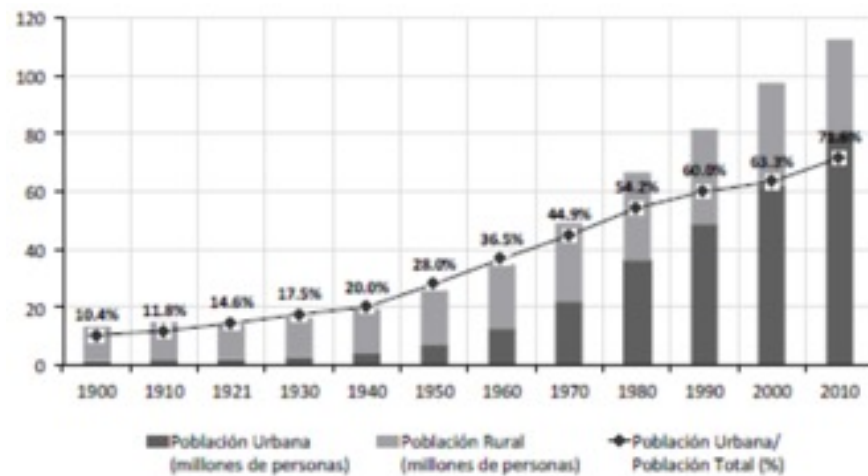


Figura 9: Evolución de la población urbana y rural en México. Se observa que el paso de un México predominantemente rural a predominantemente urbano se dio entre las décadas de los 70 y 80 [4].

centros de producción, en México los ejercicios urbanos se han caracterizado por ser esfuerzos aislados, interrumpidos y con resultados diversos a pesar de un fuerte interés por ordenar las ciudades a principios del siglo XX. Por su propia historia convulsa en aspectos económicos y sociales, se ha generado un cuerpo de conocimiento propio y útil pero escaso aún para el entendimiento de sus ciudades al igual que sus metodologías para elaborar instrumentos de planeación urbana. Más aún, estas han sido mayormente adaptaciones de ideas europeas. Aunque se han tenido periodos relevantes en términos de atención al fenómeno urbano en las décadas de los años 20 y 30 [24] y de nuevo en los 80 con la generación de guías oficiales de desarrollo urbano y de la rectoría por parte del estado, esta finalmente fue abandonada a finales de la misma década en que México transitaba a ser predominantemente urbano. Por este motivo, junto con otros de carácter político, social y económico, es que actualmente se padece una serie de problemas urbanos sin que exista a la par un esfuerzo proporcional tanto para entenderlos como para solucionarlos.

Está problemática es bien reconocida en el Plan Nacional de Desarrollo Urbano 2014-2018 [4], instrumento rector del gobierno federal, el cual indica que la acelerada urbanización de

México ha traído graves consecuencias sobre la configuración de las ciudades: asentamientos irregulares y en zonas de riesgo, expansión desproporcionada de la mancha urbana, baja densidad poblacional, despoblamiento y crecimiento acelerado de localidades y lejanía de centros urbanos, urbanización periférica de baja densidad y conectividad deficiente provocando mayores costos en el desarrollo urbano, baja cohesión social, segregación y disparidades urbano-rurales [4]. Se ha reconocido tal gravedad del problema, que inclusive en el discurso gubernamental se habla de la necesidad de implementar políticas públicas agresivas para atenuar estos problemas, pero éstas aún no han sido aplicadas. Por lo anterior, un importante reto en el contexto del desarrollo urbano en México es cómo diseñar mejores políticas públicas en un ambiente de incertidumbre y lento avance en la generación de conocimiento en el campo de la planeación urbana, lo que ha impedido el entendimiento y atención de problemas urbanos, persistiendo una separación entre propuestas y realidades [25]. En un contexto institucional en donde el gobierno trata de ordenar a la ciudad a través de programas de desarrollo urbano con una visión normativa, estática y de arriba-hacia-abajo, junto con la particularidad en México del constante incumplimiento de dichos programas, es que se observa la necesidad de mejorar tanto los procesos de elaboración de estos programas como la generación de conocimiento que arroje nueva luz sobre el funcionamiento de las ciudades. Ante tal situación es importante cuestionar el nivel de conocimiento que se tiene sobre el funcionamiento de las ciudades en nuestro país, y la imperante necesidad de ampliarlo y aprovecharlo para el mejoramiento de las mismas. Esto implica trascender la perspectiva de la planeación que ha prevalecido hasta hoy y que define a la ciudad como algo básicamente predecible, controlable y planeable [26], como un gran problema de ingeniería y consecuentemente atenderlo similarmente a una máquina [27]. Aunque ha habido esfuerzos en conceptualizar a los asentamientos humanos mediante otras metáforas como las de organismos o ecosistemas, con el tiempo se ha observado que estos enfoques no son los adecuados. Los organismos vivos tienen estados óptimos claramente reconocibles relacionados a su tamaño, edad, peso y temperatura, entre

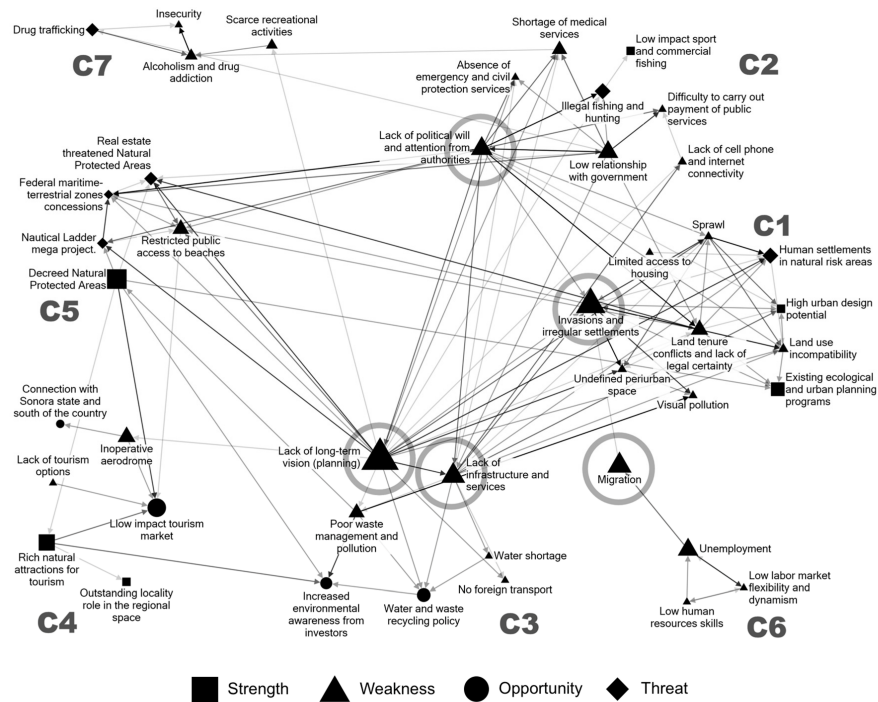


Figura 10: Ejemplo de diagnóstico urbano-rural basado en análisis de redes: relaciones e interacciones entre Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas al desarrollo de la localidad de Bahía de Los Ángeles, Ensenada, [5].

otros, y fuera de los cuales no pudieran existir. Además, los sistemas que integran a un organismo trabajan de manera coordinada para mantenerlo vivo. Las ciudades no tienen estados óptimos y sus componentes no siempre están armonizados, como cuando sucede la competencia de diversos usos de suelo por un mismo predio vacante o cuando diferentes actores sociales defienden su postura respecto a cuál debe ser el aprovechamiento de un recurso natural o la densidad habitacional de una zona en particular. Así, la razón de que estas analogías, o de otros esfuerzos metodológicos, no hayan podido explicar las causas de la situación actual de las ciudades es que se centraron principalmente en aspectos descriptivos, estáticos y de la forma, prescindiendo de un elemento clave para entenderlas: las relaciones e interacción entre sus componentes (Fig. 11) [28] [29].

Esta ampliación de conocimiento urbano debe de partir del reconocimiento que la ciudad en donde vivimos es resultado solo en parte de esfuerzos de planeación que emanan de un

gobierno, pero que también lo es de un gran número de acciones independientes, organizadas e interactuantes entre sí y su entorno que escapan de un esfuerzo central de control. Movimientos sociales, autoconstrucción, invasiones, influencia política, transporte, demandas ciudadanas e intereses sectoriales son una muestra de agentes que escapan de la rectoría central de gobierno en materia de ordenamiento urbano, pero que determinan significativamente el estado de la ciudad. Su intensa interacción deriva en resultados inesperados y novedosos como lo son los asentamientos irregulares, corredores comerciales espontáneos, congestiónamiento vial, o el despunte de una vocación comercial. Aparte de esta dinámica interna que da forma a la ciudad, hay factores de naturaleza externa que la afectan. Trascienden su escala local y son incontrolables. Al depender de economías foráneas o al integrarse a redes de servicios regionales, obliga a concebir la ciudad como un sistema abierto. La interrupción repentina de servicios por fenómenos naturales o el vaivén económico internacional pueden ser un punto de inflexión que determine un nuevo rumbo a las ciudades.

Bajo este contexto de estrecha interacción de un gran número de factores a diferentes escalas que pueden derivar en resultados inesperados, es importante analizar las políticas públicas que se quieran implementar en materia de desarrollo urbano bajo un enfoque que contenga las herramientas y metodologías para abordar esta compleja naturaleza. Más allá del sentido común que pueda sugerir lo adecuado de su aplicación, habrá políticas públicas que se implementen por primera vez y por lo mismo se desconocerá en un principio las ramificaciones de sus impactos. Instituciones que han estudiado el efecto de las políticas públicas como la Organización para el Desarrollo y Cooperación Económica asevera que pequeños cambios en las políticas públicas pueden provocar grandes efectos, grandes cambios pueden tener efectos sorprendentemente pequeños u obtener efectos no anticipados [30]. Inclusive, aunque fueran exitosas en el momento de su aplicación, pudiera ser que a largo plazo las políticas públicas pudieran ser contraproducentes [31]. Tampoco es habitual el plantear estrategias de reacción ante estos posibles efectos adversos ya que aparte de que aún no se han aplicado, no se tiene

un conocimiento suficiente sobre el funcionamiento de las ciudades en donde se van aplicar. Este desconocimiento puede propiciar situaciones peligrosas ya que, si los responsables de formular políticas públicas se sienten atraídos a improvisar acciones sin conocer la naturaleza del problema, hay buena probabilidad de que lo puedan empeorar [32]. Esto significa que antes de diseñar una política pública urbana se deben de entender los mecanismos subyacentes de la ciudad para identificar cual es la mejor manera de inducirla hacia un camino deseado, aunque esta parezca contra-intuitiva o implique no llegar a una solución óptima [31]. Aplicado a la ciudad de Ensenada, recientes trabajos realizados por el IMIP confirman lo anterior. En el estudio denominado Estudio Geoestadístico del Fenómeno Delictivo [33] se identificaron relaciones entre ciertos tipos de delito y la aplicación de acciones de gobierno que en primera instancia se concibieron como de beneficio para la población pero también se obtuvieron resultados más allá de lo que se pudo imaginar. Tal es el caso de la construcción de instalaciones deportivas que en primera instancia abaten el déficit de estos espacios en zonas marginadas, pero a la vez elevan la oportunidad de robo de automóvil por la superficie de estacionamiento que siempre acompaña a este tipo de proyectos, o cuando se generan fuentes de empleo se eleva el robo a casa habitación ya que ahora los beneficiados deben de dejar su hogar en horas de trabajo. Otro estudio fue el Programa Parcial de Desarrollo Urbano Maneadero-Punta Banda [3]. Al estar diseñando su normatividad de usos de suelo, siempre se estipuló el respetar el valle agrícola de la localidad de Maneadero, prohibiendo cualquier tipo de urbanización sobre el mismo. Nunca se dudó de los beneficios que esto traería a la actividad económica de la agricultura, pero al simular esta situación en un modelo computacional [19], los resultados mostraron que si se implementaba esta política pública, habría la probabilidad de que se urbanizaran por primera vez áreas aledañas y cercanas a zonas de riesgo. El modelo claramente mostró que al actuar sobre un espacio, inintencionalmente podría afectar a otro originalmente no contemplado. El diseñar una política pública sobre el valle implicaba considerar mas allá del mismo.

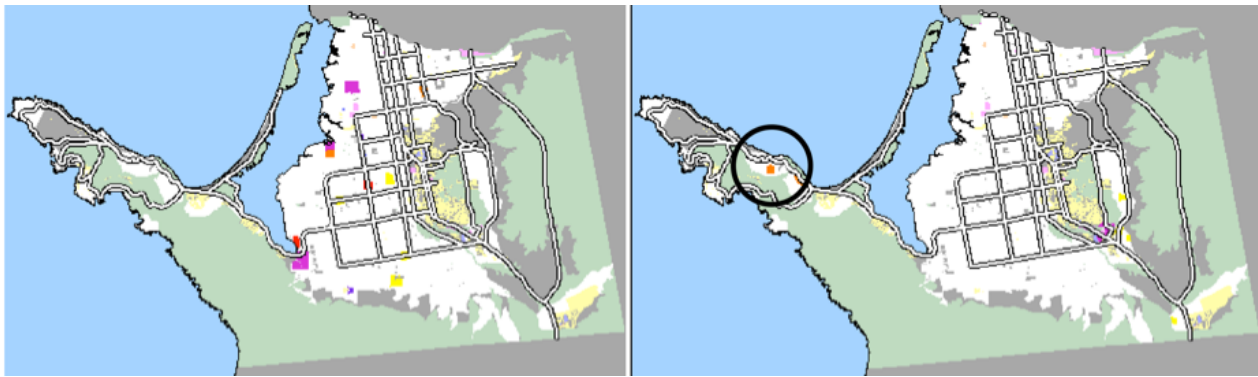


Figura 11: Izquierda: Escenario sin aplicar políticas en donde se observa la urbanización del valle agrícola. Derecha: Escenario de aplicación de política pública para evitar la urbanización del valle agrícola, en donde se encierra en círculo la nueva urbanización que se genera fuera del mismo

A la luz de este tipo de hallazgos, el realizar investigación que genere conocimiento urbano desde la perspectiva de las relaciones e interacciones de los elementos que componen a la ciudad a través de una herramienta que apoye de manera informada en el diseño de políticas públicas en materia de desarrollo urbano sería de gran utilidad.

2.1. Complejidad

Aunque ya ha permeado la idea de investigar a los sistemas naturales y sociales como partes interactuantes y organizadas que dan origen a comportamientos desconocidos o contraintuitivos; este no siempre fue el caso, mucho menos aplicado a las ciudades. Lo anterior se engloba dentro del término de *complejidad*, palabra que proviene de “complectere” de origen latino cuya raíz “plectere” significa trenzar, enlazar (Fig. 12). Su génesis se remonta a la teoría de sistemas la cual tuvo un salto sobresaliente a mediados del siglo pasado cuando Warren Weaver, director de la División de Ciencias Naturales de la Fundación Rockefeller, planteó la pregunta respecto a qué es la ciencia en un artículo de 1948 y mediante su respuesta terminó escribiendo uno de los textos más influyentes en el ámbito de la complejidad

[34]. Su valor estuvo en escribir con claridad y por primera vez el aspecto básico conceptual de la complejidad: la interacción de una gran cantidad de componentes. Para ello, Weaver explica cómo la ciencia desde hace unos trescientos años al presente había dado solución a problemas de naturaleza física en base al manejo de la cantidad de variables, desde dos o tres hace tres siglos hasta cientos o miles a inicios de los 1900. Pero las explicaciones no se podían lograr cuando los problemas eran relacionados a las ciencias de la vida sino se incluía una característica propia de esta: la *organización*. Weaver acuñó el término de *Problemas de Simplicidad* a aquellos que eran resueltos en base a dos o quizá un poco más de variables, y *Problemas de Complejidad Desorganizada* a los problemas en donde se involucraban cientos o miles de variables. Sin importar el número, los componentes de los dos conceptos anteriores se comportan individualmente erráticos, pero precisamente por esta independencia podían ser estudiados con métodos probabilísticos y de mecánica estadística, y así saber el comportamiento probabilístico del sistema bajo estudio. Para los sistemas en donde sus componentes están interrelacionados en un todo orgánico Weaver acuñó un tercer término: *Problemas de Complejidad Organizada* (Fig. 13), y por la intensa interconectividad e interacción de los componentes de este tipo de sistemas visualizó la necesidad de usar grupos de trabajo multidisciplinarios y el poder de procesamiento de las computadoras para su estudio y entendimiento, algo visionario en su tiempo.

Dada la naturaleza del enfoque de la complejidad, este se ha utilizado para al estudio de campos tan diversos como los mercados [35], epidemias [36], redes sociales [37], tráfico vehicular [38], multitudes [39], políticas públicas [40] y ciudades [41], con el potencial de aplicarse a cualquier fenómeno que se pueda abstraer como un sistema compuesto de una gran cantidad de componentes interconectados e interactuantes. Por lo mismo, el enfoque de la complejidad, o sistemas complejos, no ha sido privativo de una ciencia en particular sino ha funcionado como una exploración inter/transdisciplinaria a diversas escalas y ambientes [31] sin importar las fronteras tradicionales entre ideas y conceptos físicos, biológicos, ecológicos

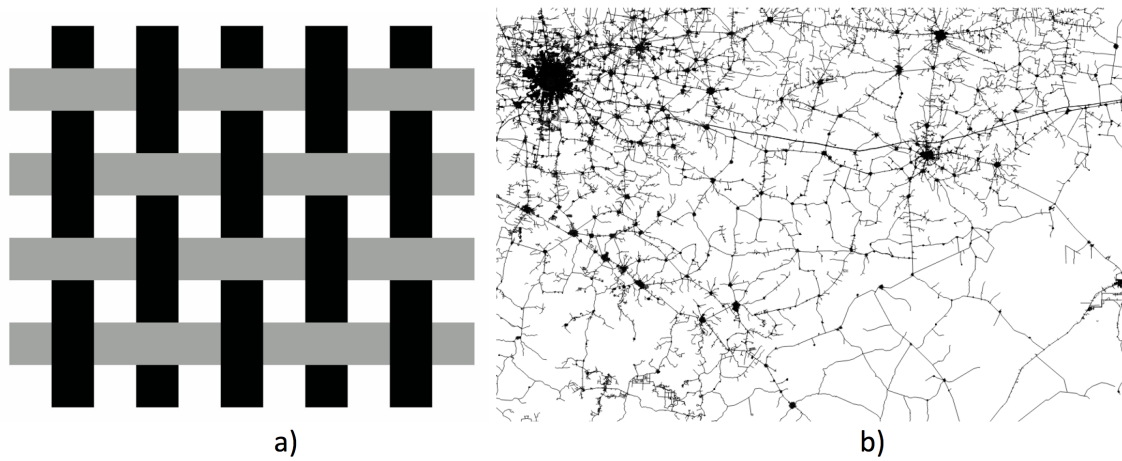


Figura 12: a) La palabra complejidad proviene de la raíz “plectere”, entrelazar: un tejido de elementos inseparables que constituyen un todo. b) Entramado carretero del estado de Yucatán, México.

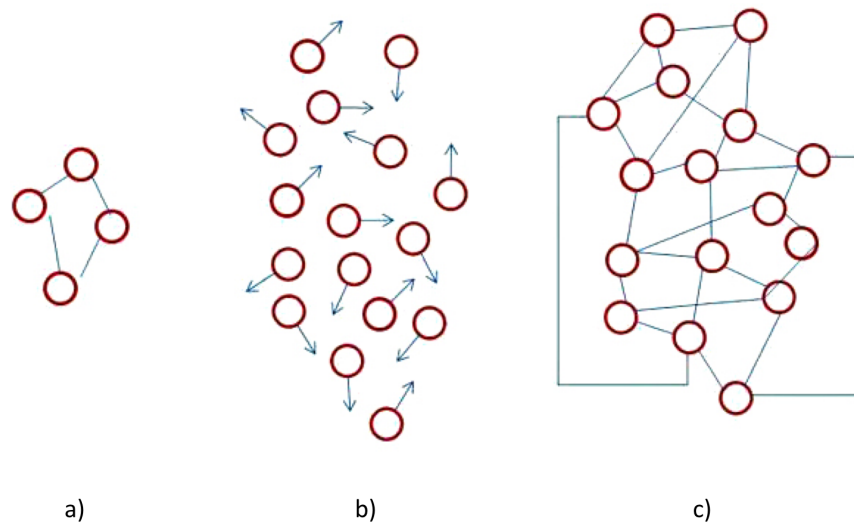


Figura 13: a) Simplicidad, b) complejidad desorganizada, c) complejidad organizada.

y organizacionales, así como entre las ciencias humanas y naturales [42]. Aunque no hay un consenso sobre su definición, quizá por su amplia aplicación, se puede entender a un sistema complejo como *un sistema en donde grandes redes de componentes sin control central y sencillas reglas de operación dan surgimiento a un comportamiento colectivo complejo* [43]. A este comportamiento complejo se le denomina *proceso emergente*, y se puede definir como *el surgimiento de estructuras, propiedades y patrones nuevos y coherentes durante el proceso de auto-organización* [44]. Este comportamiento impredecible es el resultado de las interacciones de los componentes del sistema (Fig. 14). Cuando el comportamiento de un sistema se describe con información diferente a la que se utiliza para describir a sus componentes [15], se está ante un proceso emergente en donde el todo no solo es más que la suma de sus partes sino también diferente a las mismas: mas es diferente [45].

Se puede decir que el enfoque de la complejidad se caracteriza por ser anti-reduccionista (si se eliminan componentes de un sistema no se puede saber con certeza sus consecuencias), holístico, multidisciplinario (por la heterogeneidad que puede existir entre los componentes) y no-lineal (la suma de los componentes no es igual al sistema del que son parte). Sus temas de investigación, métodos y herramientas se muestran en la Tabla 1.

A 70 años de la publicación de su influyente escrito, la visión de Warren no se ha desviado de las tres tendencias actuales de la complejidad. Primero, la interdisciplinariedad y analogía. Segundo, las técnicas y modelos surgidas de la investigación de operaciones y la simulación computacional. Tercero, y quizá de las principales diferencias entre un sistema y un sistema complejo, la noción que la optimización de un sistema a través de su diseño y control ya no es una metáfora adecuada para resolver problemas humanos [46]. Este último aspecto fue lo que causó que las disciplinas del urbanismo buscaran en el enfoque de la complejidad nuevas aproximaciones al problema de las ciudades ante el declive de los sistemas centrales y mecanicistas de la planeación.

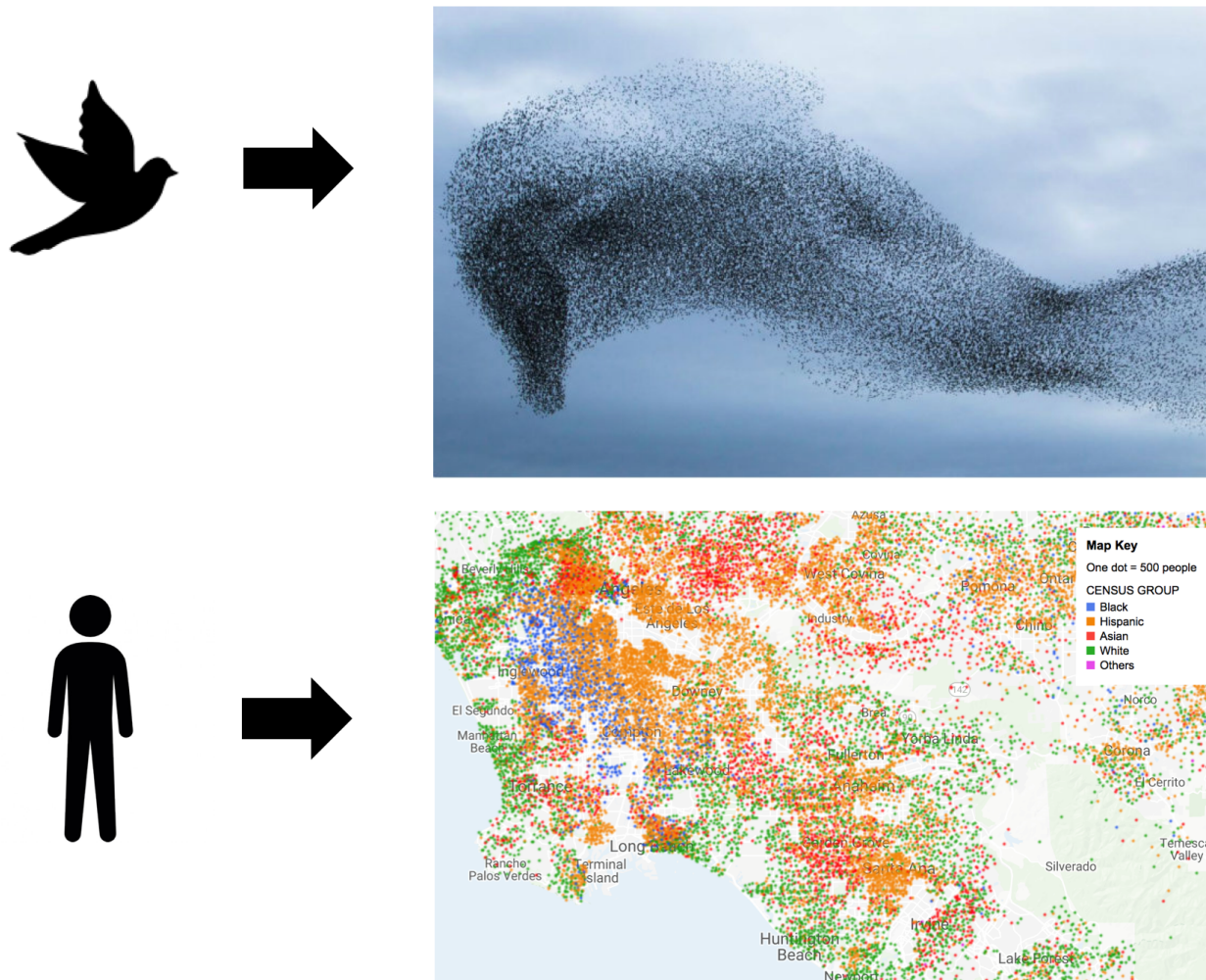


Figura 14: Macro-comportamientos que emergen del micro-comportamiento individual de sus componentes. Arriba, izquierda: una ave como componente básico. Arriba, derecha: del interactuar de cientos de aves emerge una parvada que se desplaza de manera coordinada como una sola unidad. Abajo, izquierda: el ser humano como componente básico. Abajo, derecha: cientos de decisiones individuales respecto a la selección de residencia en su conjunto generan macro patrones de segregación racial en la ciudad de Los Ángeles. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes:

<https://conceptodefinicion.de/wp-content/uploads/2017/12/Parvada.jpg> y

<https://www.nytimes.com/interactive/2015/07/08/us/census-race-map.html>

Tabla 1: Características, temas, métodos y herramientas de la Complejidad. Fuente: elaboración propia

Características	Temas de investigacion	Metodos	Herramientas
Anti-reduccionista	Auto-Organizacion	Automatas celulares	Equipo de computo
Holistica	Adaptacion	Caos	Modelado y simulacion computacional
Multidisciplinaria	Procesos emergentes	Grafos	Lenguajes de programacion
No linear	Autopoiesis	Percolacion	Software informatico
Multiplicidad de estados	Dinamica de sistemas	Teoria de la informacion	
	Evolucion	Redes neuronales	
	Redes	Logica difusa	
	Cambios de fase	Algoritmos geneticos	
	Desempeno de acuerdo a escala	Geometria fractal	
	Aprendizaje	Vida artificial	
	Procesamiento de informacion	Analisis de redes	
	Dependencia de trayectoria	Modelado multi-agente	
	Dinamicas lejos de equilibrio	Mineria de datos	
	Patrones	Inteligencia artificial	
	Segregacion	Teoria de juegos	
		Simulacion numerica	
		Leyes de potencia	
		Machine learning	
		Simulacion Montecarlo	
		Cadenas de Markov	
		Ecuaciones diferenciales	

2.2. Complejidad y políticas públicas

Como se ha mencionado, el enfoque de la complejidad se ha aplicado en varios campos de las ciencias naturales y humanas incluyendo los estudios urbanos, en donde se traslapa de manera natural con el área de políticas públicas porque a través de estas se ha tratado de controlar e inducir de manera histórica el destino de las ciudades. Visto desde la lógica de que las políticas públicas y los sistemas complejos comparten por lo menos el interés de los agentes involucrados y la interacción entre estos y su ambiente [47], es por lo tanto factible aplicar los temas de investigación y metodologías de la complejidad. Estas ofrecen nuevas maneras de pensar sobre la forma de hacer políticas públicas, centrado su atención en conexiones dinámicas y evolución, no solo en el diseño estático de instituciones, leyes, regulaciones y otros instrumentos tradicionales [37]. Más allá de las causas y su control, resalta la importancia de la influencia y la probabilidad. El enfoque de la complejidad supera la forma tradicional de diseñar políticas públicas al tomar en cuenta que estas tienen efectos en otros dominios y que estos dominios interactúan entre sí [31], y por lo tanto identifica nuevas relaciones e interacciones en sistemas urbanos que permiten soluciones más sustentables y exitosas. En el contexto del diseño de políticas públicas, se enfoca en identificar cadenas de causa-efecto y extraer conocimiento de las ciudades al revelar mecanismos subyacentes que conducen hacia el comportamiento observado [30], además de descubrir nuevas formas de abordar los retos urbanos en un contexto de incertidumbre, planteándose como una alternativa al proceso tradicional de diseño de políticas públicas que desconocen las interacciones con dominios ajenos al problema que originalmente pretenden atender [48] y que operarán en un espacio altamente complejo más allá de lo que se pueda controlar u observar de una manera determinista [49]. Debe aportar conocimiento sobre las ciudades al identificar comportamientos emergentes y anticipar cómo estas pueden ser afectadas por la implementación de políticas antes de su aplicación en la vida real [50], además de identificar nuevas relaciones

en la estructura y dinámica urbana que permita soluciones más exitosas y sustentables [51]. Si se lograra esto, se cumpliría la meta de las políticas públicas que es el alterar o mantener el comportamiento de un grupo grande de individuos u organizaciones para alcanzar un resultado social deseado, y la meta del análisis de políticas públicas que es la comparación y evaluación sistemática de alternativas disponibles a actores públicos para solucionar problemas sociales [31]. De esta manera se estaría planteando un nuevo papel de la planeación urbana en el que pretenda estimular o inhibir el surgimiento de nuevas cualidades urbanas [52], mejorar la resiliencia del sistema, disminuir sus vulnerabilidades, inhibir puntos de inflexión peligrosos e identificar actores claves que puedan promover cambios en el sistema [31]. Así, el pronosticar, explicar y controlar tendrían importantes implicaciones conceptuales para quienes diseñan e implementan las políticas públicas [30].

Esta unión entre políticas públicas y complejidad (Tabla 2) se caracteriza por contener múltiples actores y niveles de gobierno, y por procesar las políticas de diferente manera: desde disputas intensas con muchos actores a temas tratados de manera rutinaria fuera de los reflectores públicos, produce decisiones basadas en información limitada, altos niveles de incertidumbre y ambigüedad y toma un tiempo considerable en obtener resultados de las decisiones [53]. De acuerdo a Paul Carney [54] [55] la Complejidad puede ayudar a la formulación de políticas públicas bajo los siguientes preceptos: 1) el comportamiento legaliforme es difícil de identificar porque el proceso de las políticas es guiado por una variedad de fuerzas, por lo que una política que fue exitosa en un contexto puede que no tenga el mismo efecto en otro, 2) los sistemas aparentan tener capacidades de auto-organización que los vuelve difícil de controlar, en donde el efecto que una misma fuerza puede ser grande o pequeño y que es imposible de predecir solo en base de esta fuerza, 3) El ambiente que provee el contexto para las elecciones que toman las personas es inestable y cambia rápidamente, por lo que deben de adaptarse de manera rápida y no depender de una sola estrategia, 4) las personas dentro de sistemas complejos pueden crear su propia percepción de lo que desean y cómo comportarse

Tabla 2: Temas de investigación de las políticas públicas y temas de la Complejidad con que se han abordado. Fuente: elaboración propia.

Temas de investigación de las políticas públicas	Tema de complejidad	Referencias
Inconformidad social, guerras	Puntos de inflexión, Patrones espaciales	\[56] \[57]
Crisis alimentarias	Dinámicas lejos del equilibrio	\[56] \[58]
Análisis de mercados	Redes Fallas en cascada	\[35] \[59]
Interdependencias y riesgos económicos	Redes Fallas en cascada	\[59]
Medio ambiente y cambio climático	Reatrolimentación Redes	\[60] \[61] \[56] \[62] \[63]
Grupos sociales	Redes Auto-Organización Segregación	\[64] \[65] \[61]
Ciudades	Patrones espaciales Procesos emergentes Redes	\[51] \[41] \[40]
Planeación del transporte	Redes Teoría de juegos	\[66] \[67]
Actividad legislativa	Emergencia de patrones	\[68]
Educación	Multi-Agencia Redes	\[69]
Epidemiología	Redes	\[56] \[70]
Instituciones, planeación	Dependencia de trayectoria	\[5] \[6] \[71] \[72]

en el ambiente en que se encuentran, 5) Decisiones tomadas en el pasado pueden producir un efecto de largo plazo o “dependencia de trayectoria”, 6) Comportamiento relativo a la formulación de políticas frecuentemente emerge de interacciones locales a pesar de esfuerzos de un gobierno central de controlarlo.

Aun así y a pesar de la potencial utilidad del enfoque de sistemas urbanos complejos y la cada vez mayor accesibilidad a equipo computacional de alto poder de procesamiento, son escasos los ejemplos de aplicación en el ámbito de la generación de políticas públicas ya que aún no existe un juego coherente y unificado de conceptos y herramientas para planificadores y formuladores de políticas públicas [40]. Y aunque existan actualmente substanciales

avances en estos campos, la mayoría de los estudios son para contextos urbanos ajenos a la dinámica urbana de México en donde la generación de este conocimiento es aún escasa y relativamente novedosa [73], y donde en la literatura extranjera el espacio dedicado a ciudades latinoamericanas es poco, enfocado principalmente al tema de los asentamientos irregulares, así que estos estudios se consideran “en su infancia” [74] y aún son novedosos [73]. El interés de aplicar este enfoque se da en el reconocimiento de que:

- Unifica en una sólida base teórica una diversidad de aspectos urbanos que normalmente se atribuían a diferentes campos del conocimiento.
- Aporta nuevas luces al entendimiento de propiedades de las ciudades bajo conceptos propios de la Complejidad como lo son procesos emergentes, auto-organización y puntos de inflexión, entre otros.
- Al ser un enfoque que por naturaleza se nutre de muy diversos campos, puede ser útil en escenarios de conflicto en donde abunden múltiples perspectivas. Como ejemplo está el consenso sobre cuáles son los problemas urbanos más apremiantes, pero no hay acuerdo sobre qué planes y acciones tomar.
- La incertidumbre y lo impredecible son temas torales de la complejidad representados a través de modelos; y las ciudades son un buen ejemplo de esto.
- No hay ejemplos obvios en donde la complejidad a través de modelos se use para informar a los procesos de planeación [26].

