



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de dinámicas urbanas y su impacto en el desarrollo sostenible por medio de simulación

Federico Andrés Liévano Martínez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de minas, Escuela de Sistemas e Informática
Medellín, Colombia
2011

Análisis de dinámicas urbanas y su impacto en el desarrollo sostenible por medio de simulación

Federico Andrés Liévano Martínez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería de Sistemas

Director (a):

Ph.D. Yris Olaya Morales

Línea de Investigación:

Investigación de operaciones y simulación

Grupo de Investigación:

Grupo de sistemas e informática

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Escuela de Sistemas e Informática

Medellín, Colombia

2011

Por ti Dios, dador del conocimiento.

Agradecimientos

El autor quiere agradecer públicamente:

- Al Profesor Isaac Dyner por sus aportes y sus consejos siempre tan sabios.
- A mi Directora Yris Olaya por su inmenso conocimiento, amabilidad, disposición para escuchar siempre mis inquietudes, y brindarme siempre su colaboración.
- Al profesor Gerard Olivar por sus consejos certeros y apoyo incondicional.
- A la Escuela de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia por brindar sus instalaciones y recursos para la consecución de este trabajo.
- A Ceiba (Centro de estudios interdisciplinarios en complejidad) por financiar el proyecto “Non Linear Dynamics in Sustainable Development” del cual hizo parte esta tesis.
- A Henry Piñeros por su colaboración en la programación del modelo.
- A mi familia mi principal motivación.

Resumen

En esta tesis se presenta un modelo de simulación basado en agentes para modelar las dinámicas en el cambio del uso del suelo urbano. Se analiza la complejidad del sistema urbano y cómo se ha enfrentado su estudio a partir de diversas aproximaciones analíticas y computacionales. Se resaltan algunas de las limitaciones de los modelos construidos y se discute cómo algunas de estas pueden ser superadas capturando las relaciones dinámicas y procesos de toma de decisiones entre los agentes que involucran el sistema. El modelo de simulación basado en agentes propuesto permite obtener patrones globales de comportamiento que ayudan al entendimiento del sistema y a realizar análisis de desarrollo sostenible urbano.

Palabras clave: cambio y forma de uso del suelo urbano, simulación basada en agentes, relaciones dinámicas, procesos de toma de decisiones, complejidad, desarrollo sostenible urbano.

Abstract

This thesis presents an agent-based simulation model for represent the land use change dynamics. We analyze the complexity of the urban system and how could be faced its study from a variety of analytical and computational approaches. We identify some of the limitations of the built models and discuss how some of these models can be overcome capturing the dynamic relationships and decision making processes among agents that involve the system. The proposed simulation model allows getting global patterns of behavior that help to the understanding of the urban system and make analysis for sustainable development.

Keywords: land use change, agent based simulation, dynamic relationships, decision making processes, complexity, sustainable development.

Contenido

1. Marco teórico	7
1.1 El desarrollo sostenible urbano y su relación con el cambio en el uso del suelo .	7
1.2 Modelamiento para el cambio en el uso del suelo urbano	10
1.2.1 El uso de modelos.....	10
1.2.2 Historia del modelamiento de dinámicas urbanas	12
1.2.3 Enfoques Metodológicos.....	14
1.3 La simulación basada en agentes (SBA) como herramienta metodológica.	23
1.3.1 Objetivos, ventajas y desventajas de la SBA.....	27
2. Estado del arte	31
2.1 Modelos de interacción humano – uso del suelo.....	31
2.2 Estudios de cambio y uso del suelo Colombia.	39
3. Modelo de simulación basada en agentes (SBA) para el cambio en el uso del suelo urbano.....	41
3.1 Un modelo SBA para el cambio en el uso del suelo urbano.....	41
3.1.1 Elementos del modelo SBA	44
3.1.2 Construcción del modelo SBA:	46
3.2 Descripción del modelo computacional	49
3.2.1 Contexto de la simulación	49
3.2.2 La proyección malla (grid).....	50
3.2.3 Inicializador	50
3.2.4 Agente Suelo.....	51
3.2.5 Agente Gobierno	53
3.2.6 Agente Constructor	54
3.2.7 Agente Empleador	56
3.2.8 Agente Persona	56
3.2.9 Parámetros, Controles y Variables Exógenas	58
3.3 Formulación.	59
3.3.1 Formulación Económica.....	59
3.3.2 Decisión del agente constructor.....	60
3.3.3 Formulación Dinámica	63
4. Resultados y validación del modelo	67
4.1 Resultados del modelo	67
4.1.1 Escenario 1. Caso base	67
4.1.2 Escenario 2: comportamiento real.	72
4.1.3 Escenario 3: caso de crecimiento poblacional alto en estrato bajo	75

4.2	Validación del modelo	78
4.2.1	Validación de las suposiciones del modelo	78
4.2.2	Validación de Comportamiento.....	85
4.2.3	Cambio de las condiciones iniciales del modelo.....	88
5.	Análisis de resultados.....	93
5.1	Indicadores de sostenibilidad	93
5.1.1	Porcentaje de la población urbana viviendo por debajo de la línea de la pobreza.....	94
5.1.2	Tasa de desempleo	94
5.1.3	Área Residencial por persona.....	94
5.1.4	Área Residencial por persona.....	95
5.1.5	Población de asentamientos de bajo y alto nivel social.....	95
5.1.6	Área Rural como porcentaje del suelo total	96
5.1.7	Producto interno bruto per cápita.....	96
5.2	Indicadores de sostenibilidad aplicados a los resultados	96
6.	Conclusiones y trabajo futuro.....	101

Lista de figuras

Figura 1. Marco para el modelamiento de las dinámicas del humano con el ambiente. .	32
Figura 2. Interacción y red de agentes. Elaboración propia.....	45
Figura 3. Diagrama de clase UML para los agentes del cambio en el uso del suelo urbano. Elaboración propia.	48
Figura 4. Algoritmo de simulación	66
Figura 5. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 1.....	69
Figura 6. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 2.....	70
Figura 7. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 3.....	71
Figura 8. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 4.....	71
Figura 9. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 1.....	73
Figura 10. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 2.....	73
Figura 11. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 3.....	74
Figura 12. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 4.....	74
Figura 13. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 1.....	76
Figura 14. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 2.....	76
Figura 15. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 3.....	77
Figura 16. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 4.....	77
Figura 17. Comportamiento del modelo en el límite máximo del horizonte temporal.	81
Figura 18. Panorama económico al límite del horizonte temporal.	81
Figura 19. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 1.	83
Figura 20. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 2.	83
Figura 21. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 3.	84
Figura 22. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 4.	84
Figura 23. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 1.	86
Figura 24. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 2.	87
Figura 25. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 3.	87
Figura 26. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 4.	88
Figura 27. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 1.....	89
Figura 28. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 2.....	90
Figura 29. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 3.....	90
Figura 30. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 4.....	91
Figura 31. Gráficos de sostenibilidad y análisis de resultados.	99

Lista de tablas

Tabla 1. Modelos construidos para el cambio en el uso del suelo.	35
Tabla 2. Condiciones iniciales de modelación. Escenario 1.	68
Tabla 3. Condiciones iniciales de modelación. Escenario 2.	72
Tabla 4. Condiciones iniciales de modelación. Escenario 3.	75
Tabla 5. Condiciones iniciales de modelación. Validación dinámica.	80
Tabla 6. Condiciones iniciales de modelación. Condiciones extremas en preferencias... ..	82
Tabla 7. Condiciones iniciales de modelación. Validación de comportamiento.....	86

Introducción

Los cambios ecológicos y sociales están creando crisis ambientales en el mundo. La variabilidad en el clima, los cambios en el uso del suelo, el agotamiento de la biodiversidad y otros efectos ambientales cuestionan el manejo actual de nuestros sistemas ecológicos y la confiabilidad de las políticas que se formulan para sostener y mejorar la habitabilidad en tiempos futuros. La población humana continúa en expansión, con fuertes transformaciones económicas, tecnológicas y espaciales. Se espera que la población mundial alcance los 10 mil millones de personas para el 2050, aumentando drásticamente la presión sobre los recursos naturales y disminuyendo el bienestar sobre un gran porcentaje de la población (U.S. Long Term Ecological Research Network (LTER) 2007).

La compleja evolución de los sistemas naturales, de los cuales dependemos dificulta la comprensión de los mismos. Para un futuro sostenible es necesario, como mínimo, un conocimiento básico de cómo las actividades humanas afectan los ecosistemas, dañan el suministro de los servicios ambientales, cómo afectan la disponibilidad de los recursos que los ecosistemas proveen y cómo es la percepción y respuesta de la población humana a dichas alteraciones en el ambiente (European Environment Agency 2000). No obstante, adquirir conocimiento del comportamiento de nuestros procesos ecológicos y sociales no es una tarea sencilla (Koomen, y otros 2002). Los sistemas naturales y sociales poseen una gran complejidad (BEA 1994) y sus dinámicas individuales están relacionadas, exhiben fenómenos no lineales y transitorios que son difíciles de predecir además, sus comportamientos están acompañados por muchísimas variables que interactúan caóticamente y en algunas ocasiones estas dinámicas no muestran bases que revelen tendencias y patrones claros para su estudio (U.S. Long Term Ecological Research Network (LTER) 2007).

En muchos lugares del mundo las áreas metropolitanas están creciendo a tasas sin precedentes. Las ciudades han cambiado de pequeños y aislados centros de población a

grandes metrópolis interconectados económica, física y ambientalmente. Hace 100 años aproximadamente el 15% de la población estaba viviendo en zonas urbanas, hoy el porcentaje es de aproximadamente el 50% (U.S. Long Term Ecological Research Network (LTER) 2007). La concentración de personas en áreas urbanas crea problemas sociales en todo el mundo y la rápida urbanización repercute en el incremento en la pobreza urbana, problemas de accesibilidad en las viviendas, inequidad entre la población urbana y rural y otros cambios económicos y sociales.

Asimismo muchas de las granjas, humedales, bosques, y desiertos han sido transformadas durante los pasados 100 años en asentamientos urbanos (USGS. Science for a changing world s.f. 2005). Casi todas las personas son testigos de estos cambios en su ambiente local pero no se tiene un claro entendimiento de los impactos que este crecimiento puede causar a futuro.

La ciudad posee un gran valor económico, social, cultural que corre peligro de ser destruido por una serie de retroacciones negativas derivadas de su desarrollo espontáneo y de la prevalencia de señales y decisiones de corto plazo (Camagni 2005). El crecimiento urbano tiene consecuencias directas sobre la preservación del ambiente natural, las características únicas de las comunidades y otros atributos de calidad de vida. Una de las razones de estos efectos negativos es la complejidad dinámica en los procesos de crecimiento urbano (USGS. Science for a changing world 2005). En estos procesos hay múltiples transformaciones de material o recurso que requieren de la explotación del ambiente y que devuelven desechos o materiales contaminantes al ambiente. Múltiples problemas están asociados con el crecimiento urbano, entre ellos, se destaca la dinámica destructora que trae el uso y la ocupación del suelo.

El problema del uso del suelo está directamente relacionado con el cambio de forma urbana, con la densificación versus la expansión y con la degradación y agotamiento del recurso natural (International Institute for Sustainable Development 2010). El problema del uso del suelo urbano puede enfrentarse desde varias perspectivas, tal como lo plantea el Instituto Lincoln (Instituto dedicado a estudios concernientes al uso, regulación y tributación del recurso suelo) en su revista Landlines (Lincoln Institute, 2010):

- *Planeación y desarrollo urbano:* La planeación y desarrollo en la forma urbana intenta estimar qué infraestructura se necesita para asegurar el bienestar de la población, causando el mínimo impacto en el ambiente natural y preservando condiciones ambientales óptimas para las generaciones futuras. Una adecuada planeación urbana requiere de conocimiento y estudio específico de la dinámica del cambio y uso del suelo urbano, de las leyes de comportamiento y de interacciones sociales, predicción de tendencias socio-económicas, y del hallazgo de patrones globales de comportamiento.
- *Sostenibilidad ambiental y preservación del suelo rural:* Los cambios económicos y demográficos del suelo están asociados con la degradación ambiental. La gran cantidad de suelo de producción agrícola removido por la urbanización ha generado preocupaciones en relación con la preservación del suelo rural, y en particular, con la seguridad alimentaria. Por otro lado, los vínculos entre el suelo, el transporte y las emisiones de material particulado y gases de efecto invernadero aumentan la preocupación con la calidad del aire y el cambio climático.
- *Administración y políticas del suelo:* algunos ejemplos son: la asignación de licencias de construcción y las estrategias para evitar el abandono del campo. La administración también incluye las estrategias para aplicar impuestos justos a la propiedad, que sirvan como fuente de ingresos locales y darle flexibilidad al crecimiento de los mercados inmobiliarios.
- *Capacidad de enfrentar los temas de uso del suelo:* Corresponde al compromiso de los entes encargados de promover la mejora en la capacidad de entendimiento del cambio urbano. Este ítem compromete a los responsables de la formulación de políticas y tomadores de decisiones de planificación urbana de conocer y entender las dinámicas y retroalimentaciones del sistema.

Se estima que en los próximos años la mayoría de los cambios y consecuencias para el ambiente global se den en asociación con ecosistemas urbanos y de trabajo (European Environment Agency 2000). Las actividades identificadas sobre las que recae la transformación de estos ecosistemas son las relacionadas con la administración de los

recursos para la subsistencia, el mercado de productos, y el desarrollo ecosistémico para el uso residencial y comercial. (U.S. Long Term Ecological Research Network (LTER) 2007). Las causas principales y las consecuencias ecológicas, de estas actividades así como sus interacciones y retroalimentaciones deben ser entendidas por la sociedad para anticipar, mitigar y manejar las consecuencias ambientales de la administración del suelo y del agua y promover el desarrollo sostenible en el futuro.

Por otra parte, las dinámicas de cambio de uso del suelo urbano son complejas. La dinámica de la ocupación del suelo ha causado cambios inesperados en la estructura y funcionalidad de la ciudad, ha disminuido el valor de los recursos naturales y en consecuencia ha afectado la sostenibilidad de las generaciones futuras. (United Nations, 1996)

La construcción de modelos de simulación, especialmente enfocados a la dinámica del recurso suelo, puede aclarar muchos comportamientos del sistema ciudad, aportando un mayor grado de desagregación en comparación con muchos de los modelos estáticos, lineales y económicos encontrados en la literatura, que abordan este tipo de problemas, donde se asumen supuestos que simplifican las estructuras, asumiendo en la mayoría de los casos funciones y rendimientos de escala constantes, competitividad e información perfecta, falta de dinamismo y exclusión de interacciones y características fundamentales (Camagni 2005).

La experimentación controlada de estructuras conocidas, con niveles variables de complejidad, que intentan representar los sistemas reales, suministra información tangible que puede ser comparada con el mundo real y de esta manera se pueden obtener realimentaciones que ayuden a tener una mejor percepción de los comportamientos y dinámicas reales de los sistemas (Checkland, 1999). Por eso, el uso y la construcción de modelos es una herramienta poderosa de aprendizaje y de ensayo de reglas e incentivos que buscan mejorar un problema real.

Estos argumentos se convierten en la principal motivación para formular un modelo que contribuya en el estudio de las dinámicas del cambio en el uso del suelo urbano y ampliar la visión de los modelos actualmente desarrollados, los cuales en su mayoría abordan débilmente la toma de decisiones de los agentes involucrados en el sistema (Agarwal, y otros 2000). La mayoría de estos modelos son construidos de manera macro (agregada), con consideraciones espaciales y temporales, altamente dependientes de los análisis

físico-geográficos y de los patrones que revelan crecimiento urbano. Aunque dichos modelos, capturan muchos comportamientos de manera coherente, estos son débiles para estudiar cómo pueden ocurrir cambios en el comportamiento por efectos en políticas e incentivos individuales y cómo estos cambios pueden modificar el estado total del sistema (Helen Briassoulis 2009). Los procesos de toma de decisión en las ciudades están dados por agentes individuales y están motivadas por el beneficio individual, por esta razón, modelos de simulación que incluyan las decisiones de los agentes, pueden dar indicios importantes acerca del comportamiento dinámico de los sistemas.

En esta investigación se realiza un estudio que aborda varias de las perspectivas mostradas anteriormente. Se investiga el cambio del uso del suelo urbano, visto como un sistema complejo. El objeto de este estudio es determinar relaciones dinámicas y modelar procesos de toma de decisiones con el fin de representar el crecimiento urbano, y de esta manera contribuir al entendimiento del sistema y al posible planteamiento de políticas y soluciones que contrarresten los efectos negativos de la dinámica del cambio del uso del suelo urbano.

1. Marco teórico

En este capítulo se revisan importantes teorías de desarrollo urbano y conceptos de dinámica urbana. Igualmente, se estudian diversos enfoques metodológicos que han sido adoptados para el modelamiento del cambio y uso del suelo urbano y se habla de la simulación basada en agentes, herramienta metodológica usada para modelar el problema del uso del suelo urbano en la tesis.

1.1 El desarrollo sostenible urbano y su relación con el cambio en el uso del suelo

Distintos agentes interpretan el concepto de desarrollo sostenible de diferentes maneras; desde la perspectiva de los planificadores, el desarrollo sostenible urbano busca una adecuada planeación con el fin de garantizar a las futuras generaciones todos los beneficios que ofrece la ciudad, considerando la preservación del ambiente y los ecosistemas (Asher, W. 1999). La variable prioritaria del desarrollo sostenible urbano es el bienestar de la población local a largo plazo, vinculado a la prosperidad de la ciudad en cuanto tal. Los urbanistas, en cambio, cuando hablan del bienestar de la población consideran, además de necesidades vinculadas al factor económico y material, también necesidades de crecimiento cultural y profesional, de identidad vinculada a los lugares, de accesibilidad a los valores ambientales y culturales de la ciudad (WCED 1987).

Los urbanizadores miden el bienestar a partir de la máxima obtención de recursos del ambiente, cumpliendo de esta manera con todas las necesidades de la población y generando la mayor cantidad de bienes y servicios posibles para la misma (Vincent 1997). Para los ambientalistas los recursos ambientales constituyen la más potente variable instrumental para medir el desarrollo sostenible y asocian el bienestar de la ciudad únicamente a la preservación y cuidado de esta (Naredo 2004).

Cuantificar el bienestar de la población es un buen punto de partida para elaborar análisis de desarrollo y sostenibilidad, a partir de las diferentes condiciones por las cuales atraviesan las ciudades. Para medir el bienestar, es necesario la elaboración de procesos que sean capaces de nutrir el aprendizaje colectivo, la capacidad de composición de conflictos y la capacidad de diseño estratégico (United Nations Commission on Sustainable Development 2000). También es preciso considerar los distintos sistemas de los que la ciudad se compone: el sistema económico, social, físico, ambiental dentro de sus interacciones dinámicas y de la unidad de su resultado. De asumir un enfoque evolutivo, caracterizado por la plena consideración de la complejidad, con sus componentes de no linealidad, acumulativa e irreversibilidad (Camagni 2005).

Operativamente, el desarrollo sostenible urbano ocurre al maximizar las externalidades positivas producto de la integración entre los distintos subsistemas (económico, físico-ambiental y social) y al minimizar los efectos de idiosincrasia y de las externalidades negativas (United Nations Economic and Social Council 1994). Por ejemplo, la elevada densidad del suelo ofrece la posibilidad de obtener economías de escala, eficiencia, accesibilidad a una amplia variedad de valores incorporados en el patrimonio histórico, cultural y ambiental, pero por otra parte los casos de contaminación de agua y aire, destrucción del patrimonio histórico, son ejemplos de externalidades negativas asociadas a esta densidad y que deben ser controladas y minimizadas (Asher 1999).

Para controlar y minimizar estos efectos negativos se requiere de una adecuada integración entre los principios reguladores de los diferentes subsistemas, para esto es necesario alcanzar una eficiencia en la toma de decisiones a largo plazo que valore adecuadamente las ventajas futuras y no solo las inmediatas (Fergus y Rowney 2005). También se requiere de una eficiencia distributiva que permita a un mayor número de ciudadanos disfrutar de los servicios de la ciudad y una equidad ambiental que garantice el acceso a los valores ambientales a los ciudadanos presentes y futuros.

El uso y cambio del suelo tiene una gran influencia sobre el desarrollo sostenible urbano. El desarrollo de la ciudad viene acompañado por innumerables cambios morfológicos y funcionales del uso del suelo y por dinámicas complejas de ocupación y competitividad (Chirivi E, David García E. y Montoya V. 2010). Desde un punto de vista económico, las

variables principales de análisis que afectan este desarrollo son, la demanda del suelo, determinada por las actividades productivas y residenciales y la renta urbana, variable ligada a la disponibilidad del suelo y su ubicación y que está relacionada con precios y alquileres de los inmuebles y de los terrenos. Otras variables de comportamientos menos generales, pero que son necesarias para analizar el problema de sostenibilidad a partir del territorio, son las relacionadas con: el consumo energético, el tráfico y la congestión, la contaminación, e indicadores de bienestar y malestar relacionados con la concentración espacial, servicios personales, criminalidad, etc.

Las características territoriales también poseen un gran impacto sobre el comportamiento urbano a largo plazo. (Camagni 2005) En su libro economía urbana, define los siguientes elementos que afectan los criterios de sostenibilidad y que están asociados con la forma urbana:

- La dimensión absoluta de la ciudad: económicas y des-economías de aglomeración y diferentes fenómenos de eficiencia dinámica están vinculados a la dimensión de la ciudad. Estudios revelan que existe una relación óptima eficiente de la ciudad que se situaría alrededor de unos 20.000 y 100.000 habitantes. Estos análisis revelan que la población es otra de las variables que enmarcan una dinámica sostenible del uso y distribución del suelo.
- La densidad del uso del suelo: Este atributo reduce el consumo general energético (calefacción, alumbrado, transporte), pero trae desmejoras en el bienestar de la población como aumento en la congestión y poca disponibilidad de accesibilidad de los espacios verdes.
- La forma urbana: la forma de los espacios en función del desarrollo, es un indicador de bienestar, eficiencia urbana, y sostenibilidad. Desde un punto de vista arquitectónico se puede decir que se ha alcanzado un consenso sobre el hecho de que las formas concentradas representan un modelo territorial eficiente de referencia.

Los anteriores argumentos muestran que la mezcla e interacción de los usos del suelo marca las pautas funcionales de las distintas áreas de la ciudad y motiva el mayor crecimiento de la demanda de movilidad. (Clarke and Wilson 1985) plantean que las áreas de mercado o de actividad económica se van extendiendo como resultado de la fragmentación de las funciones, de las tareas y de la profesionalización. (Alonso 1964), muestra que las áreas residenciales se ensanchan por motivos de ocio, de cultura o de trabajo. Otros autores plantean que la dinámica está acompañada además de las relaciones físico-geográficas por múltiples procesos de toma de decisiones (Anas y Kim 1996). Todos estos elementos serán recogidos y analizados posteriormente, para llegar a un modelo base de desarrollo de cambio en el uso del suelo urbano y de esta manera construir un modelo de simulación.

1.2 Modelamiento para el cambio en el uso del suelo urbano

1.2.1 El uso de modelos

Los modelos permiten la imitación de operaciones de un proceso o sistema del mundo real a lo largo del tiempo. Son una declaración, no ambigua, de la forma en que interactúan los componentes del sistema bajo estudio (Checkland 1999). Los modelos sirven para mejorar el entendimiento del sistema real, para predecir comportamientos, y para valorar alternativas para mejorarlos y transformarlos.

Un modelo está compuesto por los componentes más importantes que el diseñador cree afectan el sistema bajo estudio. También posee variables exógenas, endógenas y de estado. Las exógenas son aquellas que afectan y realimentan el sistema desde fuera de la frontera del mismo o de una manera externa. Las variables endógenas a diferencia, se producen y modifican a partir de relaciones y procesos internos. Las de estado son aquellas que cambian secuencialmente con el horizonte temporal y son las que definen las distintas fases del sistema (Sterman 2000).

Los modelos también contienen parámetros y relaciones funcionales. Los parámetros son los valores fijos que representan condiciones constantes, supuestos y limitaciones del modelo. Las relaciones funcionales son las distintas formulaciones (generalmente expresadas como ecuaciones matemáticas) que conectan los componentes, flujos, variables, parámetros y le dan la dinámica o la vida secuencial al modelo.

Los modelos buscan ser aceleradores de aprendizaje ya que el modelamiento efectivo está determinado por iteraciones constantes entre experimentos y aprendizaje en el mundo virtual construido, retroalimentados con experimentaciones y aprendizaje del mundo real. El procesamiento de modelado consta de cinco pasos fundamentales que interactúan constantemente en todo el transcurso de construcción, estos son; la articulación del problema, la identificación de relaciones dinámicas, la formulación, la validación y el planteamiento de políticas y evaluación (Checkland 2000).

- La articulación del problema: es el paso en el cual el modelador se cuestiona sobre el problema a resolver. En la identificación del problema real y no en el síntoma o en la dificultad, en el límite del modelo y en el propósito fundamental del mismo. Para esta caracterización inicial del problema es adecuado discutir en grupo con expertos en el área, una investigación histórica de las dinámicas del problema, recolectar datos que ayuden a revelar tendencias y usar la observación directa.
- Identificación de relaciones dinámicas: En este paso el diseñador desarrolla una teoría acerca del comportamiento problemático y construye relaciones que explican el fenómeno en términos del enfoque metodológico adoptado. La estructura deben especificar la dinámica del sistema y las reglas de interacción entre variables y agentes involucrados en el modelo.
- Formulación del modelo: En este paso se realiza una formalización completa del modelo con todas sus ecuaciones, parámetros y condiciones iniciales, en este paso es cuando se empieza a descubrir el entendimiento acerca del problema y la habilidad para representarlo.

- Validación: Corresponde a probar el comportamiento y la estructura del modelo construido. Se debe garantizar que cada variable corresponde a un concepto en el mundo real, y que cada ecuación tenga su fundamento teórico y dimensional.
- Planteamiento de políticas y evaluación: Una vez se tenga confianza en la estructura y comportamiento del modelo se diseñan las políticas para el mejoramiento, implementar nuevas estrategias, estructuras y reglas de decisión.

1.2.2 Historia del modelamiento de dinámicas urbanas

El modelamiento de las dinámicas que surgen a partir de interacciones del humano con el recurso suelo, ha tenido a lo largo del tiempo destacadas perspectivas para abordarlo. Empezando con teorías de ubicación clásicas construidas por Von Thunen, Weber, Reilly, Christaller y Hoyt.

Von Thunen (1826) construye un modelo de ubicación agrícola donde simula un mercado de productos agrícolas que son producidos en cultivos a varias distancias del mercado. El problema está relacionado con el rendimiento del cultivo en términos del precio del mercado, los costos de producción y de transporte. Con el fuerte supuesto de terreno llano y uniforme este modelo genera un conjunto de anillos concéntricos alrededor del mercado.

Weber (1909) plantea uno de los primeros intentos de examinar el problema de la ubicación industrial donde, de manera similar al modelo de Von Thunen usa una formulación espacial continua y un conjunto de supuestos restrictivos para permitir soluciones al problema de la ubicación industrial. El truco de Weber fue pensar en las distintas maneras de especificar las funciones de costo y beneficio en el sitio de la actividad de la industria con dos flujos desde la fuente de los materiales y un solo flujo hacia el mercado.

Reilly (1931) propone una formulación para establecer la distribución de comercio o centros de servicio. Principalmente su modelo se basa en tener una distribución dada de

centros comerciales y predecir los flujos de ingresos para estos. Reilly establece un equilibrio en las instalaciones cuando todos los proveedores han conseguido equilibrar sus gastos e ingresos. Extensiones de este modelo son los construidos por (Christaller 1933). (Lósch 1954) los cuales incluyen mayores grados de desagregación (tipo de consumo, tipo de producto, las rentas diferenciales y los costos de transporte, etc)

Hoyt (1939) busco un método simple de definición de las perspectivas de desarrollo de las ciudades americanas para ofrecerlo a la Federal Housing Administration distinguiendo entre la ocupación urbana total, ocupación de base y ocupación en servicios. Hoyt demuestra que obteniendo una valoración exógena de la dinámica de la ocupación base es posible una previsión del crecimiento de la ocupación global de la ciudad.

Posteriormente (Wingo 1961), (Alonso 1964) integran las primeras visiones económicas de valoración económica de la renta, ubicación, y transporte, pasando posteriormente a unos de los modelos económicos más importantes que propone simular la estructura de los usos del suelo urbano en un momento dado, a partir interacciones entre uso del suelo y demanda de transporte (Lowry 1964). Luego provienen los modelos que integran interacción espacial y principios económicos. (Clarke and Wilson 1985).

(Forrester 1986) plantea un modelo donde las áreas urbanas se mueven de una fase de crecimiento donde las mezclas de población y la actividad económica cambian a un estado de equilibrio donde la renovación y la ocupación del suelo pasa de ser, un área de mercado de constante innovación y crecimiento a uno caracterizado por áreas urbanas envejecidas y un declive en la industria. Consecutivamente extensiones del modelo de Von Thunen son formulados, con modelos de equilibrio parcial y general de usos del suelo urbanos policéntricos con congestión endógena y aglomeración laboral (Anas, Arnott y Small 1998), (Anas y Kim 1996) y finalmente se consolidan las últimas tendencias en modelamiento, usando sistemas dinámicos, y modelos de simulación de no equilibrio (Batty, 2005), (Li, Sato y Zhub 2003), (Abraham and Hunt 2002). La discusión amplia de los enfoques metodológicos en los cuales se agrupan los modelos presentados se presenta a continuación.

1.2.3 Enfoques Metodológicos

Los modelos presentados anteriormente han estado enmarcados en acercamientos que involucran ciencias económicas y de la computación. A continuación se describen los principales enfoques metodológicos que han acompañado estos modelos.

- La visión económica

Los modelos económicos de uso del suelo han sido propuestos históricamente como formulaciones de las actividades más importantes que incumben el uso del recurso y sus dinámicas agregadas. Estos han estado ligados históricamente a los principales modelos económicos que han sido propuestos como formulaciones de la base económica urbana. (Hoyt 1939), (Czamanski 1964), (North 1955). El suelo para la economía, es un factor productivo sujeto a leyes económicas particulares y merecedor de un tratamiento específico en el interior de la teoría económica. Es clasificado sobre dos puntos de vista económicos según su característica rural o urbana:

El suelo rural es visto como un recurso original, no creado por el hombre, difícilmente sujeto a una potencial utilización monopolística. El suelo urbano en cambio, no es visto como un factor original, ya que está producido por inversiones infraestructurales y aglomeración de actividad. A ambos se les asigna el calificativo de escasez con referencia a sus específicas propiedades de accesibilidad (Wingo 1961).

Otra característica general del suelo es la de tener un papel en la producción social que deriva no solo de una prestación productiva específica, sino de actividades externas: para el suelo urbano por ejemplo, de los procesos generales de urbanización de la población, procesos de crecimiento industrial, procesos de proximidad a infraestructuras de transporte, de centros urbanos o de trabajo y de otras actividades relacionadas. Para el suelo agrícola en general por la presencia de condiciones de fertilidad otorgadas por la naturaleza que determinan completamente la producción (Lowry 1964). Pero la diferencia contundente con otros factores productivos es que la remuneración de la tierra (renta), no tiene la función de estimular la oferta agregada total, sino solo la de optimizar la asignación de los recursos y de generar una cuota distributiva a nivel macroeconómico.

La renta mencionada en el párrafo anterior es la principal característica del suelo, que a lo largo de la historia ha sido vista y modelada principalmente con dos consideraciones, la microeconómica o micro-territorial y bajo una dimensión agregada o macroeconómica. En la primera, la renta es vista como el precio de cada una de las porciones del espacio urbano. Para la segunda, la renta es una cuota agregada que va a parar a una específica clase social, la clase de los propietarios. (Camagni 2005)

A nivel micro, la renta está estrechamente asociada a las decisiones localizativas de las empresas y de las familias y por tanto es un elemento fundamental que determina los fenómenos que construyen el espacio económico; como las ventajas de aglomeración, demanda, accesibilidad, en interacción en todas las actividades localizadas (Alonso 1964). La renta del suelo urbano en los procesos económicos constituye de esta manera, la objetividad en el precio, y la asignación coherente a cada lugar específico del valor que los actores económicos atribuyen explícita e implícitamente a cada localización territorial en sus procesos de definición de las elecciones localizativas, productivas y residenciales (Camagni 2005).

En la mayoría de los casos la valoración se manifiesta en una disponibilidad a pagar y a recibir por parte del propietario, un determinado precio máximo o mínimo de mercado por el uso de cada porción de suelo urbano. En otros casos, en modelos de asignación óptima, con la ausencia de un precio específico de mercado, la valoración emerge solo implícitamente de las decisiones de localización y movilidad y adopta la forma de un precio sombra por ser un recurso escaso y que surge cuando este es objeto de demanda.

La valoración del suelo está estrechamente ligado a procesos de optimización: optimización en la localización de cada actividad productiva y residencial, optimización en la asignación de los recursos territoriales entre usos alternativos, optimización de los costes de movilidad y transporte. Una valoración óptima mantiene en equilibrio la demanda y oferta del suelo y realiza la mejor asignación territorial de los recursos para la colectividad en su conjunto.

Muchos de los modelos económicos que han adoptado algunas de las visiones anteriormente explicados del recurso suelo se han ajustado a conceptos

microeconómicos estándar y ha modelamientos económicos que se adaptan a fuertes supuestos. La característica principal de este tipo de modelamientos, es la concepción de homogeneidad en los bienes de la misma categoría y la completa disponibilidad de información presente en el mercado, que es accesible a todos los agentes participantes. De esta manera se construye un mundo de colecciones de categorías homogéneas de oferta y demanda con funciones para cada una, las cuales determinan la posición en el mercado de los agentes (Abraham and Hunt 2002).

Para esta visión se asume que las categorías son optimizadoras en sus decisiones de consumo por tal razón para la mayoría de los bienes hay un equilibrio entre la oferta y la demanda y el precio de equilibrio es establecido a través de algún proceso que no envuelve comercio lo que implica que todo el comercio ocurre en el punto de equilibrio. Esta visión microeconómica estándar es la base para modelos de equilibrio general y parcial computacional, donde los sistemas de ecuaciones definidos describen una economía basada sobre los flujos de bienes entre los agentes del mercado. Este tipo de modelos son resueltos cuando se determina el estado de equilibrio.

Para estudios espaciales urbanos o de uso del suelo, los modelos de equilibrio parcial, distribuyen las actividades en el espacio de estudio a partir de decisiones económicas. De esta manera la organización en el espacio está dada a partir del principio de accesibilidad, donde el espacio impone restricciones al movimiento y las elecciones están dadas única y exclusivamente por la accesibilidad, es decir, el suelo le es dado a aquel agente que paga más por el o le da el mayor valor. Este principio genera competencia espacial entre los agentes, lo cual organiza el territorio.

Los centros en este tipo de modelos definen las restricciones espaciales. Estos indican los puntos espaciales con mayor actividad económica, mayor valor de accesibilidad por la interacción de actividades económicas ocurridas allí y picos de gradientes de renta y densidad de uso del suelo. Existen modelos mono-céntricos de un solo centro de trabajo donde la ubicación de este, es independiente de la población. También existen modelos poli-céntricos donde al inicio los usos residenciales y de producción pueden ocurrir en cualquier parte pero la futura ubicación de estos se vuelve interdependiente y endógena.

Un ejemplo de un modelo mono-céntrico y de equilibrio parcial es el famoso modelo de Von Thunen (Von Thunen 1826), para el mercado agrícola. En este se representa la asignación del suelo agrícola para varios niveles de renta determinados por la distancia a un único centro que sirve de mercado para todos los productos con factores de producción distribuidos uniformemente y con infraestructura homogénea. En este modelo se tiene una función de producción específica para cada producto agrícola y rendimientos de escala constantes. El precio de cada producto es exógeno, el costo de transporte es unitario y constante y se posee una demanda ilimitada de productos.

Los resultados de este modelo revelan que aquellas actividades con alto contenido de interacción, actividades orientadas a alta información, símbolos de poder y control, actividades de elevada eficiencia y densidad espacial, con un mercado urbano central y actividades que usan estructuras o factores urbanos concentrados, se ubican en el centro del territorio.

Otro modelo económico urbano de referencia y altamente conocido es el de Anas y Kim (Anas y Kim, 1996) el cual plantea un modelo de equilibrio general poli-céntrico con un mercado laboral cerrado y externalidades positivas de aglomeración, aquí el crecimiento poblacional agota las economías de escala de la actividad concentrada y los centros se distribuyen uniformemente. Por otro lado los cambios en el tiempo para este modelo están dados por la distribución uniforme de actividades inestables en etapas tempranas de crecimiento y el inicio de este crecimiento está dado por la concentración de las actividades en uno o varios lugares.

El modelo plantea un equilibrio espacial competitivo entre los consumidores, las firmas y el sector transporte con un espacio que es dividido en zonas diferenciadas a partir de nodos con caminos de distancia mínima entre estos y con retornos constantes de escala. Por otro lado existe un número predeterminado de industrias que pueden ubicarse en cualquier subconjunto de estas zonas. Los factores de producción para estas, son el trabajo, el suelo y cualquier subconjunto de bienes intermedios.

Los bienes se diferencian por la ubicación de la producción y el precio de equilibrio puede variar entre las distintas zonas, es decir existe un precio competitivo en cada zona. Los consumidores por su parte cumplen varias funciones; son de un solo tipo, poseen un

gusto heterogéneo por su localización de trabajo y residencia, venden trabajo a las firmas, compran suelo, realizan viajes de compras a todas las zonas y compran una unidad de un solo bien en cada viaje.

La formulación de equilibrio general es vista como las posibles ubicaciones donde se producen bienes comunicados por transacciones inter-industriales y donde ocurren transacciones de los consumidores, es decir, lugares donde se produce y se vende y donde la congestión está determinada por el costo del tráfico.

De esta manera para los consumidores, dada una localización de empleo y comercio, una información del precio en todos los mercados, costos de transporte y tiempos de viaje, escogerán un par de ubicaciones trabajo residencia, un tamaño de lote residencia, horas de trabajo y ocio y patrón de viajes de comercio. Para las firmas, dados los lugares de operación, precios de insumo y productos, costos de transporte y de bienes intermedios deciden cantidades de insumos (suelo y trabajo) y cantidades de bienes intermedios de otras ubicaciones. Para el transporte existirá una planificación central a corto y largo plazo. Donde se fijan las cantidades de tierra, las tarifas de congestión en las vías, hasta alcanzar finalmente el punto de equilibrio en las zonas.

Los resultados de este planteamiento muestran que cuando las preferencias de compra no dependen del tamaño del sitio de la compra se obtiene un equilibrio único, una dispersión de consumidores y trabajos en todas las zonas propuestas y que los gradientes de rentas, salarios y precios de bienes tienen un pico en la zona central. En cambio cuando se hacen efectivas las economías de escala en el comercio y los consumidores gastan más dinero en centros comerciales grandes. Los resultados revelan equilibrios múltiples, ciudades poli-céntricas y un empleo concentrado en un subconjunto e las zonas.

Los estudios mostrados anteriormente, son discutidos porque se basan en fuertes supuestos económicos y consideran finalmente, ciudades estáticas y espacialmente ordenadas. Sin embargo estos estudios, han proporcionado un gran entendimiento inicial de la evolución de las ciudades y han sido las bases teóricas mas solidas para la construcción de nuevos modelos y avances metodológicos.

- *La teoría de la utilidad*

El paradigma tradicional microeconómico se aleja de la realidad espacial cuando considera la fuerte restricción de la heterogeneidad en las categorías de análisis, y en particular en la heterogeneidad del suelo (Abraham and Hunt 2002). La Teoría de la Utilidad entra a relajar este supuesto y asume actores heterogéneos y bienes heterogéneos, lo cual marca una gran diferencia en los conceptos teóricos mostrados anteriormente. La principal diferencia se basa en considerar procesos de maximización entre los agentes, quienes entran a evaluar niveles de utilidad con relación a sus preferencias y características heterogéneas del bien y finalmente maximizan dicha utilidad bajo un indicador que generalmente es el precio.

Comúnmente y para análisis de uso y distribución del suelo, se ha utilizado la teoría de la utilidad aleatoria, en la cual cada actor maximiza su utilidad. Esta utilidad está compuesta por dos componentes: Un componente determinístico que puede ser calculado a partir de ecuaciones determinadas y un componente estocástico que refleja la unicidad de los individuos y situaciones que varían. Este componente estocástico es generalmente usado para representar el difícil proceso de toma de decisiones humanas, o la incertidumbre que lleva inherente este proceso.

Las aplicaciones más comunes donde se aplica esta teoría, son en modelos de escogencia discreta, donde se representa la escogencia de una alternativa sobre otras en un conjunto de alternativas. Esta puede representar por ejemplo la escogencia de un establecimiento para adquirir algún bien, una escogencia de un lugar donde vivir, o donde construir cierta infraestructura. El componente estocástico de la utilidad varía con la distribución seleccionada y la escogencia de dicha distribución depende del comportamiento a representar y de la preferencia del modelador.

Mayores componentes estocásticos en las funciones de utilidad representan más variación e incertidumbre en las decisiones individuales. Un gran componente estocástico en la función de utilidad puede reducir la expectativa para que un actor encuentre la mejor opción, pero esta alternativa quizá se ajuste más al comportamiento y situaciones reales donde la incertidumbre y el sesgo de información, especialmente en la toma de decisiones humanas son evidentes. Bajo esta concepción, pueden obtenerse patrones y dinámicas más acertadas y acercadas a la realidad.

Estas ideas teóricas han sido muy usadas en las funciones que se usan simulación con autómatas celulares y simulación basada en agentes, las cuales adoptan la estructura espacial o física a partir de celdas, y representan las unidades sociales y humanas a través de agentes. La construcción espacial para este tipo de modelos adopta en general la idea de vecindario. El cual es definido como aquellos sitios que inmediatamente son influenciados si alguna otra ubicación adjunta cambia su actividad (Batty 2005). La base de cambio y toma de decisiones en estos modelos es gobernado a partir de procesos aleatorios y funciones matemáticas de utilidad que modelan la intención humana de obtener beneficio, que junto con las restricciones que limitan la manera en la que la ciudad opera espacialmente, causa que emerjan estructuras ordenas y patrones característicos de las ciudades.

- La visión dinámica

Un sistema en equilibrio puede ser convertido a un sistema dinámico adicionando solo una especificación formal de cómo los precios varían. De esta manera un sistema dinámico completo contendrá dos partes; la económica, que involucra las ecuaciones que representan la oferta, la demanda y el mercado, y la dinámica con las respectivas reglas de cambio. Un modelo dinámico de este tipo reaccionara instantáneamente con el cambio de los precios en el tiempo, por lo tanto la concepción anterior se modifica, del diseño de un algoritmo de búsqueda de precios, a un algoritmo de actualización de precios que revele comportamientos dinámicos en el tiempo y patrones de estabilidad.

Para operar tales modelos a través de simulación computarizada se requiere que el tiempo sea discretizado. Se asume un conjunto de condiciones iniciales, se calcula el conjunto de ecuaciones económicas y se ajustan los precios con relación al tiempo discreto y la regla de actualización. Este procedimiento se realiza paso a paso a través de un procedimiento secuencial.

Esta noción donde el comportamiento es instantáneo, mientras que las actualizaciones del precio toman tiempo, es un concepto abstracto y poco real. Los individuos toman tiempo en reaccionar y los precios son el producto de las decisiones que toman las personas en el mercado. Una metodología alternativa es modelar los procesos donde los

agentes de oferta y demanda ajustan sus decisiones en respuesta a las condiciones cambiantes.

La simulación basada en agentes ayuda a corregir esta limitación, y formula modelos de comportamiento global que surgen a partir de la interacción de la toma de decisiones individuales, las cuales son simuladas, considerando el comportamiento plausible del agente en una población en cada periodo de tiempo.

Los modelos dinámicos contruidos, ya sea a partir de asociaciones micro estructuradas (Clarke, Hoppen y Gaydos 2000) o a partir de reglas definidas que determinan los estados presentes en términos de los eventos pasados (Dendrinis 2000), logran capturar relaciones dinámicas reales, y procesos de toma de decisiones entre los elementos y son una muy buena escogencia para obtener patrones globales de comportamiento espacial y de uso del suelo urbano.

- Predicciones y series temporales

Esta noción cabe dentro de la idea de usar modelos matemáticos para describir el comportamiento de un fenómeno que está bien establecido. En algunas ocasiones es posible derivar un modelo basado sobre leyes, las cuales nos permiten calcular el valor de una cantidad dependiente del tiempo. De esta manera nosotros podemos calcular la concentración de una sustancia de una reacción química en un determinado tiempo, o la trayectoria de un misil impulsado desde una cierta posición, con una dirección y velocidad conocida. Esta noción es concebible si el modelo fuera completamente determinístico.

Sin embargo no todos los modelos con completamente determinísticos, existen factores desconocidos tales como la velocidad y dirección del viento en el ejemplo del misil. En muchos problemas es necesario definir factores desconocidos de los cuales es imposible escribir un modelo determinístico que nos permita calcular con exactitud el futuro comportamiento de un fenómeno (Box and Jenkins 1976).

No obstante es posible también, derivar un modelo que puede ser usado para calcular la probabilidad de un valor futuro, perteneciente a un rango especificado. Este tipo de

modelos son llamados modelos estocásticos. Los modelos que en general, incumben a las series de tiempo y que son necesitados para alcanzar óptimas predicciones y especificaciones adecuadas de control y planificación son en efecto modelos estocásticos,

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones generadas secuencialmente en el tiempo. La serie de tiempo puede ser continua o discreta dependiendo de las características del conjunto de observaciones (Box and Jenkins 1976). El uso de estas observaciones disponibles en el tiempo, pueden ser altamente eficientes para predecir el valor de comportamientos de fenómenos en tiempos futuros y pueden proveer una base para la planeación económica y espacial donde se destaca la planificación territorial, la ubicación de centros de producción, el control poblacional, la determinación de procesos residenciales son algunas aplicaciones que el uso de series de tiempo puede aportar a la economía espacial.

Con la llegada de nuevos y completos sistemas de información geo-referenciada, el uso de modelos de series de tiempo para predecir fenómenos espaciales y urbanos es cada vez más común y se han convertido sin duda en una de las herramientas más comunes para ser adoptadas en los modelos de planificación urbana y territorial.

- La visión optimizadora - análisis multiobjetivo

Finalmente los estudios espaciales y en particular aquellos que involucran desarrollo y actividades del suelo en muchos contextos pueden ser caracterizados como el balance de interés de múltiples tomadores de decisiones. A menudo el ejercicio puede ser caracterizado en un marco de optimización multiobjetivo donde se tiene un número finito de objetivos los cuales deben ser optimizados sujetos a restricciones.

Cada función objetivo se relaciona con la meta de un determinado plan de desarrollo de un tomador de decisiones (el hidrólogo, el conservacionista, planeador de gobierno y desarrollador por ejemplo), el conjunto de restricciones, incluye los limitantes para el suelo en consideración como por ejemplo las tasas de crecimiento, etc. El objetivo es encontrar una función óptima de Pareto (Moglen, Gabriel y Faria 2003). Que implica que

una mejora en uno de los objetivos debe repercutir en la pérdida de los otros. Así se tendrá un conjunto de soluciones satisfactorias factibles para múltiples decisores.

1.3 La simulación basada en agentes (SBA) como herramienta metodológica.

La simulación basada en agentes es el estudio computacional de procesos modelados como sistemas dinámicos de interacción de agentes, aquí agente se refiere a la programación de características y métodos de comportamiento instauradas en una clase que representa una entidad que forma parte de un mundo computacionalmente construido. Este tipo de modelo es esencialmente una conexión de algoritmos que son programados lógicamente dentro de los métodos de las clases que hacen alusión a los agentes. Estos procedimientos pueden solo ser implementados usando la información particular que ha sido programada por el modelador como herramientas de racionamiento, tiempo y recursos físicos disponibles en el modelo (Duffy 2008).

No existe un acuerdo universal para la definición precisa del término agente, algunos modeladores consideran que un agente es un componente computacional independiente que puede tener desde reglas primitivas de decisión a procedimientos de inteligencia artificial adaptativa compleja (Bonabeau 2001). Otros autores (Teshfatsion 2008) plantean que la palabra agente hace alusión a componentes que pueden aprender de sus ambientes y cambiar sus comportamientos en respuesta a este mismo. Casti (1997) Argumenta que los agentes deben contener reglas que cambien las reglas y de esta manera proveer adaptación. (Jennings 2000) menciona que la característica fundamental de los agentes es la capacidad de tomar decisiones independientes o en otras palabras tener autonomía.

La definición que se adopta en este trabajo es la asumida pro (Macal and North 2006) donde consideran un agente es:

- Un individuo discreto con un conjunto de características y reglas que gobiernan sus comportamientos y la capacidad de tomar decisiones. El requerimiento de que sea un componente discreto implica que el agente tiene un límite y el

modelador puede fácilmente determinar si otro componente hace o no parte del agente.

- Un agente vive en un ambiente en el que interactúa con otros agentes. Los agentes tienen protocolos de interacción como la comunicación y la capacidad de interactuar con el ambiente. Un agente tiene la habilidad de reconocer los atributos de otros agentes.
- Un agente puede tener metas con respecto a sus comportamientos y comparar el cumplimiento de estas metas en el tiempo.
- Un agente es flexible y tiene la habilidad de aprender y adaptarse sus comportamientos a distintas experiencias.
- A diferencia de particular de un sistema los agentes son diversos, heterogéneos y dinámicos en sus atributos y reglas de comportamientos.

Una clase que le da vida a un agente, contiene información (características y variables) junto con métodos de comportamiento que actúan sobre esa información. Esta información y métodos pueden ser de tipo público, privado o protegido, lo cual limita la accesibilidad de todos los entes computacionales para dicha información (Brenner 2008). Los agentes pueden comunicarse unos con otros a través de sus métodos protegidos y públicos

La información que va dentro de las clases de los agente puede incluir su tipo de atributo (mundo, mercado, firma, consumidor), sus atributos estructurales (geografía, diseño, función de costo, función de utilidad,) y información acerca de atributos de otros agentes (ubicación, estado). Un método de un agente pueden incluir métodos de comportamiento social instituidos (leyes de defensa, leyes de antimonopolio, protocolos de mercado, etc.) así como métodos de comportamiento privado (estrategias de producción y precio, algoritmos de aprendizaje para actualizar estrategias, y métodos para cambiar métodos (métodos para activar el algoritmo de aprendizaje de otro)) (Duffy 2008).

Los agentes pueden ser individuales (trabajadores, consumidores), grupos sociales (familias, firmas, agencias de gobierno), instituciones (mercados, sistemas de regulación), entidades biológicas (cultivos, bosques, ganado) entidades físicas (infraestructura, clima, regiones geográficas). Pueden variar desde elementos con capacidades de aprendizaje a pasivas características del mundo sin una función cognitiva (Tesfatsion 2008). Del mismo modo estos pueden ser compuestos por otros agentes permitiendo construcciones jerárquicas. Por ejemplo un agente que representa una industria puede estar compuesto de agentes trabajadores y managers.