2.3. Sistemas complejos urbanos

Aparejado al fenómeno urbano han surgido una serie de acercamientos para tratar de entenderlo e inclusive querer controlarlo como una reacción ante sus efectos. Aunque su análisis

y estudio sigue siendo tan novedoso como el concepto de la ciudad moderna, existen ya una serie de teorías, estudios e instituciones que inclusive surgieron en épocas tan tempranas como el siglo XIX cuando apenas se iniciaba a reconocer lo urbano como meritorio de estudios propios. Desde finales del siglo XIX y a la par de la efervescencia intelectual relacionada con las ciencias sociales, la economía y la física; se iniciaron las primeras concepciones teóricas de la estructura de las ciudades. Dada la naturaleza de la ciudad industrial en donde se manifestaba el desorden y la insalubridad fue natural concebir que esta desorganización era producto, en términos de estructura, de las dinámicas que se daban desde los componentes más básicos que conforman la ciudad y que por lo tanto era necesario la implementación de un control y planeación de tipo central [46]. Así se establecía la necesidad de un arquitecto para la ciudad, idea que finalmente permeó en el gobierno y lo aceptó como su rol, y en la que solo los intelectuales y profesionales sabrían cómo controlar la ciudad y hacerla funcionar para el beneficio de los demás. Esta concepción de ciudad por simplista que parezca predominó desde entonces hasta casi finales del siglo XX, y que en el contexto de estructura y organización se le llegó a referir como de un tipo de control de arriba-hacia-abajo. A pesar de su prolongada aplicación, este modelo mostró su dificultad de implementación cuando entraron en función estructuras administrativas, de planeación y control urbano para cumplir su fin al no funcionar la racionalidad del proceso lineal de primero estudiar el ambiente, luego decidir, diseñar, generar un plan y luego implementarlo en el territorio a través de una imagen estática espacial que carecía de una característica fundamental: enfatizar las interacciones entre los componentes de la ciudad y así identificar nuevas relaciones en la organización y dinámica urbana que permitieran mejores soluciones [28]. Contrario a esto, se asumió que las ciudades estaban en equilibrio como un sistema cerrado el cual se podía intervenir y mejorar, pero pronto se descubrió que las ciudades eran demasiado diversas y dinámicas como para considerarse en equilibrio. Se concibió que este equilibrio se podía cambiar a través de procesos de diseño, pero en realidad solo era una imagen instantánea de un sistema altamente

dinámico que reaccionaba a las acciones y funciones humanas [46].

Cuando Warren Weaver escribió su influyente artículo sobre complejidad organizada, ya vislumbraba la aplicación de métodos experimentales cuantitativos y matemáticos a las ciencias de la biología, medicina e inclusive las ciencias sociales para poder abarcar los aspectos complejos de las mismas. Y aunque así sucedió también para el tema de las ciudades, en un inicio solo fue hecho por matemáticos y físicos que tenían interés en realizar comprobaciones usando a las urbes como estudios de caso, no para avanzar en el conocimiento de las mismas. Fue así que se generaron modelos urbanos donde se concebían a las ciudades como sistemas físicos dinámicos, particularmente introduciendo el concepto de tiempo (y cambios incrementales), además de aspectos de ubicación. El comportamiento de las ciudades se concibió bajo nuevos conceptos como transición de fase hacia otros estados, puntos de inflexión y caos. Muy en particular, se realizaron modelos que demostraron cómo podrían aparecer de manera espontánea nuevas actividades en lugares inesperados, siendo esta otra de las características emblemáticas de los sistemas complejos: la incertidumbre y los procesos emergentes. Esto iba en directa contraposición a la planeación urbana racional comprensiva que suponía que las ciudades esencialmente eran predecibles y por ende controlables y planeables [75]. Para finales de siglo este modelo pronto daría lugar a un mundo que se concebía cada vez mas de abajo-hacia-arriba, la cual es una de las características de la Complejidad.

Al aplicar conceptos de la física a centros urbanos, los enlaces entre las teorías de la complejidad y el estudio de ciudades se fueron afianzando desde los años 60 tanto en los EUA en el tiempo de grandes intervenciones en materia de infraestructura y en América Latina en los procesos de intenso crecimiento urbano [31]. En los EUA surgió en parte como una reacción a la visión de resolver los aspectos urbanos desde soluciones meramente de infraestructura, y fue la influyente activista y autora Jane Jacobs quien reaccionó contra esta forma mecanicista de concebir a las ciudades que aniquilaba la heterogeneidad y diversidad de las ciudades vibrantes. En su libro *The Death and Life of Great American Cities* [76], Jacobs

utiliza directamente los conceptos de Warren, argumentando que los problemas urbanos no podían abordarse ni como simples ni tampoco de una complejidad desorganizada, sino de una complejidad organizada, propio de las ciencias de la vida. Esto implicaba que las ciudades no fueran vistas como máquinas, sino con características propias de los sistemas vivos de donde emerge la forma de la ciudad desde abajo hacia arriba [77]. Su libro trajo al frente la perspectiva de la complejidad de las ciudades, generando el interés y la participación ya no solo de físicos y matemáticos, sino de sociólogos, arquitectos y urbanistas. Lo anterior contribuyó a la formación de un nuevo dominio de estudio que se le ha nombrado Teoría de la Complejidad de Ciudades [78], la cual explora una variedad de fenómenos urbanos que antes se consideraban independientes y estudiados previamente bajo diferentes bases teóricas [26], pero que ahora se consideran interconectados en lo intrincado de la complejidad urbana [52]. La Teoría de la Complejidad de las Ciudades supera los límites de la planeación urbana tradicional y une aspectos de las ciudades y sistemas complejos, en donde el crecimiento poblacional y económico, el aumento en los niveles de urbanización, la dependencia en infraestructura y el papel de la tecnología en la sociedad son considerados como elementos que impulsan la complejidad urbana [79] logrando, entre otras cosas, una base teórica sólida para una variedad de fenómenos y propiedades urbanas además de aportar nuevo entendimiento de las ciudades con propiedades básicas de la complejidad [26]. Dado que los sistemas complejos están compuestos por elementos con relaciones e interacciones tal y como sucede en asuntos urbanos, este enfoque se ha considerado crucial para el entendimiento de las características y dinámicas de sistemas urbanos al aplicarse en casos de administración de recursos naturales [60], detección de patrones socioeconómicos [80], paisajes urbanos [81], tráfico y transporte [82], [83], conectividad [41], población [39], epidemias [84], cambios de usos de suelo [85] y redes sociales [37], entre otros temas (Tabla 3).

Lo que en un principio empezó como casos de estudio para otras disciplinas impulsados por físicos y matemáticos con temas como ciudades en equilibrio, leyes de escala, redes,

Tabla 3: Temas de investigación de los sistemas urbanos complejos y metodologías utilizadas. Fuente: elaboración propia.

Temas de investigación en sistemas urbanos complejos	Métodos utilizados	Referencias
Patrones espaciales de usos de suelo	Autómatas celulares Modelado basado en agentes	\[86], \[87], \[88], \[89], \[90], \[91], \[92], \[93], \[94]
Segregación espacial de grupos sociales	Autómatas celulares	\[95], \[96]
Desempeño económico de acuerdo a escala	Leyes de potencia	\[97]
Redes de comunicación y servicios	Análisis de redes	\[98]
Redes sociales	Análisis de redes	\[99], \[100], \[101], \[102]
Procesos emergentes urbanos	Autómatas celulares Modelado multi-agente Redes neuronales	\[103], \[104], \[105], \[106]
Desarrollo en base a retroalimentación positiva	Análisis de redes Modelado multi-agente	\[107]
Auto-organización social	Análisis de redes Modelado multi-agente	\[36], \[26]
Fases de transición hacia nuevos estados del sistema	Simulación Montecarlo	\[108], \[109], \[28]
Transporte, tráfico y congestión	Análisis de redes Teoría de grafos Teoría de juego	\[66], \[110], \[83], \[67], \[111], \[66]
Movilidad peatonal	Análisis de redes Teoría de grafos Teoría de percolación Ecuaciones de densidad de flujo y velocidad	\[39], \[112], \[36]
Movimiento intempestivo de multitudes	Análisis de redes Teoría de grafos Teoría de percolación	\[112]
Movilidad residencial	Autómatas celulares Modelado multi-agente	\[47], \[113], \[114]
Ubicación espacial del comercio y servicios	Autómatas celulares Modelado multi-agente	\[115]
Salud y vectores infecciosos	Análisis de redes	\[108]
Interacciones mercado de suelo y bienes raíces	Autómatas celulares Modelado multi-agente	\[35], \[39]
Asentamientos irregulares	Autómatas celulares Modelado multi-agente	\[116], \[105], \[74], \[117]
Crecimiento urbano disperso	Autómatas celulares Modelado multi-agente	\[118], \[119], \[120], \[40]
Distribución de ciudades por tamaño	Leyes de potencia	\[28]
Procesos de planeación urbana	Modelado multi-agente Análisis de redes Algoritmo genético Red neuronal	\[121], \[122], \[123], \[124], \[125], \[82], \[126], \[80], \[127], \[128]
Contingencias urbanas por desastres	Modelado multi-agente Análisis de redes	\[79], \[129], \[30]
Distribución espacial de aspectos económicos	Autómatas celulares Modelado multi-agente Análisis de redes	\[64], \[35]

crecimiento exponencial, crecimiento logístico, comportamiento no-lineal, caos y bifurcación [41], estos han fertilizado el campo del urbanismo, actualizandolo hacia la concepción de la ciudad con comportamiento y organización evolutivo donde cambia y se adapta [130], la clasificación de ciudades de acuerdo a leyes de potencia [131], la identificación de un código genético en ciudades en base a estructuras funcionales y espaciales [132] y las ciudades como una hiper-red o “sistemas de sistemas de sistemas” [133], entre otros aspectos. El campo de la complejidad puede arrojar nueva luz sobre métodos innovadores para el estudio de los asentamientos humanos [37], ya que el entendimiento de sus relaciones funcionales es uno de los factores claves para el diseño de políticas públicas efectivas en materia de desarrollo urbano [80]. A pesar de estos avances, la presencia de profesionales en el campo del urbanismo y la planeación sigue incipiente (Tabla 4), por lo que la aportación de la complejidad al estudio de las ciudades apenas inicia.

2.4. Metodologías de modelado urbano.

En el más amplio sentido de la palabra, un modelo es una representación simplificada de una estructura o sistema [15]. Visto así, hay varias maneras de representar la realidad de las ciudades actuales, pero todas se pueden englobar en formas físicas de representación y formas conceptuales de representación [134], y su desagregación es la siguiente:

- Modelos físicos: la realidad representada por características materiales.
 - Modelos físicos icónicos: El mundo real es representado con un cambio de escala y en algunas de sus propiedades (Maquetas).
 - Modelos físicos análogos: El mundo real es representado con mayor abstracción y de acuerdo a reglas de transformación (mapas, planos, gráficos, esquemas).
- Modelos conceptuales: La realidad es representada por medio de lenguajes y símbolos.

Tabla 4: Principales autores relacionados al tema de sistemas urbanos complejos consultados para esta investigación, y su formación profesional. Fuente: elaboración propia.

Autor	Formación
Robert Axelrod	Ciencias matemáticas PhD Ciencias Políticas Computación
Robert Axtel	Ciencias sociales Políticas públicas Arquitectura y urbanismo
Joana Barros	Maestría en Planeación Urbana y Regional PhD Estudios de Planeación
Michael Batty	PhD Planeación Urbana y Rural
Itzhak Benenson	MSc, Matemáticas (Álgebra) PhD Biofísica Matemática
Luis M. Bettencourt	Ph.D. Física Teórica Ingeniería Física
Keith C. Clarke	B.A. Geografía y economía M.A. Geografía Ph. D. Geografía (Cartografía Analítica) PhD Geografía,
Andrew Thomas Crooks	MSc Ciencia de Información Geográfica B.Sc. Geología y Geografía Física Matemáticas Latinas
Guy Engelen	Geografía
Peter M. Allen	Física Teoría Física
Volker Grimm	Biología PhD Física Ecología Teórica PhD Ciencias de la tierra PhD Economía
Furtado, Bernardo Alves	Maestro en Geografía (Tratamiento de la Información Espacial) Especialista en Urbanismo, Bachiller en Arquitectura y Urbanismo
Nigel Gilbert	Ciencias de la Ingeniería Ph.D. University of London, Centre for Advanced Spatial Analysis
David O'Sullivan	M.Sc. Cartografía y Tecnología de Geo-información Relaciones industriales y Estudios Sindicales Ingeniería B.A. Matemáticas
Scott E. Page	M.A. Matemáticas, M.A. Economía de la Empresa Ph.D. Economía Gerencial y Ciencias de la Decisión BA Arqueología e Historia
Juval Portugali	MA Estudios Urbanos y Regionales PdD Department of Geography London School of Economics and Political Science
Roger white	PhD Geografía teórica y económica BA Economía y Filosofía

- Modelado estadístico: Formaliza relaciones entre variables en la forma de ecuaciones matemáticas. Describe como una o más variables aleatorias están relacionadas a una o más variables. La función lineal es la expresión matemática más simple disponible para modelar la relación entre dos o más variables cuantitativas.
- Modelado matemático: formaliza teorías mediante modelos de cambio en tiempo continuo y el análisis causal de patrones emergentes. Es útil para el modelamiento de sistemas dinámicos que por definición no describen comportamientos lineales. De las técnicas más usadas para modelar comportamientos no lineales son las ecuaciones diferenciales (para los sistemas dinámicos). Se puede derivar el comportamiento futuro de un sistema desde su estado actual.
 - Modelos teóricos o pasivos: para aumentar el entendimiento de las dinámicas urbanas.
 - Modelos operacionales o activos: para solucionar un problema en particular.
- Modelado computacional: permite formalizar teorías mediante modelos de cambio en tiempo continuo y el análisis causal de patrones emergentes empleando para ello el lenguaje de la programación.

Dadas las exigencias de procesamiento de información propio de los sistemas complejos, su representación y trabajo se da a través de equipos computacionales, que con respecto al listado mencionado arriba correspondería a la representación conceptual o modelado científico [135] a través del modelado computacional.

2.4.1. Modelado computacional

Dada la gran cantidad de variables, estados, interacciones, relaciones y reglas a considerar en un sistema complejo, se asevera que sin la existencia de los equipos de cómputo el cam-

po de la Complejidad no hubiera emergido [136], [137]. Con la formalización de un sistema urbano a través de un modelo computacional es posible hacer una serie de ejercicios tanto para entender el sistema como el pronosticar sus posibles estados futuros que para los tomadores de decisiones en materia urbana pueden ser de gran importancia. Ya desde los años 60, con un enfoque inicial en temas de transporte urbano y usos de suelo, se ha utilizado el poder de procesamiento de estos equipos para implementar los temas de investigación de la complejidad a través de métodos como los autómatas celulares (Fig. 15), [6], [118], teoría del caos, redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos, geometría fractal, vida artificial, análisis de redes y modelos multiagentes para realizar modelos y ejercicios de simulación que coadyuven en el entendimiento de los centros urbanos o que proyecten su comportamiento futuro [136]. La aplicación de estos conceptos ya ha sido variada, pero circunscribiéndonos al tema de dinámicas urbanas similares a las observadas en México, se han utilizado modelos híbridos de regresión logística, cadenas de Markov y autómatas celulares para simular el crecimiento de población, representación de los impulsores de dispersión con el uso de autómatas geográficos [120], representación de crecimiento disperso a través de enlaces de procesos de escala macro con procesos de micro-dinámicas [119], mapas probabilísticos de usos de suelo disperso [138] y su modelado en Sistemas de Información Geográfica [139]. Ha sido tal el reconocimiento del potencial de la simulación que se le ha clasificado como la tercera manera de hacer ciencia además de los procesos inductivos y deductivos [140], y se le ha llegado a denominar como las Ciencias Sociales Computacionales [141], entendida como "...la investigación interdisciplinaria e integrada, a través de sistemas computacionales avanzados, de sistemas sociales como organizaciones que procesan información" [8] (Fig. 16).

La utilidad de estas herramientas estriba en que se pueden plantear preguntas del tipo "qué sucedería si" como una manera para analizar políticas públicas [32] donde se pueden probar in-sílico con diferentes opciones de políticas públicas de manera práctica y económica abordando sus efectos, efectividad y costos [130]. Como lo mencionan Furtado y Sakowski:

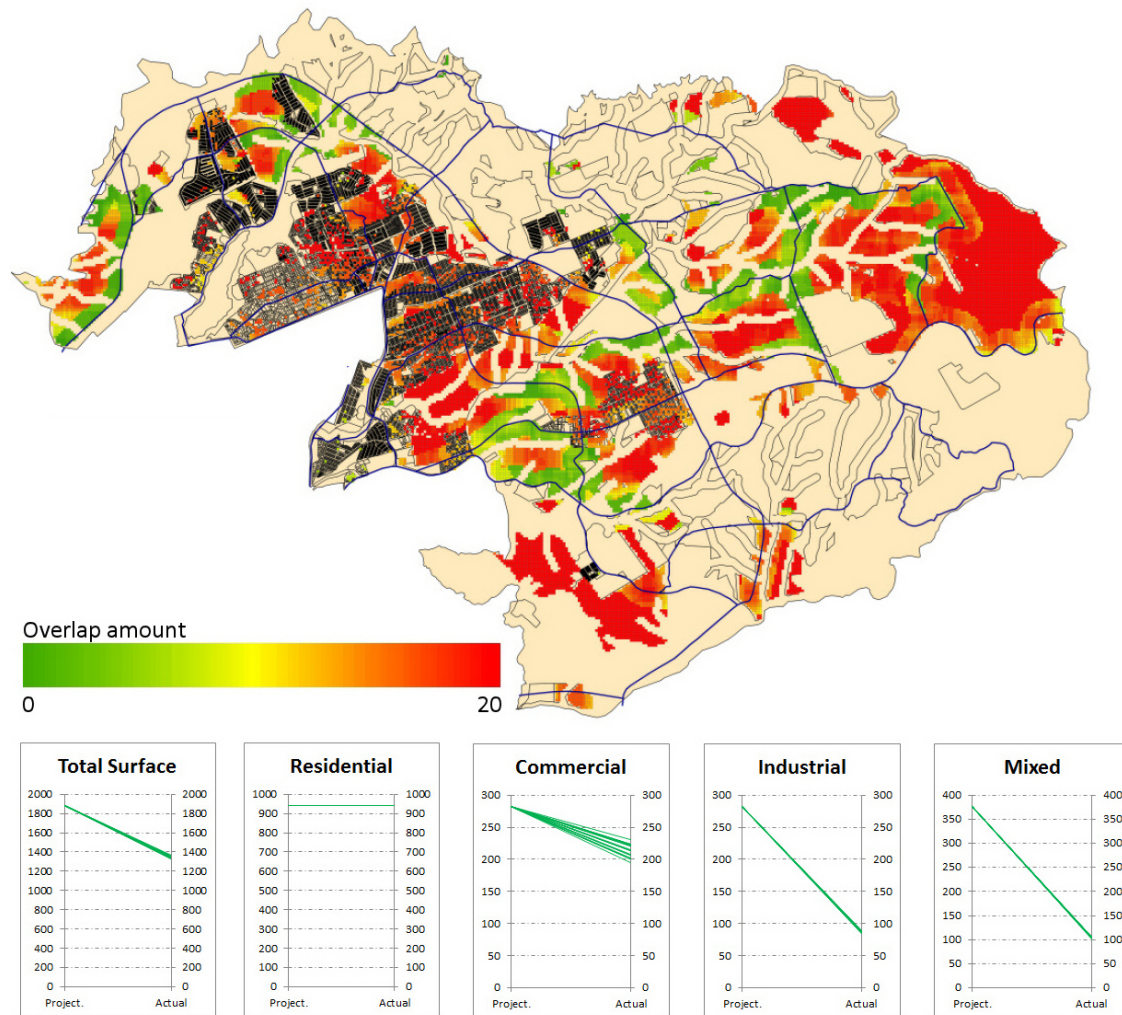


Figura 15: Resultado de una simulación urbana enfocada a identificar impactos urbanos en Ensenada, México [6]

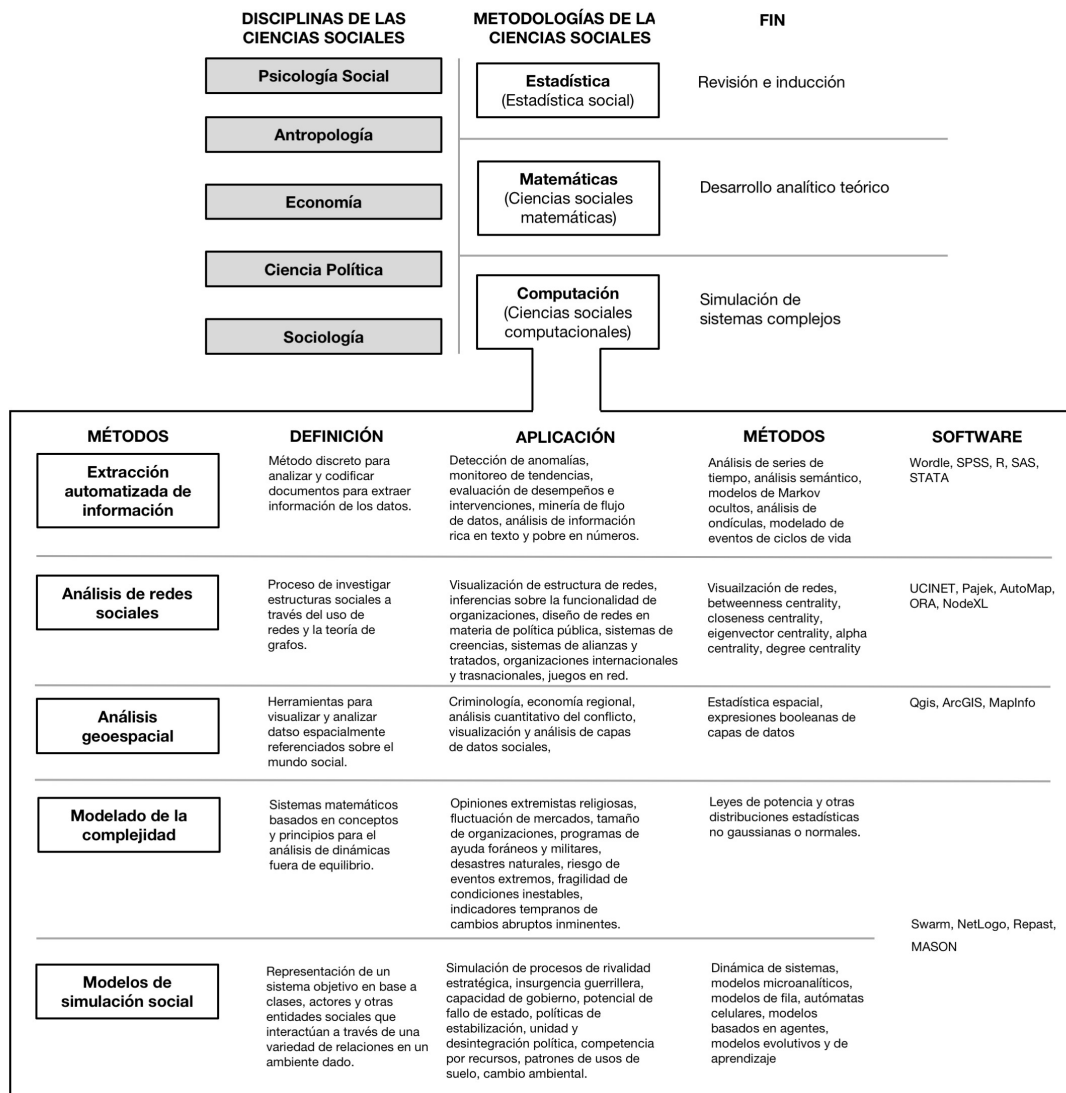


Figura 16: Las ciencias sociales computacionales. Fuente: elaboración propia en base a [7] y [8].

“El simular significa modelar la acción y la interacción entre ciudadanos, firmas, instituciones y el ambiente limitados por la legislación y regulación, el presupuesto, políticas y límites espaciales (...) trabajar con sistemas complejos aplicados a la política pública significa crear ambientes experimentales computacionales en donde está presente la esencia de los sistemas y de donde se pueden extraer elementos para el mejoramiento de políticas públicas de una manera relativamente simple y barata, además de aumentar el entendimiento de los efectos (espacial y temporal) de las políticas.” Esto es fundamental ya que al identificar los mecanismos clave de un sistema urbano se puede determinar de qué manera se deben de afectar para provocar un cambio particular y esto, junto con evitar sorpresas indeseadas, es precisamente el fin que persiguen las políticas públicas. Sin este entendimiento de sus principios intrínsecos sería muy difícil no solo saber qué “palanca” se tendría que usar para obtener el efecto deseado, sino también en qué momento se dejaría de usar para no empezar a tener efectos no deseados [31]. En un entorno de presupuesto y recursos limitados donde los grandes proyectos urbanos se vuelven prohibitivos por su alto costo, la intervención quirúrgica y selectiva se vuelve esencial. Bajo la luz de la complejidad, se vislumbra entonces que una de las claves de la administración de sistemas interactuantes y complejos es que las soluciones no se imponen per se, sino que se extraen del mismo sistema, para guiarlo hacia uno de los estados disponibles a los que se puede conducir, visto desde un punto de vista integral de sus componentes [32].

La utilidad entonces del enfoque de sistemas urbanos complejos a través de la simulación computacional, aparte del entendimiento y predicción [15], estriba también en la planeación. Por una parte, ayuda en el entendimiento del sistema a través de la caracterización de sus comportamientos y así identificar propiedades esenciales [31]. Inclusive el proceso de construcción del modelo puede ser tan esclarecedor como el uso del mismo modelo porque revela qué es lo que sabemos y qué no respecto a sus conexiones y causalidades [137], y con este conocimiento se pueden diseñar mejores políticas públicas. De esta manera, se lograría uno

de los potenciales aun no alcanzados del modelado urbano: la aplicabilidad de estas herramientas por las organizaciones oficiales encargadas de regir el desarrollo de las ciudades [141]. Por la otra parte, se puede utilizar para realizar pronósticos de escenarios que pudieran resultar de manera imprevista si se aplican ciertas políticas públicas. Respecto a esto último, aunque el modelado no indica con absoluta certeza los efectos de una política en la vida real, el tener conocimiento de la variedad de estos efectos nos aseguraría un mejor entendimiento del conjunto de lo posible y asegurar así políticas públicas más robustas [31]. Por ejemplo, para demostrar que para que un sistema llegue a un estado deseado, las acciones necesarias a aplicar a sus componentes pueden ser contra-intuitivas, que respuestas individuales pueden diferir de efectos agregados, que los resultados dependen de trayectorias y que los detalles institucionales pueden ser significativos. Estas son poderosas lecciones para los tomadores de decisiones. Pero más allá de eso, los modelos existentes son meramente conceptuales si no son adaptados a las ciudades interesadas en aplicarlos, por lo que mientras no se haga esto no son de mucha utilidad.

2.4.2. Modelado computacional del crecimiento urbano

De las metodologías para realizar modelos urbanos, las que interesa para el presente trabajo es el modelado computacional, el cual se puede realizar de acuerdo a las aproximaciones mostradas en la Tabla 5. De acuerdo a Axelrod y Tesfatsion, los objetivos perseguidos en el modelado computacional toman cuatro formas: el entendimiento empírico y normativo, la heurística y el avance metodológico [142]. En esta última la pregunta a responder es cómo suministrar a los investigadores de estos modelos con los métodos y herramientas que necesitan para realizar el estudio riguroso de sistemas sociales a través de experimentos controlados. Actualmente estos investigadores están explorando una variedad de maneras para abordar este objetivo que van desde la consideración de principios metodológicos hasta el desarrollo

Tabla 5: Aproximaciones de modelado computacional. Adaptado de [17]

Aproximación	Enfoque	Preguntas de investigación comunes
Dinámica de sistemas	Influencia de relaciones causales en el funcionamiento de un sistema.	¿Qué condiciones crean inestabilidad en el sistema?
Paisaje adaptativo	Rapidez y efectividad con que un sistema modular se adapta para alcanzar un punto óptimo.	¿Cuánto tiempo se toma para encontrar un punto óptimo? ¿Cuál es el desempeño del punto óptimo?
Algoritmos genéticos	Adaptación de una población de agentes a través del aprendizaje adaptativo.	¿Qué afecta la tasa de adaptación, aprendizaje o cambio? ¿Cuándo emerge una forma óptima?
Autómatas celulares	Emergencia de macro-patrones de micro interacciones a través de procesos espaciales en una población de agentes.	¿Cómo emerge y cambia el patrón? ¿Qué tan rápido emerge un patrón?
Procesos estocásticos	Exploración de teorías que no se ajustan a la lógica teórica ni los supuestos de las aproximaciones de simulación estructurada.	¿Cuáles son los efectos de variar las fuentes estocásticas?
Agentes	Interacción entre sí y con el ambiente de agentes autónomos y heterogéneos, con poco o nulo control central.	¿Cuáles son los procesos emergentes identificados?

de herramientas de programación y visualización.

La metodología que se va a diseñar en esta investigación estará enfocada al modelo basado en agentes a través de autómatas celulares el cual se centra en la dimensión espacial y el surgimiento de patrones.

2.4.3. Modelos basado en agentes

Ya que unas de las características principales de los sistemas complejos son las interacciones de sus componentes y los procesos emergentes que surgen de estas, una aproximación del modelado computacional que se basa en estas dinámicas son los modelos basados en agentes. La pieza básica de estos modelos es el agente, el cual es una entidad única y autónoma que interactúa con el resto de los agentes que existan en el modelo y con el ambiente en donde están inmersos. Las características principales de un agente son [143][144]:

- Autonomía: No hay un control central de los agentes, deciden por sí mismos.

- Heterogeneidad: Cada agente puede tener sus propios atributos (estados de variables y valores) y reglas de comportamiento
- Espacio explícito: Los agentes existen dentro de un espacio, el cual puede ser un ambiente físico o abstracto (por ejemplo, una red social)
- Racionalidad limitada: Los agentes no tienen un conocimiento universal, solamente aquel que es específico a su contexto.
- Reglas de comportamiento: Cada agente debe ser capaz de responder proactivamente a cambios en su ambiente.

Un agente puede ser un humano, un organismo, una corporación o cualquier otra entidad que persiga una meta [145]. Por esta flexibilidad de aplicación, el modelado basado en agentes se ha utilizado en temas tan diversos que van desde el estudio de flujos peatonales hasta el crecimiento urbano y grandes migraciones [9]. El fin de este tipo de modelos es el crear agentes y reglas que generen un comportamiento de interés. Cuando este comportamiento se desarrolla en un espacio físico, una familia de estos modelos son los denominados autómatas celulares.

Autómatas celulares

Los sistemas complejos, como ya se mencionó, tienen una amplia aplicación, y la selección de los métodos y modelos van a depender de los campos en los que se emplea. Hay sistemas que tienen la propiedad de ser ubicuos, como los mercados financieros o las redes sociales en donde las personas pueden estar integradas a los mismos sin importar su ubicación. Todo lo contrario, hay sistemas que tienen en la ubicación espacial un componente determinante. Tal es el caso de las ciudades las cuales se desenvuelven en contextos explicados por la geografía y la noción de territorio, ambos inminentemente espaciales. Desde los inicios de la teoría

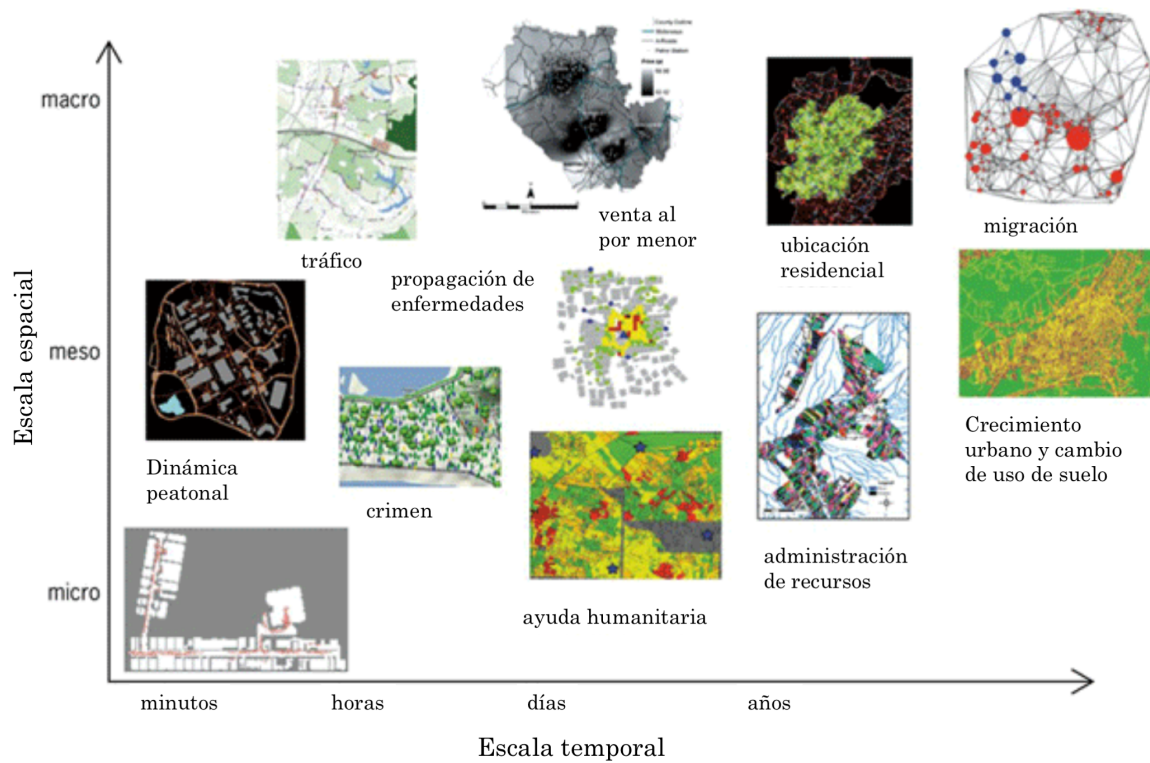


Figura 17: Uso de modelos basados en agentes de acuerdo a escalas de tiempo y espacio.
Traducido de [9]

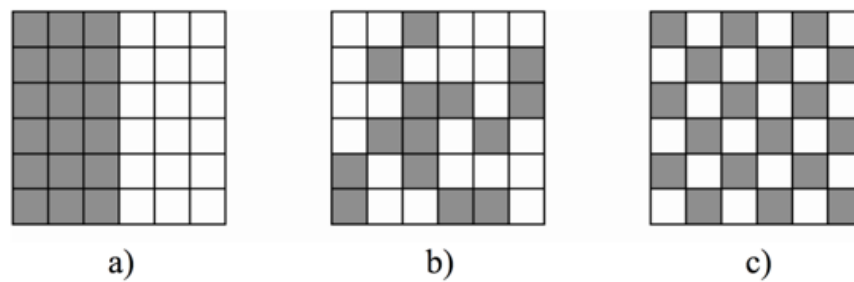


Figura 18: Tipos de autocorrelacion espacial. a) Positiva: cercanía espacial con atributos similares, b) Sin autocorrelacion, c) Negativa: cercanía espacial sin atributos similares.

de sistemas, las ciudades rápidamente atrajeron la atención por su intrínseca característica compleja. Weaver ya había escrito sobre la interrelación de variables de una manera general, pero fue Waldo Tobler [146] quien lo relacionó con la geografía de una manera tan simple que sigue permeando hasta hoy. Aceptando que en términos generales todo está relacionado con todo, reflexionó que en teoría cualquier problema podría volverse infinitamente complejo, particularmente en las ciencias sociales. Por ejemplo, la cantidad de población de un lugar A sería parte de la población de una región, que a su vez formaría parte de la población de un país, que a su vez formaría parte de la población total del mundo. Así como Weaver utilizó el ejemplo de una mesa de billar con miles de pelotas colisionando para explicar que un sistema puede caracterizarse en su conjunto a través de comportamientos promedios; Tobler trajo el ejemplo del clima para explicar que a pesar de ser el resultado de variables que se pueden ir agregando hasta llegar a un nivel mundial, se podían resumir con aproximaciones hasta tener un número reducido. Igualmente, aunque un sistema social pudiera considerarse complejo por su gran cantidad de variables, desde una perspectiva espacial este podría volverse más manejable si se considerara la variable de cercanía. De aquí se desprendió lo que Tobler denominó la Primera Ley de la Geografía: “Todo está relacionado, pero las cosas cercanas están más relacionadas que con las lejanas”. Hasta el día de hoy esta ley sigue siendo citada en estudios de naturaleza espacial y ha dado pie al concepto de autocorrelacion espacial (Fig. 18), la cual es una propiedad que mide la similitud entre cosas cercanas y lejanas [147].