Idealmente, las clases que representan los agentes deben tener la misma flexibilidad de acción y toma de decisiones en el mundo virtual que en el mundo real. Esto implicaría que los agentes deben ser libres de comportarse en acorde con sus propias preferencias, instituciones y circunstancias físicas sin la imposición externa de condiciones de equilibrio que restringen el modelamiento y le quitan realidad al sistema.

Construidas las clases y los métodos que representan las entidades en el mundo real, se procede a construir las reglas o mecanismos de interacción que promueven la conexión de la información de las clases del sistema con el fin de obtener propiedades emergentes que surgen a partir dichas interacciones. Existen varios mecanismos de interacción: cara a cara, sistemas virtuales, procesos, leyes, elementos en un mercado, etc. (Tesfatsion 2008). Un ejemplo de esto puede ser la interacción entre agentes consumidores y agentes industrias que puede ser modelado a partir de un mecanismo instaurado por precios y pagos.

Definido el mecanismo de interacción, el experimentador inicia con la construcción computacional del mundo que comprende estas interacciones de agentes, luego a través de pasos observa el desarrollo del mundo sobre el tiempo. Es necesario especificar el estado inicial del sistema detallando cada información inicial de cada agente, métodos de comportamiento y el grado de accesibilidad de esta información y métodos por otros agentes. El modelo debe ser dinámicamente completo. Esto significa que el modelado del sistema debe ser capaz de desarrollarse sobre el tiempo únicamente sobre la base de las interacciones de los agentes sin más intervenciones del modelador. El modelamiento basado en agentes fuerza al modelador a respetar esta restricción.

En resumen, los pasos generales para construir un modelo de agentes son (Macal and North 2006):

1. Agentes: identificar los tipos de agentes y otros objetos con sus atributos.
2. Ambiente: definir el ambiente de los agentes, el cual establece donde vivirán e interactuarán.
3. Métodos de los agentes: Especificar los métodos por los cuales los atributos de los agentes serán modificados o actualizados en respuesta a las interacciones agente-agente o agente –ambiente.
4. Interacciones Agentes: Definir los métodos que controlan cuales agentes interactúan, cuando ellos interactúan y como ellos interactúan durante la simulación.
5. Implementación: Implementar el modelo de agentes en un software computacional.

Adicional a lo anterior, se sugiere que para aplicaciones prácticas de modelos de simulación basada en agentes se requiere (Macal and North 2006):

1. Definir una teoría del comportamiento de cada agente.
2. Definir una teoría de la interacción de cada agente con los otros y con el ambiente.
3. Obtener información relacionada con los agentes.
4. Validar el comportamiento de los agentes asumiendo el modelo como un todo.
5. Correr el modelo y analizar los resultados desde una perspectiva individual o microscópica de los agentes hasta los comportamientos globales o macroscópicos del sistema, estableciendo relaciones entre ambas dimensiones.

Cabe notar que las observaciones extraídas de los modelos de agentes deben ser traducidas a análisis convincentes, para esto, los investigadores necesitan plantear en la formulación de los modelos una estructura coherente que posea las características económicas de comportamiento real de los sistemas (Brenner 2008). A continuación se enuncian algunas de las ventajas y desventajas de esta herramienta metodológica.

1.3.1 Objetivos, ventajas y desventajas de la SBA

Los objetivos de la SBA pueden clasificarse en cuatro objetivos que van acorde con el objetivo de los modelos y de la teoría sistémica, estos se explican a continuación (Tsfatsion 2008):

- El entendimiento empírico: este busca explicaciones casuales basadas en las repetidas interacciones de agentes en mundos realísticamente prestados.
- El entendimiento normativo: que determina la posibilidad de los modelos basados en agentes de ser usados como laboratorios para el descubrimiento de esquemas que mejoren los distintos procesos del mundo real. Los investigadores que persiguen este objetivo son interesados en evaluar si los diseños propuestos para políticas económicas, instituciones, y procesos resultan sistemas deseables socialmente y sostenibles en el tiempo.
- La visión cualitativa o la teoría de la generación: que se refiere a cómo pueden los sistemas ser más ampliamente entendidos a través de un examen sistemático de sus comportamientos dinámicos potenciales bajo alternativas especificadas de condiciones iniciales. Tal entendimiento ayudaría a clarificar no solo por qué ciertos resultados globales han regularmente sido observados sino que también porque otros no lo han sido.
- La mejora metodológica: que busca la manera de proporcionar a los investigadores de SBA con las herramientas y métodos que ellos necesitan para emprender el riguroso estudio de sistemas a través de experimentos computacionalmente controlados.

Una ventaja de la simulación basada en agentes puede ser aplicada a un amplio espectro de sistemas económicos (micro y macro), sociales, físicos, humanos, etc. Las aplicaciones tienen pros y contras dependiendo de los enfoques de modelamiento estándar. Por otro lado los agentes pueden ser representados como entidades interactivas direccionadas a metas de conocimiento estratégico con posibilidades cooperativas y competitivas con otros agentes, (Teoría de la organización industrial),

pueden aprender, es decir cambian comportamientos basados en sus propias experiencias y su aprendizaje puede ser calibrado a lo que se ha observado que hace la gente actual en el mundo real o controlado por opciones de laboratorio (Tesfatsion 2008).

El modelamiento se destaca por que los eventos son manejados solamente por interacciones entre agentes una vez las condiciones iniciales han sido especificadas. Así en lugar de enfocarse sobre estados de equilibrio de un sistema, la idea es observar o ver si alguna forma de equilibrio se desarrolla sobre el tiempo. La meta es adquirir un mejor entendimiento de retrato fase entero del sistema, es decir, todos los posibles equilibrios (aun si son computacionalmente intratables o no existentes) correspondientes, junto con las cuencas de atracción (Duffy 2008).

Otra ventaja, es el incremento en la facilidad para los agentes para entablar una comunicación social flexible proporcionada por las herramientas basadas en agentes, esto significa que los agentes pueden comunicarse con otros agentes en tiempos de eventos manejados usando rutinas que se han programado. También es posible el diseño de agentes con relativa autonomía. Un agente autónomo es un sistema situado dentro y parte de un entorno que siente ese ambiente y lo que actúa sobre él, sobre el tiempo, en búsqueda de su propio objetivo (Brenner 2008). Lo que conllevaría aun modelamiento de agentes con más capacidades sociales y de aprendizaje reales a diferencia de otros modelamientos tradicionales.

Las principales desventajas pueden identificarse como:

- Es obligatoria la construcción de un modelo dinámicamente completo: iniciando con las condiciones iniciales, el modelo debe permitir y apoyar plenamente el desgaste de las interacciones de los agentes sobre el tiempo sin más intervención del modelador (Brenner 2008).
- Si una interacción de un agente induce fuertes retroalimentaciones positivas, pequeños cambios en estas especificaciones iniciales podría afectar radicalmente los tipos de resultados.

- La experimentación intensiva debe ser a menudo conducida sobre un amplio rango de especificaciones iniciales plausibles para modelos basados en agentes si se quiere alcanzar una predicción robusta. (Tsfatsion 2008).
- Existe a menudo dificultad en la validación de los resultados de los modelos contra los datos empíricos (Duffy 2008).

Son pocas las desventajas con relación a las múltiples ventajas que tiene este tipo de modelamiento, por esta razón varios modelos para representar el cambio en el uso del suelo se han venido desarrollando con esta metodología durante las últimas décadas y se han convertido en la tendencia más fuerte moderna para el estado del arte. A (Schelling, 1978) se le acredita la primera simulación social basada en agentes para revelar patrones de uso del suelo. Schelling mostró que los patrones de organización territorial pueden surgir de forma espontanea sin ir incluso en consonancia con los objetivos de los agentes individuales. También se destacan trabajos como el modelo de autómatas celulares de (Clarke, Hoppen y Gaydos 2000) que empieza a introducir la micro-simulación para el análisis del uso y cambio del suelo a partir de reglas consistentes e información digital.

Otros estudios como los de (Li, Sato y Zhub 2003) (Deala y Schunk 2004), utilizan técnicas de modelamiento espacial con agentes para evaluar las políticas a largo plazo en el suelo urbano. Otros como (Kocabas y Dragicevic 2006), (Xie, Batty y Zhaoz 2006) y (Batty 2005) (Abraham and Hunt 2002) usan técnicas de simulación basada en agentes, para desarrollar modelos urbanos y simular eficientemente patrones de crecimiento espacial. En el capítulo siguiente se hace una breve revisión del estado del arte en el tema y se discuten fortalezas y debilidades de algunos de los modelos más representativos para el cambio en el uso del suelo urbano.

2.Estado del arte

En este capítulo se discuten importantes modelos que han sido construidos para representar el problema del cambio y uso del suelo urbano y que constituyen un breve estado del arte en el tema de estudio. También se enuncian algunos de los estudios que se han desarrollado en Colombia para abordar el mismo problema de interés.

2.1 Modelos de interacción humano – uso del suelo

Los modelos para estudiar las interacciones humano – uso del suelo pueden proponerse en un marco basado en tres dimensiones críticas que resumen la estructura de los modelos que explican las dinámicas del humano con el ambiente. Las dimensiones estudiadas son el tiempo, el espacio y el proceso de toma de decisiones, con atributos de escala y complejidad para cada una de estas (Agarwal, y otros 2000). La figura1 ilustra un ejemplo del marco con las tres dimensiones de análisis, y la ubicación de algunas de las concepciones metodológicas de los modelos más representativos en la literatura.

Para el cambio en el uso del suelo urbano los modelos ubicados en el eje espacial involucran metodologías que permiten entender geográficamente, el cambio del uso en las zonas. Es decir son metodologías que permiten establecer como las ciudades se desarrollan en un nivel físico-geográfico con variaciones: sociales, económicas, y condiciones ambientales. Estas metodologías se apoyan fuertemente en sistemas geográficos de referencia y en la construcción de mapas zonales que revelan las posibles tendencias de cambio del uso del suelo.

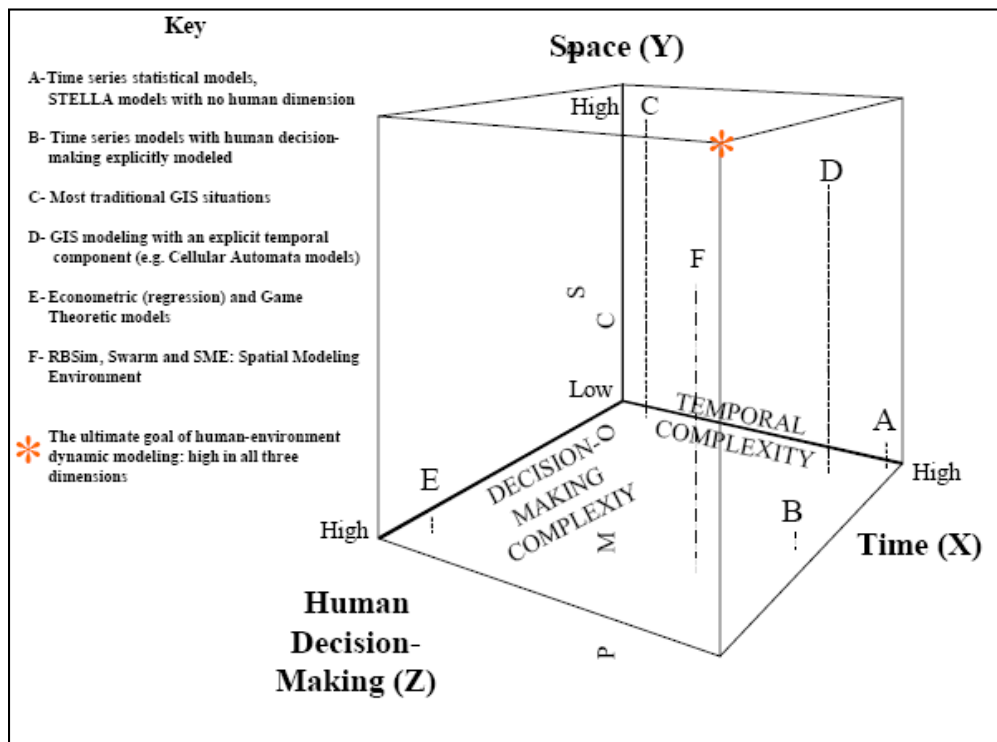


Figura 1. Marco para el modelamiento de las dinámicas del humano con el ambiente.
 Tomado de: (Agarwal, y otros 2000).

Hay dos tipos de espacialidad explícita en los modelos: la espacialidad representativa y la espacialidad interactiva. La representativa puede incorporar, producir o mostrar información de hasta dos o tres dimensiones espaciales, pero no puede modelar relaciones topológicas, e interacciones entre interacciones geográficas. En contraste los modelos interactivos, definen relaciones espaciales y sus interacciones sobre el tiempo (Agarwal, y otros 2000).

El eje temporal agrega de manera significativa la dinámica en el análisis, generalmente los modelos que implementan esta dimensión buscan por medio de relaciones funcionales y matemáticas, establecer las condiciones a futuro del sistema a partir de condiciones iniciales determinísticos o variables estocásticas. Por otro lado se busca a partir de la exploración de datos reales encontrar posibles relaciones estadísticas y econométricas que pronostiquen los índices fundamentales del cambio en el uso del suelo.

La determinación temporal del modelo también permite determinar el dominio de análisis, cuya modificación puede alterar la dimensión temporal de las decisiones. El establecimiento del horizonte de planificación es una variable fundamental a la hora de aumentar o disminuir la complejidad en el sistema (Agarwal, y otros 2000).

Un análisis que involucre ambos ejes (visión espacio temporal) requiere del entendimiento de la historia del uso del suelo de la región, la exploración de datos demográficos de la población, líneas de tiempo de eventos históricos, construcción dinámica de mapas y el establecimiento de las principales condiciones físico-geográficas, como; geografía, clima, suplemento de agua y las variables fundamentales que hacen que se limite o crezca el crecimiento y el cambio del uso del suelo.

Los modelos que optan por este análisis conjunto revelan patrones que permiten evidenciar el crecimiento urbano y su efecto en la dinámica del suelo: como por ejemplo la evolución de la existencia y accesibilidad de rutas de transporte, el desplazamiento de actividades productivas, la dinámica residencial y el futuro de otros índices del uso del suelo. También se pueden generar alternativas de resultados con el uso de escenarios usando limitantes ambientales y distintas políticas con el fin de realizar acertadas predicciones. Los modelos más comunes se esfuerzan en determinar cuentas del uso del suelo, y factores físicos, y con la ayuda de la estadística atacar la incertidumbre para predecir las probabilidades de urbanización. Estos resultados son ampliamente útiles sobre todo para las entidades públicas, planeadores, y tomadores de políticas cuyos estudios les ayudan a anticiparse y a planear de manera adecuada un futuro sostenible urbano con relación al uso y distribución del suelo.

El último eje relacionado con la toma de decisiones humanas corresponde a considerar todos los factores que afectan la toma de decisiones en los procesos donde el ser humano está involucrado. Generalmente el modelamiento está influenciado por teorías determinísticas y hay pocos intentos por entender como los factores externos, afectan el cálculo interno de beneficio costo que es el que afecta rotundamente como los individuos toman sus decisiones (Agarwal, y otros 2000). Otras teorías relacionadas con procesos de racionamiento han sido implementadas, como la teoría de juegos, donde se hacen mucho más consistentes las escogencias de las decisiones individuales como el

resultado de varios factores que se combinan para afectar a los procesos y resultados del racionamiento urbano.

Pero en general hay mucho por aportar en los modelos con respecto a la toma de decisiones individuales y colectivas. Se cree que un desarrollo más estricto de esta dimensión en los modelos puede ayudar a esclarecer patrones dinámicos hasta ahora desconocidos e inesperados por los investigadores.

En la Tabla 1 se citan algunos de los modelos más representativos del cambio en el uso del suelo. Son innumerables los modelos construidos para abordar dinámicas de uso del suelo, en este capítulo se intentan agregar los más significativos, pero evidentemente es imposible incluir todos los modelos que pueden tener peso en el estado del arte del tema. Para esta clasificación de modelos se especifica la visión adoptada de análisis, los componentes que están incorporados en los modelos, lo que explican, sus fortalezas y debilidades.

Tabla 1. Modelos construidos para el cambio en el uso del suelo.

Nombre del Modelo / cita Bibliográfica	Visión	Componentes	Que Explica	Fortalezas	Debilidades
General Ecosystem Model (GEM) (Fitz, y otros 1996)	Dinámica	Hidrología, Macrófitas, Algas, Nutrientes, Fuego, Humus.	Captura las realimentaciones entre los componentes abióticos y bióticos del ecosistema.	Posee representación espacial sobre mapas. Incluye efectos de variación dinámica sobre los procesos. Adapta resolución y paso de tiempo para ajustar el proceso q está siendo modelado.	Limitado en toma de decisiones Humanas.
Patuxent Landscape Model (GEM mejorado)(Voinov, y otros 1999)	Dinámica	Hidrología, Nutrientes, Macrófitas, Modelo Económico.	Predicciones de los procesos ecológicos y patrones de uso del suelo en un nivel hidrológico.	Retroalimentaciones entre sus variables. Involucra toma de decisiones humanas Evalúa impactos de la administración del suelo.	Poca consideración de factores institucionales.
(Conversion of Land Use and Its Effects) CLUE (Veldkamp and Fresco 1996)	Teoría de la Utilidad – Predicción y Series Temporales.	Modulo Biofisico Regional. Modulo objetivos del uso del suelo. Ubicación del uso del suelo regional.	Predice el cambio en el uso del suelo en el futuro.	Cubre un amplio rango de operadores biofisicos y humanos con diferentes escalas temporales y espaciales.	Limitada consideración de variables económicas e institucionales.
Area base Model (Hardie y Parks 1997)	Predicción y Series Temporales.	Un solo modulo.	Predecir las proporciones de uso del suelo en los condados.	Características económicas, derechos de propiedad y densidad. Impacto de la heterogeneidad del suelo.	Dependencia de la porción del conjunto de datos Riesgo en las predicciones para periodos de tiempo grandes.

(Mertens y Lambin 1997)	Predicción y Series Temporales.	Tres Áreas de estudio: Totales Corredores Islas.	Patrones de deforestación.	Explica la mayoría de la variabilidad en los comportamientos en la deforestación.	Falta de dinámica e interacción de los factores de análisis.
(Chomitz y Gray 1996)	Predicción y Series Temporales.	Múltiples ecuaciones matemáticas.	Predice el uso del suelo agregado en dos clases: Vegetación Natural y Agricultura.	Una fuerte base teórica del modelo de Von Thunen Información desagregada espacial para calcular las medidas de distancia integradas.	Uso de fuertes supuestos que pueden alejarse un poco de la realidad.
(Gilruth, Marsh y Itami 1995)	Dinámica.	Múltiples subrutinas para diferentes tareas.	Predice los sitios futuros de cultivo en términos de topografía y proximidad a los centros de población.	Representa la expansión en cultivo. Es replicable a varios escenarios.	no se incluyen impactos en la calidad del uso del suelo y variables socioeconómicas.
(Wood, y otros 1997)	Dinámica.	Modelos markovianos espaciales y temporales.	explica el cambio en el uso del suelo, a través de variaciones markovianas.	Considera cambios espaciales y temporales.	Excluye factores importantes en el análisis del uso del suelo.
CUF (Landis, A New Generation of Metropolitan Simulation Models. 1992) (Landis 1995)	Dinámica.	Crecimiento poblacional. Base de datos espacial. Ubicación espacial.	Explica el uso del suelo en un nivel metropolitano en términos demanda (crecimiento de la población) y oferta (suelo disponible).	Usa proyecciones en la población y en el precio. Incorpora incentivos para desarrolladores intermediarios. Utiliza SIG que suministra información detallada, realismo y precisión.	Debilidad en la retroalimentación entre la oferta y la demanda. Débil estimación del precio y la exclusión de tasas de crecimiento económico.

LUCAS (Berry, y otros 1996)	Dinámica - Predicción y Series Temporales.	Socioeconómico. Espacial. Impactos.	A partir de matrices de probabilidad calcula el cambio en el suelo y evalúa los impactos naturales.	El modelo muestra procesos, resultados y evaluación de impactos. Usa un GIS económico.	Tiende a fragmentar el suelo real por el método de pixelado que usa.
(Wear, y otros 1999)	Predicción y Series Temporales.	Modulo básico.	Predice la posibilidad de suelo potencial.	Involucra muchas variables biofísicas.	Solo usa variables básicas humanas como la densidad de la población.
(Swallow, Talukdar y Wear 1997)	Dinámica.		Simula una óptima secuencia de los procesos de cosecha y explotación del recurso suelo.	Presenta valores de los posibles estados del bosque maximiza utilidades Indicadores de preservación.	Dificultad para identificar los patrones de optimización óptimos del recurso.
NELUP (O'Callaghan 1995)	Predicción y Series Temporales – Optimizadora.	Ecológico. Hidrológico. Regional.	Explica patrones del uso del suelo en agricultura y silvicultura bajo diferentes escenarios.	Utiliza un marco de componentes económicos usando un recursivo modelo de planificación lineal.	Uso limitado de variables institucionales.
FASOM (Adams, y otros 1996)	Dinámica - Optimizadora	Forestal Agrícola	Modelo de asignación de suelo en los sectores agrícolas y forestales	Programación matemática con precios endógenos y dinámica no lineal. Usa el precio de los productos y del suelo como Evalúa impactos de políticas a largo plazo	Escala de análisis extensa y por lo tanto pierde nivel de desagregación con respecto a la variación del suelo

<p>CURBA (Landis, Monzon, y otros 1998).</p>	<p>Dinámica - Predicción y Series Temporales.</p>	<p>Modelo estadístico. Simulación y evaluación. Mapas y datos georeferenciados.</p>	<p>Explica la interacción entre probabilidades de urbanización, su interacción con el hábitat. Mide impactos que las políticas tienen sobre el uso y cambio del suelo.</p>	<p>Mezcla indicadores de SIG con proyecciones estadísticas de crecimiento urbano.</p>	<p>No considera explícitamente la toma de decisiones humanas. Limitaciones para explicar históricos patrones de crecimiento urbano.</p>
<p>Urban Dynamics (Jay Forrester 1969).</p>	<p>Dinámica.</p>	<p>Relaciones Causales. Ecuaciones diferenciales.</p>	<p>Explica la interacción entre componentes de lo que él considera el sistema urbano. Muestran dinámicas de ocupación del suelo y desarrollo. Para horizontes temporales de más de 100 años</p>	<p>Explicar históricos patrones de crecimiento urbano.</p>	<p>No considera explícitamente la toma de decisiones humanas.</p>
<p>URBANSIM (Alberti, and Waddell 2000)</p>	<p>Dinámica.</p>	<p>Sector Transporte. Sector Residencial y de negocios. Sector Uso del Suelo. Sector Gubernamental.</p>	<p>El modelo representa el proceso por el cual los desarrolladores construyen nuevas edificaciones o re-desarrollan las existentes.</p>	<p>El modelo trata explícitamente la toma de decisiones en ubicaciones de residencias y centros de negocios. Involucra políticas gubernamentales e impactos en las tasas impuestas. Usa GIS para la visualización.</p>	<p>Requiere de Fuertes supuestos con relación al comportamiento humano y natural de las regiones.</p>

2.2 Estudios de cambio y uso del suelo Colombia.

En Colombia pocos estudios se han desarrollado para modelar las dinámicas del cambio en el uso del suelo y los patrones de ordenamiento territorial de las ciudades. Los estudios más importantes han surgido en los últimos años donde se han venido construyendo modelos de simulación de la movilidad residencial e industrial para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en Colombia, como parte del proyecto de investigación “Modelo de apoyo a la toma de decisiones en planificación y ordenamiento territorial para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá” perteneciente al grupo de energía, ambiente y economía de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Este grupo de investigación se encuentra formulando herramientas de planificación tipo “ciudad” de mediano y largo plazo, combinando variables energéticas, ambientales y económicas.

Dos estudios de este grupo, se destacan en el área de interés, orientados a ordenamiento espacial y ocupación del suelo. Estos han usado dinámica de sistemas para la construcción de sus modelos. El primero llamado “Estudio de las dinámicas de movilidad residencial y su efecto en el uso del suelo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá”. (Garzón y Olaya 2010). En este estudio se construyen hipótesis dinámicas y modelos de flujos y niveles para entender la ubicación residencial y obtener patrones de ocupación y agotamiento del recurso suelo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

El segundo modelo llamado “Modelo para estimar el impacto de la creación de cluster industriales en la economía urbana”. (Morales y Olaya 2010) también construye hipótesis dinámicas para el entendimiento de generación de cluster industriales en el área metropolitana y revela simulaciones del impacto que estos poseen en la economía industrial y en los patrones de uso del suelo.

Otro modelo desarrollado en Colombia pero esta vez enfocado a como las dinámicas del suelo afectan la riqueza biótica del mismo es el desarrollado por (Quintero y Dyner 2004) en este se plantea el desarrollo de un modelo a partir de autómatas celulares y dinámica de sistemas el cual permite representar la evolución de los flujos de suelo, mostrando cómo son alteradas sus potencialidades y riquezas.

Otros modelos enfocados a la planificación en el sector transporte usando variables energéticas, ambientales económicas y procesos de optimización usando programación lineal pueden destacarse, (Alzate, Builes y otros 2007) (Cadena, Alzate y otros 2007). Aunque estos estudios no están enfocados en el cambio en el uso del suelo en particular, poseen importantes consideraciones a nivel de movilidad que afectan el recurso.

La cantidad desarrollada de modelos de interacción humano - recurso suelo en Colombia es muy limitada. Es un reto para los investigadores del país desarrollar modelos que aporten al entendimiento de las dinámicas del recurso y que involucren especificaciones y características típicas de nuestro territorio y comportamiento urbano.

En capítulos posteriores se desarrolla un estudio del cambio y uso del suelo urbano tomando como base las visiones metodologías explicadas y algunas de las técnicas adoptadas por los modelos expuestos en este capítulo. En el capítulo 4 se desarrolla un modelo de simulación basado en agentes el cual revela dinámicas de comportamiento de cambio urbano y patrones característicos en la evolución de la construcción del suelo urbano.

3. Modelo de simulación basada en agentes (SBA) para el cambio en el uso del suelo urbano

En este capítulo se formula un modelo de micro-simulación que captura relaciones dinámicas y procesos de toma de decisión entre agentes que intervienen en el cambio del uso del suelo urbano. A partir de la interacción de los agentes, se simulan patrones globales de comportamiento y dinámicas observadas en los modelos discutidos en los capítulos anteriores.

3.1 Un modelo SBA para el cambio en el uso del suelo urbano.

La simulación presentada está basada en la idea de que la ciudad evoluciona a partir del diseño detallado de las partes individuales, que luego se relacionan para formar componentes más grandes que van determinando y delimitando el sistema completo (bottom-up). El problema a simular consiste en dado un conjunto de distribuciones iniciales de centros de empleo y residencias de diferentes tipos:

- Cómo poder predecir el crecimiento y la distribución de diferentes tipos de residencias (residential and housing location problem).
- Cómo distribuir la población en varios centros de trabajo y casas distribuidos en diferentes zonas particulares de la ciudad.
- Cómo predecir el crecimiento y distribución de otros centros de trabajo (retail location problem).

Para simular tales comportamientos, se representan los principales elementos que caracterizan una ciudad a partir de celdas, las cuales adoptan la estructura espacial o física de la ciudad y a través de agentes, que representan las unidades sociales y humanas que hacen que la ciudad evolucione.

Los agentes son los principales actores de cambio urbano, y pueden modificar el espacio por medio de la interacción con otros agentes y recursos. El espacio (determinado por las celdas) impone las restricciones que limitan la manera en la que la ciudad opera y como resultado de la interacción y las decisiones de los agentes, emergen estructuras ordenadas y patrones característicos. Los recursos (disponibilidad de suelo, salario, empleo, licencias de construcción, etc.), son diseñados como variables que cambian en el tiempo y son adquiridos por los agentes a través de sus actividades, para su beneficio individual.

Para diseñar el modelo de simulación que se presenta en este capítulo, se siguen los pasos sugeridos por (Batty, 2005):

- Identificar las dinámicas que generan los cambios discontinuos y continuos.
- Explicar patrones y formas ordenadas del cambio urbano a partir de procesos aleatorios y límites de la geometría espacial.
- Determinar la variedad de transformaciones espaciales a partir de eventos únicos discretos, que representen los repetidos desarrollos urbanos en muchas escalas espaciales.
- Identificar los efectos de acciones repetitivas locales que se construyen a partir de realimentaciones que crean estructuras con organización global.

En nuestro modelo los cambios en el uso del suelo son resultado de las decisiones de agentes urbanizadores. Las dinámicas de construcción dependen de varios factores económicos, sociales y ecológicos como, por ejemplo, el ahorro urbano, el nivel de

ingresos, el nivel de desempleo, la condición social, la tasa de crecimiento poblacional, las restricciones en la construcción como la disponibilidad de espacio y la inversión, las zonas de conservación, el suelo rural disponible, etc.

Las transformaciones espaciales son, la formación de barrios de distintas clases sociales y a la ubicación estratégica de los centros de trabajo. Asimismo, el modelo representa los cambios relacionadas con el agotamiento de los recursos naturales y el respeto por las zonas de conservación. El suelo cambia de uso por la ejecución programada de cadenas de eventos discretos como; la construcción, el pago de los salarios y el crecimiento de la población, entre otros. Estos eventos serán explicados en detalle en secciones siguientes.

La escala espacial y temporal del modelo, afecta significativamente las trayectorias y las dinámicas que se buscan representar en la ciudad. Es importante pensar en escalas y en niveles de resolución que estén de acuerdo con las transformaciones espaciales y con los eventos principales del modelo (construcción de residencias o centros de trabajo).

En nuestro caso los tipos de procesos que ocurren durante la simulación para generar aglomeraciones de desarrollo urbano se ajustan a dimensiones anuales (tiempo discreto de la simulación), la justificación para esta dimensión se determina con base en un estudio realizado por Camacol (Cámara colombiana de la construcción) (Chirivi E, David García E. y Montoya V. 2010) que estima que en promedio el tiempo de construcción residencial en Colombia es de un año desde la inicialización del proyecto (no desde el lanzamiento o aprobación de licencia). Para la construcción de centros de trabajo se asume esta misma escala temporal.

La implicación que tiene usar pasos de tiempo discretos anuales posibilita también hacer comparaciones con la evolución y envejecimiento de muchas de nuestras ciudades. La mayoría de las ciudades en Colombia oscilan entre los 100 y 500 años. Santa Marta por ejemplo posee 484 años, Medellín 334 y Pereira 145 años entre otras. Esta clasificación ayudará a validar los horizontes temporales del modelo acorde con la evolución real de las ciudades.

En las siguientes secciones se realiza una descripción detallada del modelo de simulación construido, explicando los elementos incluidos, sus características, métodos de comportamiento y la formulación matemática, algorítmica y económica del mismo.

3.1.1 Elementos del modelo SBA

La simulación basada en agentes que se muestra en esta sección tiene como objetivo investigar los cambios en el uso e infraestructura en el suelo urbano. Además, busca entender las implicaciones de dichos cambios en la forma, distribución, densidad y precio del suelo. Esta aplicación posee múltiples procesos sociales que deben ser modelados donde los agentes representan personas o grupos de personas y las relaciones entre ellos deben representar la interacción social o económica entre ellos.

Diferentes tipos de agentes actúan en los fenómenos y dinámicas heterogéneas que ocurren en el cambio del suelo urbano. Entre estos están el suelo (visto aquí como un agente con atributos y comportamientos), la población, los urbanizadores, el gobierno, los empleadores, entre otros. Los agentes realizan diferentes tareas usando reglas de decisión determinadas. Por ejemplo, los agentes urbanizadores estudian el suelo disponible para construir y adaptan sus decisiones buscando maximizar su utilidad pero su comportamiento se limita por la estructura física del espacio, el cual es representado por una malla.

Todos los agentes tienen acceso a distintos tipos de información que proviene de otros agentes y del ambiente. Ejemplos de esta información son la demanda de viviendas, la oferta y demanda de empleo que surgen del crecimiento poblacional y económico, la disponibilidad y tipo de suelo, las licencias para la construcción, entre otros. Los flujos de información que generan la interacción y la dinámica total del modelo se ilustran en la figura 2.

Para simplificar el desarrollo del modelo se hacen algunas suposiciones. Por ejemplo el modelo no considera el sistema de transporte urbano ni los flujos de información que este le suministra al sistema. En su lugar, se usa la distancia como una aproximación de los impactos que se tiene al estar cerca o lejos de una ubicación estratégica particular. Esta suposición equivale a suponer que el transporte tiene capacidad infinita y cero precio. El mercado inmobiliario es simplificado en un esquema simple de oferta y demanda, con retardos de construcción de un año, sin considerar mercados de arrendamiento, especulación o comportamientos estratégicos.

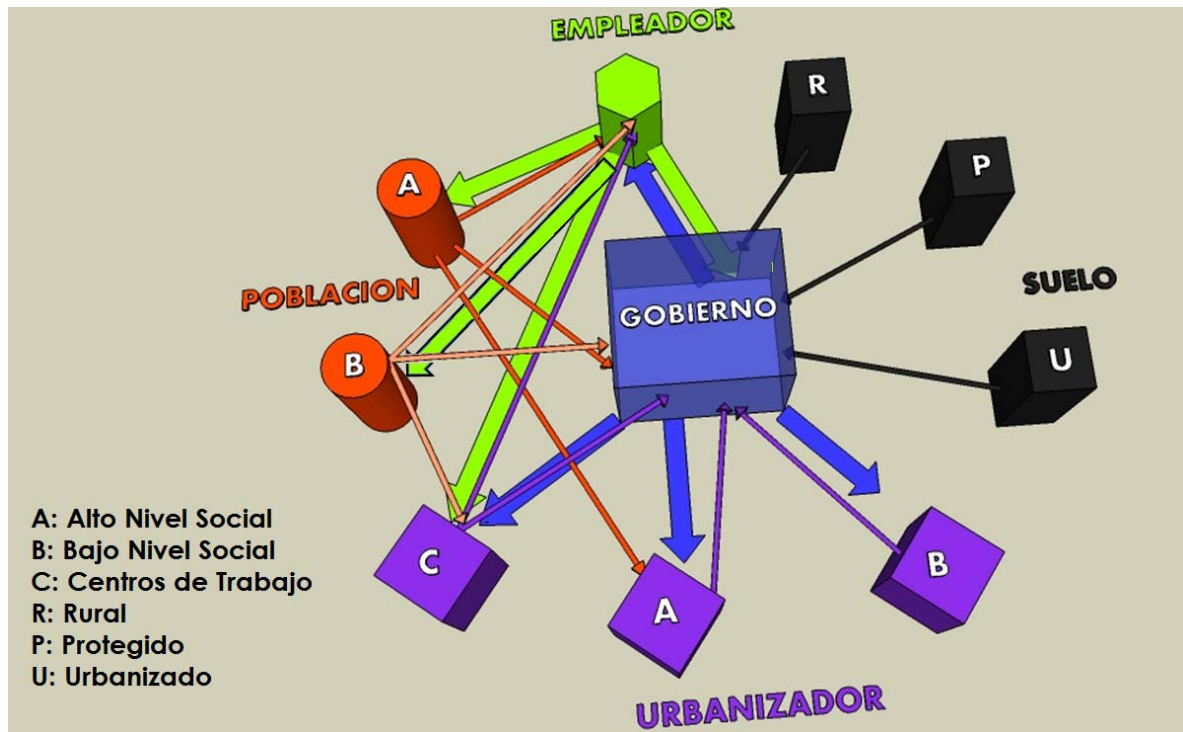


Figura 2. Interacción y red de agentes. Elaboración propia.

El precio del suelo varía conforme a los cambios en infraestructura y características del vecindario, y de nuevo, no se involucran las complejas dinámicas económicas del mercado real, como especulaciones, transacciones, negociaciones. La función del gobierno es aprobar licencias para la construcción según las necesidades de la ciudad, otras actividades y políticas públicas pertenecientes a este agente son excluidas.

En cada periodo los agentes discutidos se transmiten flujos de información y dinero y se efectúan los siguientes comportamientos:

1. La población de agentes persona (de cada tipo social) aumenta, producto de una tasa definida de crecimiento poblacional.
2. Las personas tienen ingresos (si trabajan en algún centro) y gastos asociados a costos de transporte y de vida. La diferencia de estas cantidades establece el ahorro por periodo el cual es usado para la inversión en la ciudad.
3. El gobierno recibe flujos de información asociados a la demanda residencial, laboral y disponibilidad del suelo. También recibe flujos de dinero correspondientes al ahorro urbano. Con base en esta información el gobierno emite licencias para la construcción de infraestructura urbana (centros de trabajo y residencias).

4. El gobierno envía información a los agentes urbanizadores sobre las licencias emitidas, con esta información, los agentes urbanizadores implementan sus construcciones en ubicaciones estratégicas para su beneficio.
5. Las personas de ambos niveles sociales reciben flujos de información de los urbanizadores para comprar residencias y se instalan en dicha vivienda.
6. La información de centros de trabajo construidos y dinero llega al agente empleador el cual busca personas de ambos niveles sociales para emplear y asignar un salario en los distintos centros de trabajo.
7. El precio y los atributos del suelo cambian producto de la urbanización, cuyos cambios son transmitidos como información al agente suelo.

La meta de los agentes urbanizadores en el modelo, es maximizar su utilidad y minimizar el costo, basado en decisiones adecuadas acerca del sitio para construir su infraestructura. Los otros agentes en el modelo cumplen comportamientos basados en reglas de programación donde por ejemplo, el objetivo del empleador es asignar empleo a la población con las características económicas y capacidad de los distintos centros de trabajo. Las personas buscan ser empleadas y tener un lugar donde vivir. El gobierno cumple con asignar licencias de construcción y recoger toda la información de la ciudad. El suelo brinda las dinámicas en las condiciones y características del espacio urbano. En las secciones siguientes se detallan los métodos utilizados para cada tipo de agente.

3.1.2 Construcción del modelo SBA:

En el modelo planteado en esta tesis, los agentes para el cambio en el uso del suelo urbano son:

- Los urbanizadores de residencias de alto nivel social.
- Los urbanizadores de residencias de bajo nivel social.
- Los urbanizadores de centros de trabajo.
- Las personas de alto nivel social.
- Las personas de bajo nivel social.
- El gobierno.
- El suelo rural.
- El suelo protegido.

- El suelo urbanizado.
- El empleador.

También se tienen objetos, que son elementos que no toman decisiones pero que hacen parte esencial en la simulación estos son:

- El contexto y la proyección (los cuales son explicados en la sección siguiente).
- El reloj el cual lleva la secuencia de la simulación.
- Las residencias de alto y bajo nivel.
- Los centros de trabajo de baja, media y alta capacidad.

Los urbanizadores de residencias de alto nivel social, los urbanizadores de residencias de bajo nivel social y los urbanizadores de centros de trabajo son agrupados juntos en una clase (padre) llamada “urbanizadores” ya que todos ellos poseen la misma estructura en términos de atributos y métodos. Del mismo modo, los distintos tipos de agentes suelo y persona, son agrupados en clases llamadas “suelo” y “persona” respectivamente.

Cada clase que describe a un agente está representada por un conjunto de atributos y métodos. Un diagrama de clases UML (Unified Modeling Language) como el de la figura 3 es una adecuada manera de representar los agentes que actúan en el modelo de cambio de uso del suelo planteado. UML es un lenguaje de modelamiento visual para representar sistemas orientados a objetos y es comúnmente adoptado para representar modelos basados en agentes (Macal and North 2006).

Figura 3. Diagrama de clase UML para los agentes del cambio en el uso del suelo urbano. Elaboración propia.

El diagrama UML de la figura 3, revela que métodos y atributos poseen los distintos agentes y cómo interactúan ellos en la secuencia principal del modelo. El método `iniciarAgentes()` hace alusión a las condiciones iniciales de los agentes que deben ser establecidas por el experimentador. El método `cicloSimulacion()` y `escogerAgente()` definen los procedimientos que deben ser repetidos en cada periodo de tiempo y que agentes deben ser activados. El objeto reloj es un elemento fundamental en la simulación que especifica el tiempo de simulación y la estructura temporal de eventos.

El conjunto completo de definiciones de las clases de los agentes, métodos, valores de los parámetros y valores iniciales de todos los agentes y otros estados, se presenta en la siguiente sección donde se da una especificación completa del modelo computacional construido para el cambio en el uso del suelo urbano.

3.2 Descripción del modelo computacional

El modelo de agentes construido en esta tesis es programado en un lenguaje programación orientado a objetos (JAVA) el cual es implementado en el software Eclipse¹ (The Eclipse fundation 2010) y usa la herramienta Repast² (Repast 2010) la cual contiene librerías y clases que simplifican la creación y uso de modelos basados en agentes. La descripción de los principales elementos del modelo basado en agentes construido para representar el cambio en uso del suelo urbano se realiza a continuación:

3.2.1 Contexto de la simulación

Un contexto es la manera como Repast define su estructura de información. Desde la perspectiva de modelamiento, el contexto representa una población abstracta donde Repast acumula o incluye todos los objetos o agentes desarrollados. Uno podría decir que el contexto representa un conjunto donde los agentes no tienen concepto de espacio o relación, pero provee la infraestructura básica para definir una población de objetos y la interacción de los mismos sin suministrar en tiempo de ejecución las implementaciones de dicha interacción. El contexto contiene los agentes a los cuales se les ha idealizado comportamientos, pero los comportamientos no pueden ser realizados hasta que la estructura o métodos se han impuesto sobre ellos.

Un contexto crea un ambiente abstracto en el cual los agentes existen en un punto dado de la simulación y almacena su estado interno. Este estado puede consistir de múltiples tipos de información, características y variables de los agentes. Todos estos comportamientos a su vez definen el estado interno del contexto. Por ejemplo el contexto que representa “la ciudad” puede tener asociado, como lo veremos más adelante, un modelo programado de su suelo, del gobierno, de la población, etc. asociado con este. Estos modelos en conjunto representarían el estado del contexto.

¹ Eclipse: plataforma de desarrollo abierta compuesta por marcos extensibles, herramientas y tiempos de ejecución para la construcción, despliegue y gestión de software. Página Web: <http://www.Eclipse.org>.

² Repast: Recursive Porous Agent Simulation Toolkit: <http://repast.sourceforge.net>.

Definido el contexto los agentes pueden moverse dentro y fuera del mismo, si las circunstancias que rodean al agente en particular cambian. Las acciones de los agentes pueden producir cambios que modifican el estado de otros agentes y contextos. Como resultado, los agentes dentro del contexto están diseñados para cambiar de conductas ya sea sobre la base de su entorno u sobre la base de otros contextos a los cuales pueden migrar.

3.2.2 La proyección malla (grid)

En párrafos anteriores vimos como el contexto de la simulación describe un entorno que incluye varios miembros computacionales (agentes) pero no contiene las relaciones entre estos. Repast usa las proyecciones (por ejemplo; redes, mapas, mallas (grid)) para definir y hacer cumplir las relaciones entre los agentes dentro de un contexto dado.

Los contextos pueden tener una o varias proyecciones asociadas a él, lo que implica que dentro de cada contexto los agentes pueden crear un número arbitrario de relaciones. En nuestro caso de estudio, la proyección implementada es la malla (Grid). Que corresponde a una malla conformada por un número determinado de celdas que representan el suelo urbano y el estado del mismo, dado su uso. Los eventos principales que ocurren en el modelo están asociados con la construcción residencial y comercial y ocurren como producto de la interacción de los agentes. Estos eventos causan cambios de color y forma en la malla; cuando se repiten en un horizonte temporal terminan revelando patrones de crecimiento urbano.

3.2.3 Inicializador

El inicializador es la clase encargada de cargar la simulación, crear los contextos, las proyecciones, e implementar las condiciones y los agentes iniciales del modelo. La clase que hace alusión al inicializador del modelo en Repast debe implementar la clase "ContextBuilder" la cual posee un miembro o método principal donde se deben programar el contexto y la proyección que se va a usar en el modelo. Según lo anterior, para instaurar distintas condiciones iniciales en el modelo, se deben crear distintas clases inicializadores que definan distintas propiedades iniciales para la simulación.

3.2.4 Agente Suelo

El suelo es modelado como un agente que posee atributos y métodos de comportamiento. El suelo en el modelo posee tres estados: suelo rural (color verde), suelo urbanizado (color gris) y suelo protegido (color verde oscuro). Para definir estos estados del agente se hace uso del poder del polimorfismo de Java construyéndose una clase padre llamada Suelo la cual contiene los miembros y atributos principales. Luego se crean las clases hijas que hacen alusión a los distintos estados que heredan o sobrescriben dichos miembros.

El trabajo de Clarke y Wilson (Clarke and Wilson, 1985) fue la base para escoger los atributos del suelo en este modelo. (Clarke and Wilson, 1985) plantean que la distancia viajada al trabajar es una de las variables que más afectan la ubicación residencial. También plantean que, si se conocen la distribución del empleo por grupo de ingreso social (bajo y alto en nuestro modelo), el número de personas por grupo social que trabajan en determinada zona, la asignación de viviendas, la atractividad residencial y comercial de una ubicación particular para un grupo social determinado, el costo de viajar y por último un término que represente los precios del suelo o de las construcciones, puede construirse un modelo de ubicación residencial que revele los patrones reproducidos por los modelos teóricos clásicos y algunos comportamientos reales.

Con base en el argumento anterior, el agente tiene cinco atributos o características que definen la condición del suelo para la construcción y sus medidas son determinantes para la decisión que toman los agentes urbanizadores (que se explican adelante). Estos atributos son: el precio, la densidad, la distancia, el atractivo social para personas de altos ingresos (atractivo SAI) y el atractivo social para personas de bajos ingresos (atractivo SBI). El cambio en estos atributos como veremos más adelante depende del uso del suelo en el espacio y en los alrededores. La definición de cada uno de los atributos se muestra a continuación:

- Precio: atributo que indica el valor económico del espacio.

- Densidad: atributo que indica la cantidad de construcciones bajo un área circulante determinada.
- Distancia: atributo que mide la distancia promedio a todos los centros de trabajo construidos.
- Atractivo SAI: atributo que indica la preferencia de personas de alto poder adquisitivo para habitar en dicho suelo.
- Atractivo SBI: atributo que indica la preferencia de personas de bajo poder adquisitivo para habitar en dicho suelo.

Los métodos de comportamiento principales que tiene este agente suelo son los siguientes:

- Valorizar: En el cuerpo de la clase suelo se crea tres métodos, uno para cuando ocurre un evento de construcción de centros de trabajo, otro para cuando se construye una residencia de alto nivel económico y el último para cuando ocurre una construcción residencial de bajo nivel económico. Estos métodos son encargados de modificar el precio y los atractivos sociales (SAI y SBI) conforme se realiza una construcción de cualquier nivel (cambio en el grid).
- Calcular densidad: Otro método o comportamiento que posee este agente (la clase) es el cálculo del atributo densidad para un espacio determinado. Como la simulación ocurre en pasos discretos de tiempo, en cada paso debe actualizarse la densidad del suelo conforme a los nuevos eventos o construcciones ocurridas.
- Calcular Distancia: Este método actualiza el atributo distancia promedio del suelo a los centros de construcción desarrollados en cada paso discreto de simulación.

Las funciones y expresiones matemáticas de estos métodos se detallan en la sección 3.3.

3.2.5 Agente Gobierno

Este agente es el encargado de verificar las condiciones poblacionales, de empleo y económicas de la ciudad (crecimiento poblacional, personas de distintos grupos sociales, desempleo, etc.) para expedir o no licencias de construcción de diferentes tipos con base en criterios de planeación, que en este caso se simplifican, limitándose a cubrir las necesidades de vivienda y de trabajo con base en el ahorro urbano, pero que pueden modelarse en mayor detalle en trabajos futuros.

Los atributos que posee este agente son:

- **Ahorro:** Este atributo mide el ahorro urbano y la capacidad económica que tiene la ciudad para crecer en infraestructura. Este atributo surge del cálculo de los ahorros individuales de cada agente “persona” (explicado posteriormente) producto de la diferencia entre los ingresos y los gastos del individuo.
- **Número de personas por grupo social:** En el modelo se proponen dos grupos sociales, cada uno correspondiente a bajos y altos ingresos respectivamente. Este atributo mide la cantidad de Personas de cada grupo social y ayuda a estimar niveles económicos y de vida para la ciudad.
- **Personas desempleadas:** Este atributo mide el número de personas de ambos grupos sociales desempleadas.
- **Personas con residencia:** Este atributo mide la cantidad de personas de ambos grupos sociales con residencia.
- **Tipo de licencia de construcción:** Este atributo identifica el tipo de licencia de construcción que fue aprobado por el gobierno. Se clasifica en tres tipos: 1) Licencia para construcción de centro de trabajo. 2) Licencia para construcción de residencia de alto nivel social. 3) Licencia para construcción de residencia de bajo nivel social. Cabe destacar que la construcción de centros de trabajo también se clasifica según su capacidad; alta, media y baja capacidad.

Los métodos de comportamiento del agente gobierno son:

- Ejecutador (@ScheduledMethod en Repast): Este método ejecuta paso a paso de la simulación y le es adherido al gobierno. En este se definen la secuencia de métodos o subrutinas que deben ejecutarse en cada paso de tiempo.
- Natalidad: Este método lleva el control sobre la natalidad y crecimiento de la población por grupo social. También lleva cuentas del número de personas desempleadas en la ciudad.
- Ahorrar: Este método cuantifica el ahorro global de la ciudad producto del ahorro individual de cada persona de grupo social.
- Licenciar: Este es el método encargado de estudiar y aprobar las licencias para la construcción en la ciudad. Tiene la opción de aprobar la construcción de tres tipos distintos de centros de trabajo (con distintos niveles de salario y capacidad), residencias de alto y bajo nivel social.
- Contar residencias: Este método contabiliza las residencias de ambos tipos de nivel social.

Las funciones y expresiones matemáticas de estos métodos se detallan en la sección 3.3.

3.2.6 Agente Constructor

Este agente tiene tres hijos computacionales: el agente constructor de centros de trabajo, el agente constructor de residencias de bajo nivel social, y el agente constructor de residencias de alto nivel social. Con la ayuda del polimorfismo de Java se crean estos tres tipos de agentes urbanizadores que heredan y sobrescriben las variables y métodos del agente constructor padre. En general estos agentes crean la infraestructura de la ciudad

determinada por los centros de trabajo y los lugares donde residen las personas de distinto grupo social.