A la par que Tobler daba a conocer su Primera Ley, la revista *Scientific American* publicaba un aparentemente sencillo e intrascendente juego matemático de naturaleza espacial en su cotidiana columna de juegos matemáticos [148]. A llevarse a cabo en una hoja cuadriculada y con fichas que se tuvieran a la mano o inclusive con lápiz y borrador, el juego era sumamente fácil de explicar y entender, pero sus reglas fueron deliberadamente diseñadas para que los resultados futuros no se pudieran predecir, lo que resultó cierto hasta muy recientemente solo gracias al uso de las computadoras. En aquel entonces se indicaba iniciar el juego distribuyendo fichas, una dentro de cada celda de la cuadrícula para formar un patrón al gusto del jugador. Esta era la primera y única vez en que se tenía participación en el juego, ya que el resto era aplicar de manera sucesiva solamente tres reglas que modificaban constantemente la distribución inicial de las fichas. Estas reglas eran:

1. Sobrevivencia: cada ficha con dos o tres fichas vecinas sobrevive a la siguiente generación.
2. Muerte: cada ficha con cuatro o más vecinos muere (se elimina de la cuadrícula) por sobrepoblación. Cada ficha con una o ninguna ficha vecina muere por aislamiento.
3. Nacimiento: cada celda vacía con exactamente tres fichas como vecinos—no más, no menos—da nacimiento a una nueva ficha que se coloca en la siguiente generación.

Lo que sucedía a continuación es una de las más claras y sencillas representaciones de un sistema complejo: reglas e interacciones que provocan resultados contraintuitivos o inesperados. Partiendo inclusive de la más sencilla y fácil de recordar distribución de fichas, estas se reproducen, sobreviven y/o mueren a lo largo de generaciones abarcando amplias superficies de la cuadrícula hasta llegar a un perpetuo estado oscilatorio o fijo. No es fácil saber en qué número de generación se llegará a estos estados, ni el camino que se recorrerá para llegar hasta ahí, ni siquiera en qué estado estarán las celdas a solo dos o tres generaciones en el

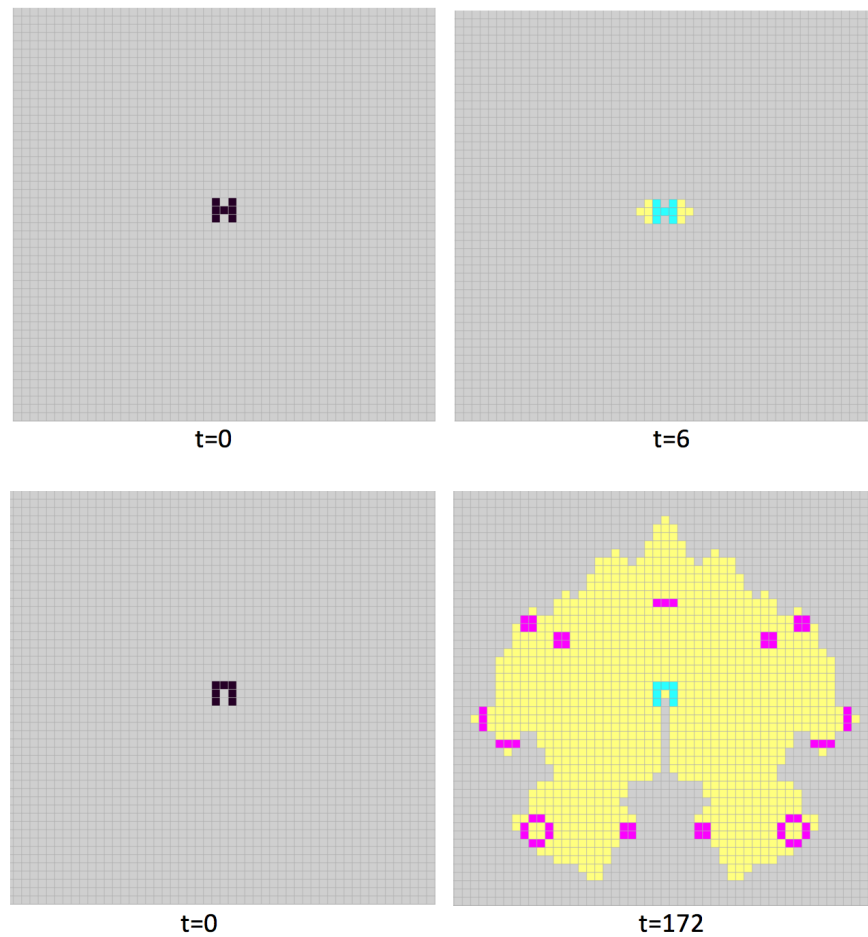


Figura 19: Historias de dos juegos de la vida partiendo de estados iniciales con solo una celda de variación entre ambos. Arriba: estado inicial de 7 celdas vivas en forma de H, que se estabiliza después de solo 6 generaciones. Abajo, estado inicial de 7 celdas vivas en forma de Pi, que se estabiliza hasta después de 172 generaciones. En amarillo se muestran celdas que algún momento estuvieron vivas, y en rosa celdas vivas finales.

futuro. Inclusive una mínima variación en iguales condiciones de inicio arroja resultados sorprendentemente diferentes (Fig. 19). Este juego fue diseñado por el matemático John Conway y lo llamó simplemente *vida*.

Después del juego de Conway, Tobler utilizó la coloquial frase “A donde fueres, haz lo que vieres” para ilustrar [10] su perspectiva sobre cercanía, ahora con modelos matemáticos espaciales aplicados a la geografía. Nueve años después de introducir su Primera Ley de la Geografía, indicaba que esta frase equivalía a decir que las reglas dependen del lugar donde

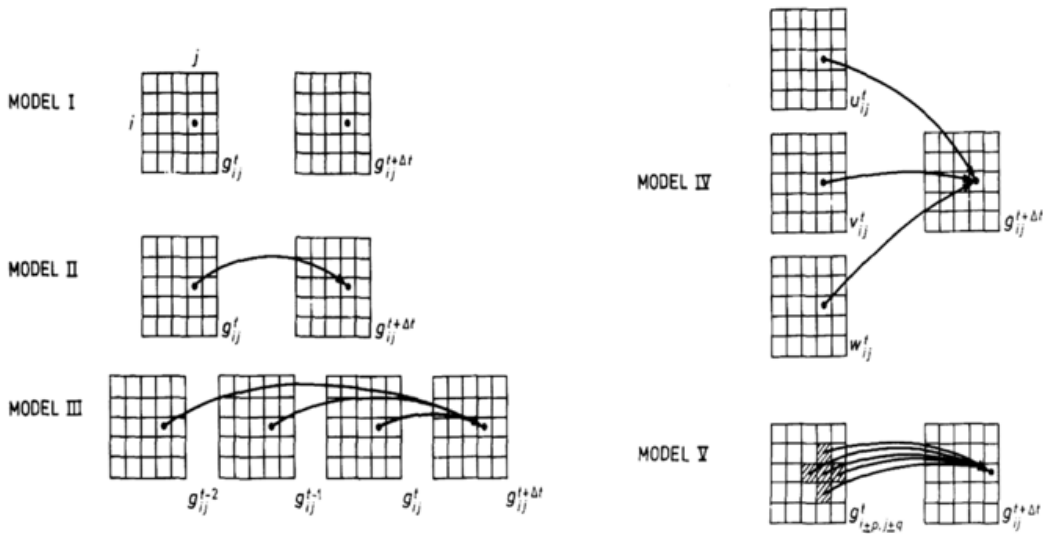
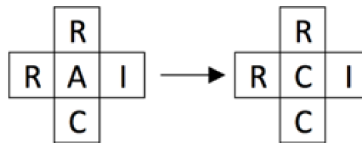


Figura 20: Clasificación de modelos de cambio de uso de suelo. El nuevo uso de suelo: I) Independiente: no tiene relación con el uso de suelo anterior, II) Dependiente: depende del uso de suelo anterior, III) Histórico: depende de varios usos de suelo anteriores, IV) Multivariable: depende de otras variables de la misma ubicación, V) Geográfico: depende de los usos de suelo vecinos [10].

se apliquen. Esta concepción sería la más reciente de una serie de modelos que explicarían los motivos de cambio de usos de suelo en base al entorno espacial adyacente (Fig. 20).

Aquí ya no habló de cercanía, ahora se refirió a *vecindad*, palabra que se sigue utilizando hasta el día de hoy en modelos espaciales. En esta vecindad aplicaban *reglas de transición*, en un espacio cuadriculado conformado por *celdas* que estaban en uno de varios posibles *estados*. Siguiendo con el ejemplo de los usos de suelo, propuso que estos estados podrían ser: Residencial (R), Comercial (C), Industrial (I), Público (P), y Agrícola (A), y una vecindad de 5 celdas. Había por lo tanto 5 estados y 5 vecinos (celdas al norte, al sur, al este, al oeste y la central). Por lo tanto, una regla de transición (cambio de uso) podría ser:



que en este caso significaba que la celda central de uso Agrícola cambiaba a un uso Co-

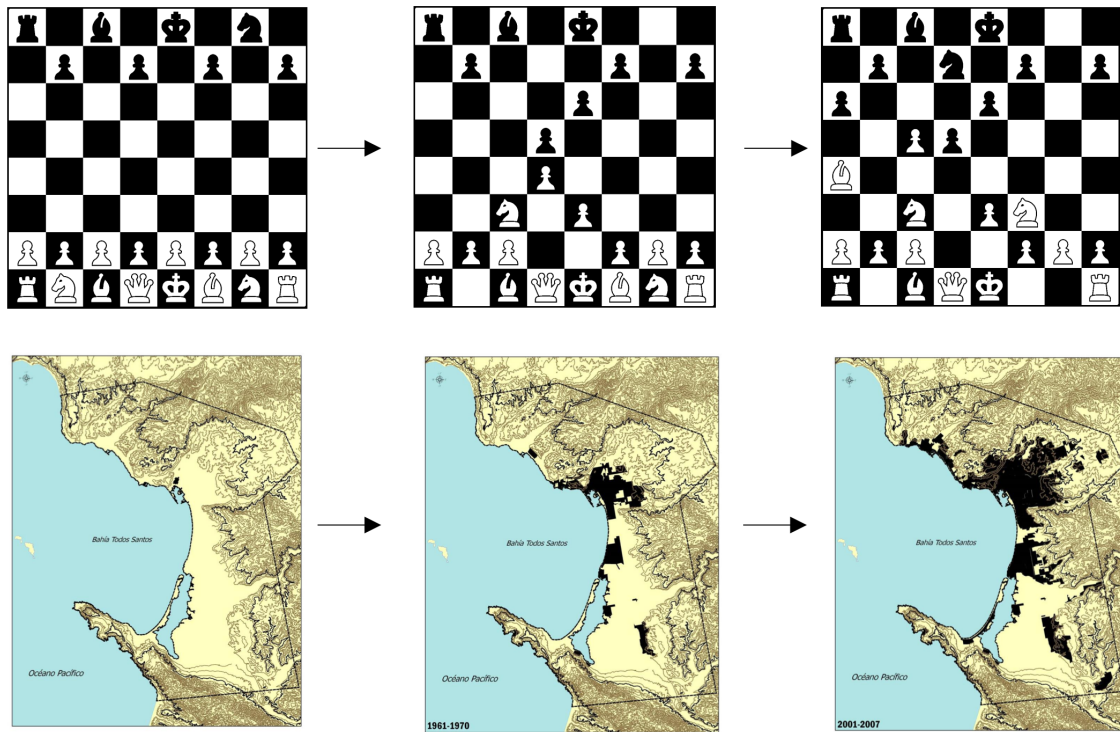


Figura 21: Secuencia ordenada de una partida de ajedrez y del crecimiento de una mancha urbana: ¿se podrán extraer las reglas de comportamiento observando su evolución?

mercial. Este cambio de un estado a otro no podía ser aleatorio sino como consecuencia de causas específicas propias de cada geografía. La deducción de estas reglas de transición fue un tema de interés para Tobler, y lo sigue siendo en recientes estudios [149], [150], [151]. Esto lo ejemplificó claramente con el siguiente ejercicio: teniendo 20 imágenes en orden secuencial de las posiciones de piezas de un tablero de ajedrez, determinar sus reglas. Terminaba preguntando si se pudiera hacer lo mismo para los patrones que cambian la superficie de la tierra (Fig. 21).

Estos conceptos de vecindad, reglas de transición y estados manejados por Tobler y Conway son características de los modelos llamados autómatas celulares. Su concepto se remonta a los primeros ejercicios realizados por el matemático John Von Neumann en la década de los 40s cuando estudiaba los mecanismos de auto-reproducción y modelado de vida, quien a

su vez fue influenciado por los trabajos del computólogo y criptógrafo Alan Turing el cual trabajó en la creación de una computadora capaz de poder actuar por sí misma (de ahí el término autómeta) en base a un conjunto de parámetros y al conocimiento del mundo externo.

Autómata se puede definir en términos llanos como “un mecanismo de procesamiento con características que cambian en el tiempo basado en características internas, reglas y entradas externas” [152]. También como una máquina que opera por sí misma que “procesa información, procediendo lógicamente, realizando inexorablemente su nueva acción después de aplicar datos recibidos fuera de sí misma a la luz de instrucciones programas dentro de sí misma” [153]. Los autómatas celulares se desenvuelven en un espacio compuesto por celdas, donde cada una procesa información y actúa en base a una serie de reglas de transición y de información que recibe de su ambiente [154]. Formalmente, cada celda A se define por uno de un juego de estados posibles $S = S_1, S_2, \dots, S_N$ y un juego de regla de transición T

$$A \leftarrow (ST)$$

Las reglas de transición definen el estado S_{t+1} de un autómeta en el tiempo $t+1$ dependiendo del estado previo t , $S_t(S_t, S_{t+1}, \in S)$ y la entrada de información I_t

$$T : (S_t, I_t) S_{t+1}$$

La entrada de información proviene del estado de las celdas adyacentes, o vecindad

$$A \leftarrow (STR)$$

donde R son las celdas vecinas de A, de donde se toma la información I para aplicar reglas de transición T para la celda A. Las vecindades más utilizadas en los autómatas celulares

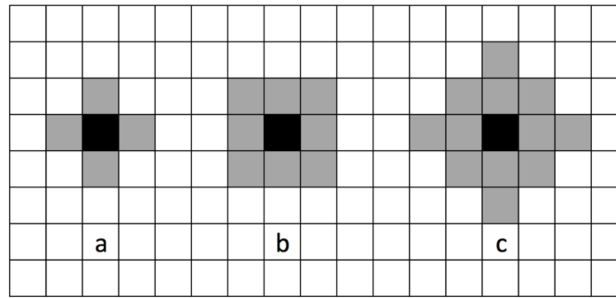


Figura 22: Tipos de vecindades: a) Von Neumann, b) Moore, c) Moore Extendida

son las de Von Neumann y Moore, e inclusive se amplían como la de Moore Extendida (Fig. 30).

Dado que hay estudios que han mostrado que las propiedades de objetos urbanos como los usos de suelo y la imagen urbana son fuertemente influidos por su relación con sus vecinos más próximos [75] y que los Autómatas Celulares es uno de los más fuertes modelos para simular patrones de crecimiento urbano debido a su estructura, sencillez y posibilidades de evolución [11], estos se han aplicado a estudios urbanos [155], [154] respetando la premisa de que celdas adyacentes cambian sus estados mediante la repetitiva aplicación de reglas sencillas [156] en donde las reglas de transición se relacionan a factores territoriales (Fig. 23). Dicho estudios se han relacionado a la predicción de comportamiento [150], expansión urbana [157], [158], [119], contracción urbana [159], cambio de usos de suelo [15], transporte [160], patrones espaciales [161], procesos de densificación [162] y como una herramienta para el análisis de políticas públicas [163]. Dado que no hay modelos preelaborados y hay que crearlos de acuerdo a la complejidad subyacente del sistema que se trate de reproducir [143], es que han surgido una amplia oferta de herramientas computacionales, de las que se han contabilizado por lo menos 85 diferentes plataformas [164]. De estas, para este trabajo de investigación se ha elegido al ambiente de programación Netlogo (Fig. 24), por su enfoque en la facilidad de uso sin sacrificar primitivos y estructuras de alto nivel que reducen los esfuerzos de programación, junto con una extensa documentación y modelos de ejemplo [164], [165].

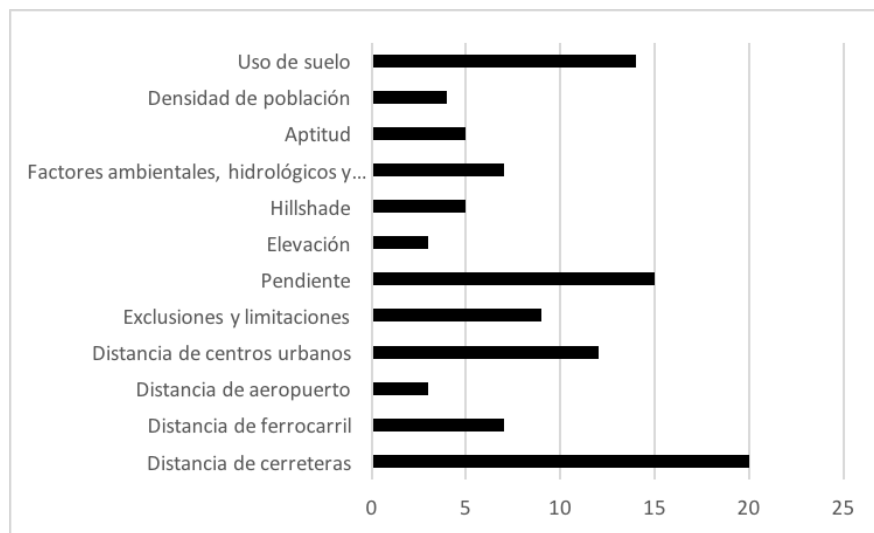


Figura 23: Principales factores usados para simular el crecimiento urbano con Autómatas Celulares. Adaptado de [11].

2.4.4. Patrones Urbanos y el concepto de Suelo Atractivo

En términos espaciales, los patrones son “...resultados discernibles o firmas de procesos que operan en un sistema” [94]. Los procesos urbanos imprimen huellas en el territorio como marca distintiva. La manera en que estas marcas se manifiestan físicamente ya sea a través de forma, disposición, acomodo, ubicación, distribución, tamaño, agrupamiento, dispersión, densidad, conectividad y/o variabilidad en el tiempo [81] expresa información de forma codificada del sistema que las genera [94]. Esto sugiere que estas firmas territoriales, o patrones, se puedan utilizar para inferir sobre sus procesos generadores. Pero, aunque existan metodologías para caracterizar patrones espaciales, aún se desconoce bastante respecto a las implicaciones espaciales de los procesos y su relación con los patrones que generan. Esto sugiere que los patrones urbanos se pueden utilizar para inferir sobre sus procesos generadores. Sin embargo, aunque existen metodologías para caracterizar patrones espaciales, el simular su comportamiento emergente en formas que capturen su comportamiento de manera razonable permanece como un significativo reto de investigación [81]. Se contempla que al arrojar luz sobre esto se podrán tener diseños urbanos y principios de planeación mejor informados

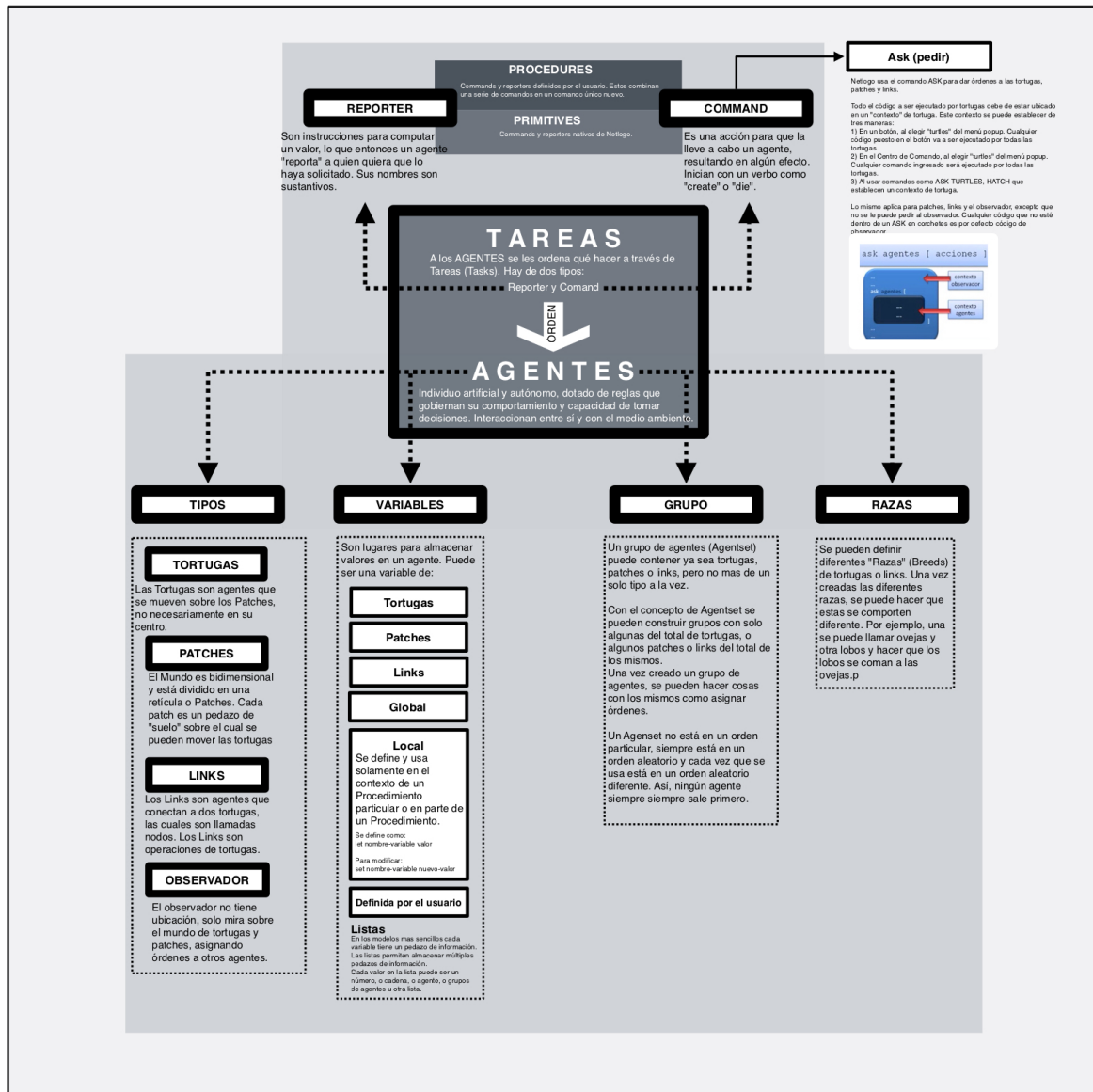


Figura 24: Taxonomía de Netlogo. Fuente: elaboración propia en base a [12], [13], [14]

y el entender su distribución en las ciudades permitirá a los planeadores y responsables de realizar políticas públicas a identificar de una mejor manera áreas de vulnerabilidad y de priorización espacial respecto a intervenciones urbanas [166].

El trabajo de esta investigación se relaciona con el surgimiento de patrones espaciales, pero a diferencia de las características normalmente asociadas a los usos de suelo los cuales son físicos, visibles y arraigados; los patrones de la característica estudiada aquí, y denominada *Suelo Atractivo*, surgen, se desplazan, desaparecen y surgen de nuevo (Fig. 25). Este comportamiento se relaciona con el concepto de proceso emergente ya explicado.

El surgimiento de Suelo Atractivo es el resultado de la aglomeración espacial de una serie de atributos que en su conjunto vuelven atractivo un suelo vacante para ciertos usos de suelo. Existe un concepto aplicado a sistemas por Peter Allen denominado *Atractor Estructural*, el cual define como "...el surgimiento de un conjunto de factores interactuantes que tienen atributos que se complementan y apoyan mutuamente" [130]. Aunque este concepto lo utilizó para referirse al comportamiento de un sistema y no a algún componente del mismo, la definición por sí misma describe admirablemente bien el concepto de Suelo Atractivo para el contexto de esta investigación. La idea de que una zona sea atractiva se ha utilizado como contexto en numerosos trabajos que persiguen otro fin último de investigación, o inclusive en modelos urbanos gravitacionales [78] pero no bajo las características del comportamiento complejo de Suelo Atractivo. Aun así, los factores interactuantes a los que hace referencia Allen se pueden considerar para que una zona sea atractiva para un uso de suelo. Estos pueden ser el empleo y servicios [78] [167] [168], costo del suelo, riesgo físico, zonas costeras [35], vialidades [169] [95] [170], tiempo de traslado [154], [78], productividad [171], proximidad a centros urbanos, accesibilidad a sistemas de transporte [172] [124], urbanización y usos de suelo existentes [173], [174], vivienda [175], infraestructura [176], disponibilidad de suelo construible, nivel de ingresos [177], estado actual de ocupación [78], densidad de población, precio del agua [52], elevación, zonas inundables, proximidad a zonas comerciales, proximidad

al agua, densidad industrial [178], industria ligera [155], distancia a Subcentros urbanos, proximidad a ferrocarril y ríos [179], total de áreas vendibles [180], áreas verdes, clima, lagos y vistas escénicas [181], [182], [183], [158] áreas agrícolas y grandes espacios abiertos [157], basureros [174], periferias urbanas [184], escuelas y hospitales [185], equipamiento deportivo [170], topografía y zonificación [162]. Dependiendo del número, combinación y arreglo que se genere entre estos factores en el territorio, será el uso de suelo que tenderá a atraer (Tabla 6).

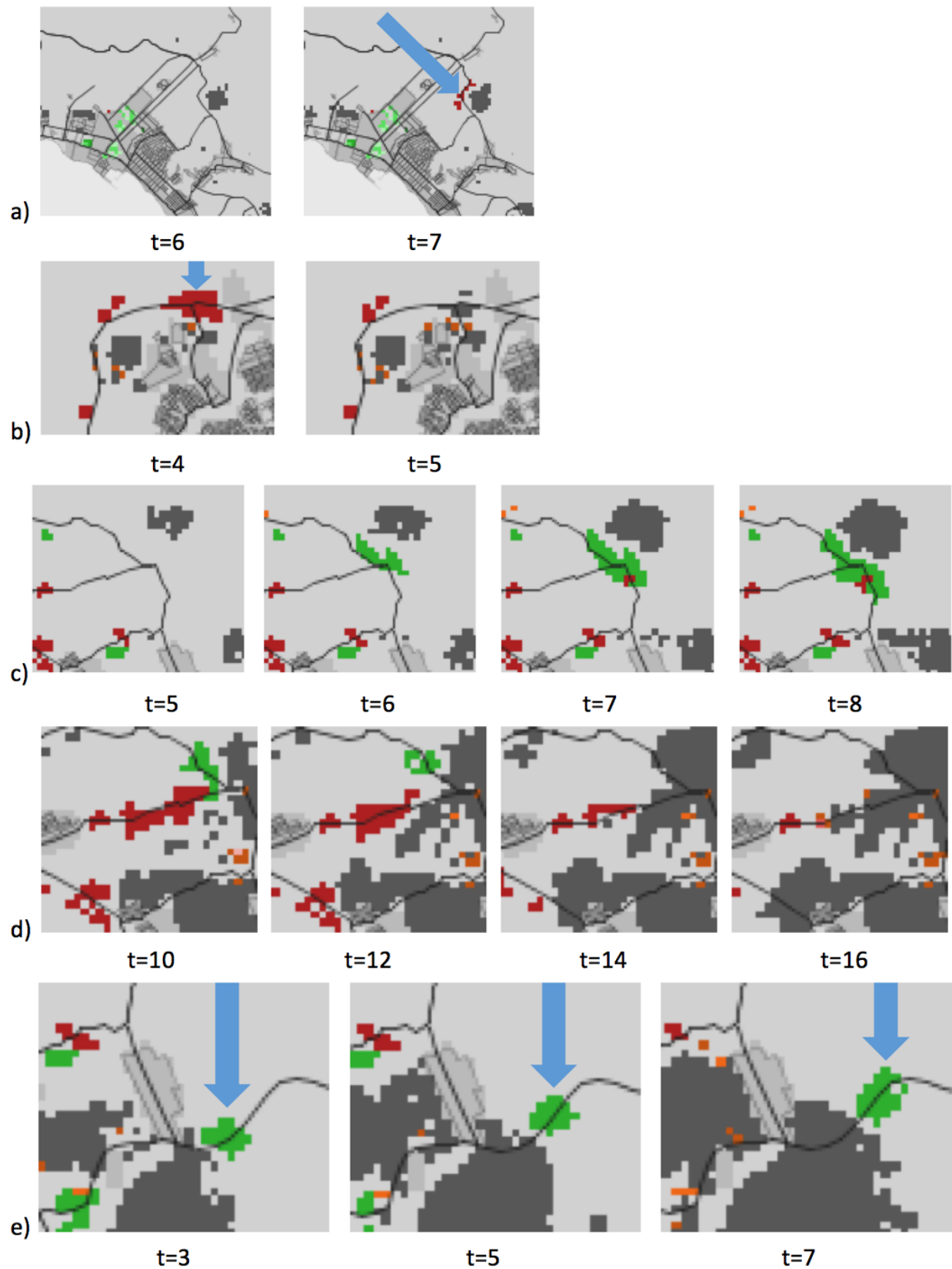


Figura 25: Comportamiento espacial del Suelo Atractivo: a) Surgimiento, b) Desaparición, c) Crecimiento, d) Reducción, e) Desplazamiento.

Tabla 6: Factores atractivos por tipo de uso de suelo. Fuente: elaboración propia en base a autores citados.

Factor	Vivienda	Comercio	Industria	Turismo	Equipamiento
Oferta de empleo	•				
Mano de obra		•	•	•	
Servicios	•	•	•	•	
Costo del suelo accesible	•	•	•	•	•
Riesgo físico					
Playa	•			•	
Vialidades	•	•	•	•	•
Tiempo de traslado	•	•	•		
Centro urbanos	•	•			
Sistemas de transporte	•	•	•		•
Urbanización existente	•	•	•		•
Vivienda	•	•			•
Infraestructura	•	•	•	•	•
Suelo construible	•	•	•	•	•
Nivel de ingresos		•			
Elevación	•				
Zonas inundables					
Cuerpos de agua (Arroyos, lagos)	•			•	
Densidad industrial		•	•		
Industria ligera		•			
Subcentros urbanos	•	•			•
Ferrocarril		•	•		
Total de área vendible		•	•	•	
Áreas verdes	•			•	
Clima	•			•	
Vistas escénicas	•			•	
Áreas agrícolas					
Basureros					
Periferia urbana			•		
Escuelas	•	•			•
Hospitales	•	•			•
Equipamiento deportivo	•	•			•
Topografía suave	•		•		
Zonificación	•	•	•	•	•
Áreas rurales	•			•	
Precio del agua			•	•	
Densidad habitacional	•	•			•
Densidad comercial	•	•			•
Densidad industrial		•	•		
Aeropuertos		•	•		
Áreas naturales protegidas				•	
Sitios históricos protegidos				•	
Derechos de vía					
Instalaciones militares					
Panteones					
Terminales de carga		•	•		

Capítulo 3

Metodología

El objetivo de esta metodología es comprobar la hipótesis de que la suma de urbanizaciones permitidas por un Programa de Desarrollo Urbano puede resultar en un ambiente atractivo para urbanizaciones no permitidas por el mismo Programa. Para ilustrarlo se introduce el concepto de Suelo Atractivo el cual se simula a través de un modelo espacial de autómatas celulares elaborado en el ambiente de programación Netlogo y descrito mediante el protocolo ODD (Overview, Design Concepts, Details por sus siglas en inglés) en el apartado 4.

3.1. La simulación como método

La secuencia de esta metodología se basa en el conocido proceso en el cual se selecciona un objetivo de la vida real el cual se desea estudiar. Este objetivo se representa de manera simplificada a través de un modelo el cual se ejecuta y arroja datos. Estos datos son comparados con datos recabados previamente del objetivo y se determina la similaridad entre los datos del modelo y los datos de la vida real (Fig. 26). En mayor detalle, sigue un proceso

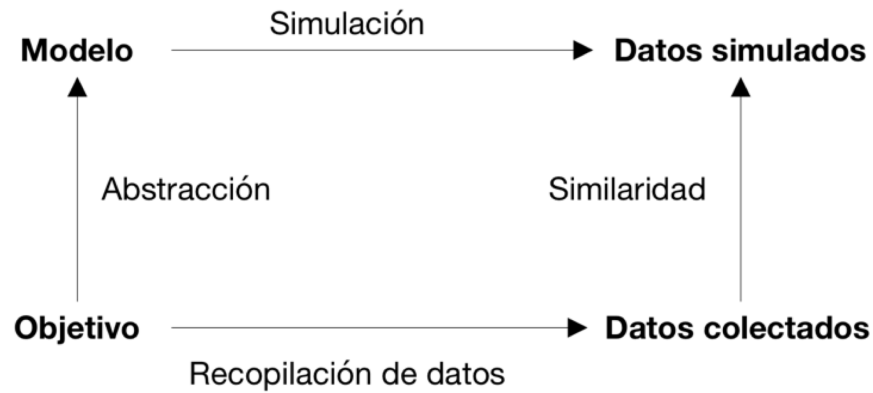


Figura 26: La lógica de la simulación como método. Traducido de [15]

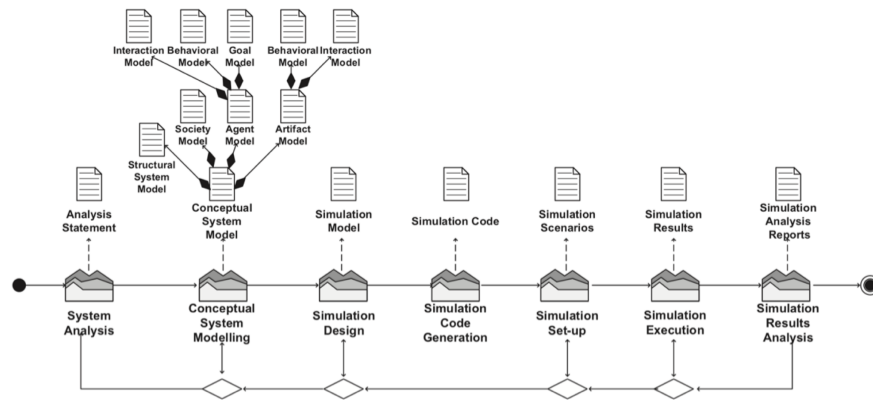


Figura 27: Proceso de modelado y simulación de acuerdo a [16]

similar al presentado por [16] el cual inicia con el análisis del sistema, modelado conceptual del sistema, diseño de la simulación, generación del código para la simulación, preparación de la simulación, ejecución de la simulación y termina con el análisis de los resultados (Fig. 27).