Este agente posee como atributos los siguientes tres elementos:

- Utilidad: Este atributo es la variable que fija o determina la utilidad que tendrá cualquier tipo de constructor al implantar su edificación en el espacio urbano determinado. La formulación matemática de este atributo será definida más adelante.
- Estado de la construcción: Este atributo es una variable booleana (true - false) que indica si el constructor está implementando una construcción en el paso de tiempo determinado.

Los métodos de comportamientos que posee el agente constructor son los siguientes:

- Obtener Utilidad: Este método calcula el nivel de utilidad de una construcción en un suelo determinado con base a una función matemática y los niveles de preferencias de los urbanizadores (ver formulación).
- Estudiar terreno: Antes de instaurar una construcción los agentes estudian primero el suelo urbano con el objetivo de obtener su mayor utilidad. Este método desarrolla el estudio de las características del suelo y optimiza (el método se ilustra adelante) la utilidad en la construcción.
- Construir: Este método instaura el tipo de construcción en la malla y transforma el suelo urbano en suelo rural.
- Asignar Residencia: Este método de comportamiento solo lo poseen los urbanizadores de residencias, para los cuales se asume realizan la asignación de residencias de ambos grupos sociales a las personas de la ciudad bajo ciertos criterios (ver formulación).

Las funciones y expresiones matemáticas de estos métodos se detallan en la sección 3.3.

3.2.7 Agente Empleador

Este Agente reacciona con el desarrollo de centros de trabajo, seleccionando el personal desempleado y ocupa las vacantes disponibles en los nuevos centros. También se encarga de seleccionar el personal de distintos grupos sociales, asignar salarios, etc.

Este agente posee un único atributo:

- Centro de Trabajo: En este atributo que es un objeto, el agente almacena el centro de trabajo construido para emplear y asignar salario a las personas desempleadas que tiene a disposición.

Y como método principal tiene:

- Asignar empleo: Este método se activa cuando algún centro de trabajo es construido. Su función es ubicar en el centro personas que no posean empleo y asignarles las condiciones de acuerdo con las características del nuevo centro (capacidad, distancia, salario).

3.2.8 Agente Persona

El agente persona define las personas de la ciudad. Este agente general es el padre de dos clases llamadas persona de nivel social bajo y personas de nivel social alto que son las que clasifican y definen el conjunto de personas en distintos niveles sociales en la simulación (bajo y alto).

Como atributos principales poseen:

- Empleado: variable booleana que define si la persona se encuentra empleada o no.
- Residencia: que es un objeto el cual hace alusión a su lugar de vivienda si este la posee.
- Centro de Trabajo: objeto que hace alusión a su lugar de empleo si ya le ha sido asignado.
- Salario: que corresponde al salario anual que recibe el agente persona que depende del tipo de Centro de Trabajo en el que labora.
- Ahorro: que corresponde al ahorro anual que tiene cada individuo según su salario y nivel de gastos.
- Gastos: Es la variable que indica el nivel de gastos del agente persona y depende de su nivel social.
- Distancia: este atributo fija la distancia del centro de trabajo al lugar donde vive el agente.
- Costo de transporte: Es el costo de transporte del agente con base en la distancia que tiene que recorrer para llegar al lugar donde trabaja.

Los métodos de comportamiento de este agente son:

- Ahorrar: que define el ahorro individual de cada persona en cada paso de tiempo. Este ahorro se calcula con la diferencia entre el salario y el costo de transporte (si la persona trabaja) o la diferencia entre el ahorro y el nivel de gastos de la personas (si la persona no trabaja).
- Fijar residencia: este método simula cuando la persona adquiere la residencia y le es asignada (escriturada).

- Fijar costos de transporte: calcula y almacena la distancia desde la residencia donde vive el agente persona hasta donde trabaja. Con base en esta distancia calcula el costo de transporte.

Finalmente cabe resaltar las propiedades que tienen los objetos principales del modelo. Estos son:

Centros de trabajo: Los cuales se clasifican en grande, mediano y pequeño y para cada uno de ellos posee una capacidad y una nomina o nivel salarial particular.

Residencias: Estos objetos simulan las residencias donde viven las personas y se clasifican en residencias de bajo nivel social y alto nivel social. Cada una de ella varía en la capacidad de vivienda para las personas.

3.2.9 Parámetros, Controles y Variables Exógenas

El modelo posee parámetros que pueden modificarse y controles que ajustan la simulación del modelo. La función de los controles de la simulación consiste en cargar (el contexto, la proyección, agentes iniciales), pausar y dar marcha a la simulación. Los parámetros por su parte alteran las condiciones de la simulación y ayudan a la experimentación bajo distintas condiciones de operación, estos son:

- Tasa de crecimiento poblacional personas de alto nivel social: Tasa que determina la creación de nuevas personas de alto nivel económico.
- Tasa de crecimiento poblacional personas de bajo nivel social: Tasa que determina la creación de nuevas personas de bajo nivel económico.
- Preferencias: Estos parámetros determinan las decisiones individuales de cada tipo de constructor. Más adelante en la formulación del modelo se explicará en detalle los diferentes tipos de preferencias.

3.3 Formulación.

Para la formulación de este modelo se adoptan varias de las visiones metodológicas explicadas en el apartado 2.2.1. A continuación se da una breve explicación de cada una

3.3.1 Formulación Económica

A la hora de ofertar cada agente constructor a la hora de ofertar cuenta con información completa de las características del suelo donde piensa instaurar la edificación. La oferta está determinada por la demanda residencial y laboral y por la capacidad de ahorro de la población (ingresos) que a su vez depende del crecimiento poblacional y de la capacidad de dar empleo de la ciudad (número, capacidad y nivel salarial de los centros de trabajo).

La oferta es optimizadora y entre un conjunto de terrenos de suelo rural, elige aquellos que maximizan la utilidad y minimizan el costo de construcción. Para todos los tipos de construcciones y para cada secuencia de tiempo discreto, hay un equilibrio entre la oferta y la demanda lo cual asume que la demanda gasta todos sus ahorros (ingresos menos gastos).

Este esquema económico se adapta a una pieza fundamental de la economía clásica, llamada la ley de Say (Fuentes 2006) que puede ser resumida como “la oferta crea su propia demanda” y significa que los recursos productivos no permanecerán indefinidamente desocupados por falta de demanda agregada.

Esta ley se basa en tres principios fundamentales que se cumplen en el modelo (Fuentes 2006):

- El ahorro, más que el consumo, promueve la acumulación de capital y el crecimiento.
- Los ingresos se gastan o invierten en su totalidad.

- La única función del dinero es la de ser medio de cambio.

En síntesis, en el modelo construido se asume que el valor de la producción se iguala al poder de compra. En cada periodo discreto las personas son demandantes de vivienda y trabajo, del mismo modo (en el mismo tiempo discreto) se asignan (licencias) todas las posibles construcciones tanto de residencias como de centros de trabajo, esto puede causar vacantes y demanda no atendida o en caso contrario la absorción de toda la infraestructura desde que haya el capital humano y el ahorro suficiente.

En el modelo, los centros comerciales son claves como en las formulaciones planteadas por (Von Thunen 1826) y (Anas y Kim 1996), pues estos son centros de actividad económica, y afectan significativamente (en mayor proporción que la otra infraestructura) el valor del suelo en los alrededores. La construcción de centros de trabajo genera una mayor competitividad en los sectores de la ciudad por la interacción de actividades económicas ocurridas allí y el aumento considerable de la circulación de personas. El modelo es definido poli-céntrico donde al inicio se determinan algunas residencias y un centro de producción fijo, pero en el transcurso de la simulación ocurren futuras ubicaciones que surgen a partir de procesos interdependientes y endógenos.

3.3.2 Decisión del agente constructor.

La decisión de los agentes urbanizadores de implementar una construcción es gobernada por la aleatoriedad y por las funciones de utilidad que cada agente posee. Estas funciones, representan la utilidad de los agentes o el beneficio que el constructor tiene al edificar su tipo de infraestructura en una determinada posición, esta varía según las condiciones o atributos del suelo específico seleccionado y se calcula a partir de la función Cobb-Douglas (Herden, Knoche y otros, 1999). Cada agente, aleatoriamente escoge un conjunto de posibles ubicaciones de suelo rural y a cada una le evalúa su utilidad. De este conjunto aleatorio escoge la mejor opción, en términos de máxima utilidad y mínimo precio.

En nuestro modelo se modela la utilidad del constructor con la función Cobb-Douglas y en función de la densidad, preferencia social y distancia promedio a los centros de

producción. Estos atributos del suelo y tipo de función de utilidad han sido usados en múltiples modelos de simulación basada en agentes para representar dinámicas urbanas (Batty, 2005) (Clarke and Wilson, 1985) (Felsen y Wilensky 2007) (Wilensky 1999), y se ajustan a muchos planteamientos intuitivos de ocupación urbana observados en nuestra ciudad (Medellín, Colombia).

Sin importar el tipo de constructor, la forma de las preferencias depende de los siguientes factores:

- Factor de densidad (dens): la densidad urbana se relaciona con la eficiencia de los procesos, la velocidad en la transmisión de la información, el aumento en el flujo de las relaciones sociales, y el aumento en las fuerzas productivas (Camagni. 2005). El crecimiento de esta variable reduce significativamente el bienestar de la población con altos índices de congestión, contaminación e incremento en el valor de tasas e impuestos (Clarke and Wilson, 1985). La densidad aumenta significativamente la utilidad de los urbanizadores, pero puede reducir el bienestar de la población.
- Factor promedio de distancia a los centros de trabajo (dist): representa el valor económico que se le da al suelo (y a cualquier construcción) por estar cerca de un centro productivo (Batty, 2005). Este atributo es significativo en la estimación de los costos de transporte de las personas que se desplazan desde su lugar de residencia hacia los centros de trabajo.
- Factor de preferencia social (sbi y sai): representa el hecho de que las personas buscan ubicarse acorde con sus preferencias sociales (Clarke and Wilson, 1985). De esta manera, cada unidad de suelo tendrá una valoración de la preferencia social distinta según la clase social que la rodee. Las residencias de alto nivel social, aumentan el índice de preferencia social alta (sai) en su vecindario, similarmente, las residencias de bajo nivel aumentan el índice de preferencia social baja (sbi) en los suelos cercanos. Los centros comerciales y de trabajo por su parte también aumentan las preferencias de clases sociales altas circundantes dado el beneficio económico que esto conlleva.

A continuación se describen las distintas funciones de utilidad tenidas en cuenta en la simulación, estas son similares a las funciones adoptadas por (Felsen y Wilensky 2007) en su modelo de disparidad económica. Las funciones dependen de los factores explicados anteriormente y cada factor posee un peso relativo (nivel de preferencia) que define la importancia de este factor en la simulación. Los pesos toman rangos de valores que varían de 0 a 1. Valores de 0 y 1 indican el menor nivel y mayor nivel de preferencia respectivamente.

- Función de utilidad para el agente constructor de residencias

Las funciones de utilidad para los constructores de residencias de bajo y alto nivel social están definidas por las siguientes ecuaciones (3.1) y (3.2):

$$U_b(\text{dist}, \text{dens}, \text{ps}, \alpha_b, \beta_b, \gamma_b) = (K/\text{dist})^{\alpha_b} \cdot (\text{dens})^{\beta_b} \cdot \text{sbi}^{\gamma_b} \quad (3.1)$$

$$U_a(\text{dist}, \text{dens}, \text{ps}, \alpha_a, \beta_a, \gamma_a) = (K/\text{dist})^{\alpha_a} \cdot (\text{dens})^{\beta_a} \cdot \text{sai}^{\gamma_a} \quad (3.2)$$

Donde U_b es la utilidad del constructor de residencias de bajo nivel económico y U_a es la utilidad del constructor de alto nivel económico o de estratos altos, K es una constante arbitraria, dist es el atributo del suelo que indica la distancia promedio a los centros de trabajo. Este atributo es inversamente proporcional en la función ya que una distancia promedio alta repercute negativamente en la utilidad del constructor, dens es el atributo que indica la densidad que posee el suelo en esa posición y es directamente proporcional indicando que el constructor busca lugares con infraestructura y servicios. sbi Es el atributo del suelo que indica la preferencia social que poseen las personas de bajo nivel social que habitarán la residencia, sai es el indicador de la preferencia social para las personas de alto nivel social. α_b, β_b y γ_b Son las distintas preferencias que posee el constructor de residencias de bajo nivel social para los distintos factores y α_a, β_a y γ_a son las del constructor de residencias de alto nivel social o estrato alto. Los parámetros de preferencias de este y de los otros agentes se ajustan al principio de la simulación, y se definen en un rango numérico de 0 a 1.

Note que por la forma de la funciones. La toma decisiones de ambos constructores de residencias estará guiada a partir del valor de esta función junto con el valor de los parámetros de preferencia que el experimentador elija.

- Función de utilidad para el agente constructor de centros de trabajo

La función de utilidad para el agente constructor de centros de trabajo también tiene la forma cobb-douglas y está definida con la ecuación (3.3):

$$U_c(\text{dist}, \text{dens}, \text{sai}, \alpha_c, \beta_c, \gamma_c) = (K/\text{dist})^{\alpha_a} \cdot (\text{dens})^{\beta_b} \cdot \text{sai}^{\gamma_c} \quad (3.3)$$

Donde U_c es la utilidad del constructor de centros de trabajo. La función muestra que al constructor de centros de trabajo le es más útil construir en lugares donde haya mayor densidad dens , por las ventajas que esto trae para el comercio, le es útil estar cerca de otros centros de trabajo, dist (inversamente proporcional) y tener una preferencia social alta, sai . α_c, β_c y γ_c Son las distintas preferencias que posee el constructor de centros comerciales o de trabajo para los distintos factores. El peso de los factores del constructor de centros de trabajo cambia con respecto a las de las funciones de constructores residenciales de acuerdo a la estrategia que el experimentador usa para representar distintos patrones en la ciudad.

3.3.3 Formulación Dinámica

El sistema económico planteado se convierte en un sistema dinámico cuando ocurren los siguientes eventos en cada paso de tiempo de simulación Δt :

- Aumenta la demanda a partir del crecimiento poblacional.
- Se ocupa el suelo con determinadas construcciones.
- Se actualizan las variables económicas (ahorro, ingresos, gastos, costos de transporte).
- Cambian las características del suelo (densidad, distancia y preferencia social).

- Cambio el precio del suelo.

Para que se cumpla lo anterior, se plantea un algoritmo que se ejecuta en cada Δt y que adopta la idea de vecindario (Batty 2005), definido como aquellos sitios que son inmediatamente influenciados si algún sitio vecino cambia su actividad. Esta noción le da la dinámica espacial al modelo.

La figura 6 detalla el algoritmo de la simulación. Al comenzar se definen las condiciones iniciales del modelo: las tasas de crecimiento poblacional, las preferencias de los agentes y el número de agentes que se instancian al comienzo de la simulación con su respectiva ubicación. Luego se activan los comandos de la simulación que cargan el mundo virtual, configurando los agentes iniciales con sus atributos y métodos iniciales y crean el contexto y la proyección de la simulación donde van a posar y a representarse los agentes.

Posteriormente se ejecuta el método de crecimiento poblacional, el cual crea e ingresa agentes tipo persona (de ambos grupos sociales) al modelo acorde con el parámetro de crecimiento poblacional elegido por el experimentador. En este paso se define la demanda residencial y laboral. En seguida se activa el método que cuantifica el nivel de ingresos o el ahorro de la ciudad. Este método suma todos los ahorros individuales de los agentes persona y obtiene un indicador económico de la ciudad que servirá posteriormente como señal para la construcción.

EL procedimiento que sigue pertenece al agente Gobierno y es el encargado de aprobar las licencias para la construcción tanto de residencias (de alto y bajo nivel social) como de los distintos centros de trabajo (con distintas capacidades y salarios). La asignación de licencias está dada por la demanda (residencial y laboral), necesidad de empleo y nivel económico urbano medido con el ahorro.

Si por los criterios anteriores (demanda y nivel económico) la ciudad no es apta para asignar licencias para la construcción, el algoritmo ejecuta de nuevo el crecimiento poblacional para realimentar la demanda y el nivel de ingresos. Si por el contrario una licencia (de cualquier tipo) es aprobada, se activa el método de estudio de características

del suelo por parte del agente constructor encargado de ejecutar dicha licencia. Este método escoge aleatoriamente un conjunto de posibles ubicaciones en la proyección o malla (suelos con distintas características y atributos) y de estas evalúa la utilidad para el constructor de edificar allí acorde con la función de Cobb-Douglas y las preferencias seleccionadas. Del conjunto seleccionado escoge el espacio o suelo con el mínimo precio y en el cual obtenga la mayor utilidad.

Identificado el suelo para construir, se activa el método de construcción, el cual implementa la infraestructura en el espacio determinado por el método anterior, pintando en la proyección o grid el tipo específico de construcción determinada por la licencia. Al instante son activados los métodos que asignan vivienda y empleo a la población, y se modifican los atributos del suelo actual y del vecindario.

Los métodos anteriores implican una actualización de todos los atributos de los agentes. Como el ahorro urbano, la población, el nivel de empleo, los salarios, los lugares de trabajo, el lugar de residencia, los costos de transporte, los gastos, el ahorro individual, etc. Luego el algoritmo regresa al método del Gobierno que licencia nuevas construcciones permitiendo en este caso varias implementaciones por paso de tiempo. La repetición secuencial de este algoritmo genera patrones globales de comportamiento en el crecimiento, cambio y forma del suelo urbano. En el capítulo siguiente se hace la validación y el análisis de resultados del modelo construido.

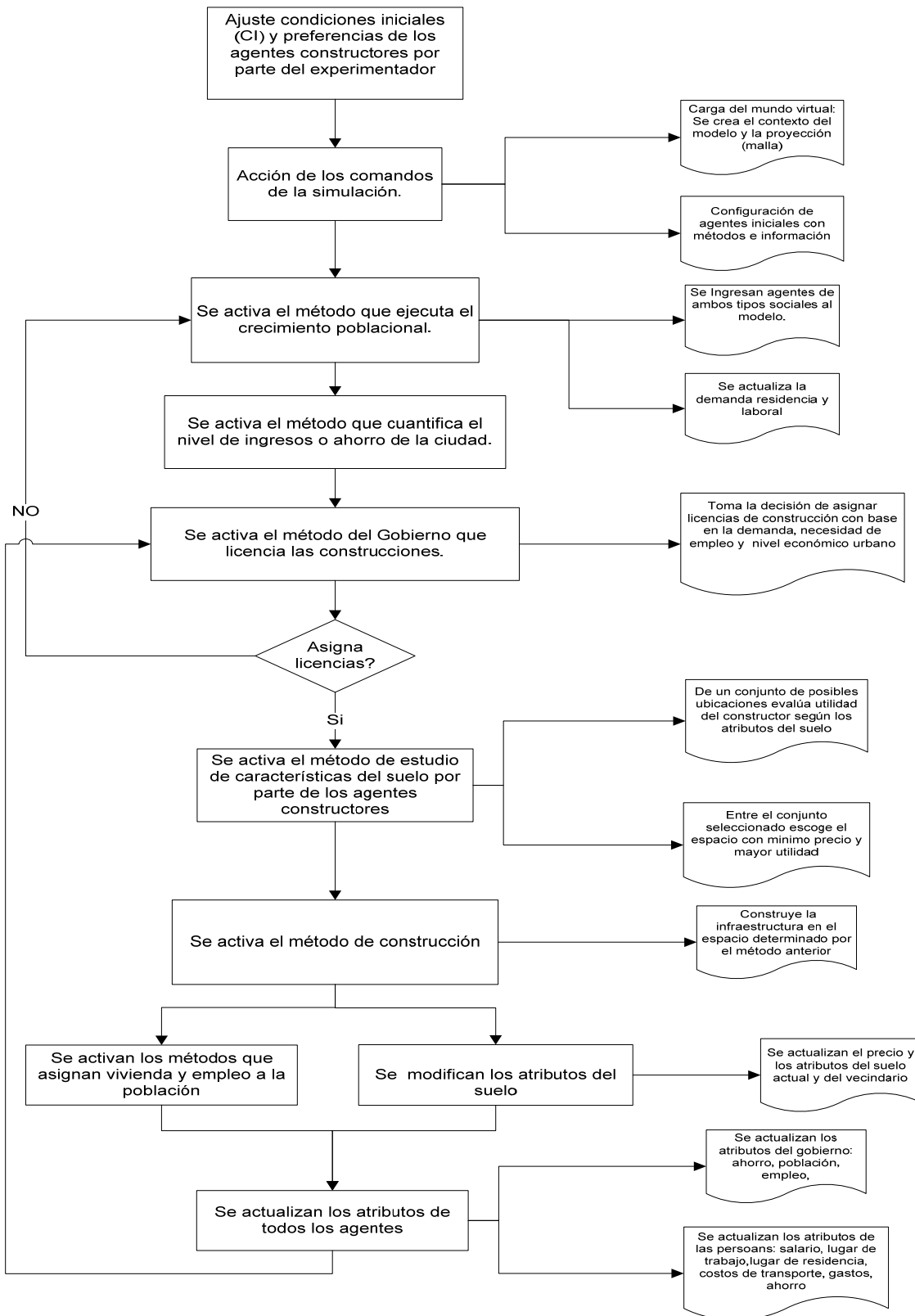


Figura 4. Algoritmo de simulación

4. Resultados y validación del modelo

En este capítulo se valida la estructura y el comportamiento del modelo a partir de múltiples simulaciones con cambios en los parámetros y condiciones iniciales del modelo.

4.1 Resultados del modelo

La principal funcionalidad del modelo construido es servir como un laboratorio de experimentación para determinar el cambio en el uso del suelo urbano y realizar análisis de sostenibilidad con relación a la evolución urbana simulada. En esta apartado se desarrollan varias corridas del modelo, con distintas condiciones iniciales y variación en los parámetros diseñados.

Las simulaciones ocurren en tiempos discretos de simulación que representan los años de crecimiento urbano. Todas las simulaciones inician en tiempo cero, indicando una época primaria o inicial donde la ciudad comienza a desarrollarse. El tiempo final de simulación se establece en 400 años o antes si la urbanización agota el espacio rural.

En las simulaciones mostradas a continuación el tiempo de simulación es de unos 120 años pues se usa una malla pequeña.

4.1.1 Escenario 1. Caso base

Las condiciones iniciales de la simulación del caso base son:

- La ciudad inicia con dos centros de trabajo pequeños o de baja capacidad.
- Se establecen inicialmente 4 residencias de bajo nivel social.
- Se establecen inicialmente 7 residencias de alto nivel social.
- 20 agentes persona de bajo nivel social comienzan en la simulación.
- 20 agentes persona de alto nivel social comienzan en la simulación.

- El 15% del suelo existente es determinado como protegido y distribuido aleatoriamente en todo el espacio de simulación.

Adicionalmente y para la primera corrida (la cual servirá como base de comparación con otros escenarios), se asume principalmente los siguientes supuestos:

- Se considera un crecimiento poblacional igual para ambas niveles sociales.
- Los centros de trabajo emplean el mismo número de personas de nivel social alto y bajo.
- Las preferencias de los agentes urbanizadores son las mismas, sin importar su clase.

La tabla 2 muestra el valor de los parámetros modelados,

Tabla 2. Condiciones iniciales de modelación. Escenario 1.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
α_a	0.4	β_a	0.3	γ_a	0.3
α_b	0.4	β_b	0.3	γ_b	0.3
α_c	0.4	β_c	0.3	γ_c	0.3
Tasa-Crecimiento- Personas-SAI	10%	Tasa-Crecimiento- Personas-SBI	10%	Tiempo Final	400 Años

El valor de los parámetros de la tabla 2, indica que todos los agentes urbanizadores tienen preferencias iguales por las características del suelo. Y esto conllevará a una alta competencia por las zonas que se están valorizando y sobre las cuales se está implementando de manera repetida el crecimiento urbano y la infraestructura comercial.

Las figuras 5 a 8 muestran varios pasos de la evolución del prototipo de ciudad bajo las condiciones de la tabla 2. Los colores que se observan en los resultados de la simulación

están dados por: el color verde claro que corresponde al suelo protegido. El color verde oscuro que corresponde al suelo rural y el color gris que corresponde al suelo urbanizado. Asimismo el círculo de color blanco representa las residencias de gran valor económico y el círculo de color rojo representa las residencias con un bajo valor económico. Los centros de trabajo son en su orden; estrellas amarillas para graficar los de alta capacidad, estrellas azules para representar los de mediana capacidad, y estrellas moradas para representar los de pequeña capacidad.

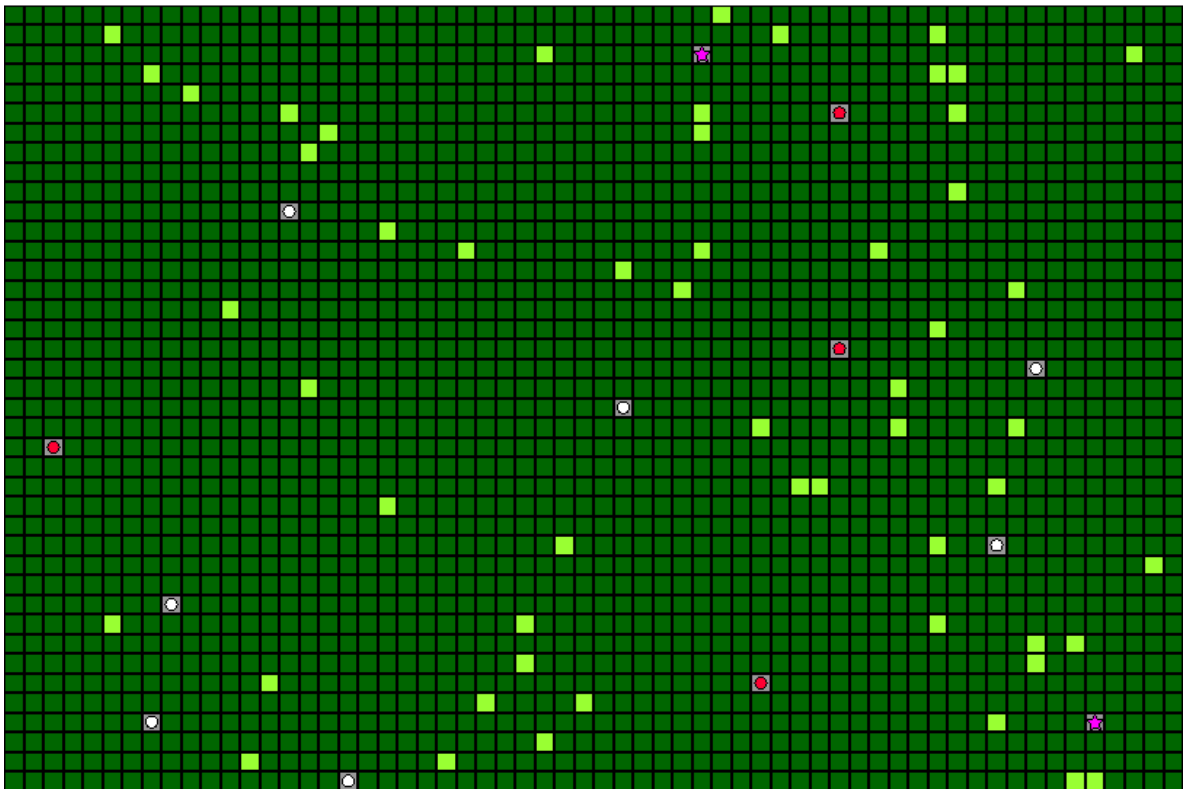


Figura 5. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 1.

- | | | |
|---|---|--|
|  Suelo Protegido |  Suelo Urbanizado Clase Alta |  Suelo Urbanizado Centro de Trabajo Pequeño |
|  Suelo Rural |  Suelo Urbanizado Clase Baja |  Suelo Urbanizado Centro de Trabajo Mediano |
| | |  Suelo Urbanizado Centro de Trabajo Grande |

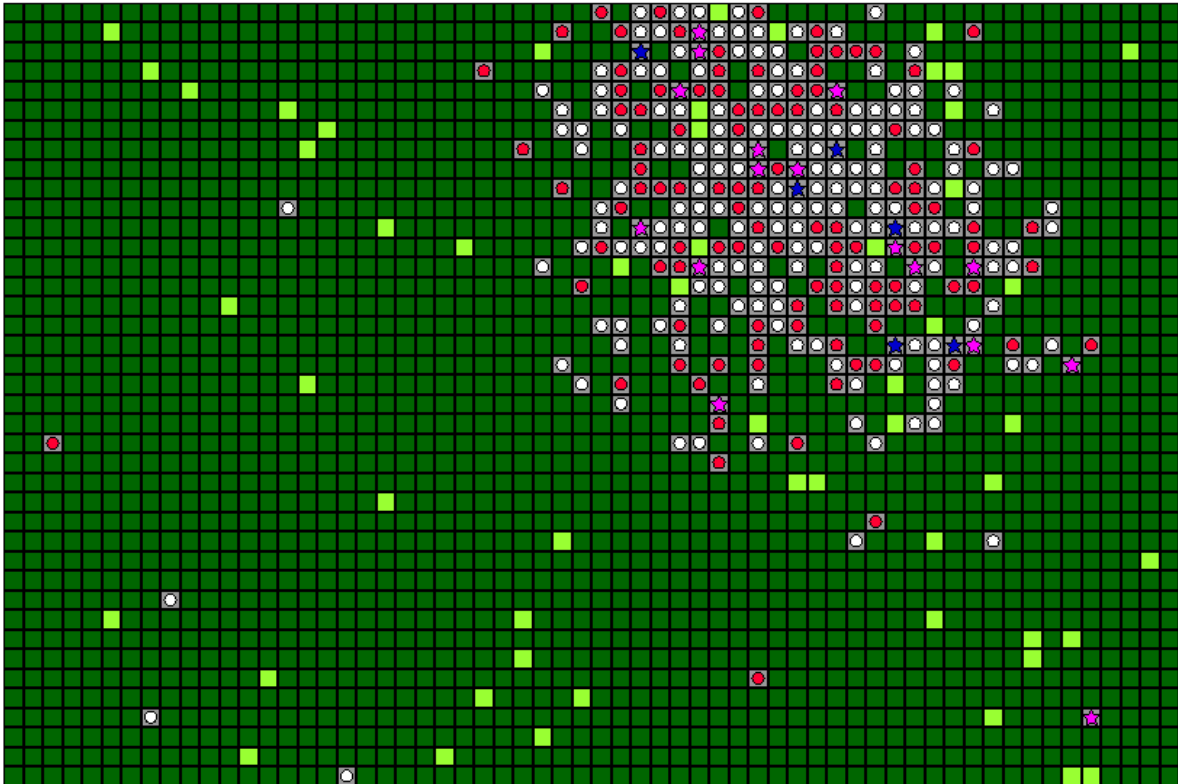


Figura 6. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 2.

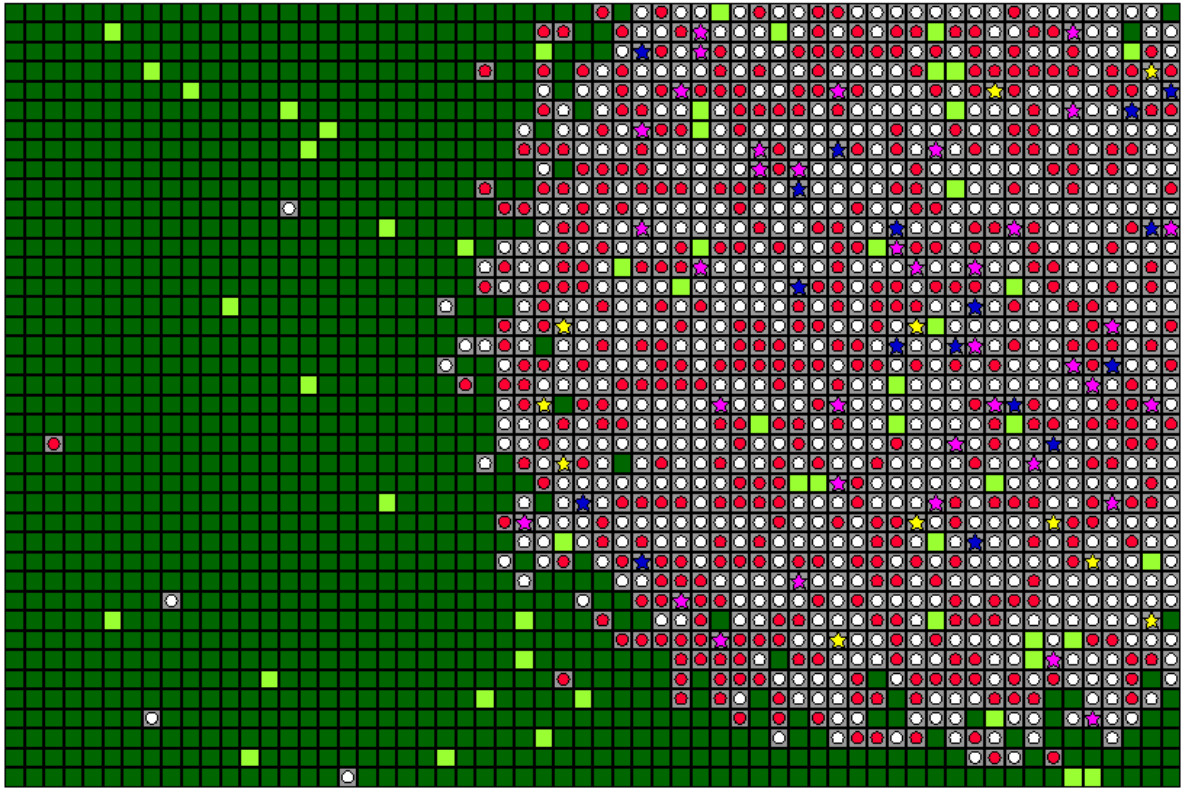


Figura 7. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 3.

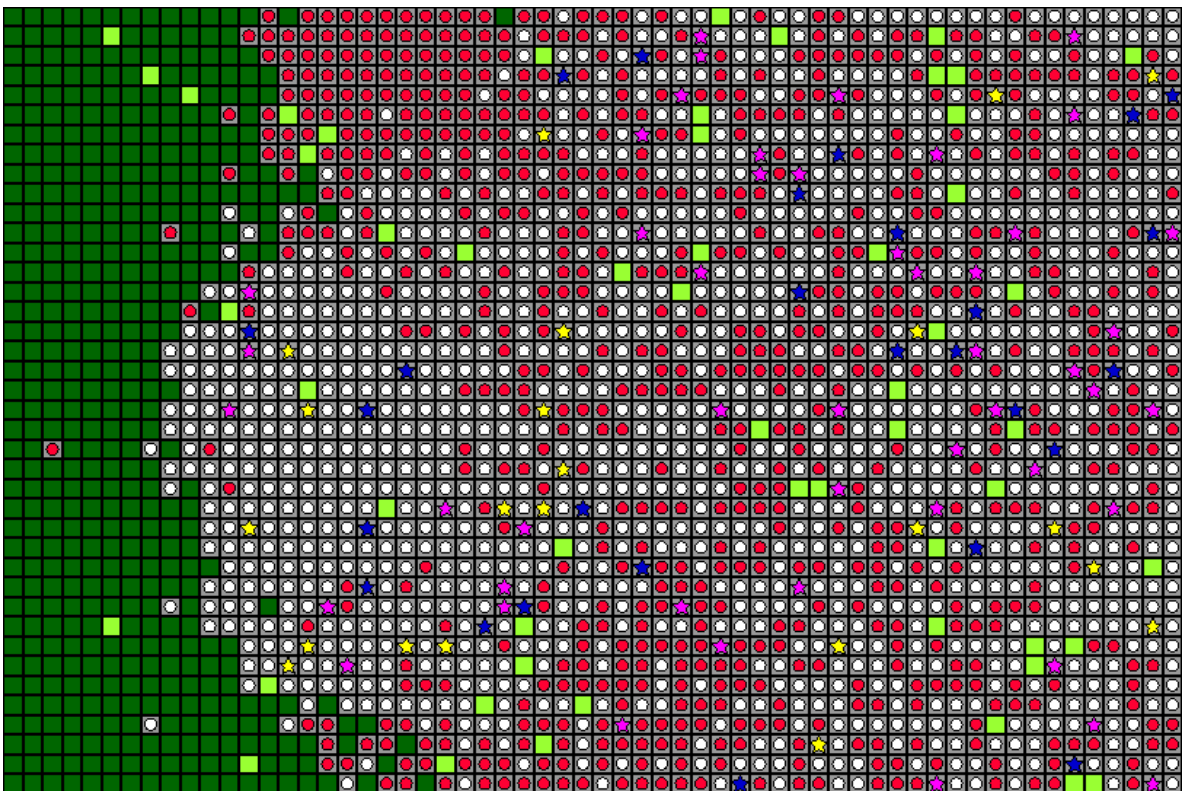


Figura 8. Resultados de simulación. Escenario 1. Paso 4.

Los resultados muestran cómo la ciudad crece sin un patrón particular y se observa la mezcla de ambos grupos sociales en todo el territorio. También se observa, como la ciudad se desarrolla con relación al crecimiento comercial que marca la competencia por el suelo circundante. Este tipo de patrón de crecimiento urbano era de esperarse dada la similitud en los parámetros de preferencia, lo que hace que los agentes en su algoritmo de búsqueda tengan preferencias de construcción parecidas y cercanas a las zonas más densas y comerciales (con mejor infraestructura) de la ciudad. Los constructores de residencias de alto y bajo nivel social compiten por el suelo más cercano a los centros de trabajo. La distribución de dichas residencias es uniforme, están mezcladas y no hay segregación.

4.1.2 Escenario 2: comportamiento real.

A diferencia del escenario base, en el escenario 2 los urbanizadores tienen preferencias ajustadas al comportamiento real (intuitivo) observado en este sector.

La tabla 3 muestra el valor de los parámetros modelados. En esta ocasión, el agente constructor de centros de trabajo escoge preferencias iguales para los atributos distancia y densidad y le da un mayor valor al indicador social y prefiere construir en suelos de alto estrato social. Las figuras 9 a 12 ilustran varios pasos de la evolución del prototipo de ciudad bajo estas condiciones.

Tabla 3. Condiciones iniciales de modelación. Escenario 2.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
α_a	0.3	β_a	0.3	γ_a	0.4
α_b	0.5	β_b	0.3	γ_b	0.2
α_c	0.2	β_c	0.3	γ_c	0.5
Tasa-Crecimiento- Personas-SAI	10%	Tasa-Crecimiento- Personas-SBI	10%	Tiempo Final	400 Años

Los resultados muestran una ciudad más segregada que la del escenario base. Se observa la aparición de la infraestructura comercial de la ciudad formada alrededor de las casas de alto estrato social. Note como cambia la forma urbana con tan solo una leve modificación de las preferencias de los urbanizadores. Esto indica que la toma de

decisiones de estos agentes tiene una gran influencia en el cambio del uso del suelo urbano.

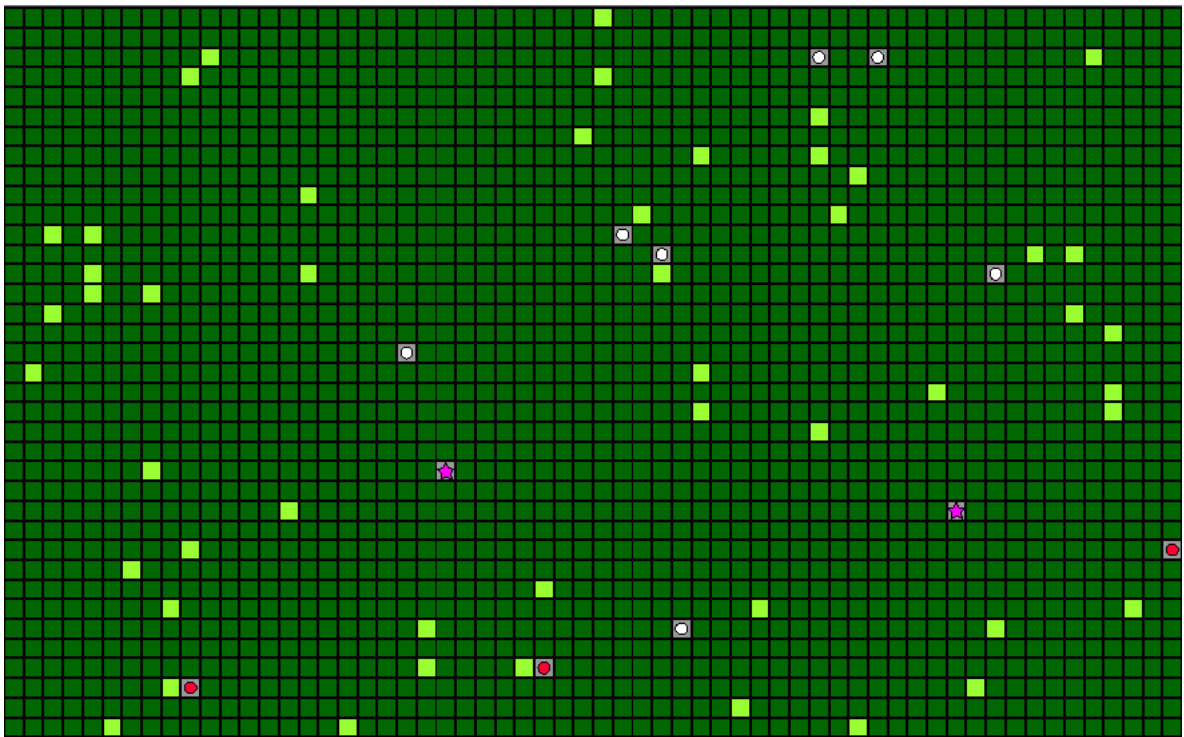


Figura 9. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 1.

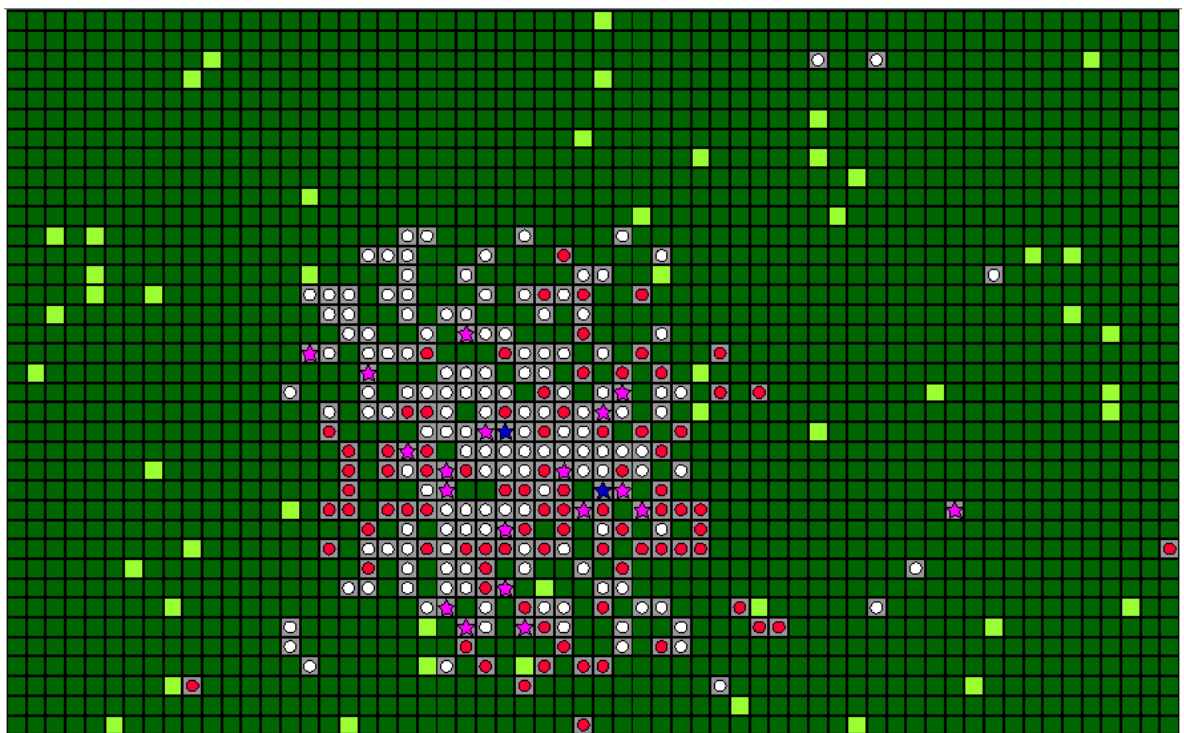


Figura 10. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 2.

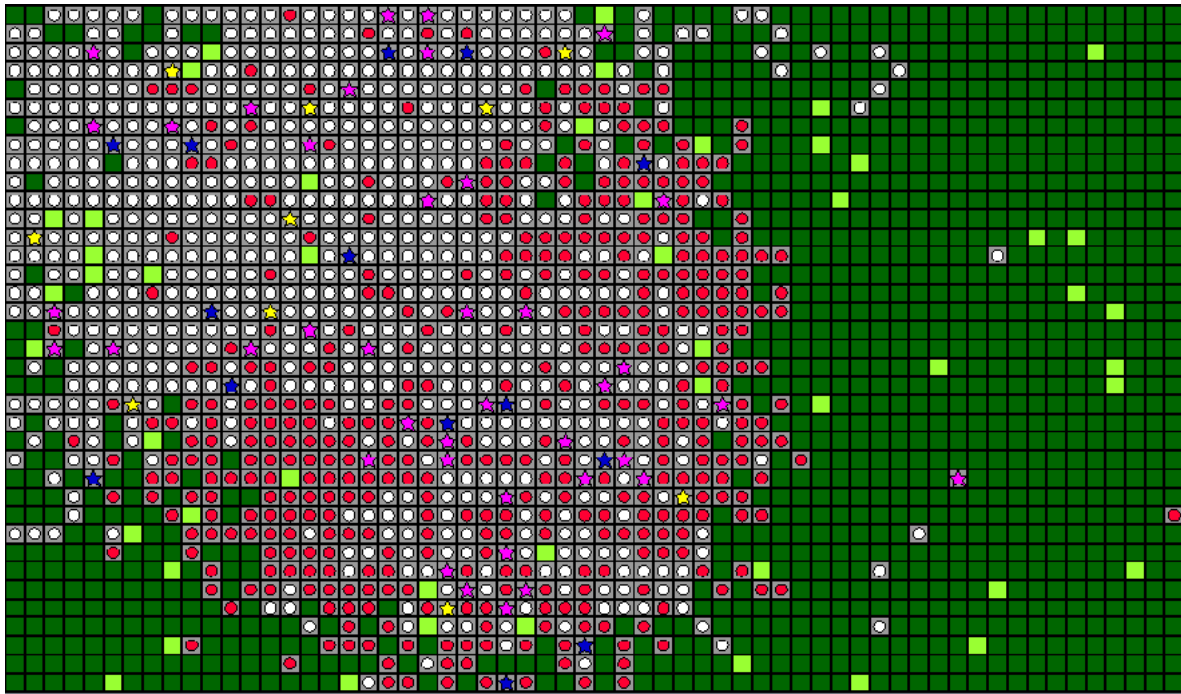


Figura 11. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 3.

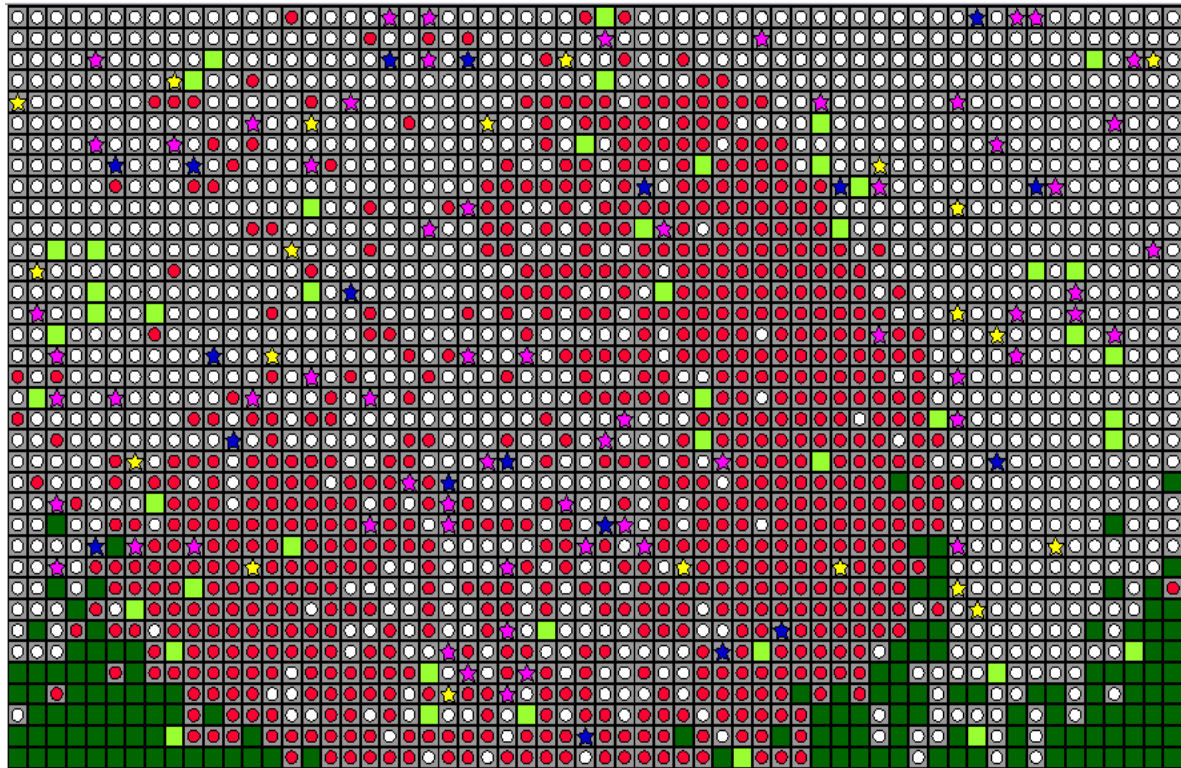


Figura 12. Resultados de simulación. Escenario 2. Paso 4.

4.1.3 Escenario 3: caso de crecimiento poblacional alto en estrato bajo

Este nuevo escenario permite descubrir como el crecimiento poblacional afecta el cambio en la forma urbana y la sostenibilidad a largo plazo de la ciudad. Las preferencias son las mismas del primer escenario (tabla 2) pero aumenta la tasa de crecimiento poblacional de las personas de bajos ingresos, la cual es ampliada en un 2% y en la disminución de la tasa de crecimiento de las personas de alto nivel social la cual es reducida en un 4 % como se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Condiciones iniciales de modelación. Escenario 3.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
α_a	0.4	β_a	0.3	γ_a	0.3
α_b	0.4	β_b	0.3	γ_b	0.3
α_c	0.4	β_c	0.3	γ_c	0.3
Tasa-Crecimiento- Personas-SAI	6%	Tasa-Crecimiento- Personas-SBI	12%	Tiempo Final	400 Años

Las figuras 13 a 16 muestran los resultados de la evolución urbana con el cambio en las tasas de crecimiento poblacional. Como se observa la forma urbana cambia con relación al escenario base, ya que es necesario construir más residencias de bajo nivel económico para suplir la alta demanda de residencias de bajo nivel social.