3.2. Información necesaria

Para la aplicación de la presente metodología, se necesita tener dos componentes principales: capas de información espacial y un Programa de Desarrollo Urbano aplicable al asentamiento humano a modelar.

Capas de información espacial. Deben de estar en el formato shp o asc, dependiendo del caso (Tabla 7).

Tabla 7: Capas de información espacial necesarias para el modelo

Información	Formato	Tipo
Polígono del Centro de Población	shp	Vector
Subsectores del Centro de Población	shp	Vector
Traza urbana	shp	Polígonos
Cuerpos de agua	shp	Polígonos
Pendiente	asc	Raster
Zonas agrícolas	shp	Polígonos
Suelo urbanizado	shp	Polígonos
Suelo urbanizable	shp	Polígonos
Suelo no urbanizable	shp	Polígonos
Estructura vial	shp	Vector
Usos de suelo	shp	Polígonos

Programa de Desarrollo Urbano. Las capas de información espacial y el Programa de Desarrollo Urbano (Tabla 8) deben de pertenecer al mismo corte de tiempo, normalmente las capas se desprenden del trabajo realizado para elaborar el Programa.

3.3. Preparación de la información

Antes de que el modelo pueda leer la información necesaria para ejecutar simulaciones, esta debe prepararse de manera particular para que se ajuste a los alcances y limitaciones actuales del mismo, pero que se enriquecerá en trabajo futuro.

Tabla 8: Información necesaria del Programa de Desarrollo Urbano

Información	Tipo
Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo	Tabla
Polígono de Centro de Población	Mapa
Sectores/Subsectores	Mapa
Crecimiento histórico de población	Tabla/Gráfico
Proyecciones de crecimiento de población	Tabla/Gráfico
Área de mancha urbana actual	Tabla
Proporción de usos de suelo actual	Tabla/Gráfico
Tasa de crecimiento de población	Tabla/Gráfico
% de Industria existente en compatibilidad	Tabla/Gráfico
Densidad de población (habitantes por hectárea)	Tabla

3.3.1. Matriz de compatibilidad

Usos condicionados. De acuerdo a los alcances del presente modelo, para que pueda leer correctamente la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo, esta debe de contener solo compatibilidades e incompatibilidades con respecto a los subsectores urbanos. El modelo no acepta usos condicionados, componente común a encontrar en estas matrices en los Programas de Desarrollo Urbano. Por esta razón, se debe de valorar qué usos condicionados se convertirán a uso compatible o incompatible.

Usos de suelo que no representan superficies. Se eliminarán usos que no se manifiestan como una superficie en la vida real y así evitar una representación espacial errónea en los resultados del modelo. Ejemplos de estos usos son ciclovías, las cuales son infraestructura que se agrega a vialidades existentes y por lo tanto no representan superficie urbana adicional, cajeros automáticos los cuales normalmente son parte integral de otros usos de suelo o campamentos los cuales son de naturaleza temporal, estacional, mínima y desmontable.

Usos de suelo únicos o ya existentes. Se deberá cuidar que el modelo no arroje usos de suelo que son de naturaleza única y/o que ya hayan sido construidos después de la elaboración del Programa de Desarrollo Urbano. Esta información se ingresa al modelo para que, una

vez que se construya un uso de suelo de esta naturaleza en una simulación, no se repliquen más instancias. Ejemplos de este tipo de uso son Palacio Municipal, el cual solo existe uno por centro de población, Presa, Ferrocarril, Mercado de Abastos y Hospital Regional. Para determinar si un uso de suelo será único se debe de considerar el tamaño del Centro de Población, bajo la lógica de que entre mayor sea su población, menor la posibilidad de que sea único.

Corredores urbanos, centros y Subcentros urbanos. El modelo puede leer espacios geográficos delimitados a través de polígonos cerrados y vectores, y por ende podrá leer información espacial que esté expresada de esa manera. Cualquier otra expresión espacial que esté expresada solo de manera indicativa y que no se represente con polígonos o vectores se eliminará de la matriz de compatibilidad. Ejemplo de estos elementos son los corredores urbanos que usualmente se señalan a eje de vialidad o Subcentros Urbanos señalados como un punto en los mapas.

3.3.2. Capas de información espacial

Las capas deben de estar en formato shp, tener la misma proyección geográfica, corresponder al mismo corte de tiempo y solo contener la información indicada. Dado que el área de aplicación de la simulación es la ciudad delimitada por el Programa de Desarrollo Urbano, la cobertura de todas las capas debe ser igual o mayor al polígono del Centro de Población. Se debe revisar la adecuada correspondencia espacial entre capas haciendo una sobreposición de todas ellas en un programa de SIG (Sistema de Información Geográfica) y verificar que estén correctamente georeferenciadas. Las capas deben de presentar las siguientes características:

Polígono del Centro de Población. Corresponder con el polígono indicado en el Programa de Desarrollo Urbano.

Subsectores del Centro de Población. Corresponder con los subsectores de a Matriz de

Compatibilidad de Usos de Suelo del Programa de Desarrollo Urbano. En la tabla de atributos correspondiente al shp debe de contener las siguientes columnas:

SUBSECTOR: la cual contendrá el nombre del subsector del polígono correspondiente.

COUNT: la cual contendrá el valor 1 para todos los subsectores, para diferenciar en el modelo el territorio que queda dentro del polígono del Centro de Población de aquel que está afuera.

Traza urbana. Contendrá todas las manzanas y demás áreas urbanizadas contenidas dentro del polígono del Centro de Población. En la tabla de atributos correspondiente al shp debe de contener la siguiente columna:

URBANO: la cual contendrá el valor 1 para cada una de todas las manzanas y demás áreas urbanizadas del Centro de Población.

Cuerpos de agua. Corresponder a lagos, presas, ríos, arroyos y costas dentro o colindante con los límites del polígono del Centro de Población.

Pendiente. Clasificar por rangos. Si el Programa de Desarrollo Urbano tiene un umbral de urbanización respecto a pendientes, se debe de manifestar como límite de un rango.

Zonas agrícolas. Son las parcelas que componen las áreas de cultivo. Si entro de las mismas hay otros usos, se deben de incluir. En la tabla de atributos correspondiente al shp debe de contener la siguiente columna:

ZONING: la cual contendrá el valor 1 para cada parcela.

Suelo urbanizado, Suelo urbanizable y Suelo no urbanizable. Estas tres capas se desprenden de los modelos de aptitud territorial que se elaboran para los Programas de Desarrollo Urbano. Si no se contara con el modelo de aptitud territorial de donde se obtiene normalmente la información de Suelo Urbanizado, Suelo no Urbanizable y Suelo Urbanizable, considerar que el primero se obtendrá de la mancha urbana existente, el segundo representan zonas donde

no debe de aplicarse ninguna acción de urbanización por motivos de riesgo, conservación o políticas de crecimiento como lo son las pendientes pronunciadas, ríos, arroyos, dunas costeras, humedales, fallas geológicas, áreas naturales sobresalientes, etc., y el tercio es el territorio que queda sobre el cual se puede edificar de acuerdo a políticas urbanas que lo permitan.

Estructura vial. Está compuesta por vialidades de jerarquía primaria y por carreteras, las cuales deben de estar diferenciadas en la tabla de atributos de la capa correspondiente. También se incluyen las que estén en proyecto. Valorar la inclusión de vialidades secundarias si se considera que estas pudieran ser usadas por tráfico pesado. Se excluyen las vialidades de jerarquía terciaria, locales o de servicio.

Usos de suelo. Debe de contener los usos de suelo actuales de la mancha urbana. Debe de haber correspondencia entre estos usos de suelo y los usos de suelo de la Matriz de Compatibilidad. En la tabla de atributos correspondiente al shp debe de contener la siguiente columna:

USO_SUELO: la cual contendrá el nombre del tipo de uso de suelo de cada polígono al que esté asignado el valor.

3.4. Verificación y validación del modelo

La información a la que se hace referencia en los apartados anteriores es la base para la comprobación de la hipótesis, la cual se hace a través de un modelo de autómatas celulares descrito a detalle a través del protocolo ODD explicado en el siguiente apartado. El modelo se utiliza para ejecutar una serie de experimentos, para lo cual antes se debe de realizar lo siguiente.

3.4.1. Verificación del modelo

Se deberá constatar la consistencia interna del modelo, verificando que todas las funcionalidades se ejecuten de acuerdo lo esperado. Para esto, se ejecutará el modelo y en cada iteración se observará que:

Suelo urbanizable. Los usos de suelo que crezcan en el territorio solo deberán hacerlo sobre suelo urbanizable y sobre el rango de pendiente previamente establecido.

Matriz de compatibilidad. Los usos de suelo que crezcan sobre el territorio solo sean aquellos permitidos por la matriz de compatibilidad de acuerdo al subsector donde se encuentren.

Matriz de adyacencia. Las adyacencias, o vecinos, de los usos de suelo deben de ser aquellos que solo sean permitidos por la matriz de adyacencia.

Proyección de población. La cantidad de población de cada año deberá de ser la misma que la esperada proyectada. Esto se realizará con escenarios ex-ante, es decir, con resultados previamente estimados y conocidos.

Superficie urbana. La cantidad de superficie urbana que se genere cada año debe de corresponder a la cantidad de población proyectada y a la densidad de población establecida al inicio de la ejecución del modelo.

3.4.2. Validación del modelo

Se deberá constatar la consistencia de los resultados del modelo al compararlo con un escenario del mundo real. Para este caso se usará como referencia la configuración espacial de la mancha urbana en aspectos de dispersión y porosidad, comparado entre la mancha del mundo real y la arrojada por el modelo. La variable mediante la cual se ajustará el modelo es la denominada *Threshold*, la cual se explica en el protocolo ODD.

3.4.3. Determinación del espacio muestral

Se deberá determinar el número de iteraciones que se ejecutará cada experimento, realizando una aproximación al espacio muestral del mismo, es decir, la cantidad de escenarios diferentes que pueda arrojar bajo un mismo juego de variables específicas.

3.5. Experimentos

Se ejecutará el modelo un número de veces igual al espacio muestral identificado previamente, bajo las variables del mundo real respecto a población actual, tasa de crecimiento poblacional y densidad de habitantes por hectárea. Todas las simulaciones tendrán la misma proyección de años de crecimiento, la cual se recomienda que no sea menor de 10 años. Se utilizará la herramienta BehaviorSpace de Netlogo que permite ejecutar un número específico de veces el mismo modelo con parámetros pre-establecidos. El modelo arroja la siguiente información de manera simultánea, tabulada y graficada:

Suelo Atractivo total. Para determinar la disponibilidad de Suelo Atractivo en condiciones de compatibilidad e incompatibilidad con el Programa de Desarrollo Urbano.

Porcentaje de Suelo Atractivo urbanizado. Para conocer la dinámica de surgimiento y desaparición de Suelo Atractivo.

Cantidad de Suelo Atractivo urbanizado. Para identificar si las reservas industriales están a la par que la demanda.

Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por compatibilidad. Para caracterizar industria en incompatibilidad normativa por falta de reservas territoriales o por ausencia de cumplimiento del Programa de Desarrollo Urbano, y de esta manera estimar la necesidad de agregar reservas adicionales o complementar la normatividad.

Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por uso de suelo. Para estimar la competencia de diversos usos de suelo por una misma zona de Suelo Atractivo.

Industria diferenciada por compatibilidad. Para conocer la cantidad de industria que se ubica en subsectores que no son compatibles con esta actividad de acuerdo al Programa de Desarrollo Urbano. Si la mayoría de este uso se encuentra fuera de subsectores compatibles denota ya sea una insuficiente propuesta actual de reservas para este uso o un incumplimiento de la normatividad.

Estado del Suelo Atractivo. Para identificar zonas en donde haya una alta urbanización de Suelo Atractivo que pueda significar una alta competencia por el suelo y en consecuencia se necesite normar con más precisión.

Los resultados arrojados se clasifican por rubro en formato csv (comma separated value, por sus siglas en inglés).

Adicionalmente, se ejecutan escenarios de densidad de población para la siguiente información: Suelo Atractivo total, Porcentaje de Suelo Atractivo urbanizado, Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por compatibilidad y Ubicación de industria diferenciada por ubicación. Cada uno se ejecuta con una densidad urbana de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 y 100 habitantes por hectárea.

Finalmente, se elaboran mapas probabilísticos de Suelo Atractivo Total y Suelo Atractivo ocupado por actividad industrial.

Toda la información anterior se procesa a través de un programa de hojas de cálculo, en donde por rubro se grafica tanto la sobreposición de todos los resultados como el comportamiento promedio de los mismos,

Capítulo 4

El modelo

Cuando se requieren herramientas de simulación, el enfoque de la complejidad usa ampliamente sistemas multiagente para formalizar y probar hipótesis sobre diferentes aspectos de dinámicas [171]. Por lo mismo, la metodología que se va a diseñar en esta investigación se apoya en el modelado basado en agentes, del cual los autómatas celulares son una familia, el cual se centra en los individuos y en explicar cómo se pueden lograr resultados a través de sus elecciones e interacciones, lo que lo vuelve un buen método para el análisis de políticas [31]. El presente modelo basado en agentes se desarrolló a través de Netlogo (Fig. 28), un ambiente de modelado programable ampliamente utilizado (“Netlogo Homepage, <https://Ccl.Northwestern.Edu/Netlogo/>, Last Accessed 2018/06/30.” 2018).

Dado que los Modelos Basados en Agentes son más difíciles de analizar, entender y comunicar en comparación con otros modelos analíticos, el modelo se va a describir a través del protocolo ODD (Overview, Design Concepts, Details por sus siglas en inglés) [186], [187]. Los beneficios que se pretenden con el uso de este protocolo son mejorar la escritura y lectura de las descripciones de modelos y comunicar de una mejor manera los supuestos y trasfondo teórico de un modelo.

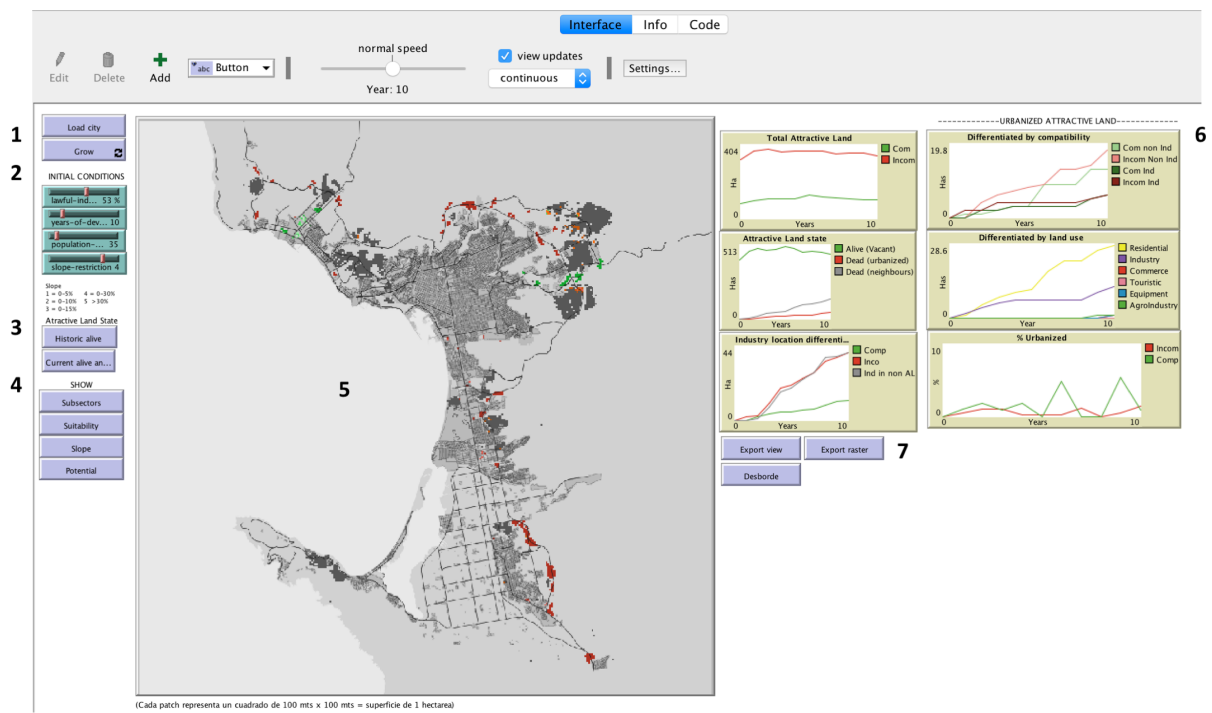


Figura 28: Interfaz del modelo elaborado en Netlogo. 1) Cargado de datos y ejecución del modelo, 2) Parámetros de condiciones iniciales del modelo, 3) Estados del Suelo Atractivo, 4) Visualización de capas de información, 5) Pantalla de resultados espaciales, 6) Gráficos de resultados cuantitativos, 7) Exportación de resultados espaciales.

4.1. Generalidades del modelo

Propósito. El propósito del modelo es el identificar el surgimiento de condiciones espaciales específicas de interés como resultado de un comportamiento de agregación en un contexto de políticas urbanas. Demuestra como la suma de una urbanización permitida puede resultar en un ambiente atractivo para una urbanización no permitida. En este caso es el suelo vacante que pueda atraer al uso industrial (Suelo Atractivo) al cumplir con requisitos establecidos desde el punto de vista de un desarrollador independientemente del cumplimiento de un Programa de Desarrollo Urbano (PDU). Estos requisitos incluyen la cercanía a vialidades regionales, mano de obra, equipamiento urbano y el no estar adyacente a zonas habitacionales. En el contexto de esta investigación, por lo tanto, siempre que se hable de Suelo Atractivo se referirá atractivo para la actividad industrial exclusivamente. Este modelo está diseñado para que sea una herramienta que apoye en el análisis y diseño de políticas públicas en materia de desarrollo urbano al identificar oportunamente zonas en donde se pueda violar la normatividad urbana o inclusive el descubrir oportunidades inesperadas, y ajustar las políticas públicas si fuese considerado necesario.

Entidades, estados, variables y escalas. El modelo se basa en una malla cuadriculada donde cada celda representa 10,000 m² o 1 hectárea. Las entidades del modelo son de naturaleza espacial y representan el uso de suelo de la ciudad que contiene variables que cambian a lo largo del tiempo. Esto sucede a la escala de la celda individual, así que 1 hectárea es la expresión mínima de esta entidad. La unidad básica de tiempo es un año y el modelo se ejecuta en periodo establecido de años, recomendándose que no sea menor de 10 años. Se han elegido estas escalas de tiempo y espacio porque son las que se utilizan con mayor frecuencia cuando se diseñan y revisan programas de desarrollo urbano.

Variables de nivel básico. Estas variables son aquellas que no se pueden deducir de otras variables de nivel básico porque son propiedades elementales de la entidad. Cada celda de

suelo contiene las siguientes variables de nivel básico (Tabla 9):

Atracción. Valor que especifica el nivel de atracción de una celda para la industria. Entre mayor el valor, mayor la atracción. Los valores más altos son los que se consideran como Suelo Atractivo. Suelo Atractivo no es un uso de suelo construido sino suelo vacante que contiene cierto conjunto de características que lo vuelven atractivo para el uso industrial desde el punto de vista de un desarrollador. Como tal, en contraste con el suelo urbanizado el cual permanece en ese estado por el resto de la simulación, el Suelo Atractivo constantemente cambia su patrón espacial a lo largo del tiempo: se reduce y desaparece en zonas que paulatinamente son urbanizadas o aparece, crece e inclusive se mueve donde se aglomeren condiciones favorables para la industria.

Estado del Suelo Atractivo. El Suelo Atractivo puede estar “vivo” (vacante y deseable) o “muerto” (estuvo “vivo” pero murió por urbanización o por tener un uso de suelo no deseable como vecino).

Interés. Representa el interés de una celda por desarrollar un uso de suelo. Este interés puede ser uno de los usos de suelo especificados en la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo de un PDU.

Uso de suelo. Representa la actividad que se lleva a cabo en la celda. Puede ser de tipo general o estar vacante, lo que significa que no hay ninguna actividad. Los 7 tipos generales se subdividen en el total usos de suelo de los que esté compuesta la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo de un PDU.

Potencial. Este es un valor aleatorio que cambia en el tiempo, y se refiere al potencial que tienen suelo vacante para desarrollarse. Si este valor es mayor a un valor umbral previamente establecido, surge en el suelo vacante el interés por desarrollar un uso de suelo específico, el cual podrá concretarse siempre y cuando sea compatible con el subsector en donde se encuentra, esto dictado por la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo. El valor de

Tabla 9: Entidades y variables del modelo

Tipo	Entidad	Variables	Expresión	¿Cambia en el tiempo?
Celda	Suelo	Estado del Suelo Atractivo	Vivo	Si
			Muerto	
		Uso de suelo	Vacante	Si
			Habitacional	No
			Turístico	
			Industrial	
			Agro-Industrial	
			Comercial	
			Equipamiento	
			Agrícola	
		Interés	Habitacional	Si
			Turístico	
			Industrial	
			Agro-Industrial	
			Comercial	
			Equipamiento	
			Agrícola	
		Urbano	Si	Si
			No	
		Renglón	Valor establecido por la matriz de compatibilidad	Si
		Columna	Valor establecido por la matriz de compatibilidad	Si
		Atracción	Valor numérico establecido por el modelo	Si
		¿Intersectado por vialidad regional?	Si	No
			No	
		¿Apto?	Si	Si
			No	
		Subsector	Polígonos establecidos por el PDU	No
		¿Urbanizable?	Si	Si
			No	No
		Potencial	Valor numérico establecido por submodelo	Si
		Pendiente	0-5 %	No
			0-10 %	
			0-15 %	
			0-30 %	
			¿30 %	
		¿Cuerpo de agua?	Si	No
			No	
Ambiente	Umbral de urbanización	Umbral de potencial	Valor numérico establecido por usuario	Si
			Deseable	No
		Matriz de adyacencia	No deseable	
			Valor numérico establecido por usuario	No
	Cumplimiento del Programa de Desarrollo Urbano	% industria compatible	Valor numérico establecido por usuario	No
			Valor numérico establecido por usuario	No
		Años de crecimiento	Valor numérico establecido por usuario	No
			Valor numérico establecido por usuario	No
	Población	Número de habitantes	Valor numérico establecido por el modelo	Si
			Compatible	No
		Matriz de compatibilidad de usos de suelo	Incompatible	
			Valor numérico establecido por usuario	No
	Políticas públicas	Densidad de población	0-5 %	No
			0-10 %	
		Restricción de pendiente	0-15 %	
			0-30 %	
			¿30 %	
			0-30 %	

la variable Potencial se estima de acuerdo al modelo Vicsek-Szalay el cual se explica más adelante.

¿Urbanizable? El polígono de la ciudad se compone de áreas urbanizables y no urbanizables. Estas últimas están compuestas por zonas que no pueden urbanizarse por motivos de riesgo, conservación o normatividad específica. Ambas áreas se toman del PDU.

¿Apto? Condiciones que tienen que cumplirse para que una celda pueda ser urbanizada por cualquier uso de suelo o pueda ser considerada como Suelo Atractivo. Estas condiciones son: que la celda esté dentro del polígono del centro de población, que sea urbanizable, que esté vacante, que no sea agrícola y que no sea un cuerpo de agua.

Renglón y Columna. Valores que corresponden a la ubicación en la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo del uso de suelo y el Subsector que en su momento se estén analizando. Estos valores son necesarios para que el modelo pueda leer apropiadamente dicha Matriz.

Urbano. Indica si la celda está ocupada por un uso de suelo.

Subsector. Sectores en que está dividido el polígono del Centro de Población de acuerdo al PDU. Este polígono es más grande que la superficie urbana actual, así que puede contener áreas naturales. Tanto los subsectores como sus compatibilidades se toman de la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo del PDU.

Pendiente. Es la inclinación del suelo, expresado en rangos: 1 = 0-5 %, 2 = 0-10 %, 3 = 0-15 %, 4 = 0-30 %, 5 ¿30 %.

¿Intersectado por vialidad regional? Especifica si la celda es intersectada por una calle o carretera. La red vial se obtiene del PDU e incluye la estructura actual y la proyectada.

¿Cuerpo de agua? Especifica si la celda es agua.

También hay variables ambientales que no son de naturaleza espacial:

Umbral de Potencial. Todas las celdas tienen una variable denominada Potencial que es

actualizada constantemente. Cuando este valor supera un umbral previamente establecido por el usuario, en las celdas se despierta el interés por desarrollar uno de los posibles usos de suelo normados en la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo del PDU.

Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo. Matriz que especifica la compatibilidad entre usos de suelo específicos y los subsectores en que está dividido el polígono del Centro de Población.

Matriz de adyacencia. Matriz que especifica adyacencias deseadas/no deseadas entre usos de suelo. Se diseña en base a evidencias empíricas de usos de suelo observadas en la ciudad a modelar.

% industria compatible. Del total de las veces que el modelo trata de crecer industria en zonas incompatibles, este es el porcentaje de las veces que el modelo lo permitirá. Esto no necesariamente significa que se construirá la industria, porque el terreno debe de satisfacer una serie de requisitos adicionales para este uso de suelo.

Años de crecimiento. El número de años que se va a ejecutar el modelo.

Número de habitantes. Cantidad de población de la ciudad. El modelo inicia con una cantidad fija de acuerdo a datos censales recientes, y se proyecta en un tiempo igual a la variable Años de desarrollo. La cantidad de usos de suelo que el modelo arroje dependerá en el tamaño de la población, la que a su vez dependerá de la variable Densidad de población.

Tasa de crecimiento. Valor que determina el aumento promedio de la población. Este se determina en base a resultados censales recientes.

Políticas públicas. Acciones del gobierno para regular el crecimiento urbano. Estas son: Densidad de población: Habitantes por hectárea de superficie urbana. Restricción de pendiente: Inclinationes de terrenos permitidas para urbanización, las cuales se obtienen del PDU.

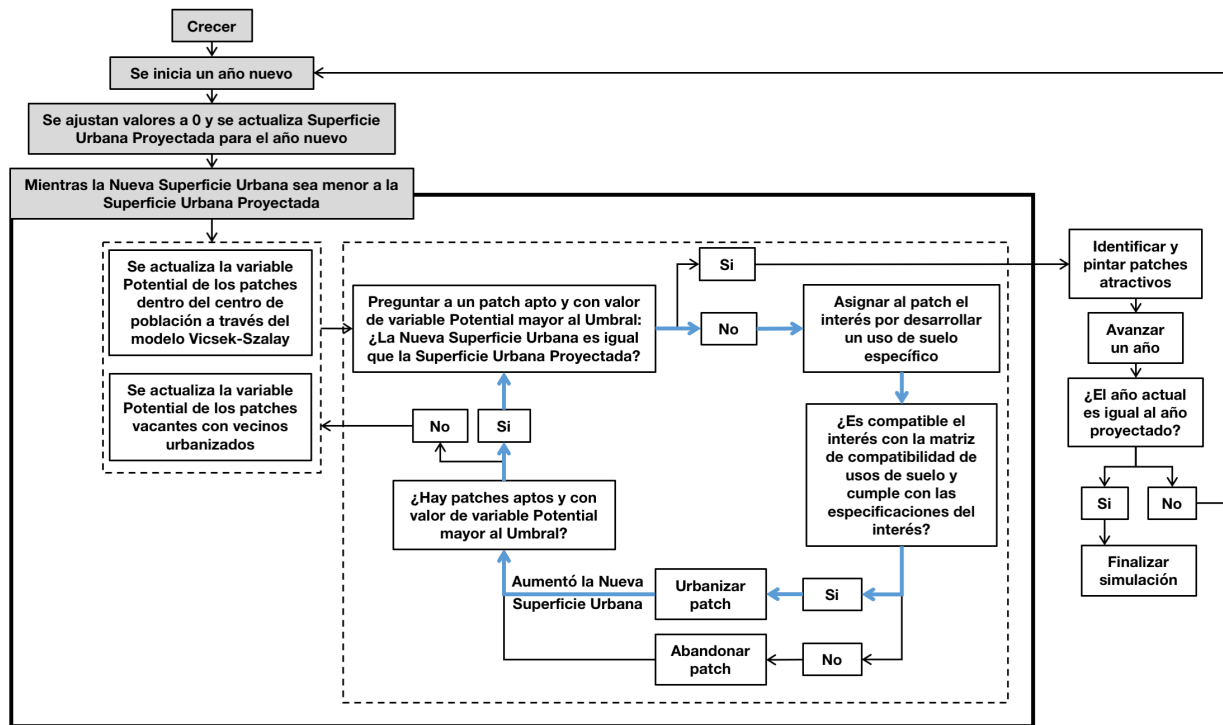


Figura 29: Secuencia del modelo

Visión general y orden de los procesos. En esta sección se presentan los procesos ambientales e individuales como una visión de conjunto concisa del modelo (Fig. 29).

Preparación. Este es el primer paso del modelo en donde se cargan datos numéricos y espaciales pre-establecidos que en su conjunto conforman el estado urbano inicial del modelo.

Asignar Suelo Atractivo inicial. Se identifica el Suelo Atractivo inicial en base a las condiciones espaciales iniciales del modelo.

Asignar valor aleatorio a las celdas. El modelo asigna de manera aleatoria un valor de 1 o -1 a la variable denominada Potencial a todas las celdas dentro del polígono del centro de población. Esta será la base para el modelo Vicsek-Szalay el cual determina si una celda vacante alcanza el potencial para ser urbanizada.

Cada uso de suelo tiene sus propios requisitos de ubicación, principalmente su compa-

Tabla 10: Matriz de adyacencia

		Habitacional	Turístico	Industrial	Agro-Industrial	Comercial		Equipamiento		Playa
						Compatible con industria	Incompatible con industria	Compatible con industria	Incompatible con industria	
Habitacional		O	O	X	X	O	O	O	O	O
Turístico		O	O	X	X	O	O	O	O	(2)
Industrial		X	X	O	O	O	X	O	X	O
Agro-Industrial		X	X	O	O	O	O	O	O	O
Comercial	Compatible con industria	(1)	O	O	O	O	O	O	O	O
	Incompatible con industria	(1)	O	X	X	X	O	X	O	O
Equipamiento	Compatible con industria	(1)	O	O	O	O	O	O	O	O
	Incompatible con industria	(1)	O	X	X	O	O	O	O	O

X No se acepta como vecino

O Se acepta como vecino

(1) Siempre y cuando haya dos o mas vecinos habitacionales

(2) Siempre y cuando haya uno o mas celdas de playa en un radio de 5 celdas

tibilidad con los subsectores y su preferencia por tener, o no, a ciertos usos de suelo como vecinos (Tabla 10).

Estimar cantidad de Superficie Urbana Proyectada. La cantidad de Superficie Urbana Proyectada para un año se estima en base datos de población inicial, tasa de crecimiento y densidad de población. La simulación se detiene cuando el año en curso equivale a la variable Años de crecimiento.

Comparar superficie urbana actual y proyectada. La Superficie Urbana Proyectada se compara a la Nueva superficie Urbana. Mientras la Nueva Superficie Urbana iguale a la Superficie Urbana Proyectada, el modelo recorrerá en ciclos los siguientes pasos. Si esta condición se cumple, se sale del ciclo, avanza un año, y se actualizan las gráficas y el patrón especial de usos de suelo, e inicia un nuevo ciclo estimando una nueva Superficie Urbana Proyectada.

Actualizar la variable Potencial de cada celda. Se actualiza la variable Potencial de todas las celdas que están dentro de los límites del polígono de la ciudad de acuerdo al submodelo Vicsek-Szalay. Adicionalmente, las celdas que ya están urbanizadas aumentan el valor de la variable Potencial de sus vecinas vacantes. Solo las celdas que tengan el valor de esta variable más alto que un valor de umbral previamente establecido pasarán a los siguientes pasos.

Asignar aleatoriamente el interés por desarrollar un uso de suelo a las celdas que tengan su variable Potencial por encima de valor de umbral. Se asigna aleatoriamente uno de los posibles usos de suelo a celdas que tengan su variable Potencial por encima del valor de umbral. Se asigna de acuerdo a probabilidades preestablecidas, basadas en la proporción de usos de suelo existentes de acuerdo al PDU, y representa un interés de la celda por desarrollar ese uso de suelo.

Validar con la Matriz de Compatibilidad el interés de uso de suelo asignado. El modelo verifica con la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo si el uso de suelo asignado es compatible con el subsector en donde se encuentra. Si lo es, procede con el siguiente paso.

Verificar vecinos. El modelo verifica con la Matriz de Adyacencia que los requisitos de vecindad del uso de suelo asignado se cumplan.

Urbanizar la celda con el interés de uso de suelo. Si se cumplen con los requisitos de la Matriz y de vecindad, la celda vacante se urbaniza con el interés de uso de suelo, y se actualizan las variables Uso de suelo, ¿Urbanizable?, ¿Apto? y ¿Urbano?. También se actualiza una variable global llamada Nueva Superficie Urbana cada vez que se urbanice una celda.

Comparar la Superficie Urbana Actual con la Superficie Urbana Proyectada. Si la Superficie Urbana Actual no es igual a la Superficie Urbana Proyectada, el ciclo permanece con el inicio de un nuevo paso de Actualizar la variable Potencial de cada celda. Si las dos superficies son iguales, se sale del ciclo del año presente y procede al siguiente paso.

Actualizar Suelo Atractivo. El modelo actualiza la configuración espacial del Suelo Atractivo de acuerdo a la distribución espacial de usos de suelo en ese momento.

Comparar el año actual con la variable Años de crecimiento. Si el año actual es el mismo que la variable Años de crecimiento, el modelo se detiene y se actualiza el patrón de usos de suelo, así como las gráficas y monitores del modelo.

4.2. Conceptos de diseño

Principios básicos. El principio básico de este modelo se base en el concepto de autómatas celulares y cómo el estado de una celda se determina por el estado de sus vecinas y por variables ambientales que representan políticas públicas, crecimiento de la población y normas de compatibilidad determinadas por un programa de desarrollo urbano.

Proceso emergente. El suelo vacante será atractivo a uno o varios usos de suelo dependiendo de su ubicación, de los patrones de usos de suelo que lo rodeen y a variables ambientales. El comportamiento de la cantidad y distribución espacial variará con el tiempo. Una celda de suelo es atractiva a más de un uso de suelo a la vez, así que la cantidad y ubicación de Suelo Atractivo para la industria disminuirá al ser ocupado por otros usos, pero a la vez surgirá en otras zonas en donde se aglomeren condiciones favorables.

Interacción. La interacción en el modelo se da entre usos de suelo y entre usos de suelo y su ambiente. Esta interacción se basa principalmente en el concepto de vecindad. Dependiendo del tipo, los usos de suelo pueden, o no, estar adyacentes entre sí, así que una vez que se establece un uso de suelo este crea condiciones que son favorables para ciertos usos de suelo, pero desfavorables para otros. Una vez que un uso de suelo urbaniza una celda, cambia sus variables **Urbano** y **¿Apto?** y aumenta el valor de la variable Potencial de las celdas vacantes vecinas.