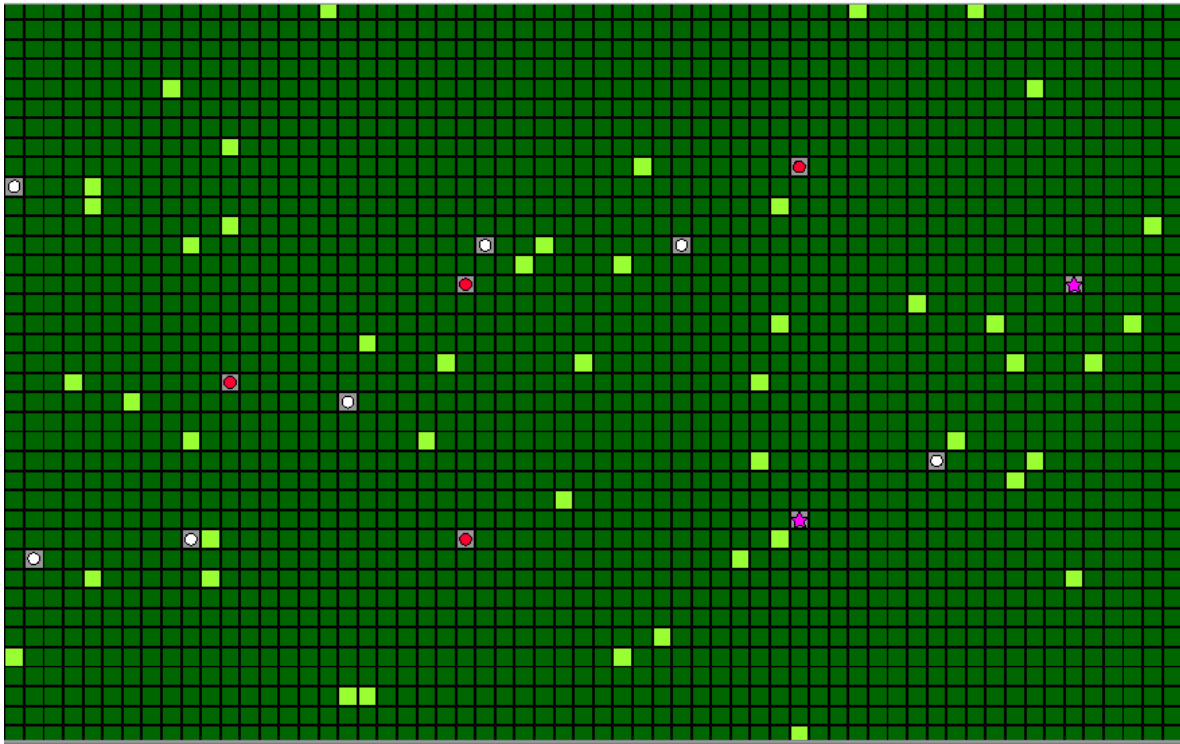


Figura 13. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 1.

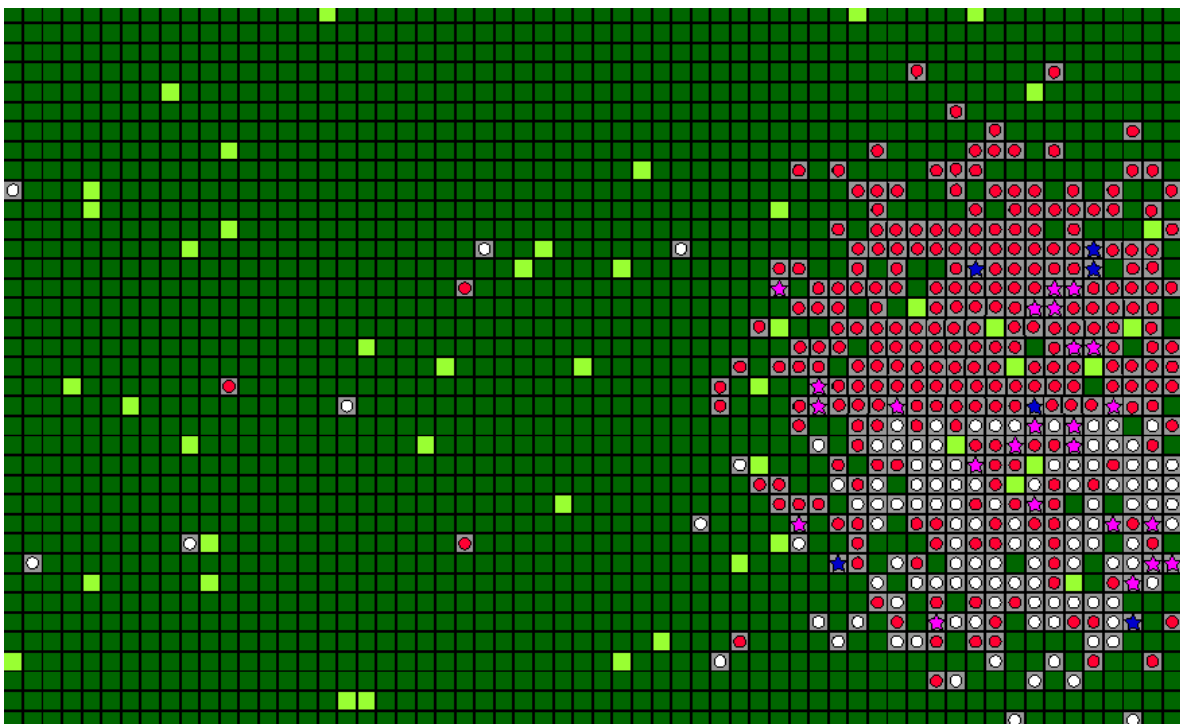


Figura 14. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 2.

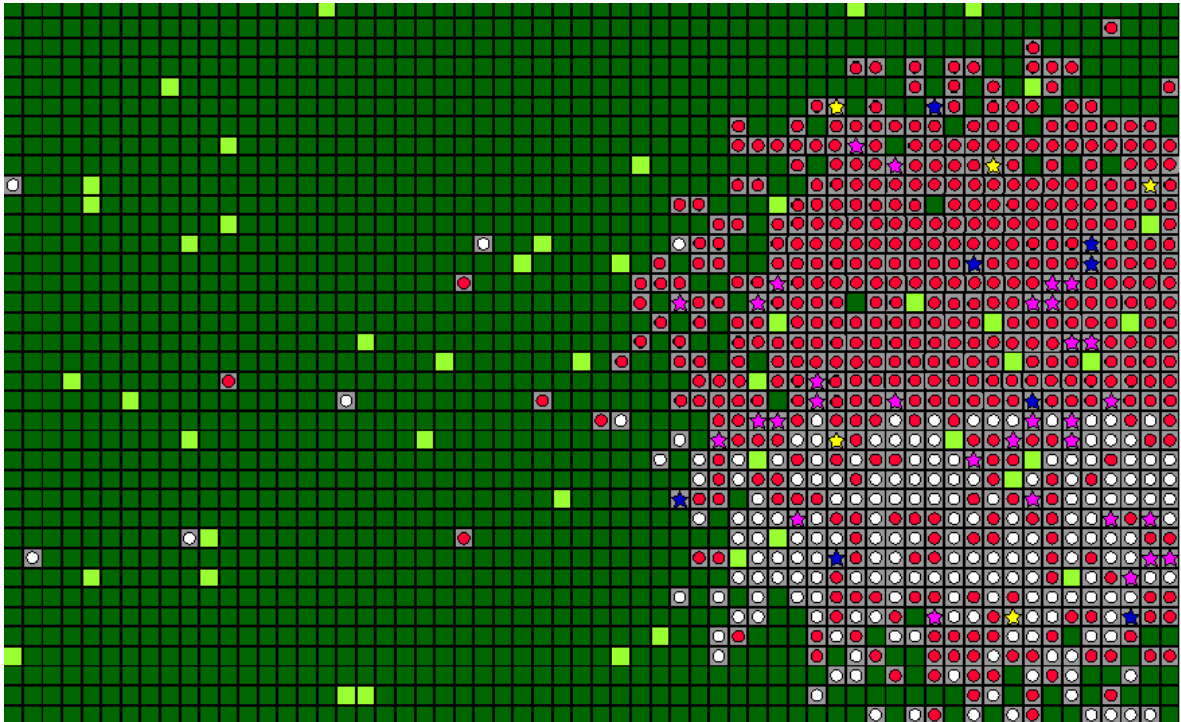


Figura 15. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 3.

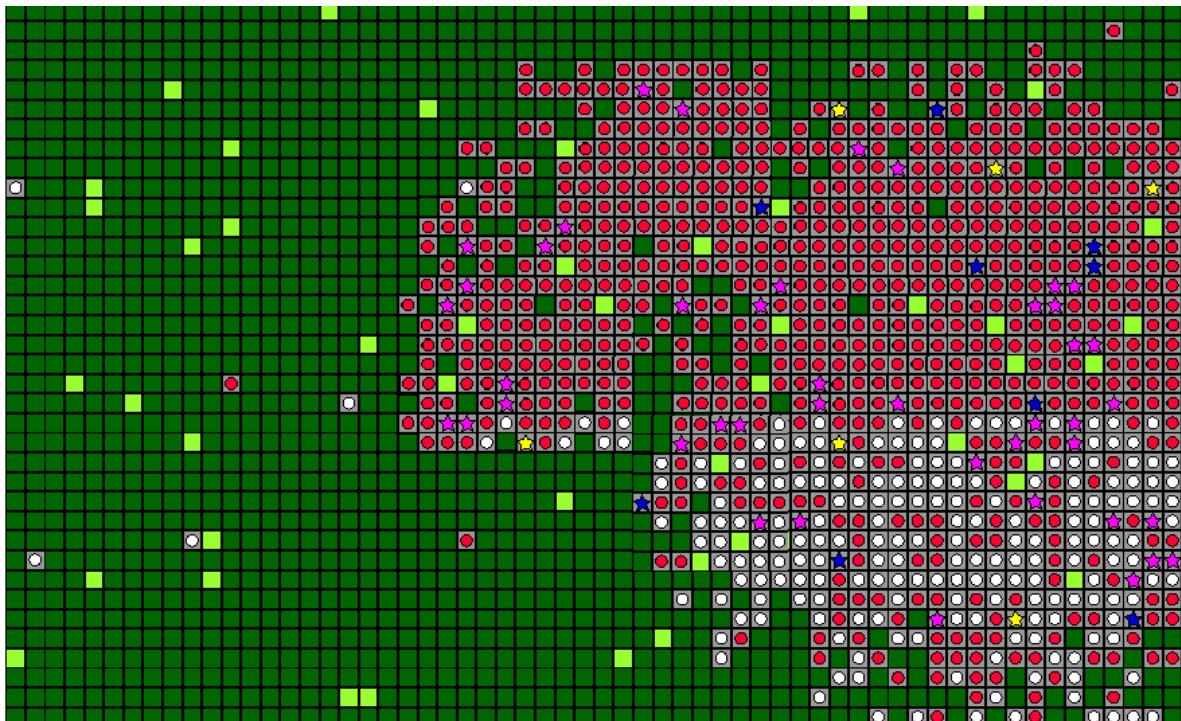


Figura 16. Resultados de simulación. Escenario 3. Paso 4.

Los resultados de las simulaciones anteriores ilustran como el modelo genera distintos patrones y comportamientos coherentes acorde con las preferencias elegidas por el experimentador y de los parámetros de diseño. El siguiente apartado discute algunos escenarios estratégicos que permiten validar el modelo.

4.2 Validación del modelo

Los modelos basados en agentes son difíciles de validar porque en muchas ocasiones se pierde la relación entre los datos empíricos y reales con los resultados de los modelos y esta es una de sus principales debilidades de su modelación. En este capítulo se usa la estrategia de validación planteada por (Barlas 1996) para validar modelos de sistemas.

Barlas plantea un esquema de validación de dos pasos que intenta:

- Validar directamente la estructura.
- Validar el comportamiento (realizar pruebas de comportamiento orientadas a la estructura)

A continuación se realiza el estudio de validación con la determinación de estos pasos.

4.2.1 Validación de las suposiciones del modelo

Los conceptos económicos que sustentan el modelo, sirven como base principal, para validar muchos comportamientos. El análisis económico adoptado en el modelo se plantea en detalle en la sección 4.3.1 y se ajusta a un modelo de mercado donde la oferta está completamente determinada por la demanda residencial y laboral y que a su vez depende del crecimiento poblacional lineal. Las decisiones de consumo en el modelo, son perfectas y se ajustan siempre a la oferta. Por esta razón en cada secuencia de tiempo discreto el modelo busca un equilibrio entre la oferta y la demanda para todos los tipos de construcciones.

Como se mencionó anteriormente, el esquema económico de nuestro modelo se basa en la ley de Say y las edificaciones no permanecen vacantes indefinidamente por falta de demanda.

Los tres principios fundamentales de la ley de Say (Fuentes 2006), se cumplen en el modelo, en particular:

- El ahorro, más que el consumo, promueve la acumulación de capital y el crecimiento: el ahorro económico proveniente de los ingresos laborales se invierte en infraestructura (capital).
- Los ingresos se gastan o invierten en su totalidad: Todo el dinero proveniente de la fuerza de trabajo es invertido en las construcciones ya que no existe otro mercado en el modelo.
- La única función del dinero es la de ser medio de cambio. La única función del dinero en el modelo es el intercambio por bienes raíces.

En algunas secuencias temporales existen excesos de oferta y de demanda en el modelo, aunque esto no hace parte del modelo de mercado perfecto si es explicado por otros modelos de mercado donde hay desequilibrios. .

- Validación dinámica

Para validar dinámicamente el modelo, se comparan las simulaciones con la explicación que tienen autores como (Forrester 1986) y (Camagni 2005) de la dinámica del desarrollo urbano. De acuerdo con Camagni, el desarrollo urbano aumenta la eficiencia de los procesos de urbanización y acelera la construcción de infraestructura. Además, con el desarrollo urbano aumentan los flujos y velocidad de transmisión de la información y el número de relaciones sociales que fortalecen las fuerzas productivas. El aumento de estas variables aumenta el capital económico, generándose una realimentación positiva en el desarrollo, que tiene como base principal la disponibilidad de capital para nuevas inversiones. Sin embargo, el crecimiento de la ciudad, aumenta su atractivo social, lo que conduce a aumentar el crecimiento de población, produciendo una dinámica negativa, que proviene del uso excesivo de los recursos y del agotamiento en la disponibilidad de los mismos.

Forrester plantea que el incremento en la ocupación del suelo, aumenta el costo de vida por los impuestos y tasas urbanas, el aumento en la densidad y congestión afectan el bienestar de la sociedad y el tamaño de la ciudad crece y las distancias y costos de

transporte se hacen cada vez más altos. Estas dinámicas hacen que la disponibilidad de suelo se convierta en un limitante crucial para el desarrollo y para las actividades productivas.

Para validar esta estructura dinámica se hará uso del modelo construido y se evaluará el comportamiento en un límite del horizonte temporal para estudiar si el modelo representa adecuadamente la hipótesis descrita anteriormente. La simulación de la figura 17 muestra un escenario de una ciudad con las condiciones de la tabla 5 que ha evolucionado hasta el tiempo límite.

Tabla 5. Condiciones iniciales de modelación. Validación dinámica.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
α_a	0.3	β_a	0.1	γ_a	0.6
α_b	0.2	β_b	0.2	γ_b	0.6
α_c	0.1	β_c	0.3	γ_c	0.6
Tasa-Crecimiento- Personas-SAI	15%	Tasa-Crecimiento- Personas-SBI	8%	Tiempo Final	400 Años

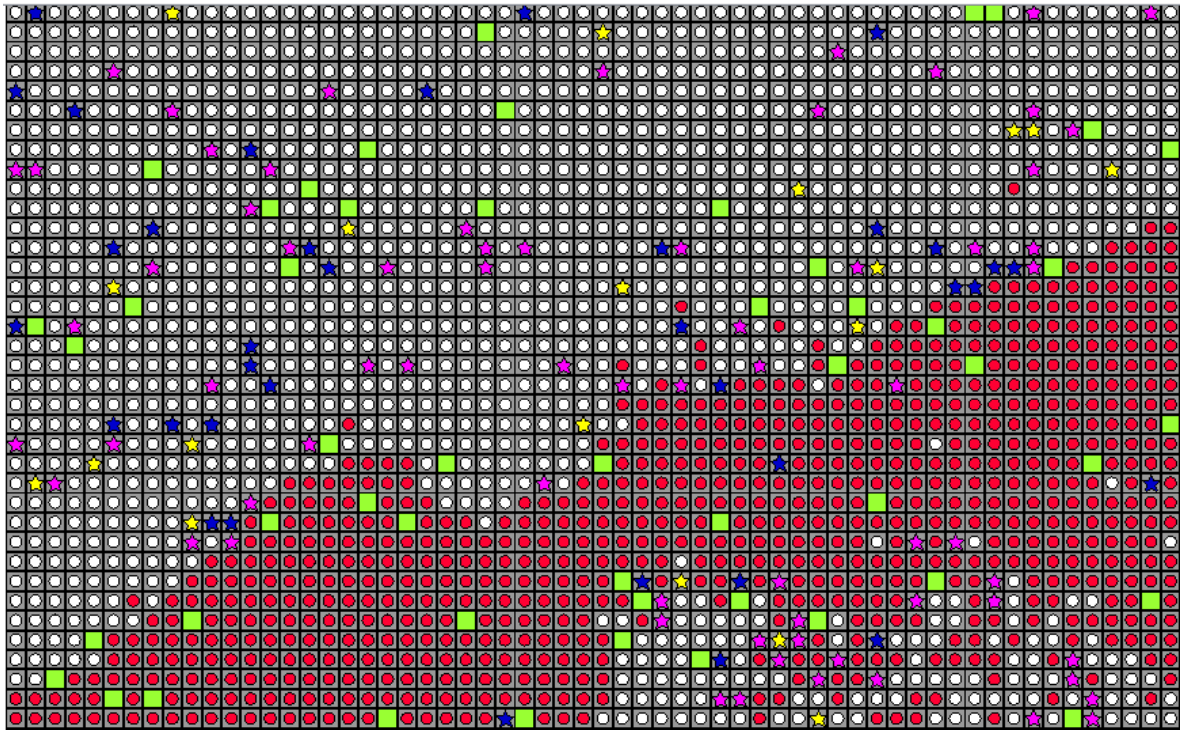


Figura 17. Comportamiento del modelo en el límite máximo del horizonte temporal.

La figura 17 muestra un completo agotamiento del recurso suelo. El panorama económico de la figura 18 muestra como existe un límite al crecimiento en el ahorro de la ciudad afectado directamente por el agotamiento del suelo que limita el respectivo nivel ingresos para toda la población.

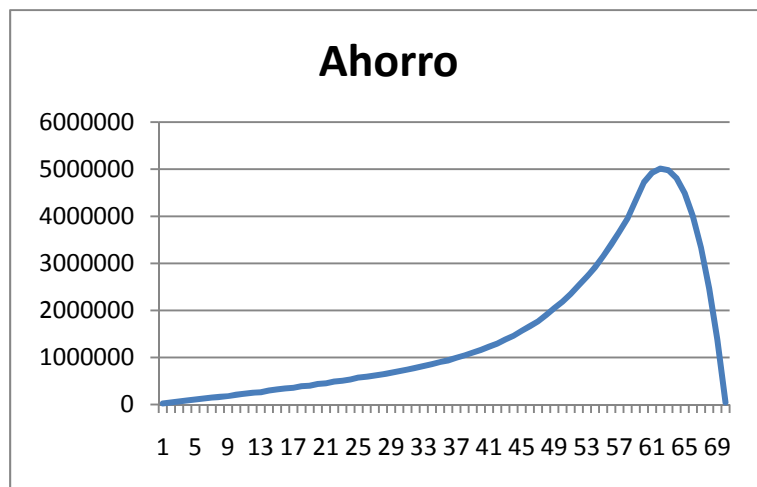


Figura 18. Panorama económico al límite del horizonte temporal.

- Validación de la estructura

Para realizar la validación de la estructura del modelo se examina si las funciones de utilidad recrean comportamientos coherentes con la modificación de sus parámetros y si el movimiento de los agentes en la simulación está acorde con la teoría matemática planteada.

El escenario sigue los mismos supuestos de las anteriores corridas, pero la intención de esta simulación es ver cómo evoluciona la ciudad cuando los urbanizadores de residencias tienen posturas extremas en sus preferencias.

La tabla 5 muestra el valor de los parámetros modelados, como en los casos anteriores, el agente constructor de centros de trabajo asigna igual peso a los tres atributos del suelo: distancia, densidad e indicador social. La diferencia para esta corrida se encuentra, en que los urbanizadores de residencias de bajo nivel social tienen una preferencia mayor por la distancia promedio a los centros de trabajo en comparación con los otros dos atributos. El constructor de residencias de alto nivel social tiene una mayor preferencia sobre el atractivo social del sector y resta importancia a los atributos de distancia y densidad. Las figuras 19 a 22 ilustran varios pasos de la evolución del prototipo de ciudad bajo estas condiciones.

Tabla 6. Condiciones iniciales de modelación. Condiciones extremas en preferencias.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
α_a	0.33	β_a	0.33	γ_a	0.33
α_b	0.7	β_b	0.2	γ_b	0.1
α_c	0.1	β_c	0.2	γ_c	0.7
Tasa-Crecimiento- Personas-SAI	10%	Tasa-Crecimiento- Personas-SBI	10%	Tiempo Final	400 Años

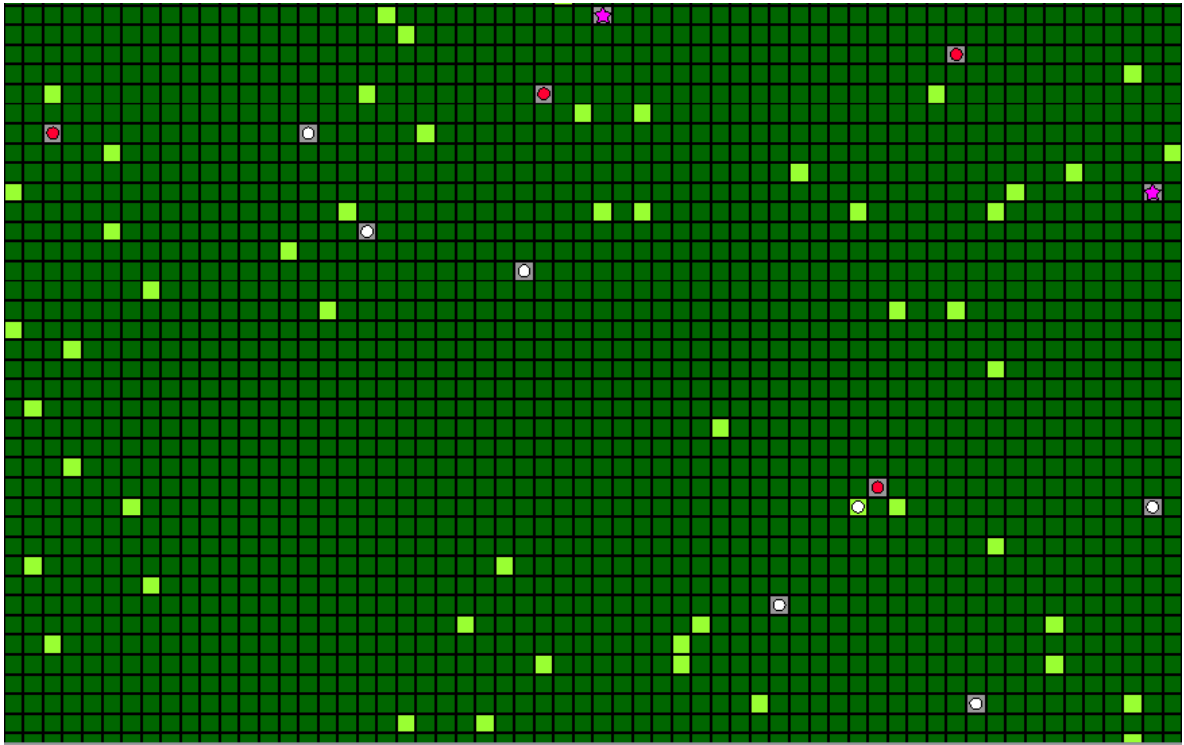


Figura 19. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 1.