Estocasticidad. Si el valor de Potencial de una celda está por encima de un valor umbral, esta desarrolla el interés por desarrollar un uso de suelo, el cual se elige de manera aleatoria. La frecuencia con que un uso de suelo se elige de manera aleatoria se basa en probabilidades previamente establecidas, basadas en la composición del uso de suelo actual manifestado en el PDU.

Colectivos. El Suelo Atractivo se aglomera espacialmente de acuerdo a requisitos es-

tablecidos por la industria, formando patrones y distribuciones espaciales de usos de suelo particulares.

Observación. El modelo arroja imágenes donde se muestran los patrones espaciales de usos de suelo, industria y Suelo Atractivo. También grafica los siguientes datos:

Suelo Atractivo Total

Estado del Suelo Atractivo

Ubicación de la industria diferenciada por compatibilidad

Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por:

Compatibilidad

Uso de suelo

% urbanizado

4.3. Detalles

Suelo Atractivo. Una celda se considera Suelo Atractivo en cualquier momento en el tiempo cuando en ella se cumplen al menos 7 de los siguientes 9 requisitos:

Pendiente del suelo es igual o menor al 15 %

0 vecinos con uso de suelo habitacional

0 vecinos con uso de suelo turístico

0 vecinos con uso de suelo comercial que no desea estar adyacente a industria

0 vecinos con uso de suelo de equipamiento que no desea estar adyacente a industria

Una vialidad regional dentro de un radio de dos celdas

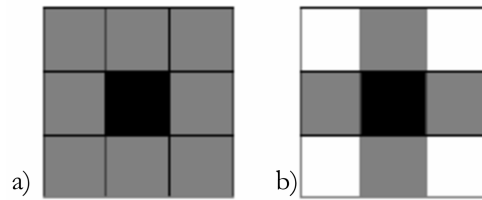


Figura 30: a) Vecindad de Moore, b) Vecindad Von-Neumann

20 o más celdas de uso habitacional dentro de un radio de 10 celdas

4 celdas o más con uso de suelo industrial dentro de un radio de 2 celdas

2 celdas o más de uso de suelo industrial dentro de un radio de 1 celda

Una celda deja de ser Suelo Atractivo para la industria una vez que se cumple una o más de las siguientes condiciones:

1 o más vecinos con uso de suelo residencial

1 o más vecinos con uso de suelo turístico

1 o más vecinos con uso de suelo comercial que no desea estar adyacente a la industria

1 o más vecinos con uso de suelo de equipamiento que no desea estar adyacente a la industria

Se consideran como vecinos las 8 celdas que rodean a la celda de referencia (Fig. 30).

Inicialización. El modelo inicialmente detecta el Suelo Atractivo de acuerdo a requisitos ya mencionados.

Entrada de datos. *Variables.* Son los valores iniciales para ejecutar una simulación los cuales varían de acuerdo al corte de tiempo y la ciudad a simular. *Capas de información.* Se cargan al modelo capas de usos de suelo actual, suelo desarrollable y no desarrollable,

estructura vial tanto actual como proyectada. Estas se cargan como archivos en formato SHP (vector) o ASC (raster), las cuales previamente se elaboraron a través de un Sistema de Información Geográfica para el PDU.

Submodelos. *Submodelo Vicsek-Szalay.* Este modelo actualiza la variable Potencial de todas las celdas. Se utiliza para determinar si una celda vacante alcanza cierto potencial para urbanización. Para que esto suceda, el valor de potencial de una celda vacante debe superar un valor umbral preestablecido. Es un modelo que se basa en celdas que muestra cómo pueden emerger patrones espaciales altamente ordenados similares a lo observado en el crecimiento urbano que se basa en el cálculo de promedios espaciales [107]. Este modelo construye patrones en el tiempo dependiendo de valores de potencial y de umbral. El potencial se puede traducir a urbanización. Esta urbanización persiste inclusive si en el futuro el potencial de la celda cae por debajo del valor umbral. El estado inicial del modelo asigna $z = 0$ a cada celda de una cuadrícula. De manera subsecuente, todo el modelo se actualiza cambiando el estado de cada celda a

$$z_i(t+1) = 1/5[z_i(t) + \sum_{j \in N_i} z_j(t)] + \epsilon_i(t)$$

en donde N_i es la vecindad Von Neumann y ϵ es un valor $+1$ o -1 que se elige aleatoriamente con la misma probabilidad, lo que provoca que el modelo nunca se desplace hacia el equilibrio ya que constantemente se introduce este ruido al sistema. El modelo por lo tanto abarca dos características que en su conjunto impulsan los procesos de crecimiento urbano: agregación y difusión [94].

Aparte del submodelo *Vicsek-Szalay*, la variable Potencial también es actualizada por celdas vecinas urbanizadas como una manera de replicar la situación observada en la vida real donde áreas urbanizadas tienden a atraer urbanización a superficies vacantes adyacentes.

Capítulo 5

Estudio de caso

El modelo descrito en el apartado anterior se aplicó a la ciudad de Ensenada, con particularidades propias de este asentamiento urbano manifestándose en los siguientes apartados de la estructura del protocolo del ODD.

5.1. Generalidades del modelo

Entidades, estados, variables y escalas. El modelo se basa en una cuadrícula que abarca la extensión especial de la ciudad de Ensenada, México. Cada celda del modelo representa 10,000 m² o 1 hectárea. La superficie del polígono que conforma los límites del centro de población abarca 45,652 hectáreas y se toma del PDUCPE.

Variables de nivel básico.

Interés. Representa el interés de una celda por desarrollar un uso de suelo. Este interés puede ser uno de los 111 usos de suelo específicos de acuerdo al PDUCPE en su Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo (Fig. 31).

Uso de suelo. Se dividen en 7 tipos generales los que a su vez se subdividen en un total de



Figura 31: Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo. Los renglones son usos de suelo y las columnas son subsectores. Las compatibilidades se muestran en verde y las incompatibilidades en rojo [1]

111 usos de suelo específicos de acuerdo al PDUCPE. Estos 7 tipos generales son Habitacional, Turístico, Industrial, Agroindustrial, Comercial, Equipamiento y Agrícola. Para facilitar su visualización, el uso de suelo industrial se muestra a través de celdas color naranja, y el resto de los usos de suelo de color gris en la pantalla del modelo.

¿Urbanizable? Las áreas no urbanizables están compuestas por cañadas, parcelas agrícolas, fallas geológicas, pendientes pronunciadas y suelo arriba de la cota 200 metros sobre el nivel del mar. Después de descontar estas superficies y el área urbanizada, el resto es suelo urbanizable que incluye a los predios baldíos que se encuentran dentro de la ciudad. Las áreas se toman del PDUCPE.

Subsector. De acuerdo al PDUCPE, el polígono de la ciudad está dividido en 5 sectores y estos a su vez están subdivididos en 61 subsectores (Fig. 32). Este polígono es más grande que la superficie urbana actual, así que contiene áreas naturales. Cada uno de los 111 usos

de suelo son compatibles, o no, con cada uno de estos 61 subsectores. Tanto los subsectores como sus compatibilidades se toman de la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo del PDUCPE.

Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo. Matriz que especifica la compatibilidad entre cada uno de los 111 usos de suelo específicos y los 61 subsectores, lo que resulta en 6,771 combinaciones (Fig. 31). El concepto de compatibilidad no se relaciona a la adyacencia entre usos de suelo, sino al permiso de un uso de suelo para que pueda suceder dentro de un subsector de la ciudad, y se obtiene de la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo del PDUCPE. En este sentido, la compatibilidad de cada celda con cada uno de los 111 usos dependerá del subsector donde se encuentre.

5.2. Conceptos de diseño

Observación. La topografía pronunciada que rodea a la ciudad limita de manera relevante su crecimiento y ha tenido una influencia histórica en su forma urbana actual. Respecto al modelo, la topografía tiene una influencia determinante en los resultados del espacio muestral de la forma urbana final, el cual es bajo en su variabilidad. Se analizó una sobreposición de 500 formas urbanas finales, y se detectó que aproximadamente a partir de la sobreposición 50 en Adelante no se presentaban diferencias significativas, motivo por lo cual cada experimento se compuso de 50 simulaciones (Fig. 33).

5.3. Detalles

Inicialización. El modelo inicialmente detecta el Suelo Atractivo de acuerdo a requisitos ya mencionados, que para la ciudad de Ensenada se muestra en la Fig. 34.

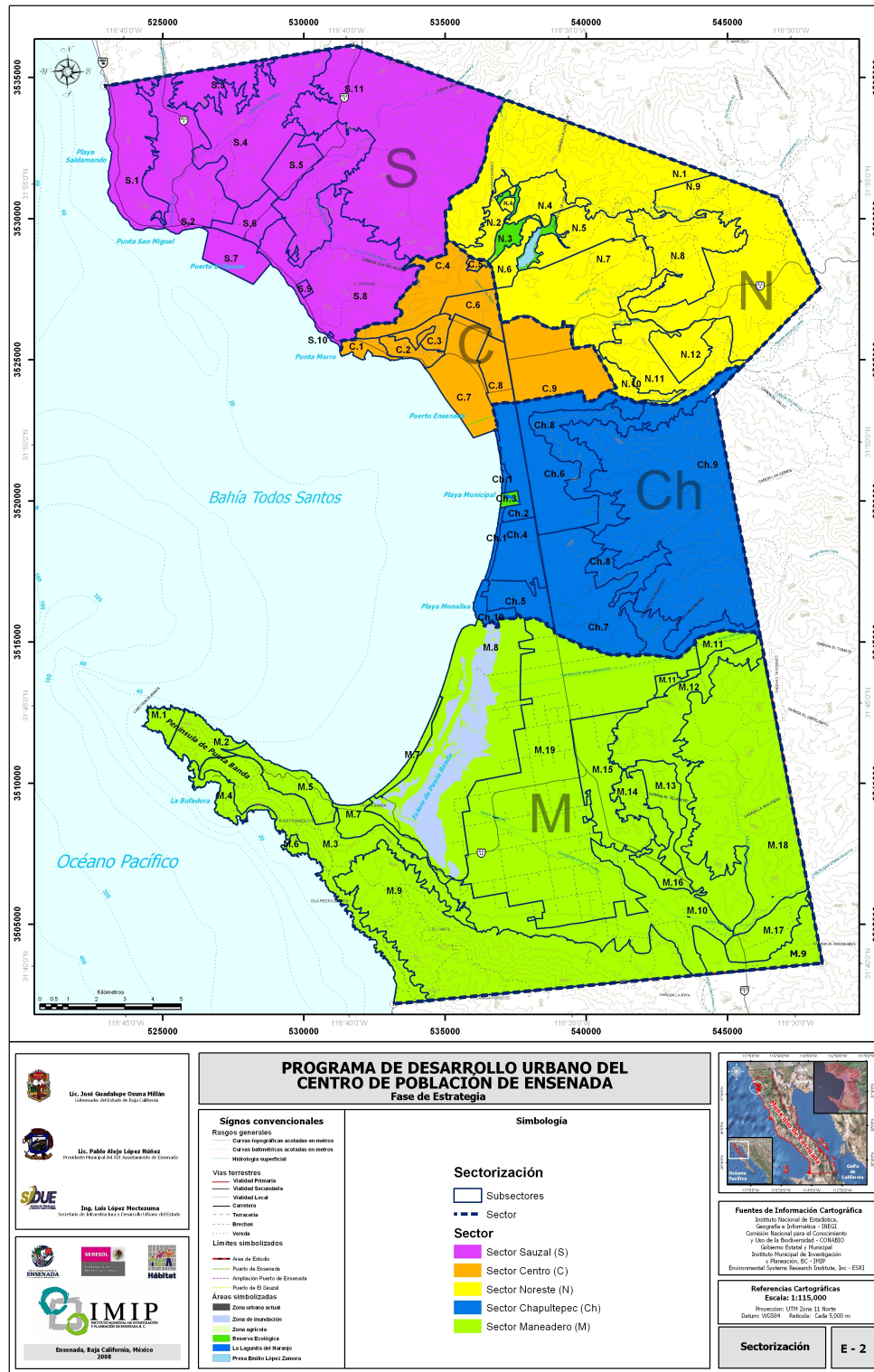


Figura 32: Sectores y subsectores de la ciudad de Ensenada [1]

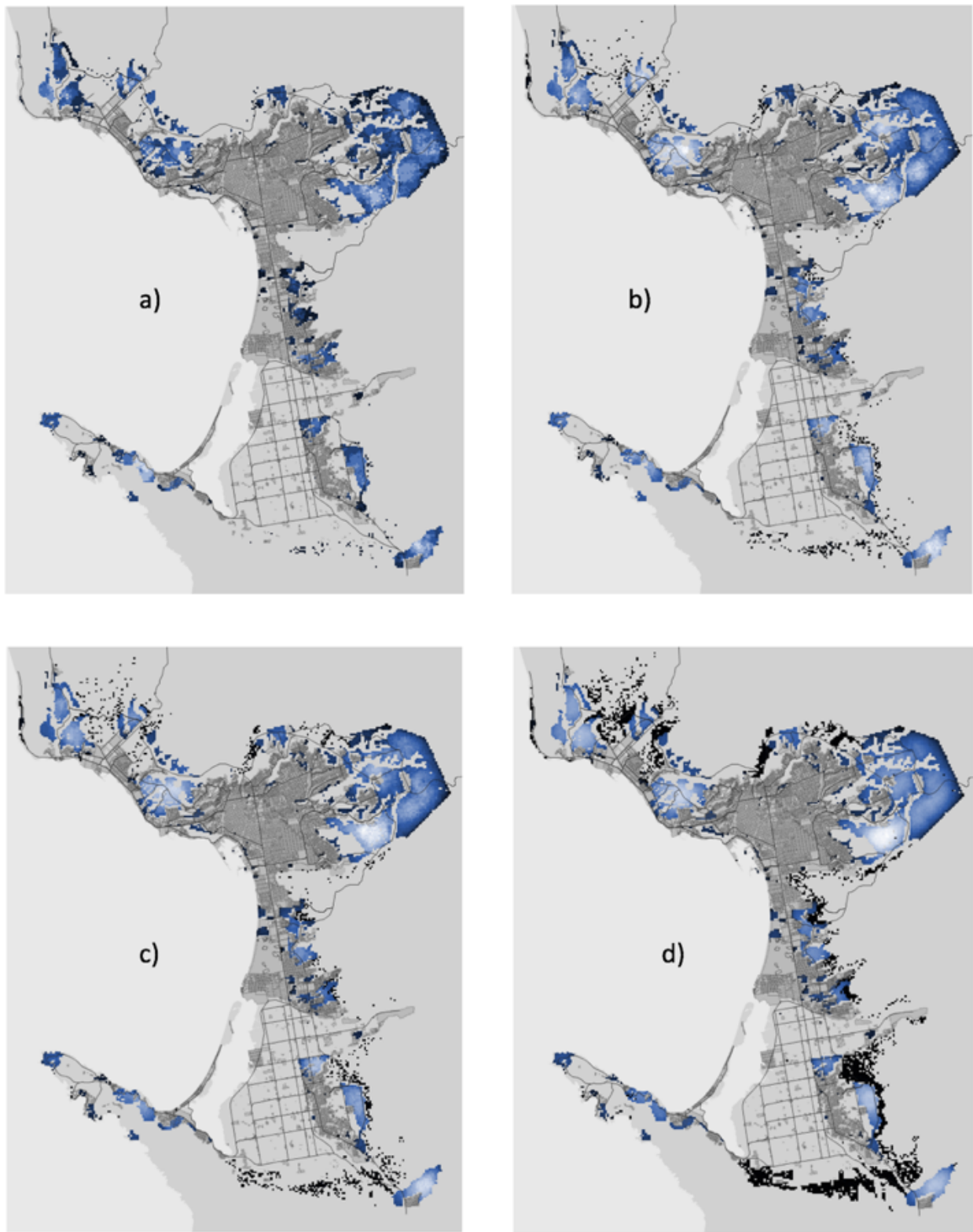


Figura 33: Mapas probabilísticos. a) 10 iteraciones, b) 50 iteraciones, c) 100 iteraciones, d) 500 iteraciones. Las zonas más claras indican mayor probabilidad de urbanización a futuro. Después de 50 iteraciones, la variabilidad de estas zonas no es significativa.

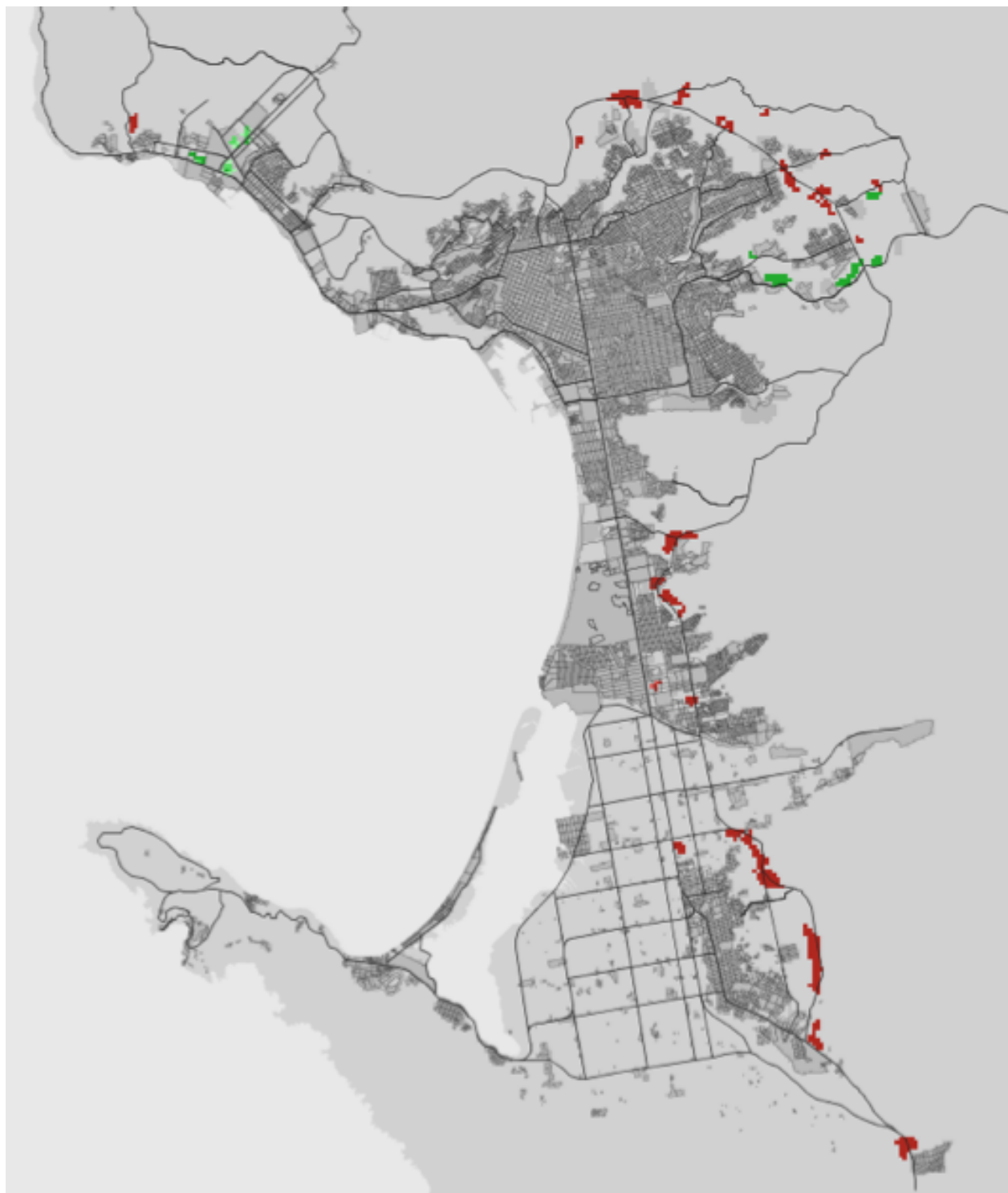


Figura 34: Estado inicial del modelo, en el cual se muestra la extensión espacial de la ciudad de Ensenada y el Suelo Atractivo para industria en compatibilidad (verde) e incompatibilidad (rojo) con el PDUCE.

Entrada de datos. Los valores iniciales para ejecutar la simulación son los siguientes:

Población inicial: 363,260. Se toma de los resultados del censo más recientes.

Tasa de crecimiento: 1.7. Se obtiene del PDUCPE.

% de industria compatible: 53 %. Se obtiene del Programa Sectorial de Desarrollo Industrial de Ensenada, el cual establece que el 47 % de la industria en la ciudad de Ensenada se encuentra en incompatibilidad normativa con el PDUCPE.

Años de crecimiento: 10. Es un rango de tiempo que se considera como aceptable por funcionarios públicos en un contexto de revisión de los programas de desarrollo urbano.

Densidad de población: 35 hab/ha. Es la densidad promedio actual de Ensenada de acuerdo al PDUCPE y se expresa en habitantes por hectárea.

Restricción de pendiente: 4. Este valor corresponde a un rango de pendiente del 0 al 30 %, el cual es similar a la norma urbana permitida de urbanización de hasta el 35 % establecida en el PDUCPE. El valor exacto de 35 % no se utilizó debido a complicaciones técnicas con los datos disponibles al momento de elaborar el modelo.

Umbral: 4. Este valor para el submodelo Vicsek-Szalay se eligió después de observación empírica de resultados con mayor similitud topología [188] a la mancha urbana de Ensenada (Fig. 35).

Se cargan al modelo capas de información espacial de usos de suelo actual, suelo desarrollable y no desarrollable, estructura vial tanto actual como proyectada. Estas se cargan como archivos en formato SHP (vector) o ASC (raster), las cuales previamente se elaboraron a través de un Sistema de Información Geográfica para el PDUCPE.

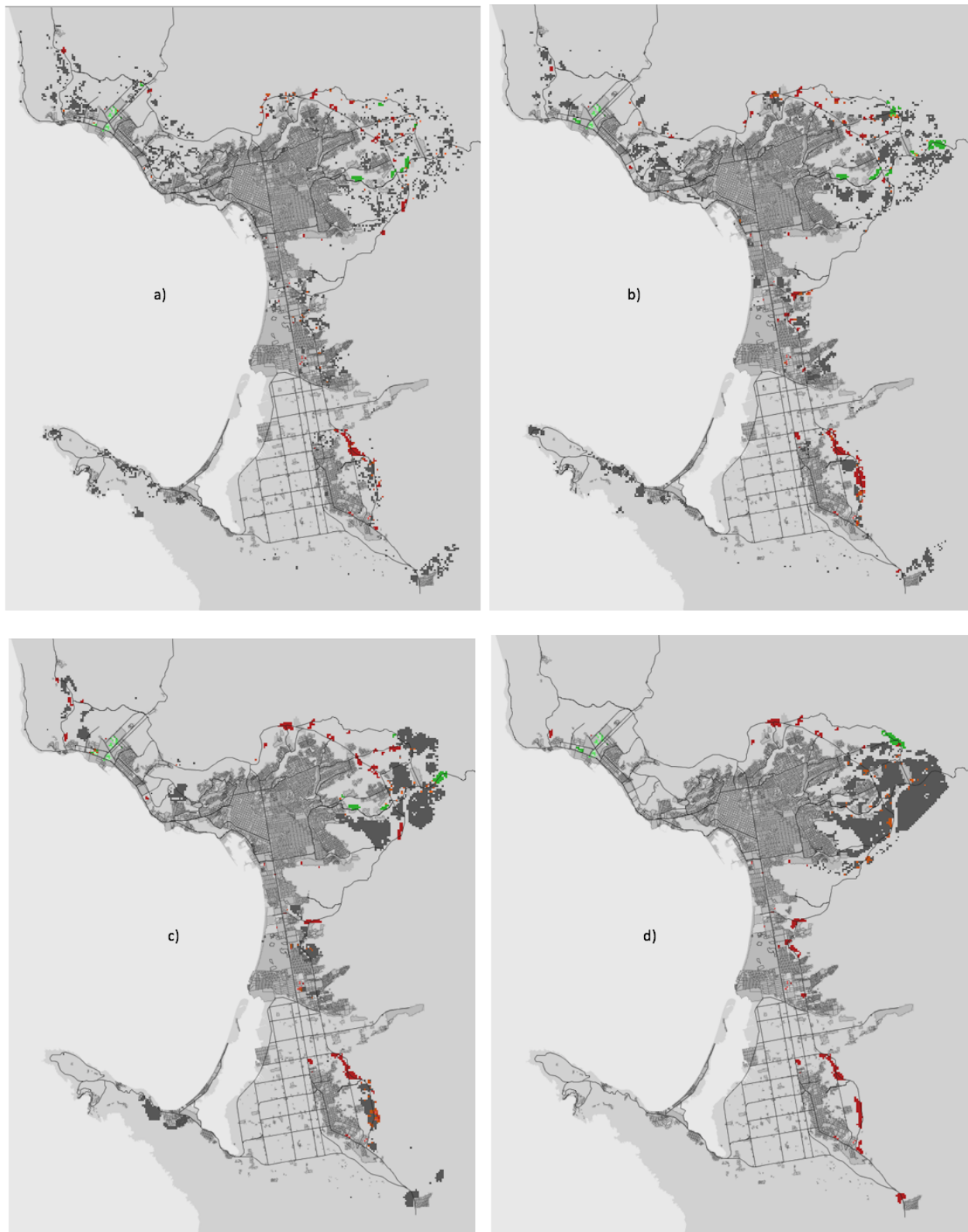


Figura 35: Patrones de superficie urbana resultantes con diferentes valores de la variable Umbral: a) 1, b) 2, c) 4 y d) 8.

Capítulo 6

Resultados

Los resultados están enfocados a analizar el comportamiento de la ocupación de suelo por la industria y del Suelo Atractivo para esta actividad como resultado de la aglomeración de ciertas condiciones territoriales y de usos de suelo normados por la Matriz de Compatibilidad de Usos de Suelo establecida en el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada. Esto con el fin de identificar donde surgen estas zonas y cómo se comporta su distribución y superficie en el tiempo, particularmente bajo condiciones variables de densidad de población y nivel de cumplimiento de la normatividad industrial. Para ello, se elaboró el modelo para obtener los siguientes datos:

- Suelo Atractivo total: Cuantifica la superficie de Suelo Atractivo en un año dado.
- Suelo Atractivo urbanizado, diferenciado por:
 - Porcentaje: Del total de la superficie de Suelo Atractivo, se estima el porcentaje que es ocupado por cualquier uso de suelo.
 - Cantidad: superficie, diferenciada por:
 - Compatibilidad: Cuantifica la superficie de Suelo Atractivo que es compatible

- e incompatible con el uso industrial, además de cuantificar el Suelo Atractivo ocupado por usos industriales y no industriales.
- o Uso de suelo: Cuantifica la superficie de Suelo Atractivo que ha sido ocupada por cada uno de los usos de suelo generales.
- Industria diferenciada por compatibilidad: Cuantifica la superficie industrial ubicada en subsectores compatibles e incompatibles con esta actividad.
- Estado del Suelo Atractivo: Cuantifica la superficie de Suelo Atractivo “vivo” (vacante y deseable) o “muerto” (urbanizado o inhibido por vecinos).
- Mapas probabilísticos de:
 - Formación de Suelo Atractivo
 - Urbanización por suelo industrial
 - Urbanización por suelo no industrial
 - Suelo Atractivo vivo o muerto

6.1. Suelo Atractivo total

Cuantifica la cantidad de Suelo Atractivo en el tiempo (Fig. 36). En este aspecto se observa que al inicio de una simulación siempre habrá más Suelo Atractivo en subsectores incompatibles con la industria que Suelo Atractivo en subsectores compatibles con esta actividad (Fig. 37), pero con el paso de los años la superficie del primero baja y la del segundo aumenta para posteriormente descender también, y llegar a un momento en que ambos tipos de Suelo Atractivo descienden de manera uniforme. Algo a notar es que en presencia de densidades bajas de entre 10 a 20 hab/ha (Fig. 38), el Suelo Atractivo desciende abruptamente en un periodo de entre 4 a 7 años.

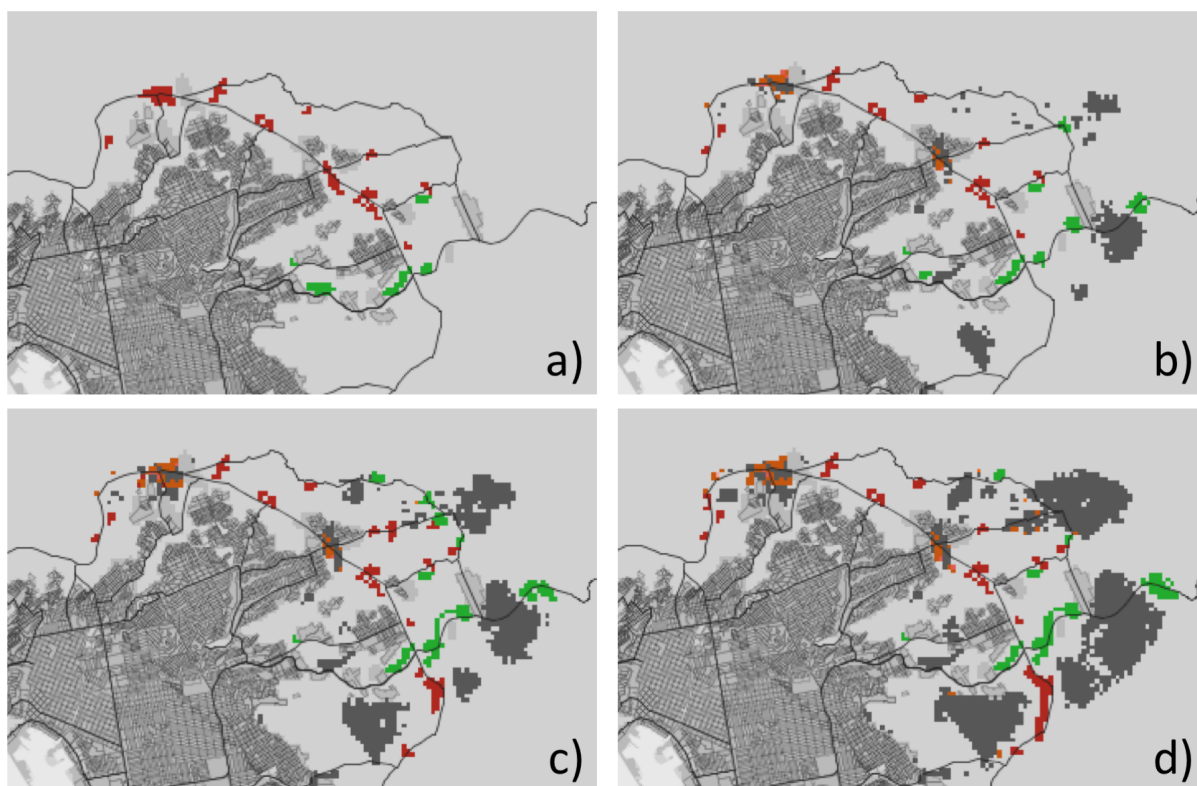


Figura 36: Ejemplo de evolución por año de Suelo Atractivo por año: a) $t=0$, b) $t=3$, c) $t=6$, d) $t=10$. Verde: Suelo Atractivo compatible con la industria, rojo: Suelo Atractivo incompatible con la industria, naranja: industria.

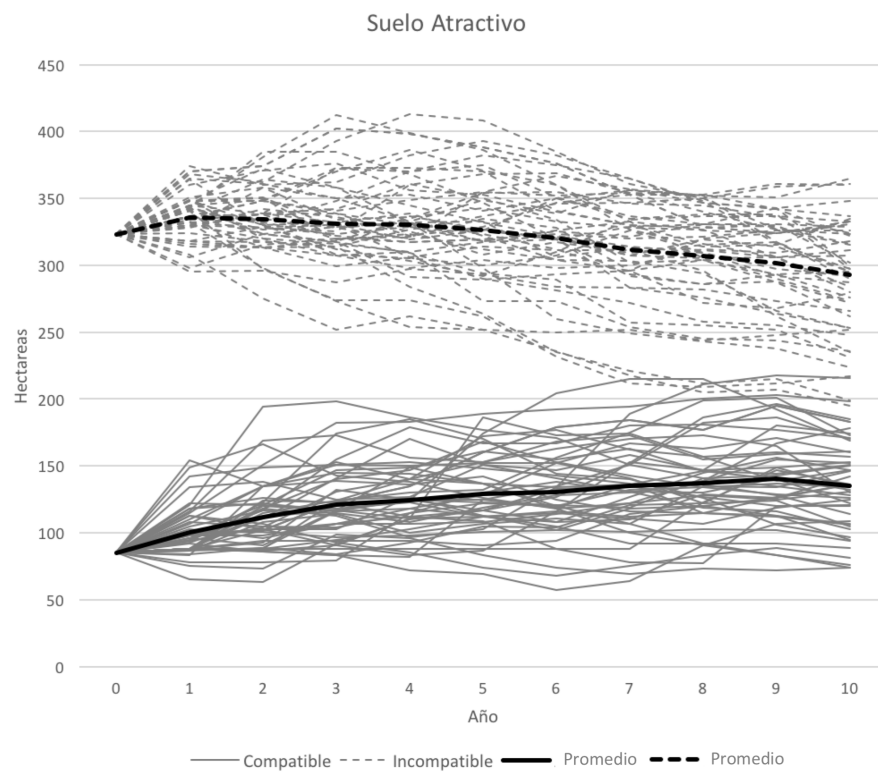


Figura 37: Comportamiento de Suelo Atractivo en un periodo de 10 años.

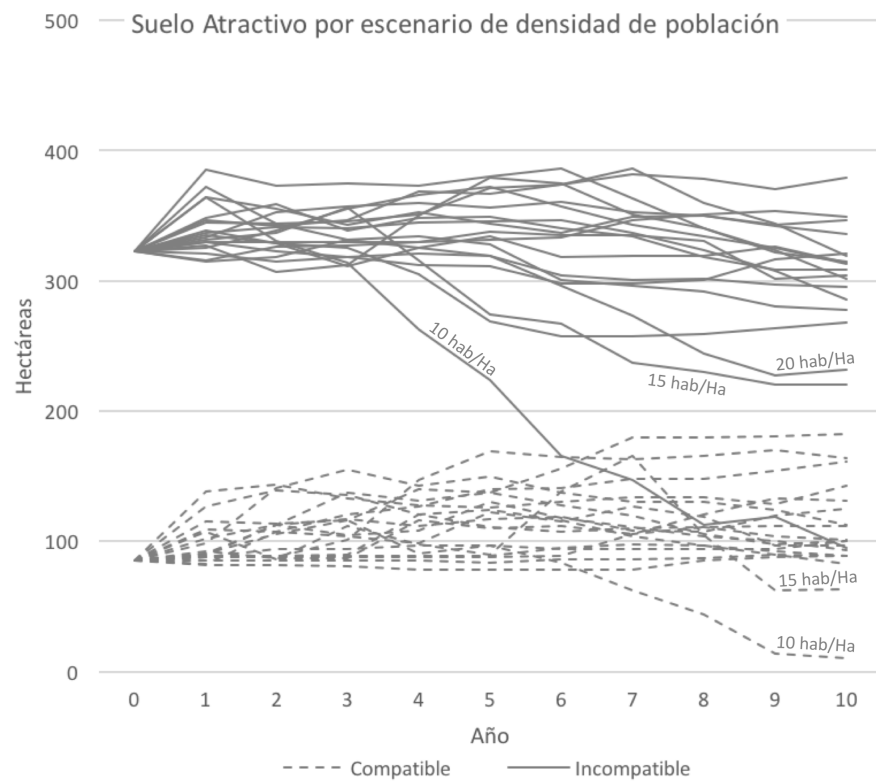


Figura 38: Comportamiento de Suelo Atractivo bajo escenarios de densidad de población en un periodo de 10 años.

Al estudiar el promedio espacial de todas las ejecuciones del modelo se observan mayores probabilidades de surgimiento de Suelo Atractivo en zonas específicas de la ciudad. Una de estas es un corredor de Suelo Atractivo a lo largo de una vialidad regional que comunica hacia el exterior noreste de la ciudad (Fig. 39), el cual muestra a través de un degradado que en cuanto más se aproxima a la ciudad, mayor es su probabilidad de formación. A la par sobre este corredor hay una posibilidad de urbanización por usos adicionales al industrial de acuerdo al mapa de probabilidad de ubicación de estados vivos y muertos del Suelo Atractivo.

El mapa de probabilidad de ocupación de Suelo Atractivo por actividad industrial (Fig. 40) muestra que esta es muy baja, sin mostrar preferencias por alguna zona en particular y mayormente en incompatibilidad normativa con el PDUCE. Respecto a esto último, a pesar de que se muestra una amplia oportunidad de ocupación de suelo por la industria en varias partes de la ciudad, en lo general esta se presenta con probabilidad baja salvo en dos zonas al norte y sur de la ciudad.

Respecto a la ocupación del Suelo Atractivo por usos industriales bajo diferentes escenarios de porcentaje de cumplimiento de la normatividad urbana en materia de compatibilidad de usos de suelo, se observa que indistintamente del nivel de este cumplimiento, la variabilidad de ocupación industrial de Suelo Atractivo que permite este uso no es significativa ocupando cuando mucho hasta 11 has de superficie. En cambio, la industrialización de Suelo Atractivo en donde no se permite el uso industrial aumenta al disminuir el cumplimiento de la normatividad urbana respecto a compatibilidades de uso de suelo hasta una ocupación de 94 has (Fig. 41). Aunque esto aparezca obvio, se debe de tomar en cuenta que el Suelo Atractivo se define independientemente de si cumple o no con la normatividad urbana. En términos espaciales, se observa la concentración de industria en la parte central y sur del Centro de Población, la cual va disminuyendo al aumentar el porcentaje de cumplimiento de la normatividad urbana. La concentración al sur dependería de la construcción de una vialidad regional que aún no existe (Fig. 42)

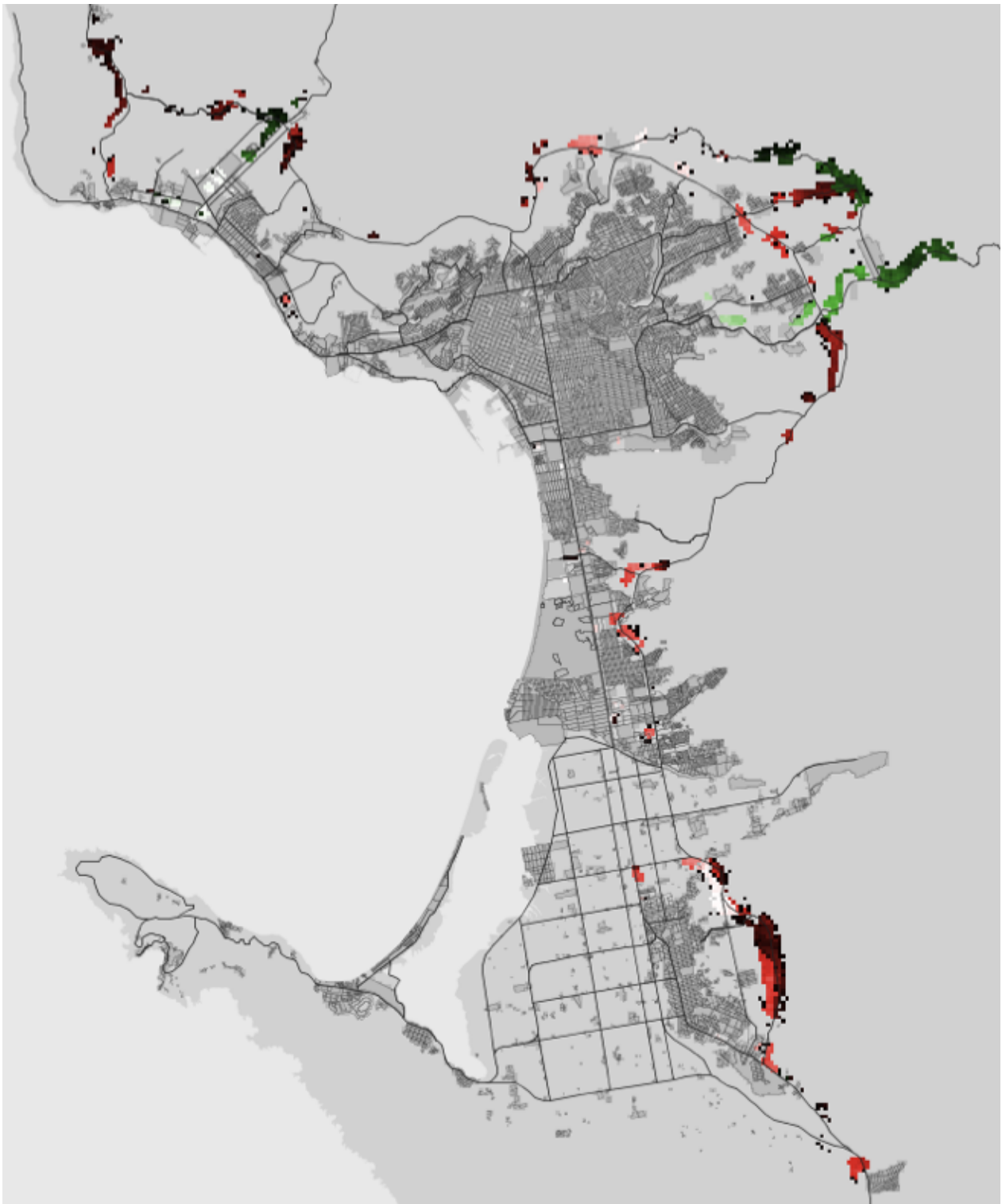


Figura 39: Mapa probabilístico de formación de Suelo Atractivo. Verde: compatible con el PDUCPE, rojo: incompatible con el PDUCPE. Tonalidad oscura: menor probabilidad, tonalidad clara: mayor probabilidad.

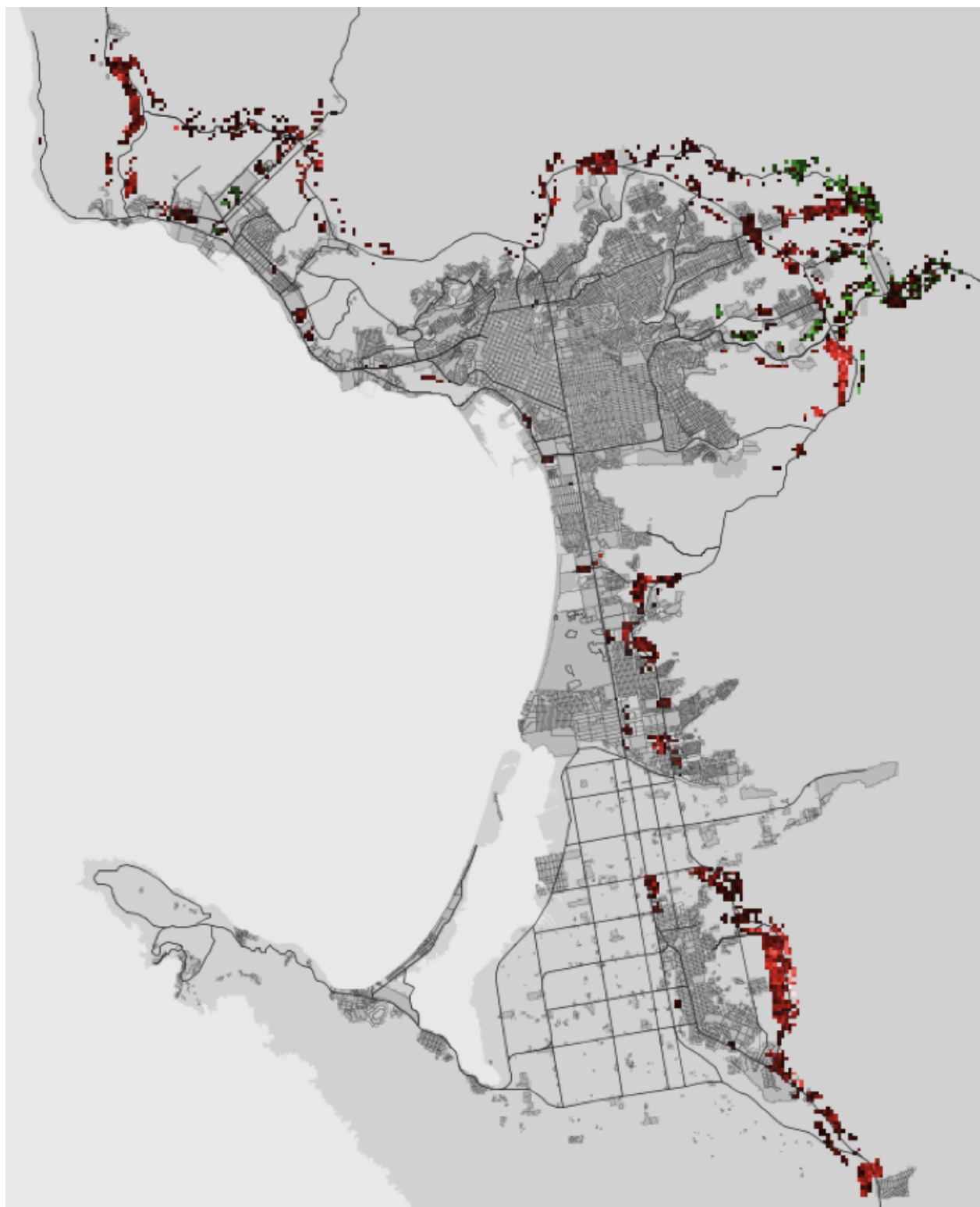


Figura 40: Mapa probabilístico de Industria en Suelo Atractivo. Verde: compatible con el PDUCPE, rojo: incompatible con el PDUCPE. Tonalidad oscura: menor probabilidad, tonalidad clara: mayor probabilidad.

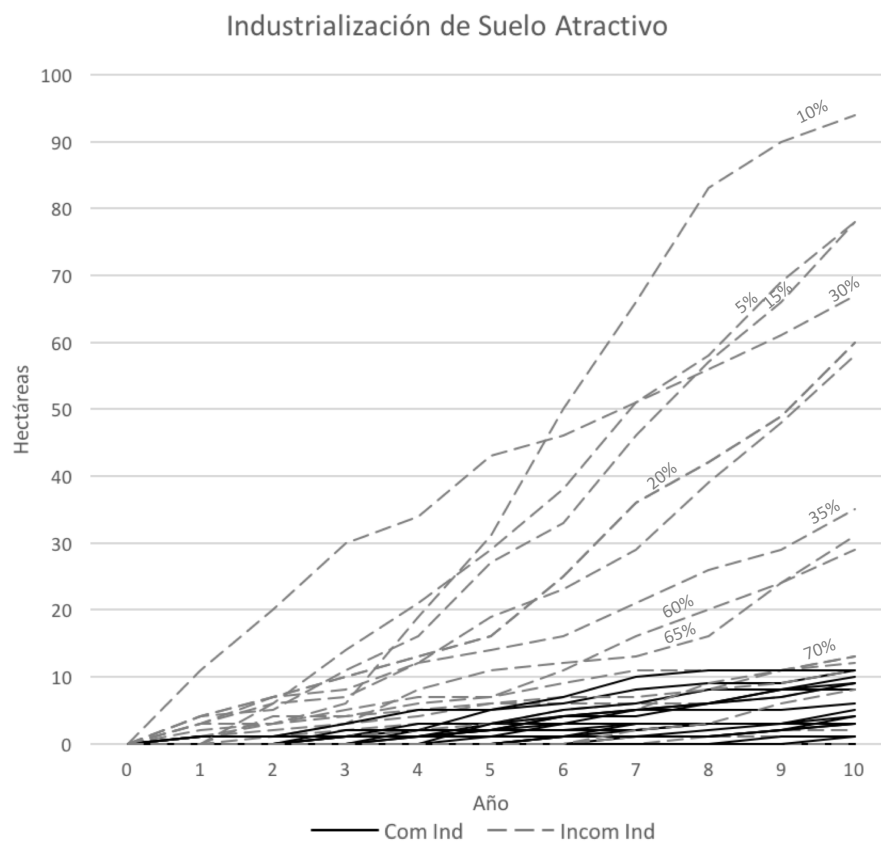


Figura 41: Ocupación de Suelo Atractivo por usos industriales bajo diferentes escenarios de porcentaje de cumplimiento normativo en un periodo de 10 años.

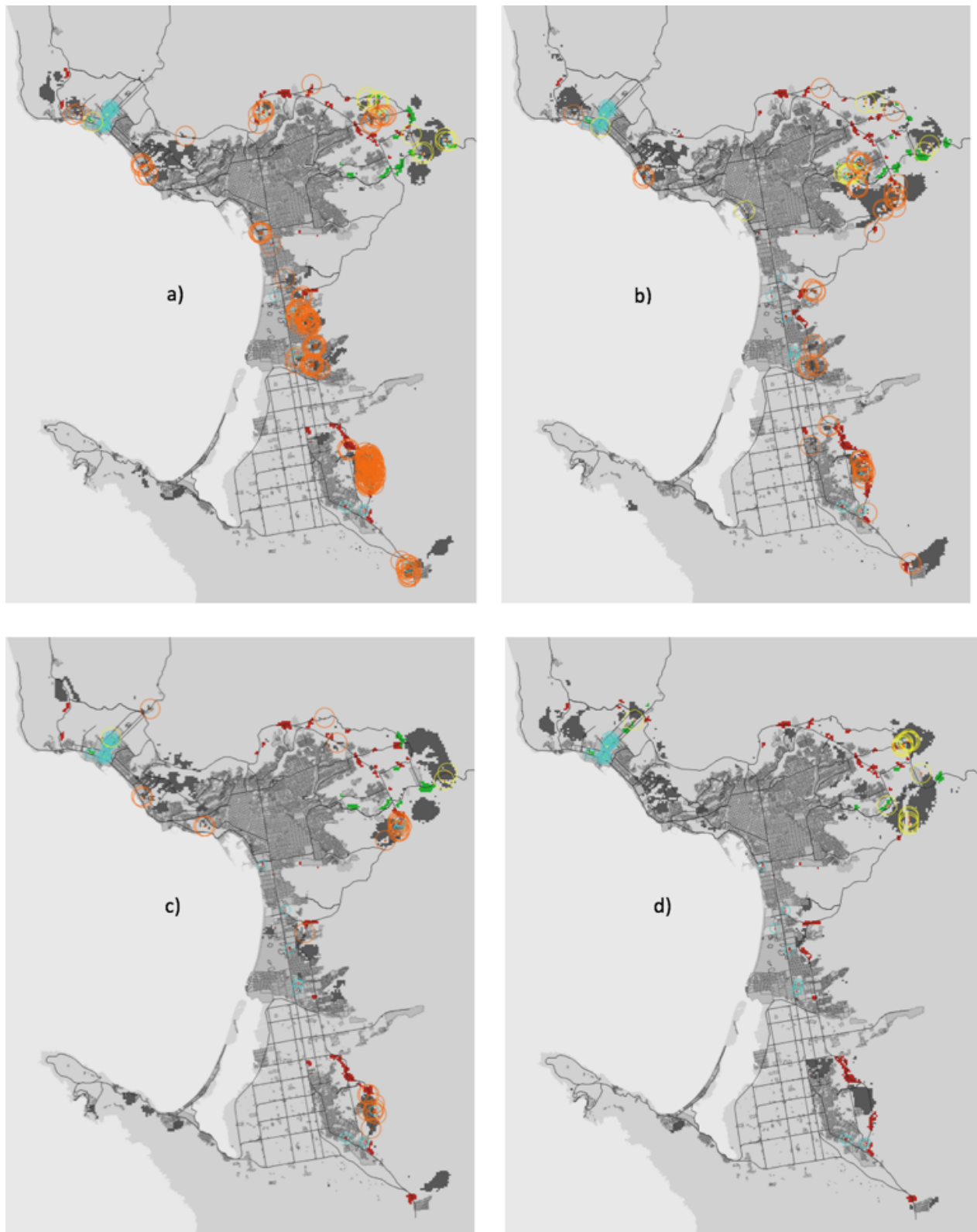


Figura 42: Ocupación industrial de acuerdo a diferentes porcentajes de cumplimiento de la normatividad urbana en materia de compatibilidad de usos de suelo de acuerdo al PDUCPE. a) 0 %, b) 50 %, c) 75 % y d) 100 %. En círculo naranja se encierra industria incompatible, en círculo amarillo se encierra industria compatible.

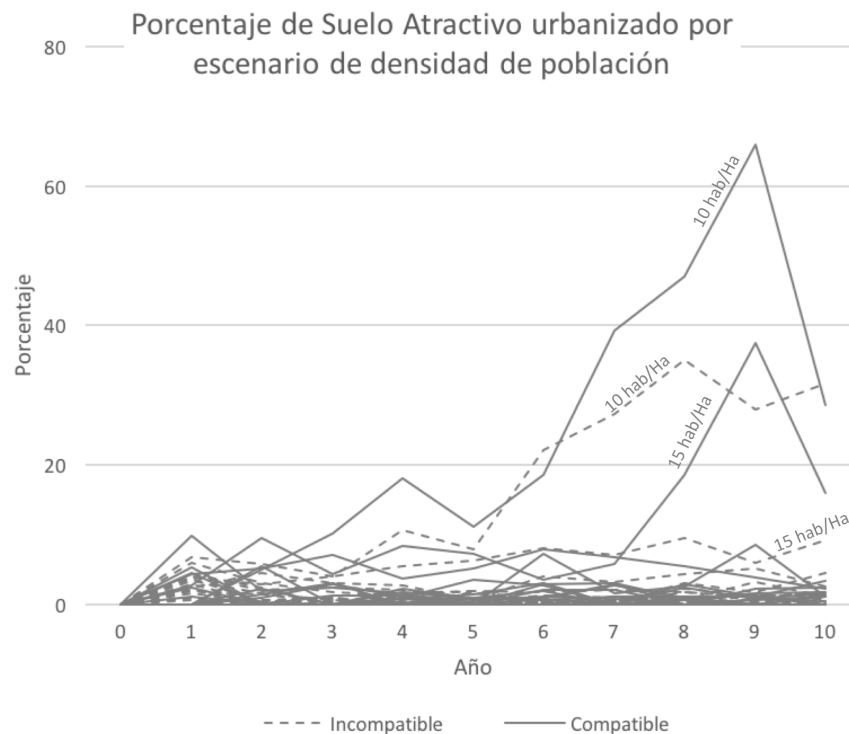


Figura 43: Comportamiento porcentual de Suelo Atractivo urbanizado en un periodo de 10 años bajo diferentes escenarios de densidad de población.

6.2. Porcentaje de Suelo Atractivo urbanizado

Porcentaje de Suelo Atractivo que es urbanizado en un año dado. El comportamiento en cada ejecución del modelo es tan variable que amerita el análisis individual de cada resultado final, pero se pueden hacer algunas observaciones en el contexto de escenarios de densidad. En presencia de densidades bajas de entre 10 a 15 hab/ha la urbanización en un año dado suele subir hasta en un 65%, cuando en comparación con una densidad similar a la que actualmente tiene la ciudad de Ensenada de 35 hab/ha la urbanización no supera el 14% anual (Fig. 43).

6.3. Cantidad de Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por compatibilidad

Cuantifica la superficie de Suelo Atractivo que es compatible e incompatible con el uso industrial, además de cuantificar el Suelo Atractivo ocupado por usos industriales y no industriales. A lo largo de las diferentes ejecuciones del modelo se observa que predomina la ocupación de Suelo Atractivo por usos diferentes a la industria (Fig. 44). La siguiente condición que predomina es industria fuera de Suelo Atractivo. Contrario a lo deseado, la ubicación de industria en Suelo Atractivo en compatibilidad normativa es la ocupación más baja de todas.

De nuevo en un contexto de densidad de población baja de entre 10 a 20 hab/ha se observa que la superficie urbanizada de Suelo Atractivo sube rápidamente, particularmente por suelo no industrial (Fig. 45), y también sube el suelo industrial fuera de Suelo Atractivo. Se observa que en densidades de aproximadamente 40 hab/ha o más altas, el total de suelo industrial fuera de Suelo Atractivo es bajo.

Espacialmente se observa una mediana probabilidad de urbanización del Suelo Atractivo en la mayor parte del sector noreste de la ciudad, y también en aquellas zonas norte y sur que se habían identificado con una alta probabilidad de que formara Suelo Atractivo pero que actualmente se encuentra en incompatibilidad normativa con el PDUCE.

6.4. Cantidad de Suelo Atractivo urbanizado diferenciado por uso de suelo

Con muy poca variación entre los datos arrojados por cada ejecución del modelo, de manera consistente el uso habitacional es el que mayormente llega a ocupar el Suelo Atractivo,

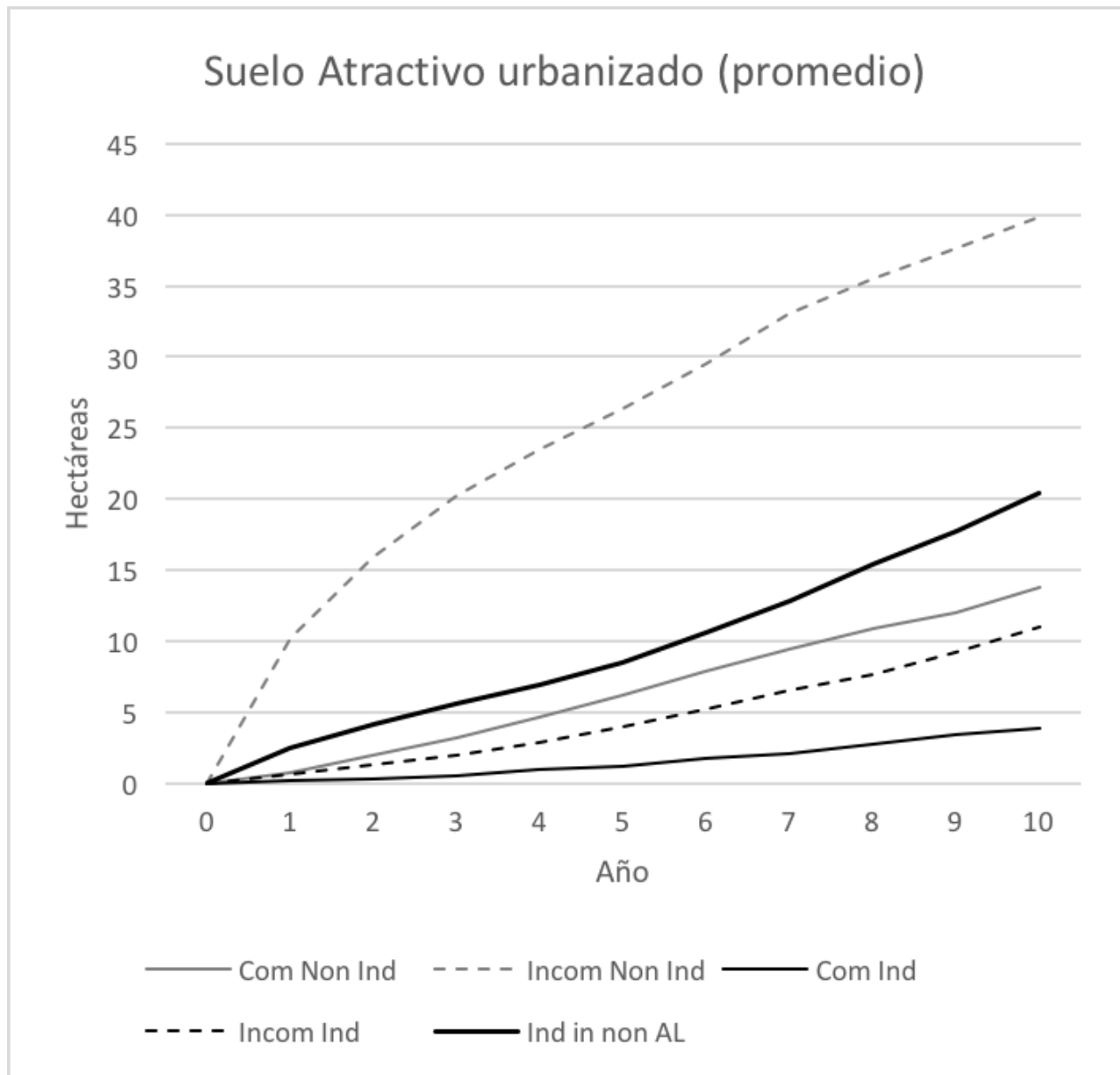


Figura 44: Comportamiento promedio de Suelo Atractivo urbanizado en un periodo de 10 años: Incom Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por industria, Com Non Ind: Suelo Atractivo compatible urbanizado por usos no industriales, Incom Non Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por usos no industriales, Ind non AL: Industria ubicada fuera de Suelo Atractivo.

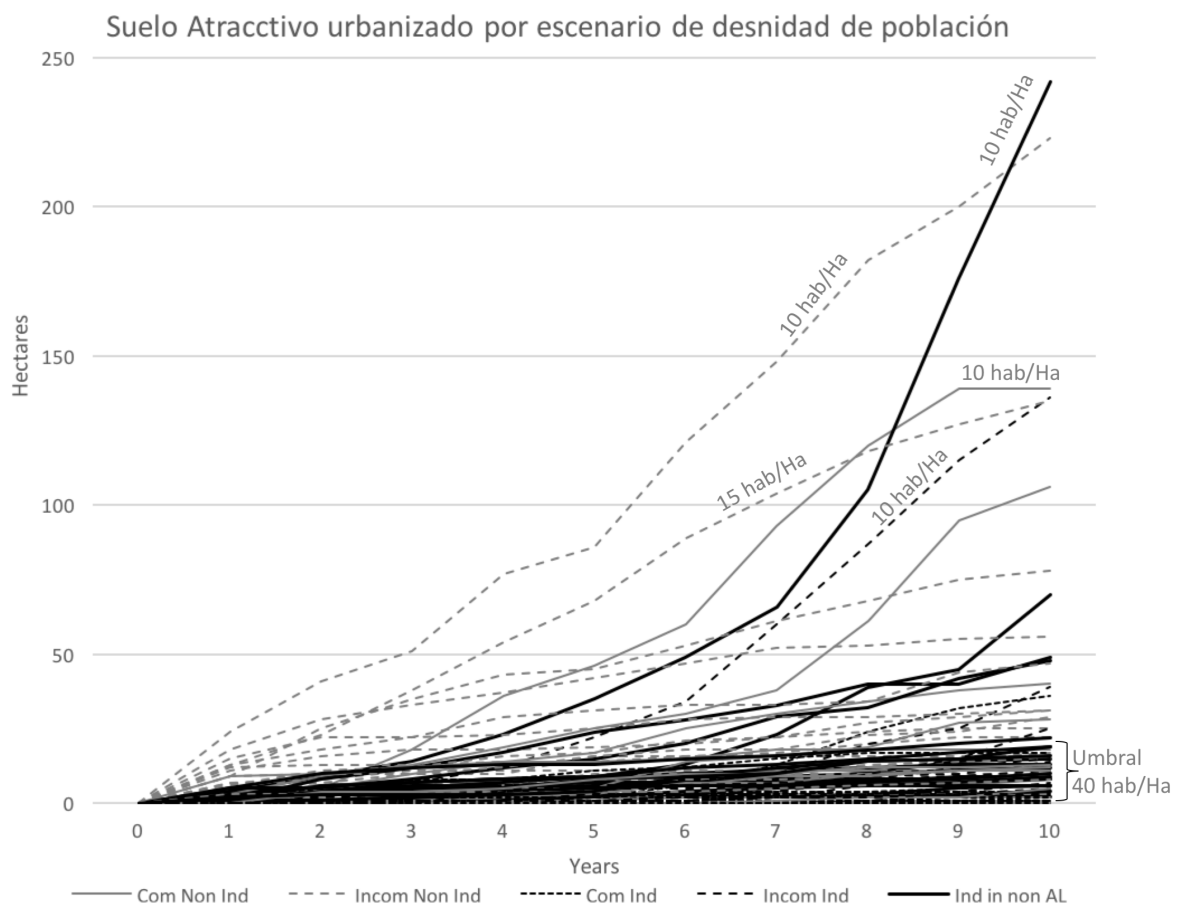


Figura 45: Comportamiento promedio de Suelo Atractivo urbanizado en un periodo de 10 años bajo diferentes escenarios de densidad de población: Incom Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por industria, Com Non Ind: Suelo Atractivo compatible urbanizado por usos no industriales, Incom Non Ind: Suelo Atractivo incompatible urbanizado por usos no industriales, Ind non AL: Industria ubicada fuera de Suelo Atractivo.

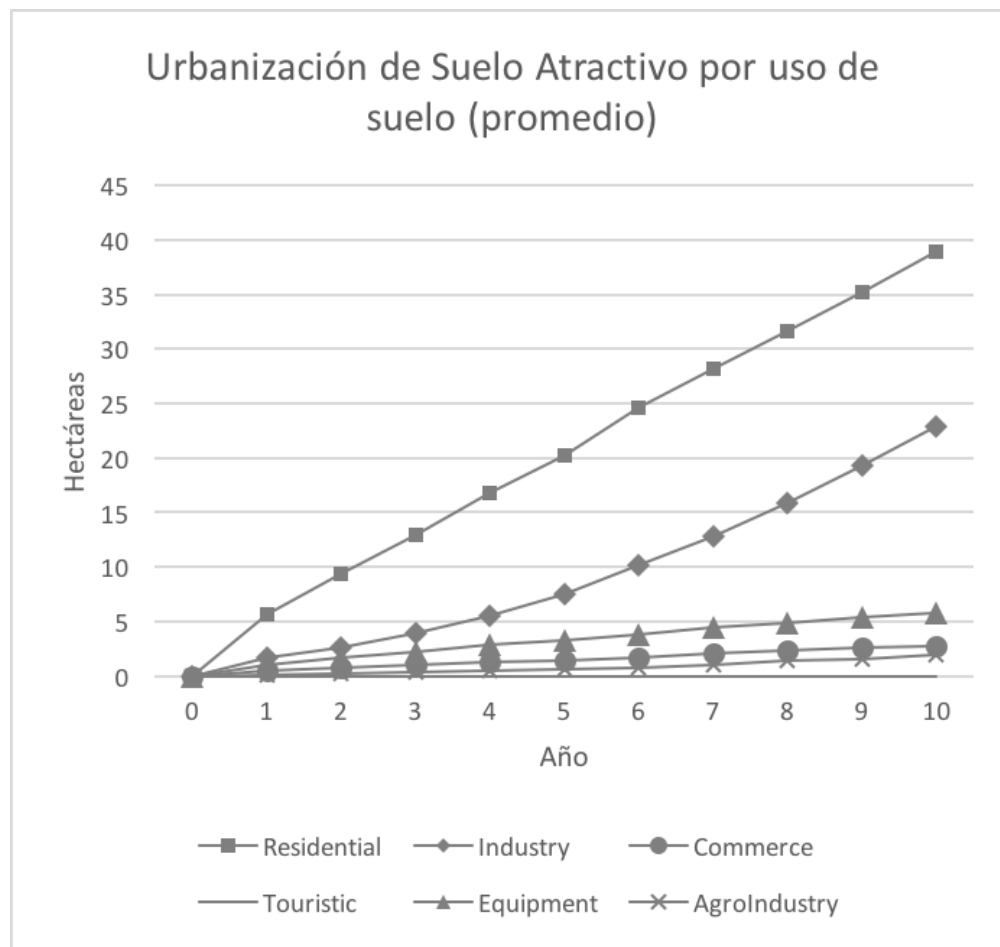


Figura 46: Comportamiento promedio de Suelo Atractivo urbanizado por diferentes usos de suelo en un periodo de 10 años.

seguido por uso industrial (Fig. 46).

6.5. Industria diferenciada por compatibilidad

Cantidad de superficie industrial ubicada en subsectores compatibles e incompatibles con esta actividad. De nuevo se observa que en densidades bajas de entre 10 a 25 ha/ha, la cantidad de superficie industrial en subsectores incompatibles con este uso sube abruptamente en el tiempo (Fig. 47).

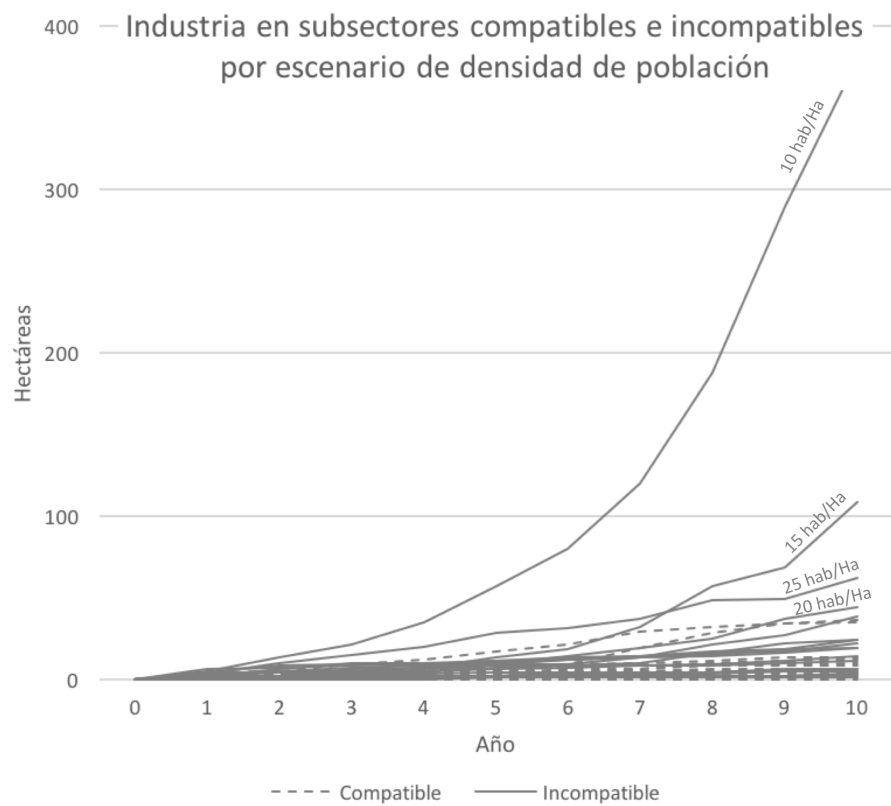


Figura 47: Compatibilidad de industria bajo diferentes escenarios de densidad de población en un periodo de 10 años.

En términos espaciales se observa que las zonas con mayor probabilidad de formar Suelo Atractivo y con buena ubicación en términos logísticos, dependen del incumplimiento del PDUCPE y de la operatividad de una estructura vial que aún no se construye.

6.6. Estado del Suelo Atractivo

Cantidad de Suelo Atractivo “vivo” (vacante y deseable) o “muerto” (urbanizado o inhibido por vecinos). En esta parte del análisis del Suelo Atractivo se denomina vivo al suelo que se encuentra vacante y que cumple con condiciones de deseabilidad para la industria, y muerto al que en algún momento estuvo vivo pero que finalmente fue urbanizado o inhibido por la llegada de usos de suelo vecinos incompatibles a la actividad industrial. Los resultados muestran que siempre habrá una mayor cantidad de Suelo Atractivo que esté vivo en los años iniciales (Fig. 48), pero invariablemente se reduce al mismo tiempo que el Suelo Atractivo muerto se eleva hasta que se invierte la cantidad y hay mayor superficie muerta que viva.

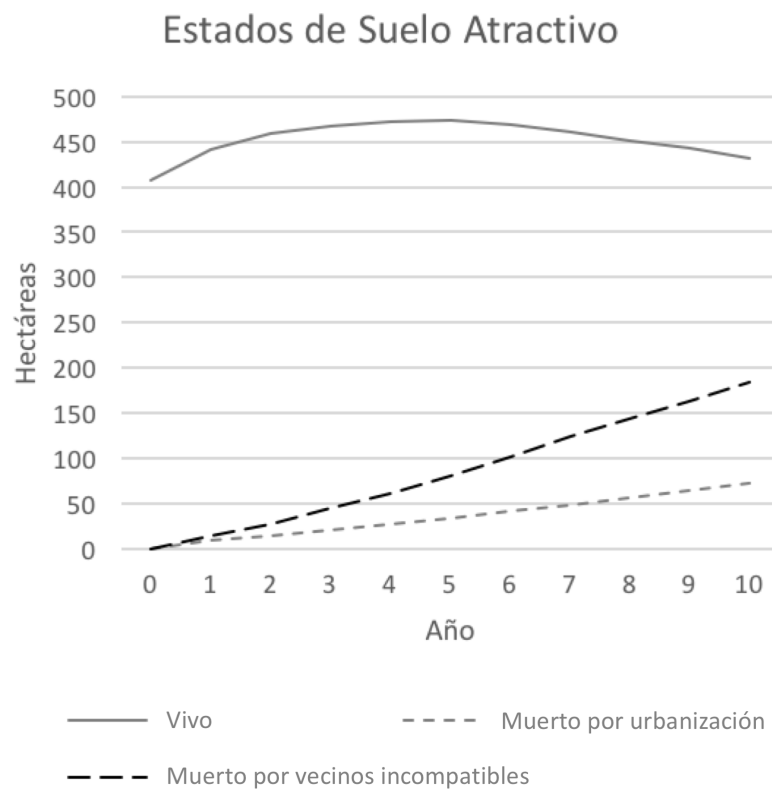


Figura 48: Comportamiento promedio de estados del Suelo Atractivo en un periodo de 10 años.

Capítulo 7

Discusión

7.1. Sobre los resultados de los experimentos

Siempre se ha considerado por inversionistas que el suelo disponible para la actividad industrial es muy limitado, así que un interés de esta investigación fue el saber cuál pudiera ser la disponibilidad de Suelo Atractivo en condiciones de compatibilidad, pero sobre todo aquel suelo incompatible con el PDUCPE que pudiera ser atractivo para la industria desde el punto de vista de un promotor, y así tratar de prever posibles violaciones normativas, y en qué lugar se pudieran dar. Los resultados del modelo demostraron que al inicio hay una mayor cantidad de Suelo Atractivo para industria en subsectores de incompatibilidad con esta actividad, lo que pone de manifiesto que, al ir creciendo la ciudad, se mantiene una mayor demanda de reservas territoriales para la industria que las que están establecidas por el Programa de Desarrollo Urbano de la ciudad, evidenciando una incongruencia entre lo permitido por este Programa en materia industrial y la realidad observada. También se demostró el efecto adverso que tienen las densidades bajas de población sobre el Suelo Atractivo para la industria, seguramente debido a que en densidades bajas la cantidad de suelo

urbano consumido es mayor y por lo mismo la probabilidad de urbanización y consecuente desaparición de Suelo Atractivo es mayor.

El modelo también ha logrado reflejar correctamente el crecimiento actual de la ciudad demostrándolo con el mapa de probabilidad de urbanización que apunta un claro crecimiento hacia la zona noreste, reproduciendo así una situación de ocupación real dada en la última década. A mayor detalle, la simulación refleja un corredor de desarrollo a lo largo de una carretera que conecta al ya mencionado sector cuyos límites solo obedecen a que el modelo está elaborado de tal manera que funcione solo dentro de los límites oficiales de la ciudad, lo que significa que hay una alta posibilidad de que en la vida real se extendiera más allá de la ciudad.

El modelo considera como construida una estructura vial que en la realidad está considerada solo como proyecto y alrededor de la cual se muestra una importante probabilidad de ocupación industrial, pero para que esta se pueda desarrollar es necesario la construcción de vialidades regionales. Esta ocupación se concentra al norte y sur de la ciudad lo que es una condición deseable y contraria a la situación actual en donde se cuenta con usos industriales en partes internas de la ciudad, pero que actualmente el PDUCPE no las permite, lo que sugiere una modificación del mismo si se desea la industria, o de inhibidores deliberados si se desea lo contrario.

Respecto al porcentaje de Suelo Atractivo urbanizado, con este dato se pretende conocer la dinámica de aparición-desaparición de Suelo Atractivo, y es una medida complementaria a la estimación de Urbanización de Suelo Atractivo. Como se ha mencionado anteriormente, se observa que en densidades bajas se consume más suelo, lo que significa una mayor ocupación de Suelo Atractivo.

A través del modelo es de interés tener un apoyo en la caracterización de industria que pudiera establecerse en subsectores que no la permita, ya sea por falta de reservas territoriales

apropiadas o por la ausencia de cumplimiento de la normatividad, y de esta manera estimar la necesidad de agregar nuevas reservas o complementar la normatividad, según sea el caso. O que el modelo arrojó en sus múltiples ejecuciones fue la recurrente ocupación de Suelo Atractivo para la industria por usos diferentes a esta, lo que reduce las oportunidades de una ubicación favorable para este uso. También demostró que, aunque exista Suelo Atractivo, recurrentemente la industria se asienta fuera de este, ante el mayor número de oportunidades que ofrece la ocupación irregular. Pero el modelo mostró que esta situación se pudiera revertir a través de una mayor densidad poblacional, particularmente al superar la densidad de aproximadamente 40 hab/ha. Esto es importante ya que la densidad actual de la ciudad de Ensenada es de 35 hab/ha, lo que significa que se está en un umbral que, si se baja más allá de él, empezaría a aparecer de manera abrupta una mayor cantidad de industria en zonas no deseadas. Esta suposición está respaldada por el Programa Sectorial de Desarrollo Industrial de Ensenada [2] y el Programa Parcial de Mejoramiento Urbano de la Zona Centro y Frente de Mar [189]. Entre ambos programas se establece que la zona centro de la ciudad tiene una baja densidad de 11 hab/ha y una alta presencia de uso industrial, inclusive mayor a la que se presenta en sectores periféricos de la ciudad que por su rápida conexión con el exterior deberían de ser las zonas con más aptitud para la actividad industrial.

Un fenómeno característico de la ciudad de Ensenada es el encarecimiento de suelo originalmente destinado para industria ya que ha sido ocupado por vivienda. Tradicionalmente se ha considerado que la ubicación de la vivienda ha sido un inhibidor en el crecimiento del sector industrial al ocupar reservas originalmente destinadas para este uso, y los resultados del modelo confirman esta aseveración. Aquí el modelo refleja una clara competencia por el uso de suelo vacante entre estos dos usos que se da en la vida real, lo cual se ha reflejado inclusive recientemente en un importante activismo social.

También con el modelo se pretendió conocer la cantidad de industria que en el futuro se pudiera ubicar en subsectores que no son compatibles con esta actividad de acuerdo al

PDUCE. Si la mayoría de este uso se encuentra fuera de subsectores compatibles denota ya sea una insuficiente propuesta actual de reservas para este uso o un incumplimiento de la normatividad. De nuevo el modelo demuestra que, a la par del crecimiento cada vez más disperso de la mancha urbana que sucede al bajar la densidad de población, las probabilidades de que la industria aparezca en subsectores incompatibles con esta actividad sube abruptamente en el tiempo.

Respecto al estado de Suelo Atractivo, el interés en este indicador fue el identificar zonas en donde hubiera una alta urbanización de Suelo Atractivo que pudiera significar una alta competencia por el suelo y en consecuencia normar con más precisión. Según lo mostró el modelo, al inicio habrá más Suelo Atractivo vivo que muerto, para posteriormente invertirse estas proporciones. El año en que se invierten depende de la densidad, y se acerca más hacia el presente al bajarse la densidad de población, es decir, entre más baja más rápida será esta inversión. La tasa a la cual la superficie viva disminuye también es dependiente de la densidad. Cuando la densidad es baja, disminuye inmediatamente a la misma tasa que sube la superficie muerta, pero cuando la densidad es alta las tasas son diferentes al subir la superficie muerta a una tasa más alta de que lo hace la superficie viva.

7.2. Sobre la experiencia del modelado: consejos para nuevos modeladores urbanos

Desde la perspectiva de alguien que ha trabajado en la función pública en materia de planeación urbana y regional, el llegar hasta los resultados recién presentados pasa por una serie de experiencias que ameritan ser expuestas tanto por el potencial que tienen para enriquecer la práctica de la planeación como por el valor que puedan tener para quienes por primera vez elaboran un modelo. Bajo este enfoque, a continuación se presentan una serie

de recomendaciones basadas en la experiencia de este trabajo, escritas por un planeador y dirigidas a planeadores.

Para empezar, se debe de considerar que un modelo es una representación simplificada de la realidad. Este concepto lleva implícito el especificar claramente cual va a ser el fenómeno urbano a estudiar junto con una explicación tentativa sobre cuales son sus causas y como estas se relacionan entre sí para que finalmente producir este fenómeno de interés. Por lo Anterior, antes de escribir la primera línea de código se deben de tener una serie de supuestos que expliquen el comportamiento del fenómeno urbano que se desea reproducir adentro de una computadora. Esta será una serie de supuestos que en su conjunto tratan de explicar una realidad observada que posteriormente se traducirán en un programa computacional. Esto obliga a realizar un ejercicio de aguda observación y análisis del fenómeno de interés, complementado con evidencias e investigación documental llevada preferentemente por varios colaboradores. Posteriormente, cuando consideremos que la teoría está suficientemente completa, se traducirá a la formalidad de un lenguaje computacional y observar si se logró reproducir el comportamiento observado en la vida real. Es probable que el primer intento sea exitoso en reproducir correctamente el fenómeno, pero por cada éxito habrá numerosos intentos que arrojen resultados que se alejen del comportamiento intencionado. Por ello, el modelado es un proceso de retroalimentación que lleva los siguientes pasos: observación del fenómeno de la vida real $\Rightarrow$ elaboración de teoría que lo explique $\Rightarrow$ formalización de la teoría en un lenguaje de programación $\Rightarrow$ Ejecución del programa $\Rightarrow$ Análisis y representación de resultados $\Rightarrow$ Comparación con el mundo real y repetir (Fig. 49). Este proceso es a la vez absorbente en tiempo y esfuerzos, pero por su misma naturaleza ofrece un amplio campo de oportunidades para conocer y experimentar sobre el fenómeno de interés. Y he aquí uno de los principales valores de esta metodología: que el proceso de modelado sirve como una herramienta para pensar la ciudad. Inclusive, el proceso mismo de construir el modelo puede llegar a ser igual de revelador, o inclusive más, que los propios resultados que arroje. Esto es

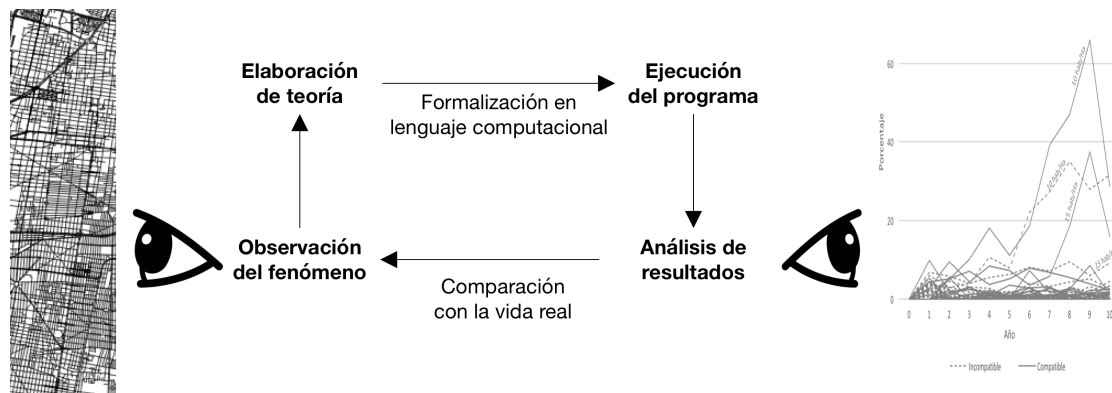


Figura 49: Proceso del modelado.

particularmente cierto cuando se elaboran modelos por primera vez como fue el caso de esta investigación. En los inicios de ella, fue de gran valor el reflexionar cuales eran los factores que determinaban la distribución espacial de los usos de suelo, programar los supuestos, observar los resultados, ver que no se obtenía el comportamiento intencionado, revisar el código, volver a reflexionar sobre las causas del fenómeno y volverlas a poner a prueba. Esto, todavía sin llegar aun a tratar la pregunta de investigación. En el proceso, se descubrieron otros caminos de investigación. Más que un proceso circular de retroalimentación, la investigación tomó bifurcaciones: se llegaba a un punto donde se volvía atractivo probar dos o tres diferentes variaciones del modelo para posteriormente proseguir solo con una o inclusive con ninguna lo que implicaba regresar, avanzar en otra dirección y de nuevo descubrir varias direcciones de avance, las cuales se volvían a recorrer. Visto en retrospectiva, la investigación tomó una estructura ramificada compuesta por una multitud de líneas de trabajo abandonadas a favor de un solo modelo que tuvo que pasar por 69 versiones para poder llegar a él.

7.2.1. Observación del fenómeno de la vida real.

Acostumbrado a elaborar diagnósticos de naturaleza descriptiva y estática, para el funcionario público dedicado a la planeación todavía le es ajeno el identificar las causas del estado

actual de un sistema urbano, así cómo también el describir cómo cambia en el tiempo. A diferencia de elaborar un mapa que indique el estado actual de las cosas en un corte en el tiempo, producto tradicional de un análisis urbano, el realizar un modelo urbano computacional obliga a identificar los componentes que provocan un fenómeno urbano de interés y cómo interactúan entre sí a través de la observación y el análisis. De esta manera se llega al primer paso del modelado, que es describir el comportamiento del fenómeno urbano que nos interesa reproducir, así como un abanico de posibles causas del mismo. Aunque aparentemente irrelevante, se tiene que tener identificados también cuales no son los comportamientos de interés pero que se pudieran confundir con el primero. Esto es importante porque es una manera de adelantarse a los posibles resultados no deseados de un modelo urbano, y codificarlo en consecuencia. Por ejemplo, la primera versión del modelo de esta investigación arrojaba una explosión de pequeñas manchas urbanas diseminadas indiscriminadamente en todo el territorio. Teniendo como tema de interés el crecimiento de la mancha urbana, el modelo era correcto en reproducir la cantidad adecuada de superficie, pero no en el patrón de distribución. Si desde un principio se hubiera identificado que uno de los resultados no deseados del modelo fuera este crecimiento urbano atomizado, se hubiera identificado la forma en que accidentalmente se pudiera codificar y de esta manera haberse evitado.

7.2.2. Elaboración de teoría que explique el fenómeno.

En 1999 el epidemiólogo y especialista en modelos sociales Joshua M. Epstein escribió un artículo [190] a favor del uso de los modelos basados en agentes en las ciencias sociales, acuñando la ahora conocida frase “Si no lo pudiste generar, no lo explicaste”. Esto, en el sentido de avanzar en la investigación empírica de las ciencias sociales en donde ahora existía la posibilidad de reproducir y explicar in-sílico fenómenos sociales. Ahora, entre colegas no se preguntarían “¿lo puedes explicar?” sino “¿lo puedes generar?”, y en la respuesta vendría

implícito si se entendía o no el fenómeno. Aunque no es correcto aseverar que el reproducir acertadamente un fenómeno significa que se están utilizando los supuestos adecuados, aun así la frase levanta una bandera que advierte de la impostergable necesidad de tener una explicación antes de modelar. Tomando en cuenta lo anterior, una actitud que va en detrimento de elaborar modelos urbanos es la aparente trivialidad con lo que se pueden considerar ciertos aspectos de la ciudad pero que el proceso de modelado computacional obliga a observarlos y explicarlos a través de una teoría. Para los profesionales de la planeación no es una novedad que las ciudades inicien con un pequeño asentamiento y se extiendan hacia fuera, o que el comercio prefiera estar cerca de vialidades primarias. Pero, ¿por qué sucede así? ¿por qué no de otra manera? Tan importante es responder por qué sucede de tal manera como el responder por qué no sucede de otra. Si no lo sabemos, no podremos “traducir” el fenómeno urbano de interés a un programa computacional, lo que finalmente nos dará resultados de maneras no intencionadas. Por lo mismo, se necesita identificar las causas responsables del fenómeno. Así como un medicamento está compuesto de diversos ingredientes químicos, pero solo uno es identificado como el “principio activo” responsable del efecto farmacológico, así también al observar el fenómeno urbano de interés se tienen que separar los “principios urbanos activos” del resto de los elementos que no lo son. Se puede aseverar que todo está relacionado con todo y por tanto lo influye, pero en el modelado se tiene que hacer un ejercicio en el cual se deben considerar solo los factores que influyen significativamente en el comportamiento de interés, lo que se convierte en un ejercicio de reflexión y aproximaciones. En el caso de explicar por qué un asentamiento crece principalmente de manera extensiva de adentro hacia afuera, lo que se observa es que los pequeños incrementos de crecimiento se dan en la cercanía de zonas previamente urbanizadas. Esto es el comportamiento. Es útil, pero lo importante es identificar las causas de este comportamiento, que posteriormente se codificarán en un programa computacional. Una teoría que explique este comportamiento es que la gente busca estar cerca de los servicios de agua, luz, drenaje y de vialidades debidamente habilitadas.

De esta manera, cuando programemos el comportamiento de urbanización, lo haremos de tal manera que se busquen tales condiciones en el territorio.

Una vez establecidas las causas de un comportamiento, el siguiente paso será formalizarlas en un lenguaje computacional, y el paso previo para llegar a él será el realizar un diagrama que visualmente establezca claramente el orden, jerarquía y relaciones entre dichas causas, similar a un diagrama de flujo. El diagrama final no solo es una brújula que mantiene al modelador en el mismo camino al momento de programar, sino que el mismo ejercicio de elaborar el diagrama ordena las ideas e inclusive ayuda a identificar errores o causas de resultados inesperados del modelo que no se pueden identificar de otra manera, o por lo menos no tan fácil.

Finalmente, unas palabras de advertencia. Si la teoría elaborada logra reproducir fielmente en la computadora un comportamiento observado, se puede decir que, adaptando la frase de Epstein, “Si lo pudiste generar, encontraste una manera de explicarlo”. Y se hace hincapié en una, de un número desconocido de posibles explicaciones. Por ejemplo, existe un conocido modelo computacional que reproduce el movimiento en parvada de las aves o las escuelas de peces con tan solo tres reglas computacionales, pero el autor tiene la cautela de no aseverar que estas son las mismas que siguen los animales en la vida real. De igual manera se debe de ser cauto con las teorías, ya que estamos ante lo que en sistemas se denomina equifinalidad, o la posibilidad de llegar a un mismo estado final partiendo de diferentes condiciones iniciales. Ante esta situación, lo mejor es apegarse a lo dicho por el reconocido estadístico George Box: “todos los modelos son incorrectos, pero algunos son útiles” [191].

7.2.3. Formalización de la teoría en un lenguaje de programación.

Teniendo la teoría, ahora se debe formalizar en un lenguaje computacional. En este paso, un especialista en programación debería de aliviar la carga de trabajo y con el cual se tendría

una estrecha comunicación. De no ser posible, el aprender un lenguaje de programación es la otra opción, lo cual es una tarea que demanda disciplina y dedicación particularmente para los que en el campo profesional de la planeación no es una habilidad habitual. Aun así, aquí unas recomendaciones que facilitaran esta tarea:

- *Realizar un diagrama de flujo de la secuencia del modelo.* El realizar un esquema será la representación visual del código que se desea escribir. El visualizar de esta manera el código ayuda a esclarecer aspectos de lo que apenas se gesta en la mente, ayuda a identificar cuáles son los agentes, sus estados, las reglas de interacción y el ambiente en que se desenvuelven.
- *Realizar una descripción literal del modelo.* Como proceso simultaneo, y que se retroalimenta con el proceso de la elaboración del diagrama, es la descripción literal del modelo. Esto se realiza contestando las siguientes preguntas:
 - ¿Qué parte del fenómeno se desea modelar?
 - ¿Cuáles son los tipos de agentes involucrados en este fenómeno?
 - ¿Qué acciones o comportamientos pueden tomar estos agentes? (entre sí y con el ambiente)
 - ¿En qué tipo de ambiente operan estos agentes?
 - Si se define el fenómeno como pasos de tiempo discretos, ¿qué eventos pudieran suceder en cada paso y en qué orden?
 - ¿Qué se espera observar del modelo?

El contestar a estas preguntas nos proporciona el material para elaborar el protocolo ODD el cual ya se explicó en este trabajo.

- *Construir con bloques.* Para quienes en un momento hemos sido nuevos en la programación, es un reto escribir de corrido todo el código de un modelo. Lo más conveniente es, basándonos en el diagrama de flujo previamente elaborado, dividir nuestro modelo en bloques de acciones sencillas, controlables y medibles. Un bloque puede ser el pintar de cierto color el territorio, otro la creación de cierto tipo de agente, otro más la interacción entre agentes o de agentes con su ambiente, y así sucesivamente. Las palabras claves en este proceso son *control* y *resultado esperado*, tanto en lo que queremos crear como con las interacciones que queremos programar. El ejecutar estos bloques de manera independiente y en condiciones que podamos saber con anticipación cual debe ser el resultado es una prueba de verificación (consistencia interna) del modelo.
- *Partir primero de un modelo sencillo.* Una vez identificados nuestros bloques de modelado, lo más práctico es iniciar con uno de ellos, verificar su eficacia, e ir agregando más hasta completar el modelo deseado. La palabra clave aquí es la *manejabilidad*.
- *Búsqueda de modelos similares.* No hay un lenguaje de programación exclusivo para las ciudades, pero si hay modelos escritos en este lenguaje que reproducen algún fenómeno de las ciudades. Por lo mismo, en vez de querer aprender todas las posibilidades de un lenguaje de programación, nos debemos de enfocar rápidamente en identificar y aprender de aquellos modelos que reproducen de manera similar aquellos comportamientos que deseamos lograr con nuestros bloques, para identificar cómo se escribió su código y adecuarlo/traspasarlo a lo que estamos realizando. Y hay que tomar en cuenta que cuando hagamos la búsqueda, esta no tiene que ser literal. Los mejores modelos son los que se pueden aplicar a diferentes campos. El que un código reproduzca el comportamiento de una parvada de aves no significa que no sea útil para reproducir la fuga de una multitud de personas.
- *Identificar la estructura de un código.* Una vez identificados los modelos que reproducen

aspectos que deben de reproducir nuestros bloques, lo que sigue es entender su estructura. A pesar de que el código de un modelo se muestra de manera corrida, su ejecución no se da en ese orden. Las instrucciones se dan por “paquetes” y estos están relacionados entre sí de una manera específica, así como en algún momento de elaboración de nuestro modelo será igual.

- *Conformar una biblioteca de snippets.* Snippets es un término que se aplica a pequeños trozos de código reutilizable. Por lo mismo, se deben de revisar la mayor cantidad posible de modelos en busca de comportamientos que sabemos nos van a ser útiles para nuestros modelos e identificarlos en su código, aislarlos y almacenarlos en una biblioteca de snippets. La importancia que urbanistas y modeladores dan a sus productos de trabajo que van surgiendo a lo largo del mismo es relevante. El urbanista desecha con facilidad las propuestas previas de ordenamiento urbano al ir trabajando sobre las nuevas que las sustituyan. El modelador, al contrario, debe de llevar un registro controlado de los intentos previos y versiones anteriores de los modelos, ya que estos pueden aportar valor a versiones posteriores. En un proceso circular de experimentación, análisis y nueva experimentación donde se van creando programas que emulan el comportamiento de una parte particular del sistema; con el tiempo se va acumulando una “caja de tuercas y tornillos” (o fragmentos de código) que, aunque no van a caber en todas las necesidades del modelo, de todas formas están adecuadamente elaboradas para fines que de principio no se sabe en qué momento se vuelvan útiles de nuevo en una etapa futura del modelo.
- *Llevar un registro ordenado de las versiones del modelo.* El modelo final con el que se hagan los experimentos no es el resultado del proceso continuo de uno, sino de varios modelos que van cambiando. Al ir agregando nuevas funcionalidades a los modelos, puede ser que lo que en un momento fue útil o interesante más adelante pueda volverse irrelevante al ir progresando en el entendimiento del sistema, afinándose la pregun-

ta de investigación o inclusive cambiarla totalmente, por causa de dos características intrínsecas del modelado: la experimentación y el descubrimiento. Este proceso es circular por lo que no es raro retroceder unos pasos para retomar elementos previamente eliminados. Es por esta razón que es imperante llevar un registro ordenado de los sucesivos cambios realizados, diferenciados por números ascendentes de versiones, en donde revisiones menores se representan con incrementos decimales al número de versión o incrementos de números enteros en avances sustantivos de la misma. Para ello se debe de llevar a manera de bitácora un historial de versiones en donde se especifiquen los cambios realizados en cada una, así como un archivo separado en donde se escriban las tareas por hacer.

- *Interactuar con las comunidades de programación en línea.* Un apoyo decisivo en tanto en el proceso de aprendizaje como en el avance del propio modelo de esta investigación fue la interacción que se tuvo con las diversas comunidades en línea que ahora existen, cuyo fin último es el mutuo apoyo entre sus integrantes. La ventaja que estas presentan sobre cualquier material escrito es que se pueden hacer preguntas muy específicas con la certeza de que serán respondidas en algún momento.

Aunque en un principio esto parezca abrumador, afortunadamente ya hay literatura suficiente respecto a la elaboración de modelos basados en agentes con suficientes ejemplos de práctica que nos empujan en el aprendizaje. Tales son los casos de los títulos *Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process* [94], *An Introduction to Agent-Based Modeling* [144], *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems* [192], *Simulación basada en agentes. Introducción a Netlogo* [193], *Agent-based and individual-based modeling* [145], *NetLogo Una herramienta de modelado* [12] y *Fundamentals of Multiagent Systems* [194].

Aquí también, unas palabras de advertencia. No es lo mismo programar para mimetizar un comportamiento, que programar la estructura de causas que lo generan. Volviendo al modelo

de parvada de aves, el modelador no programó por adelantado el camino que debía seguir cada una de las aves para que siguieran en conjunto cierta trayectoria, lo que programó fue la obediencia de todas las aves a tres reglas de comportamiento, y dejar que las aves volaran por sí mismas. Aunque ninguna de las reglas explícitamente dicta “formen grupos diferenciados que vuelen en una misma dirección de manera sinuosa”, el resultado final es este comportamiento.

7.2.4. Ejecución del programa.

El proceso de modelado ofrece la libertad de experimentar, algo normalmente prohibitivo en los procesos de planeación urbana tradicional. En estos, la propuesta final es el resultado de supuestos desligados de un razonamiento que pudiera enriquecerse si se entendieran las interacciones, como ahora lo ofrece el modelado computacional. Por lo mismo, el modelado permite la exploración de alternativas. Aunque esto demanda mayor tiempo, ofrece la posibilidad del descubrimiento. Esta característica exploratoria que ofrece el modelado tiene dos caras: puede demostrar que los supuestos no son tales o lo que se esperaba como resultado finalmente no llega, pero igualmente puede evidenciar nuevas líneas de investigación que solo se descubren tras la observación y análisis de resultados concretos.

7.2.5. Análisis y representación resultados.

El proceso de modelado demanda también identificar una variedad de herramientas y métodos para el procesamiento, análisis y visualización de resultados. Para el procesamiento de datos, se necesita tener establecidas secuencias ordenadas de trabajo donde se indique cuáles serán las herramientas a usar, para qué se van a usar, en qué momento se van a usar y cómo se van a usar. Esto va desde paquetería de Sistemas de Información Geográfica, de manejo de hojas de cálculo, de programación, hasta de edición gráfica y administración de

bases de datos bibliográficas. A la par de la necesidad de tener claramente establecida la batería de herramientas informáticas, lo es también el saber claramente cuáles son los métodos existentes para analizar los resultados de un modelo, lo cual se vuelve particularmente complicado cuando sus resultados no son estáticos sino que cambian en el tiempo de manera cuantitativa y espacial de manera simultánea [195] y de lo cual no hay literatura enfocada para quienes se encuentran en la curva de aprendizaje del modelado. Como complemento, es necesario saber sobre las técnicas de presentación y visualización de los resultados que arrojan los modelos, donde de nuevo cobran especialmente relevancia en el contexto de sistemas complejos ya que cambian en el tiempo por lo que su visualización en papel es actualmente una limitante y por lo mismo ahora se explora su representación a través de medios digitales e interactivos [196].

Finalmente, a pesar de las ventajas que pudiera presentar el modelado computacional de fenómenos urbanos, se presentan una serie de retos que dificultan su amplia implementación y práctica. El primero es la dificultad de que un solo profesional realice de manera efectiva todas las labores necesarias que demanda el proceso de modelado. Especialistas en sistemas de información geográfica, programadores y urbanistas son solo algunos de los integrantes de lo que debería de ser un equipo multidisciplinario que se iría complementando con otros perfiles de acuerdo a las necesidades del modelo, como lo son sociólogos y economistas. Otro reto significativo es la disponibilidad de información espacial en condiciones adecuadas para el modelo, como el que esté digitalizada, actualizada, ordenada y verificada.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones

El aplicar el enfoque de sistemas complejos a la planeación de ciudades obliga a un ejercicio de adecuación, ya que su misma definición indica que los elementos de un sistema complejo se auto-organizan sin la presencia de un control central. Así pudiera enfocarse a sistemas de origen natural o grupos sociales bajo contextos volátiles, pero al aplicarse a ciudades como en el caso de este estudio debe de reconocerse la rectoría de un estado el cual deliberadamente busca cambiar situaciones no deseables y cambiarlas a un estado que signifique bienestar a la población. Este es el fin y definición de política pública: las acciones de un gobierno hacia sus gobernados buscando lograr un cambio y mantenerlo en un estado deseado. Aunque es ingenuo pensar que las políticas públicas se aplican y cumplen a cabalidad, también lo es pensar que las ciudades son el mero resultado de las acciones autónomas de sus ciudadanos independientemente de los dictados del estado como se ha querido dar a entender en numerosos trabajos de investigación que no profundizan el papel de las acciones de gobierno en las ciudades. Aunque es evidente la ausencia en el cumplimiento

de políticas públicas, aun así se observa que hay consecuencias por su aplicación aunque esto sea de manera parcial. Así pues, las políticas públicas bajo el enfoque de la complejidad en lugar de controlar y suprimir, busca inducir cambios a través de la detección de puntos sensibles que al actuar sobre estos se puedan tener una mayor probabilidad de alcanzar el estado deseado, aunque esto signifique el reconocer efectos colaterales e inesperados, dada la alta sensibilidad que puede presentar un sistema.

Respecto al caso de estudio de esta tesis, se identificaron tópicos sobre los cuales se debería de trabajar en la actualización del PDUCPE para mejorar el desempeño del suelo industrial en la ciudad. Algunos de estos tópicos se relacionan únicamente con la industria, pero otros tienen un impacto más generalizado en donde la actividad industrial es solo una de los afectados. En primer lugar, se tiene el tema de las densidades bajas de población el cual es una característica real de la ciudad. A través del modelo se identificó que este es un factor que reduce la oportunidad del crecimiento industrial en una zona de por sí limitada por su abrupta topografía. En un escenario de baja densidad esta tiene un papel importante en la paulatina disminución de suelo atractivo para esta actividad ya que las densidades bajas producen un crecimiento extensivo que rápidamente engulle suelo atractivo a la industria. A pesar de que la densidad poblacional siempre se ha considerado un tema relevante para la ciudad, este siempre se vio desde la perspectiva de una mayor demanda de infraestructura, pero nunca se habían identificado los efectos sobre usos de suelo particulares, por lo que este hallazgo complementa el entendimiento de los efectos de la baja densidad en la ciudad de Ensenada.

Así como la baja densidad es una limitante para la industria, lo es también la escasa infraestructura vial. Esto ya ha sido un tema conocido, pero a través del modelo se puede observar cómo la formación de Suelo Atractivo depende fuertemente de que se logren proyectos que complementen la estructura vial de la ciudad que al día de hoy permanece incompleta.

Otro hallazgo significativo fue el nivel de importancia que tiene el incumplimiento de la normatividad del PDUCPE. Aunque no es novedad su insuficiente aplicación, se observó que, si actualmente se quisiera estimular el crecimiento en zonas donde se detectó una alta probabilidad de generación de suelo atractivo para la industria, se tendría que incumplir con el PDUCPE. Esto se complica ya que el modelo mostró que siempre habrá mayor cantidad de Suelo Atractivo para la industria en subsectores donde actualmente no se permite esta actividad, lo que obliga a revisar el PDUCPE bajo esta perspectiva: o se elabora normatividad más detallada y estricta que inhiba lo más posible esta diseminación, o se reconocen algunas de estas áreas como nuevas reservas para el crecimiento industrial, sobre todo porque en las ejecuciones del modelo se observó una disparidad entre la demanda de suelo industrial en contraste con las reducidas reservas destinadas para este uso en el PDCUPE.

La necesidad de una mayor especificidad normativa entre usos también se corroboró a través del modelo ya que demostró una alta competencia por ocupar suelo vacante. Esto es particularmente importante ya que se mostraron zonas con alta probabilidad de formar Suelo Atractivo cerca de desarrollos habitacionales. Si a estas altas probabilidades se suma la abrupta topografía que limita la ubicación de industria, es que dicho modelo llega a ser un justificante importante para que los esfuerzos que realiza la ciudad en materia de atracción de inversión industrial se enfoque en atraer tipos de industria que tengan una mayor posibilidad de realizar sus actividades en las condiciones antes mencionadas y que no se produzcan inhibiciones entre esta actividad y las circundantes.

8.2. Trabajo futuro

A pesar de que el modelo actual es capaz de arrojar resultados útiles al proceso de planeación, existen limitaciones tanto en la información de la que se tuvo acceso como en el modelo mismo que, una vez atendidas, seguramente enriquecerán esta línea de trabajo.

Dado que la actividad industrial en particular es sensible a las condiciones topográficas del terreno, será necesario ejecutar el modelo con modelos de elevación de mayor resolución que el utilizado para este ejercicio, para de esta manera obtener resultados más apegados a la realidad. Para ello, será necesario incluir una capa de información adicional relacionada a los valores comerciales del suelo, los cuales no se incluyeron en esta etapa ya que no existe una cobertura total de esta información haciéndose necesario el tener que ejecutar otros modelos que por lo pronto quedan fuera del alcance del presente trabajo, pero que definitivamente determinan la toma de decisión al momento de urbanizar un terreno. Otro tema a resolver será la resolución a la que se podrá manifestar la unidad mínima de urbanización, la cual es de 1 hectárea para este ejercicio. Esto va en el sentido de que hay usos de suelo que no llegan a abarcar toda una hectárea en la vida real, sino que suceden en superficies menores a esta. Finalmente, será necesario validar los resultados del modelo por parte de desarrolladores inmobiliarios industriales los cuales seguramente podrán proporcionar una retroalimentación útil para el modelo.

Dado que el ambiente de programación con el que se hizo el modelo es gratuito, flexible, con una amplia librería de código y ofrece flexibilidad en el diseño de una interfaz a las necesidades del modelador; un trabajo a futuro es el aprovechar el potencial didáctico del modelo tanto para la enseñanza de conceptos urbanos como los procesos de consultas públicas en el marco de la elaboración y/o actualización de instrumentos de planeación territorial.

Bibliografía

- [1] IMIP. Programa de desarrollo urbano de centro de población de Ensenada 2030. *Periódico Oficial del Estado de Baja California, CXVI (13): 7-133, 2009*, page 117, 2009.
- [2] IMIP. Programa Sectorial de Desarrollo Industrial de Ensenada, 2017.
- [3] IMIP. Programa Parcial de Desarrollo Urbano Maneadero-Punta Banda, Ensenada, B.C. *Programa Parcial de Desarrollo Urbano Maneadero-Punta Banda, Ensenada, B.C.*, 2012.
- [4] SEDATU. Programa Nacional de Desarrollo Urbano 2014-2018, 2014.
- [5] Javier Sandoval, Manuel Castañón-Puga, Carelia Gaxiola-Pacheco, and Eugenio Suarez. Identifying Clusters of Complex Urban–Rural Issues as Part of Policy Making Process Using a Network Analysis Approach: A Case Study in Bahía de Los Ángeles, Mexico. *Sustainability*, 9(6):1059, 2017.
- [6] Javier Sandoval-Felix and Manuel Castañón-Puga. Using an Urban Growth Simulator for Ensenada City Public Policy Analysis. In *CSSSA 2015*, pages 1–12, Santa Fe, 2015.
- [7] David Gries, Fred B Schneider, and Claudio Cioffi-Revilla. *Introduction to Computational Social Science*. Springer, second edition, 2017.
- [8] Claudio Cioffi-Revilla. Computational social science. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(3):259–271, 2010.

- [9] Alison Heppenstall and Andrew Crooks. Agent-based modeling in geographical systems, 2016.
- [10] Waldo R. Tobler. Cellular Geography. *Philosophy in geography*, pages 379–386, 1979.
- [11] Maher Milad Aburas, Yuek Ming Ho, Mohammad Firuz Ramli, and Zulfa Hanan Ash’aari. The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52:380–389, 2016.
- [12] Fernando Sancho Caparrini and Juan Carlos García Vázquez. *NetLogo Una herramienta de modelado*. CulturePlex, 2017.
- [13] U. Wilensky. The NetLogo 6.0.4 User Manual. *Northwestern University.*, 2018.
- [14] Luis R. Izquierdo. Netlogo 6.0 – quick guide, 2017.
- [15] Nigel Gilbert and Klaus G. Troitzsch. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, Glasgow, 2005.
- [16] Alfredo Garro and Wilma Russo. EasyABMS: A domain-expert oriented methodology for agent-based modeling and simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(10):1453–1467, 2010.
- [17] J. P. Davis, K. M. Eusebgardt, and C. B. Binghamman. Develop Theory Through Simulation Methods. *Academy of Management Review*, 32(2):480–499, 2007.
- [18] Secretaria de Economía. Norma Mexicana Nmx-R-046-Scfi-2011 Parques Industriales – Especificaciones Industrial Parks - Specifications. *Diario Oficial de la Federación*, 2011.

- [19] Javier Sandoval. Adecuacion y reprogramacion del software urban growth simulator para su utilizacion en los procesos de planeacion de la ciudad de Ensenada, B.C., Mexico. *Architecture, City and Environment*, pages 91–110, 2011.
- [20] Javier Sandoval-Felix, Manuel Castañón-Puga, Josue Miguel Flores-Parra, and Carelia Gaxiola-Pacheco. Towards an urban growth model for Ensenada City Public Policy Analysis. In Mir-Abolfazl Mostafavi and Nuno Norte Pinto, editors, *Second International Symposium on Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems*, pages 74–89, Quebec, 2016.
- [21] Javier Sandoval-Félix and Manuel Castañón-puga. Computational modeling for urban land change analysis. In *7mo. Congreso Internacional en Ciencias Computacionales, CiComp 2014 Computational*, pages 617–622, 2014.
- [22] UN-HABITAT. State of the World’s Cities 2012/2013: United Nations Human Settlements Programme. *United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT)*, page 152, 2012.
- [23] Neal R. Peirce, Curtis W. Johnson, Farley. Peters, and J Rodin. *Century of the city: no time to lose*. The Rockefeller Foundation, 2008.
- [24] Gerardo Sanchez. *Planeacion Moderna de Ciudades*. Editorial Trillas, México, D.F., 2008.
- [25] Juan Jose Gutierrez Chaparro. PLANEACION URBANA EN MEXICO: UN ANALISIS CRITICO SOBRE SU PROCESO DE EVOLUCION. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 12(19):52–63, 2009.
- [26] Juval Portugali, Han Meyer, Egbert Stolk, and Ekim Tan. *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*. Springer, 2012.

-
- [27] Kevin Lynch. *A theory of good city form*. MIT Press, 1981.
- [28] Luís M a Bettencourt. The origins of scaling in cities. *Science*, 340(6139):1438–41, 2013.
- [29] Stephen Marshall. *City Planning , Design and Evolution Concepts*, 2009.
- [30] OECD and Global Science Forum. Applications of Complexity Science for Public Policy: New Tools for Finding Unanticipated Consequences and Unrealized Opportunities. Technical Report September, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2009.
- [31] Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors. *Modeling Complex Systems For Public Policies*. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.
- [32] Philip Ball. *Why Society is a Complex Matter*. Springer, 2012.
- [33] IMIP. Estudio geoestadístico del fenómeno delictivo. Technical report, Instituto Municipal de Investigación y Planeación, Ensenada, 2014.
- [34] Warren Weaver. Science and Complexity. *American Scientist*, 36(4):536–544, 1948.
- [35] Tatiana Filatova. Empirical agent-based land market: Integrating adaptive economic behavior in urban land-use models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54:397–413, 2015.
- [36] Bruce Edmonds and Ruth Meyer, editors. *Simulating Social Complexity: A handbook*. Springer, Manchester, first edition, 2013.
- [37] Raoul Weiler and Jüri Engelbrecht. The New Sciences of Networks & Complexity: A Short Introduction. *Cadmus Journal*, 2(1):131–141, 2013.

- [38] Rahmatollah Beheshti and Gita Sukthankar. A hybrid modeling approach for parking and traffic prediction in urban simulations, 2014.
- [39] David Easley and Jon Kleinberg. Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World. *Science*, 81:744, 2010.
- [40] Goktug Morcol. Urban sprawl and public policy: A complexity theory perspective. *Emergence: Complexity and Organization*, 14(4):1–16, 2012.
- [41] Michael Batty. Cities as Complex Systems: Scaling, interactions, Networks, Dynamics and Urban Morphologies. *Working Paper Series*, 2008.
- [42] Stephen Read. Meaning and Material: Phenomenology, Complexity, Science and Adjacent Possible Cities. In *Complexity theories of Cities Have Come of Age*, pages 105–127. Springer, 2012.
- [43] Melanie Mitchell. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press, 2009.
- [44] Jeffrey Goldstein. Emergence as a Construct: History and Issues. *Emergence*, 1(1):49–72, 1999.
- [45] P W Anderson. More is different. *Science (New York, N.Y.)*, 177(4047):393–396, 1972.
- [46] Michael Batty and Stephen Marshall. The Origins of Complexity Theory in Cities and Planning. In *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, chapter The Origin, pages 21–45. Springer, 2012.
- [47] Bernardo Alves Furtado. *Policy space: agent based modeling*. Institute for Applied Economic Research, Rio de Janeiro, first edition, 2018.
- [48] Scott E Page. Preface. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies Pages:*, chapter Preface, pages 9–14. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.

- [49] James E. Gentile, Chris Glazner, and Matthew Koehler. Simulation Models for Public Policy. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies*, chapter 4, pages 73–83. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.
- [50] William Rand. Complex systems: concepts, literature, possibilities and limitations. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors, *Modeling complex systems for public policies*, chapter 2, pages 37–54. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.
- [51] Luís M.A. Bettencourt. Cities as complex systems. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies*, chapter 10, pages 217–236. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.
- [52] Christian Walloth, Jens Martin Gurr, and J Alexander Schmidt, editors. *Understanding Complex Urban Systems: Multidisciplinary Approaches to Modeling*. Springer, 2014.
- [53] Paul Cairney. An Advocacy Coalition Framework of Policy Change and the Role of Policy-Oriented Learning Therein. In Ed Page, Steve Balla, and Martin Lodge, editors, *Oxford Handbook of the Classics of Public Policy and Administration*. Oxford, 2012.
- [54] Paul Cairney. Complexity Theory in Political Science and Public Policy. *Political Studies Review*, 10(3):346–358, 2012.
- [55] Paul Cairney. How does ‘complexity thinking’ improve our understanding of politics and policymaking?, 2015.
- [56] Yaneer Bar-Yam. Complexity theory in applied policy worldwide. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies*, chapter 11, pages 239–259. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.

- [57] Edward G. Anderson. An initial simulation model for aiding policy analysis in urban insurgencies. In *Proceedings - Winter Simulation Conference*, pages 1168–1176, 2007.
- [58] Michael J. Widener, Sara S. Metcalf, and Yaneer Bar-Yam. Agent-based modeling of policies to improve urban food access for low-income populations. *Applied Geography*, 40:1–10, 2013.
- [59] Orlando Gomes. The economy as a complex object. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies*, chapter 8, pages 169–190. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.
- [60] Seth D. Kenbeek, Christopher Bone, and Cassandra Moseley. A network modeling approach to policy implementation in natural resource management agencies. *Computers, Environment and Urban Systems*, 57:155–177, 2016.
- [61] Masaru Yarime and Ali Kharrazi. Understanding the environment as a complex, dynamic natural-social system: opportunities and challenges in public policies for promoting global sustainability. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovolli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies*, chapter 6, pages 127–140. Institute for Applied Economic Research, 2015.
- [62] Jay Lee. Development of A Community-Accessible Urban Sprawl Impact Assessment System for Northeast Ohio 15-County Region. Technical report, Applied Geography Laboratory, Ohio, 2001.
- [63] Michael Noth, Alan Borning, and Paul Waddell. An extensible, modular architecture for simulating urban development, transportation, and environmental impacts. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(2):181–203, 2003.
- [64] Jee Rey Johnson, Andrzej Nowak, Paul Ormerod, Bridget Rosewell, and Yi-Cheng Zhang, editors. *Non-Equilibrium Social Science and Policy: Introduction and Essays*

- on New and Changing Paradigms in Socio-Economic Thinking*. Springer, Switzerland, first edition, 2017.
- [65] Claudio J. Tessone. The complex nature of social systems. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovoli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies*, chapter 7, pages 141–168. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.
- [66] Hossein Haghshenas, Manouchehr Vaziri, and Ashkan Gholamialam. Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, 45:104–115, 2015.
- [67] Athena Roumboutsos and Seraphim Kapros. A game theory approach to urban public transport integration policy. *Transport Policy*, 15(4):209–215, 2008.
- [68] Acir Almeida. Overcoming chaos: legislatures as complex adaptive systems. In Bernardo Alves, Patricia Sakowski, and Marina Tovoli, editors, *Modeling Complex Systems For Public Policies*, chapter 16, pages 337–362. Institute for Applied Economic Research, Brasília, 2015.
- [69] Michael J Jacobson. Education as a complex system: Implications for educational research and policy. In *Modeling Complex Systems for Public Policies*, pages 301–314. Institute for Applied Economic Research, 2015.
- [70] Petra Ahrweiler, Michel Schilperoord, Andreas Pyka, and Nigel Gilbert. Modelling Research Policy: Ex-Ante Evaluation of Complex Policy Instruments. *Jasss*, 18(4), 2015.
- [71] a. Chettiparamb. Complexity theory and planning: Examining ‘fractals’ for organising policy domains in planning practice. *Planning Theory*, 13(1):5–25, 2013.

- [72] Jw Meek. Complexity theory for public administration and policy. *Emergence: Complexity and Organization*, 12(1), 2010.
- [73] Leonardo Rueda and Dewar Rico. Modelamiento inicial de ciudades de países en via de desarro, utilizando dinamica de sistemas. *Scientia Et Technica*, XIII:421–426, 2007.
- [74] Amit V. Patel. *Slumulation: An integrated simulation framework to explore spatio-temporal dynamic of slum formation in Ahmedabad, India*. PhD thesis, George Mason University, 2012.
- [75] Juval Portugali. Complexity Theories of Cities: Achievements, criticism and potentials, 2009.
- [76] Jane Jacobs. *The death and life of great American cities*. Random House, 1961.
- [77] Michael Batty. Complexity in City Systems: Understanding, Evolution, and design. *UCL Working Paper Series*, 44(0):0–18, 2007.
- [78] Juval Portugali. *Complexity, cognition and the city*. Springer, Tel Aviv, 2011.
- [79] Funda Atun. Understanding effects of complexity in cities during disasters. In Christian Walloth, Jens Martin Gurr, and J. Alexander Schmidt, editors, *Understanding Complex Urban Systems: Multidisciplinary Approaches to Modeling*, volume 106, pages 51–65. Springer, 2014.
- [80] Beniamino Murgante, Giuseppe Borruso, and Alessandra Lapucci, editors. *Geocomputation and urban planning*, volume 176. Springer, 2009.
- [81] Marina Alberti. *Advances in Urban Ecology*. Sringer, Seattle, 2008.
- [82] Gert De Roo and Elisabete a Silva. *A Planner’s Encounter with Complexity*. ASHGATE, 2010.

- [83] Feng Xie and David M. Levinson. *Evolving Transportation Networks*. Springer, 2011.
- [84] Alison Heppenstall, Andrew Crooks, Linda See, and Michael Batty, editors. *Agent-based models of geographical systems*. Springer, 2012.
- [85] Reine Maria Basse, Hichem Omrani, Omar Charif, Philippe Gerber, and Katalin Bódis. Land use changes modelling using advanced methods: Cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale. *Applied Geography*, 53:160–171, 2014.
- [86] Yaolin Liu, Qingsong He, Ronghui Tan, Yanfang Liu, and Chaohui Yin. Modeling different urban growth patterns based on the evolution of urban form: A case study from Huangpi, Central China. *Applied Geography*, 66:109–118, 2016.
- [87] U. Wissen Hayek, D. Efthymiou, B. Farooq, T. von Wirth, M. Teich, N. Neuenschwander, and A. Grêt-Regamey. Quality of urban patterns: Spatially explicit evidence for multiple scales. *Landscape and Urban Planning*, 142:47–62, 2015.
- [88] Jian Peng, Yanxu Liu, Jiansheng Wu, Huiling Lv, and Xiaoxu Hu. Landscape and Urban Planning Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China. *Landscape and Urban Planning*, 143:56–68, 2015.
- [89] Hani Rezayan, Mahmoud Reza Delavar, Andrew Ulrich Frank, and A. Mansouri. Spatial rules that generate urban patterns: Emergence of the power law in the distribution of axial line length. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(5):317–330, 2010.
- [90] Bohumil Frantál, Bryn Greer-Wootten, Petr Klusáček, Tomáš Krejčí, Josef Kunc, and Stanislav Martinát. Exploring spatial patterns of urban brownfields regeneration: The case of Brno, Czech Republic. *Cities*, 44:9–18, 2015.

- [91] Alison R Holt, Meghann Mears, Lorraine Maltby, and Philip Warren. Understanding spatial patterns in the production of multiple urban ecosystem services. *Ecosystem Services*, 16:33–46, 2015.
- [92] R. Gupta. The Pattern of Urban Land-Use Changes: A Case Study of the Indian Cities. *Environment and Urbanization Asia*, 5(1):83–104, 2014.
- [93] James Decraene, Christopher Monterola, Gary Kee Khoon Lee, Terence Gih Guang Hung, and Michael Batty. The emergence of urban land use patterns driven by dispersion and aggregation mechanisms. *PLoS ONE*, 8(12), 2013.
- [94] David O’Sullivan and George L. W. Perry. *Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process*. Wiley-Blackwell, New Zealand, first edition, 2013.
- [95] Shahadat Hossain, Wolfgang Scholz, and Sabine Baumgart. Translation of urban planning models: Planning principles, procedural elements and institutional settings. *Habitat International*, 48:140–148, 2015.
- [96] Antonio Aguilera and Edgardo Ugalde. A spatially extended model for residential segregation. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2007(1), 2007.
- [97] Luís M.A. Bettencourt. The kind of problem a City Is: New perspectives on the nature of cities from complex systems theory, 2013.
- [98] Joan Marull, Carme Font, and Rafael Boix. Modelling urban networks at mega-regional scale: Are increasingly complex urban systems sustainable? *Land Use Policy*, 43:15–27, 2015.
- [99] Mingxiang Li. Social network and social capital in leadership and management research: A review of causal methods. *Leadership Quarterly*, 24(5):638–665, 2013.

-
- [100] Derek Hansen, Ben Shneiderman, and Marc. A. Smith. *Analyzing Social Media Networks with NodeXL: Insights from a connected world*. Elsevier, Burlington, 2011.
- [101] Ken Wakita and Toshiyuki Tsurumi. Finding community structure in mega-scale social networks. *arXiv:cs/0702048 [cs.CY]*, page 1275, 2007.
- [102] Aaron Clauset, M E J Newman, and Cristopher Moore. Finding community structure in very large networks. *Phys. Rev. E*, 70:66111, 2004.
- [103] Mathieu Hélie. Conceptualizing the principles of emergent urbanism. *International Journal of Architectural Research-IJAR*, 3(2):75–91, 2009.
- [104] Michael Batty. Complexity And Emergence In City Systems: Implications For Urban Planning. *Malaysian Journal of Environmental Management*, 10(1):15–32, 2009.
- [105] Debraj Roy, Michael Harold Lees, Bharath Palavalli, Karin Pfeffer, and M. A Peter Sloot. The emergence of slums: A contemporary view on simulation models. *Environmental Modelling and Software*, 59:76–90, 2014.
- [106] Michael Batty. *The emergence of cities: complexity and urban dynamics*, 2003.
- [107] Michael Batty. *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, first edition, 2007.
- [108] Ricard V. Solé. *Phase Transitions*. Princeton University Press, New Jersey, first edition, 2011.
- [109] Alan Wilson. *The Science of Cities and Regions: Lectures on Mathematical Model Design*. Springer, London, 2012.

- [110] Mohammed Aljoufie, Mark Zuidgeest, Mark Brussel, Jasper van Vliet, and Martin van Maarseveen. A cellular automata-based land use and transport interaction model applied to Jeddah, Saudi Arabia. *Landscape and Urban Planning*, 112(1):89–99, 2013.
- [111] Valerio Gatta and Edoardo Marcucci. Behavioural implications of non-linear effects on urban freight transport policies: the case of retailers and transport providers in Rome. *Case Studies on Transport Policy*, 2015.
- [112] Andrew Crooks, Christian Castle, and Michael Batty. Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6):417–430, 2008.
- [113] Veronika Gaube and Alexander Remesch. Impact of urban planning on household’s residential decisions: An agent-based simulation model for Vienna. *Environmental Modelling and Software*, 45:92–103, 2013.
- [114] René Jordan, Mark Birkin, and Andrew Evans. Agent-Based Modelling of Residential Mobility, Housing Choice and Regeneration. In Alison J. Heppenstall, Andrew T. Crooks, Linda M. See, and Michael Batty, editors, *Agent-based models of geographical systems*, chapter 25, pages 511–524. Springer, 2013.
- [115] Carlos Garrocho Rangel, Tania Chavez, and Jose Antonio Alvarez. *La dimension espacial de la competencia comercial*. El Colegio Mexiquense, Mexico, first edition, 2002.
- [116] Ron Mahabir, Andrew Crooks, Arie Croitoru, Peggy Agouris, Ron Mahabir, Andrew Crooks, Arie Croitoru, and Peggy Agouris. The study of slums as social and physical constructs: challenges and emerging research opportunities. *Regional Studies, Regional Science*, 3(1):737–757, 2016.
- [117] Joana Barros and Fabriano Sobreira. City of slums: self-organisation across scales, 2002.

- [118] Shikhar Deep and Akansha Saklani. Urban sprawl modeling using cellular automata. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 17(2):179–187, 2014.
- [119] Apostolos Lagarias. Urban sprawl simulation linking macro-scale processes to micro-dynamics through cellular automata, an application in Thessaloniki, Greece. *Applied Geography*, 34:146–160, 2012.
- [120] Paul Torrens, Ioannis Kevrekidis, Roger Ghanem, and Yu Zou. Simple Urban simulation atop complicated models: Multi-scale Equation-Free computing of sprawl using geographic automata. *Entropy*, 15(7):2606–2634, 2013.
- [121] Peter Allen. The Role of Planning in Self-Organizing Urban and Regional Systems: Towards a proactive co-evolutionary type of planning within the Eurodelta. In Gert De Roo and Luuk Boelens, editors, *Spatial planning in a complex unpredictable world of change*, chapter 2, page 359. InPlanning, Groningen, 2016.
- [122] M Zhou. An interval fuzzy chance-constrained programming model for sustainable urban land-use planning and land use policy analysis. *Land Use Policy*, 42:479–491, 2015.
- [123] Yousef Sakieh, Abdolrassoul Salmanmahiny, Javad Jafarnejhad, Azade Mehri, Hamidreza Kamyab, and Somayeh Galdavi. Evaluating the strategy of decentralized urban land-use planning in a developing region. *Land Use Policy*, 48:534–551, 2015.
- [124] Andrew Crooks, Amit Patel, and Sarah Wise. Multi-Agent Systems for Urban Planning. In Nuno Norte Pinto, Jose Antonio Tenedorio, António Pais Antunes, and Josep Roca Cladera, editors, *Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories*, chapter 3, pages 29–56. IGI Global, 2014.
- [125] Gert De Roo, Jean Hillier, and Joris Van Wezemaal, editors. *Complexity and Planning: systems, assemblages and simulations*. ASHGATE, 2012.

- [126] Gert De Roo. Spatial Planning, Complexity and a World ‘Out of Equilibrium’: Outline of a Non-linear Approach to Planning. In *Complexity and Planning Systems: Assemblages and Simulations*, pages 129–165. Ashgate, 2011.
- [127] Juan Porta, Jorge Parapar, Ramón Doallo, Francisco F. Rivera, Inés Santé, and Rafael Crecente. High performance genetic algorithm for land use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 37(1):45–58, 2013.
- [128] Yeh Gar-On and Li Xia. Urban Simulation Using Neural Networks and Cellular Automata for Land Use Planning. In *Symposium on Geospatial theory, processing and applications*, Hong Kong, 2002.
- [129] Kashif Zia, Andreas Riener, Katayoun Farrahi, and Alois Ferscha. A new opportunity to urban evacuation analysis: Very large scale simulations of social agent systems in repast HPC. In *Proceedings - 2012 ACM/IEEE/SCS 26th Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation, PADS 2012*, pages 233–242, 2012.
- [130] Peter M. Allen. Cities: The Visible Expression of Co-evolving Complexity. In *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, pages 67–89. Springer, 2012.
- [131] Denise Pumain. Urban systems dynamics, urban growth and scaling laws: The question of ergodicity. *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, page 91, 2012.
- [132] Bill Hillier. The Genetic Code for Cities: Is it simpler than we think? In Juval Portugali, Han Meyer, Egbert Stolk, and Ekim Tan, editors, *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, chapter 7, pages 129–152. Springer, 2012.
- [133] Jeffrey Johnson. Cities: systems of systems of systems. In Juval Portugali, Han Meyer, Egbert Stolk, and Ekim Tan, editors, *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, pages 153–172. Springer, 2012.

-
- [134] Gustavo Munizaga Vigil. *Diseño urbano: teoría y método*. Ediciones Universidad Católica de Chile, México, D.F., 2nd edition, 2000.
- [135] OECD Global Science Forum. Effective Modelling of Urban Systems to Address the Challenges of Climate Change and Sustainability. In *OECD Global Science Forum*, page 99, 2011.
- [136] Brian Castelliani and Frederic Hafferty. *Sociology and complexity science. A new field of inquiry*. Springer, Heidelberg, 2009.
- [137] Bernardo Alves Furtado, Patrícia Alessandra Morita Sakowski, and Marina Haddad Tóvolli. A Complexity Approach for Public Policies. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada*, 2015.
- [138] Shoufan Fang, George Z. Gertner, Zhanli Sun, and Alan A. Anderson. The impact of interactions in spatial simulation of the dynamics of urban sprawl. *Landscape and Urban Planning*, 73(4):294–306, 2005.
- [139] H S Sudhira, T V Ramachandra, and K S Jagadish. Urban sprawl: metrics , dynamics and modelling using GIS. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5:29–39, 2004.
- [140] Robert Axelrod. Advancing the art of simulation in the social sciences. *Journal of the Japanese and International Economies*, 12(3):16–22, 2003.
- [141] R. Conte, Nigel Gilbert, G. Bonelli, Claudio Cioffi-Revilla, G. Deffuant, J. Kertesz, V. Loreto, S. Moat, J. P. Nadal, A. Sanchez, A. Nowak, A. Flache, M. San Miguel, and D. Helbing. Manifesto of computational social science. *European Physical Journal: Special Topics*, 214(1):325–346, 2012.

-
- [142] Robert Axelrod and Leigh Tesfatsion. A Guide for Newcomers to Agent-Based Modeling in the Social Sciences. In *Handbook of Computational Economics*, pages 1647–1659. Elsevier B.V., 2006.
- [143] Andrew Crooks, Alison Heppenstall, and Nick Malleon. Agent-Based Modeling. In Bo Huang, editor, *Comprehensive Geographic Information Systems*, chapter 1.16, pages 219–243. Elsevier, 2018.
- [144] Uri Wilensky and William Rand. *An Introduction to Agent-Based Modeling*. MIT Press, London, first edition, 2015.
- [145] Steven F. Railsback and Volker Grimm. *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton University Press, New Jersey, 2012.
- [146] Waldo R. Tobler. A Computer Movie Simulation Urban Growth in Detroit Region. *Economic Geography*, 46:234–240, 1970.
- [147] David O Sullivan and David J Unwin. *Geographic Information Analysis*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2010.
- [148] Martin Gardner. Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway’s new solitaire game “life“. *Scientific American*, pages 120–123, 1970.
- [149] Keith Clarke. Land Transition Modeling With Deltatrons, 2008.
- [150] N Laila Ab Ghani, Siti Z.Z. Abidin, and M. Zamani. Generating Transition Rules of Cellular Automata for Urban Growth Prediction. *International Journal of Geology*, 5(2), 2011.
- [151] Frank Schiller. Urban Transitions: Scaling complex cities down to human size. *Journal of Cleaner Production*, pages 1–10, 2015.

-
- [152] Itzhak Benenson and Paul Torrens. *Geosimulation: Automata-based Modeling of Urban Phenomena*. Wiley, 2004.
- [153] Paul Torrens. How cellular models of urban systems work, 2000.
- [154] Nuno Norte and Antonio Pais. Cellular automata and urban studies: a literature survey. *ACE: architecture, city and environment*, 1(3), 2007.
- [155] Inés Santé, Andrés M. García, David Miranda, and Rafael Crecente. Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2):108–122, 2010.
- [156] Michael Batty. Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American Planning Association*, 1997.
- [157] Jamal Jokar Arsanjani, Marco Helbich, Wolfgang Kainz, and Ali Darvishi Boloorani. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(1):265–275, 2011.
- [158] Jasper van Vliet, Roger White, and Suzana Dragicevic. Modeling urban growth using a variable grid cellular automaton. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1):35–43, 2009.
- [159] Dagmar Haase, Annegret Haase, Nadja Kabisch, Sigrun Kabisch, and Dieter Rink. Actors and factors in land-use simulation: The challenge of urban shrinkage. *Environmental Modelling and Software*, 35:92–103, 2012.
- [160] Reine Maria Basse. A constrained cellular automata model to simulate the potential effects of high-speed train stations on land-use dynamics in trans-border regions. *Journal of Transport Geography*, 32:23–37, 2013.

- [161] Wenfeng Gong, Li Yuan, Wenyi Fan, and Philip Stott. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata — Markov modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34:207–216, 2015.
- [162] W. Loibl and T. Toetzer. Modeling growth and densification processes in suburban regions - Simulation of landscape transition with spatial agents. *Environmental Modelling and Software*, 18(6):553–563, 2003.
- [163] Terry L. Sohl and Peter R. Claggett. Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool for decision-makers. *Journal of Environmental Management*, 129:235–243, 2013.
- [164] Sameera Abar, Georgios K. Theodoropoulos, Pierre Lemarinier, and Gregory M.P. O’Hare. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24:13–33, 2017.
- [165] Steven F. Railsback, Steven L. Lytinen, and Stephen K. Jackson. Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. *Simulation*, 82(9):609–623, 2006.
- [166] Timon McPhearson, Steward T A Pickett, Nancy B. Grimm, Jari Niemela, Marina Alberti, Thomas Elmqvist, Christiane Weber, Dagmar Haase, Jurgen Breuste, and Salman Qureshi. Advancing Urban Ecology toward a Science of Cities. *BioScience*, 66(3):198–212, 2016.
- [167] Jian Lin, Bo Huang, Min Chen, and Zhen Huang. Modeling urban vertical growth using cellular automata—Guangzhou as a case study. *Applied Geography*, 53:172–186, 2014.

-
- [168] Liliana Bazzanella, Luca Caneparo, Franco Corsico, and Giuseppe Roccasalva, editors. *The future of cities and regions: simulation, scenario and visioning, governance and scale*. Springer, 2012.
- [169] Jingnan Huang, Jinting Zhang, and X X Lu. Applying SLEUTH for simulating and assessing urban growth scenario based on time series TM images: referencing to a case study of Chongqing, China. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37:597–606, 2008.
- [170] Federico Amato, Piergiuseppe Pontrandolfi, and Beniamino Murgante. Supporting planning activities with the assessment and the prediction of urban sprawl using spatio-temporal analysis. *Ecological Informatics*, 2015.
- [171] Anne Bretagnolle, Eric Daudé, and Denise Pumain. From theory to modelling: urban systems as complex systems, 2013.
- [172] Luis Inostroza, Rolf Baur, and Csaplovics Elmar. Urban Sprawl and Fragmentation in Latin America: A Comparison with European Cities. The myth of the diffuse Latin American city., 2010.
- [173] Brendon Miles Watkiss. *The SLEUTH urban growth model as forecasting and decision-making tool*. PhD thesis, Stellenbosch University, 2008.
- [174] Jose I. Barredo, Marjo Kasanko, Niall McCormick, and Carlo Lavalle. Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64(3):145–160, 2003.
- [175] Patsy Healey. *Urban Complexity and Spatial Strategies: Towards a Relational Planning for Our Times*. Routledge, 2008.

- [176] Jamalunlaili Abdullah. City Competitiveness and Urban Sprawl: Their Implications to Socio-Economic and Cultural Life in Malaysian Cities, 2012.
- [177] Kazem Oryani and Britton Harris. Review of Land Use Models: Theory and Application. *Sixth TRB Conference on the Application of . . .*, pages 80–91, 1997.
- [178] Thomas Lechner, Pin Ren, Ben Watson, Craig Brozefski, and Uri Wilenski. Procedural modeling of urban land use. *ACM SIGGRAPH Research posters*, page Article No. 135, 2006.
- [179] Li Xia and Yeh Gar-On. Integration of principal components analysis and cellular automata for spatial decision- making and urban simulation, 2002.
- [180] A. Stewart Fotheringham and Peter A. Rogerson, editors. *The SAGE Handbook of Spatial Analysis*. Sage, 2009.
- [181] Farhad Hosseinali, Ali A. Alesheikh, and Farshad Nourian. Agent-based modeling of urban land-use development, case study: Simulating future scenarios of Qazvin city. *Cities*, 31:105–113, 2013.
- [182] Arthur Hjorth and Uri Wilensky. Redesigning Your City - A Constructionist Environment for Urban Planning Education. *Proceedings of Constructionism*, 13(2):1–10, 2014.
- [183] Arika Ligmann-Zielinska and Piotr Jankowski. Exploring normative scenarios of land use development decisions with an agent-based simulation laboratory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(5):409–423, 2010.
- [184] Travis B. Paveglio, Tony Prato, and Michael Hardy. Simulating effects of land use policies on extent of the wildland urban interface and wildfire risk in Flathead County, Montana. *Journal of Environmental Management*, 130:20–31, 2013.

- [185] Juval Portugali. *Complex Artificial Environments: Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities*. Springer, 2006.
- [186] Volker Grimm, Uta Berger, Finn Bastiansen, Sigrunn Eliassen, Vincent Ginot, Jarl Giske, John Goss-Custard, Tamara Grand, Simone K. Heinz, Geir Huse, Andreas Huth, Jane U. Jepsen, Christian Jørgensen, Wolf M. Mooij, Birgit Müller, Guy Pe’er, Cyril Piou, Steven F. Railsback, Andrew Robbins, Martha Robbins, Eva Rossmanith, Nadja Rüger, Espen Strand, Sami Souissi, Richard Stillman, Rune Vabø, Ute Visser, and Donald DeAngelis. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198(1-2):115–126, 2006.
- [187] Volker Grimm, Uta Berger, Donald DeAngelis, J. Gary Polhill, Jarl Giske, and Steven F. Railsback. The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221(23):2760–2768, 2010.
- [188] Roberto Murcio and Suemi Rodríguez-Romo. Modeling large Mexican urban metropolitan areas by a Vicsek Szalay approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(16):2895–2903, 2011.
- [189] IMIP. Programa Sectorial de Mejoramiento Urbano de la Zona Centro y Frente de Mar de Ensenada. *Instituto Municipal de Investigacion y Planeacion en Ensenada*, page 2017, 2017.
- [190] Joshua M. Epstein. Agent-Based Computational Models and Generative Social Science. *Complexity*, 4(5):41–60, 1999.
- [191] G.E.P. Box. Robustness in the Strategy of Scientific Model Building. In R. L. Launer and G. N. Wilkinson, editors, *Robustness in Statistics*, pages 201–236. ACADEMIC PRESS, INC., 1979.

-
- [192] Hiroki Sayama. *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*. Open SUNY Textbooks, Geneseo, first edition, 2015.
- [193] José I. García. *Simulacion basada en agentes. Introduccion a Netlogo*. Centro de Investigaciones Sociológicas, Madrid, 2016.
- [194] Jose Vidal. *Fundamentals of Multiagent Systems with Netlogo examples*. Jose M. Vidal, 2010.
- [195] Ju Sung Lee, Tatiana Filatova, Arika Ligmann-Zielinska, Behrooz Hassani-Mahmooei, Forrest Stonedahl, Iris Lorscheid, Alexey Voinov, Gary Polhill, Zhanli Sun, and Dawn C. Parker. The complexities of agent-based modeling output analysis. *Jasss*, 18(4):1–26, 2015.
- [196] Manuel Lima. *Visual Complexity: Mapping Patterns of Information*. Princeton Architectural Press, New York, 2011.