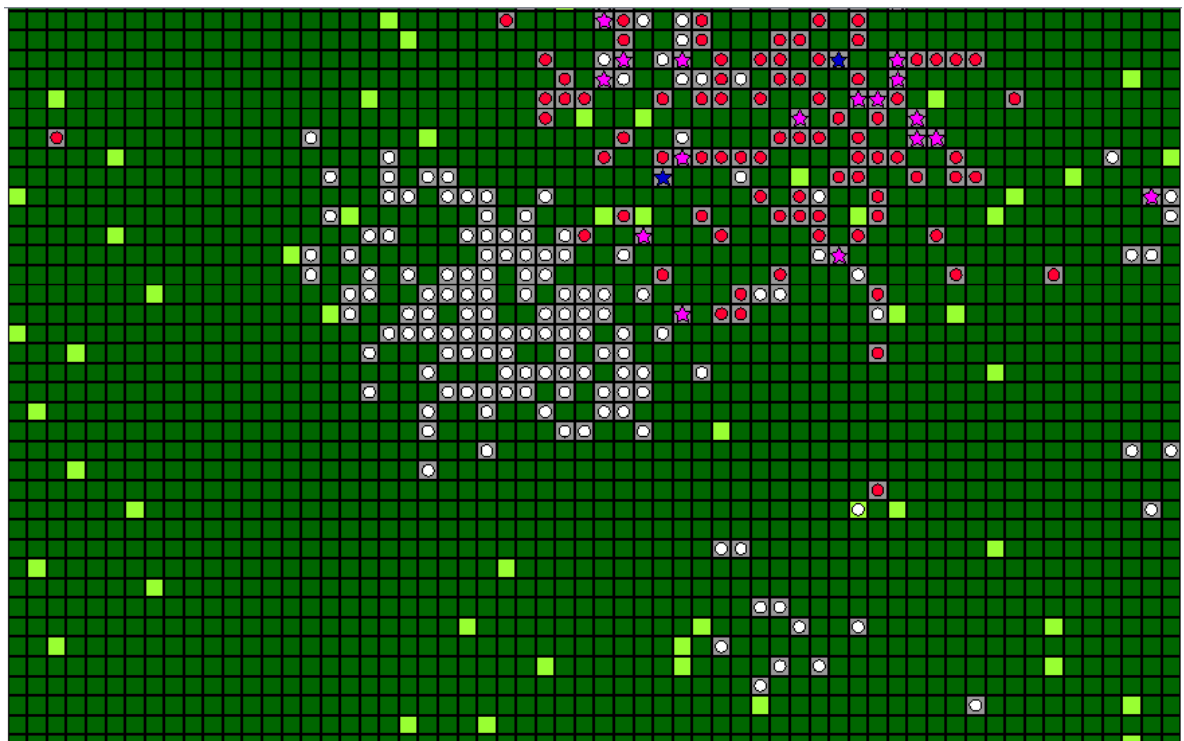


Figura 20. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 2.

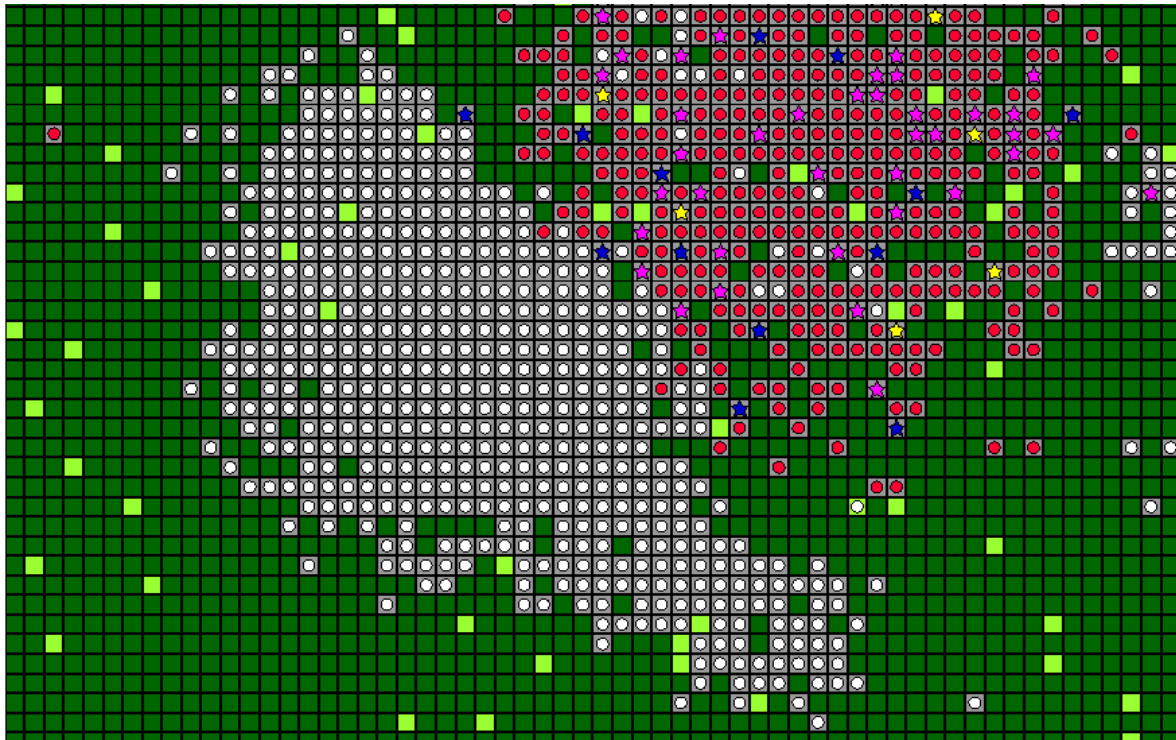


Figura 21. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 3.

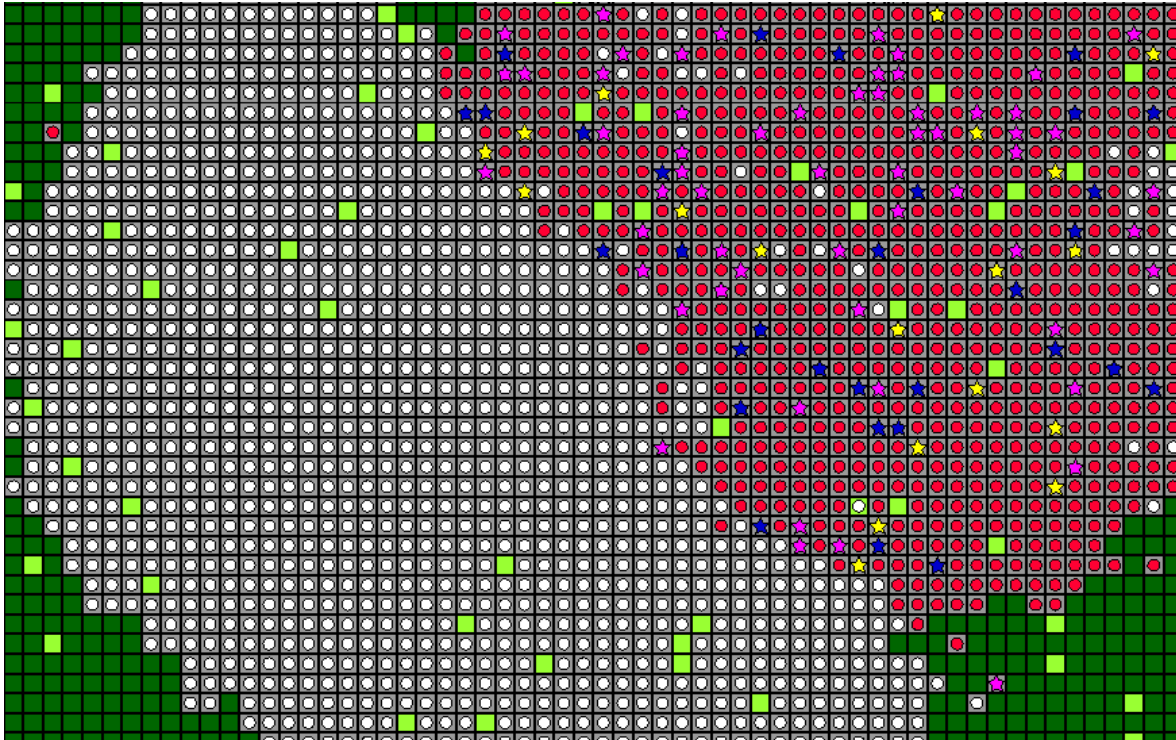


Figura 22. Resultados de simulación. Escenario preferencias extremas. Paso 4.

Bajo las condiciones extremas se forman dos barrios de distinta clase en los extremos del territorio, y esta es la mayor segregación que se obtiene con el modelo. La mayoría de los centros de trabajo se ubican en el sector de bajo nivel económico dada la motivación del constructor de bajo nivel social por construir cerca de la zona comercial. Este escenario podría revelar que a las personas de alto nivel social no les importa estar lejos de los lugares de trabajo, en gran medida por que tienen mayor facilidad para movilizarse, en cambio les interesa estar lejos de población de bajo nivel social y apartados del centro urbano. Finalmente y dado el agotamiento del suelo, ambos barrios (el de alto y bajo nivel social) terminan juntos, pero queda marcada la segregación en la ciudad.

4.2.2 Validación de Comportamiento

Existen varias pautas para validar el comportamiento del modelo (Forrester y Senge 1980), adoptaremos algunas de ellas para su estudio. La principal consiste en evaluar y analizar si el modelo realmente está recreando el problema por el cual se construyó. Los análisis discutidos anteriormente nos ayudan a validar en parte este argumento demostrando que las simulaciones representan la evolución urbana para una variedad de comportamientos y preferencias de los agentes urbanizadores y permite en efecto hallar patrones de uso y cambio del suelo. El modelo responde coherentemente a cambios en la formulación matemática, y permite reproducir dinámicas de crecimiento consistentes con la teoría y con lo observado.

Por ejemplo, Clarke y Wilson (Clarke y Wilson 1985) modelan la distribución de grupos de bajos ingresos en sectores deprimidos del centro de la ciudad y los vecindarios de calidad alta en los suburbios externos. Este es un patrón observado en distintas ciudades del mundo (Camagni 2005). Para representar dicho comportamiento se ajustan los parámetros de la tabla 7 donde el constructor de centros de trabajo tiene una mayor preferencia por estar cerca de otros centros de trabajo y por la densidad del suelo. El constructor de residencias de bajo nivel económico prefiere construir en lugares cercanos a los centros de trabajo y le da poca preferencia a la densidad y al factor social. El constructor de residencias de alto nivel social prefiere construir en lugares de alta preferencia social y le resta importancia a los otros dos atributos. Las figuras 23 a 26 lustran la evolución de la ciudad.

Tabla 7. Condiciones iniciales de modelación. Validación de comportamiento.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
α_a	0.4	β_a	0.4	γ_a	0.2
α_b	0.5	β_b	0.2	γ_b	0.3
α_c	0.3	β_c	0.2	γ_c	0.5
Tasa-Crecimiento- Personas-SAI	10%	Tasa-Crecimiento- Personas-SBI	10%	Tiempo Final	400 Años

Al ajustar los parámetros, se reproducen los patrones estudiados por (Clarke y Wilson 1985): el desarrollo de la actividad económica se concentra en el centro, donde son ubicados la mayoría de los centros de trabajo de todas las capacidades. El centro es habitado por personas de bajo nivel social quienes están más cerca de los centros de trabajo e incurren en menos costos de transporte. Las personas de alto nivel social viven a las fueros del centro principal de la ciudad.

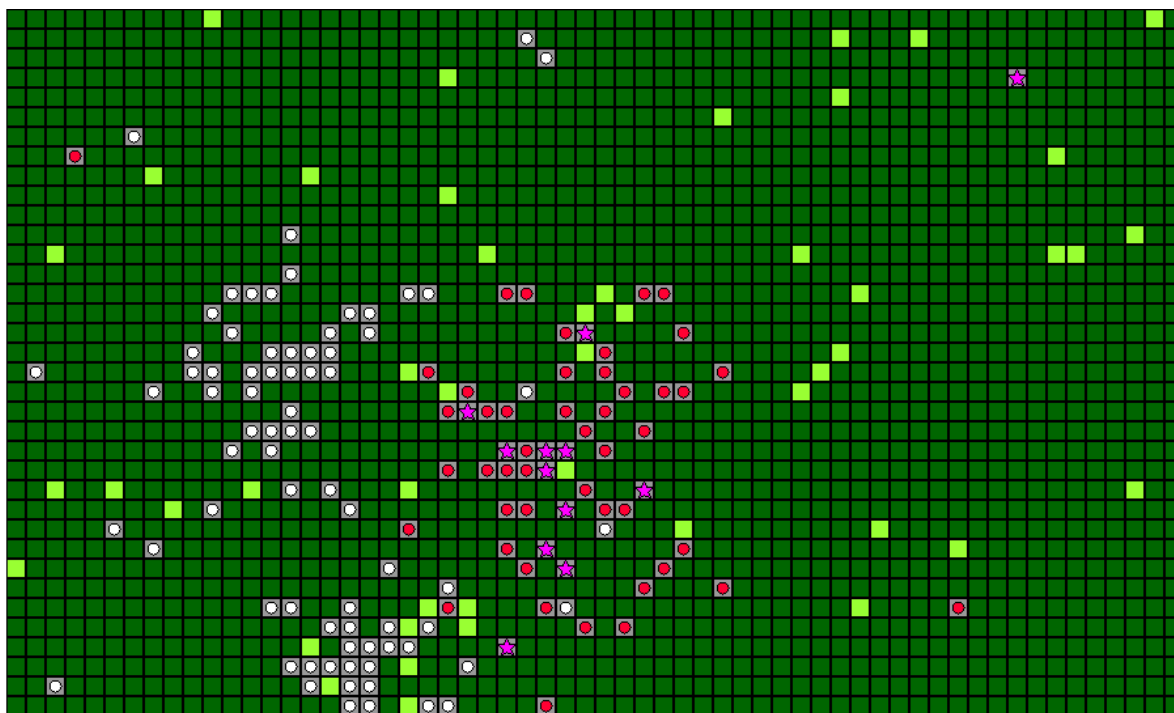


Figura 23. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 1.

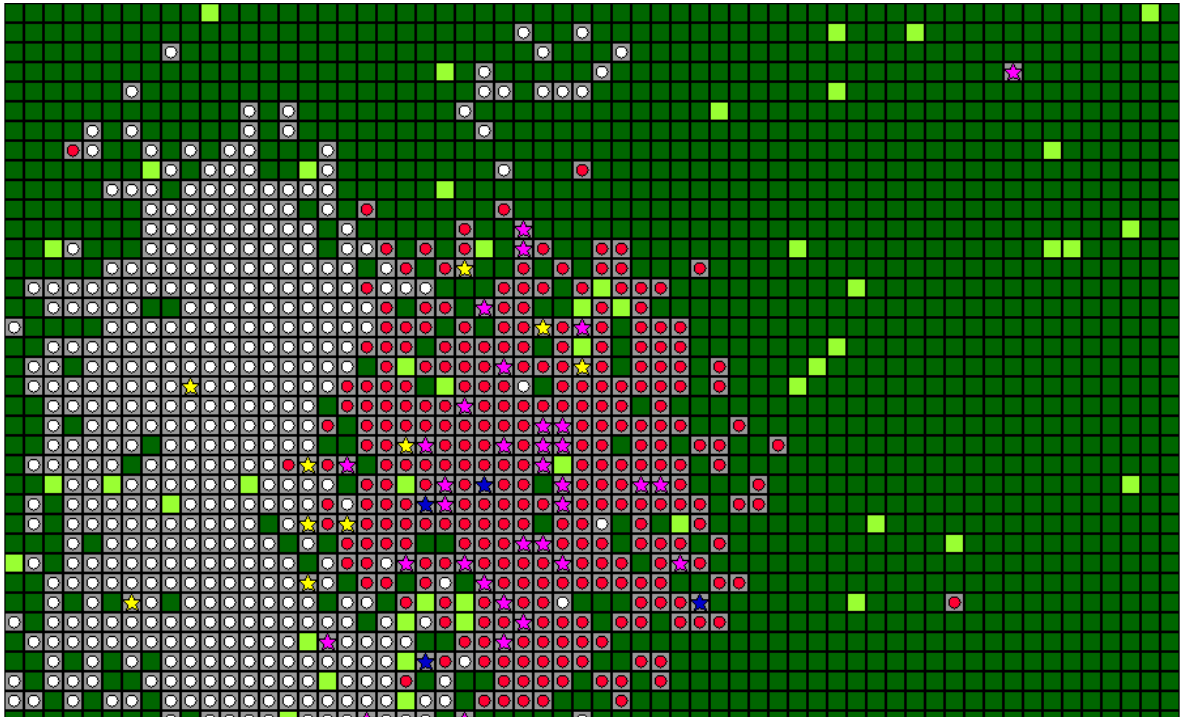


Figura 24. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 2.

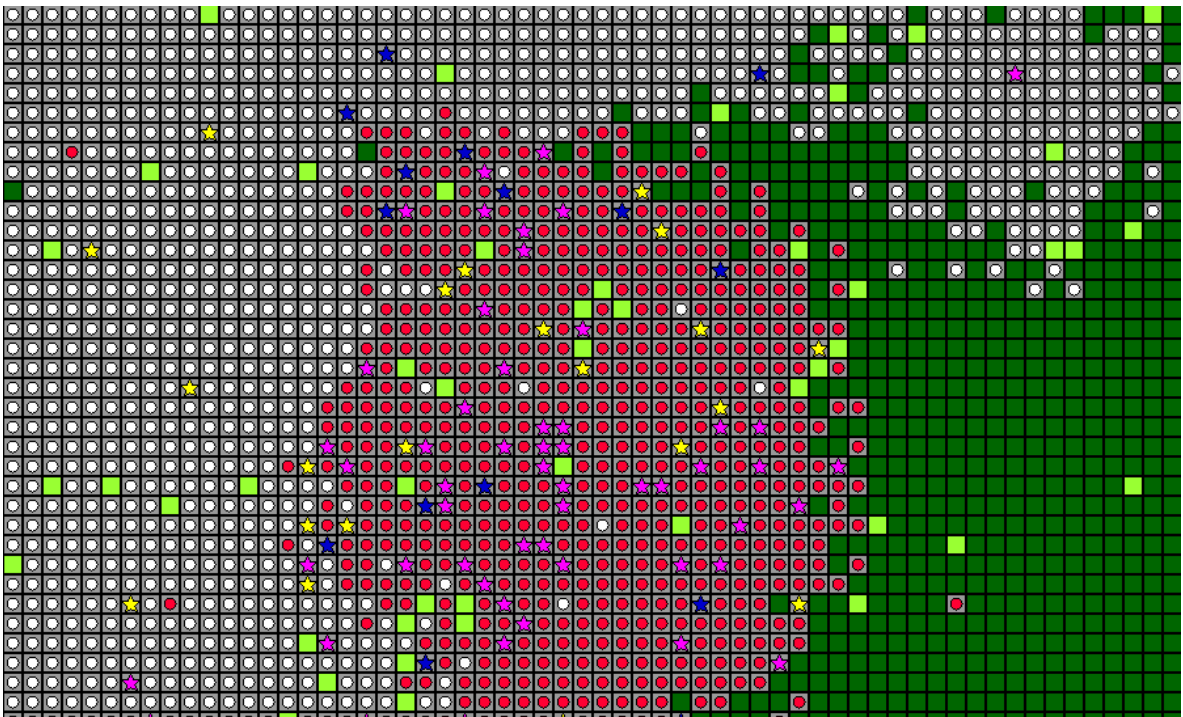


Figura 25. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 3.

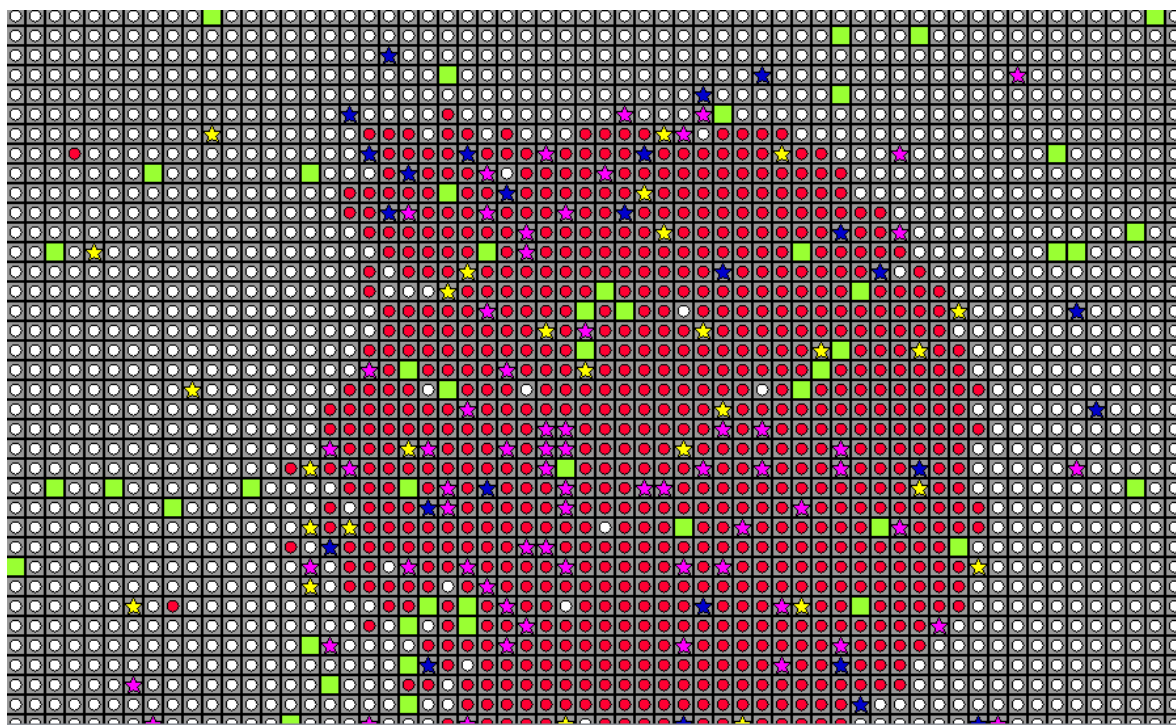


Figura 26. Resultados de simulación. Validación comportamiento. Paso 4.

4.2.3 Cambio de las condiciones iniciales del modelo.

Los cambios en las condiciones iniciales implican alteraciones significativas en los resultados de las simulaciones. Un ejemplo para corroborar lo anterior se plantea formulando las siguientes condiciones iniciales:

- La ciudad inicia con dos centros de trabajo pequeños o de baja capacidad.
- La ciudad inicia con dos centros de trabajo medianos o de media capacidad.
- La ciudad inicia con un centro de trabajo grande o de gran capacidad.
- Se establecen inicialmente 4 residencias de bajo nivel social.
- Se establecen inicialmente 7 residencias de alto nivel social.
- Los centros de trabajo se ubican en todo el centro de la ciudad.
- Las residencias son separadas por niveles sociales y son ubicadas en lados opuestos del centro.
- 20 agentes persona de bajo nivel social comienzan en la simulación.
- 20 agentes persona de alto nivel social comienzan en la simulación.

- El 15% del suelo existente es determinado como protegido y distribuido aleatoriamente en todo el espacio de simulación.

Los resultados de la simulación con el cambio en las condiciones iniciales y con las preferencias de la tabla 2, se muestran en las figuras 27 a 30.

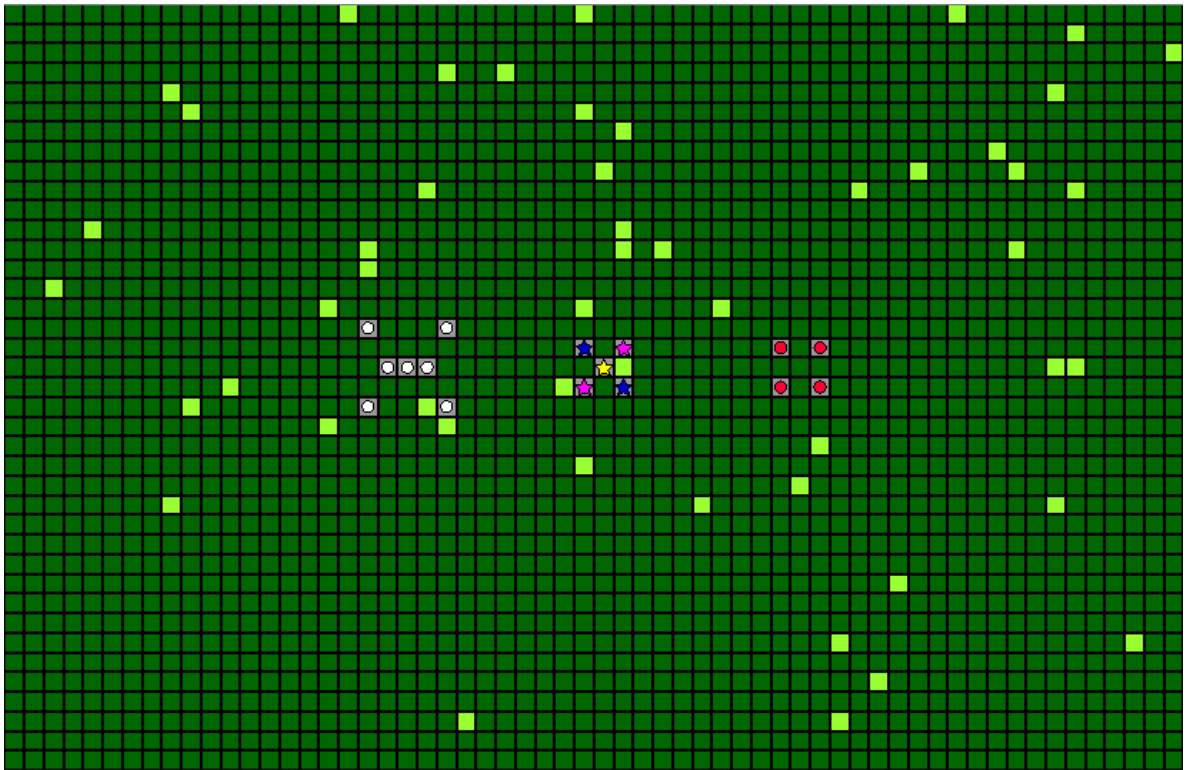


Figura 27. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 1.

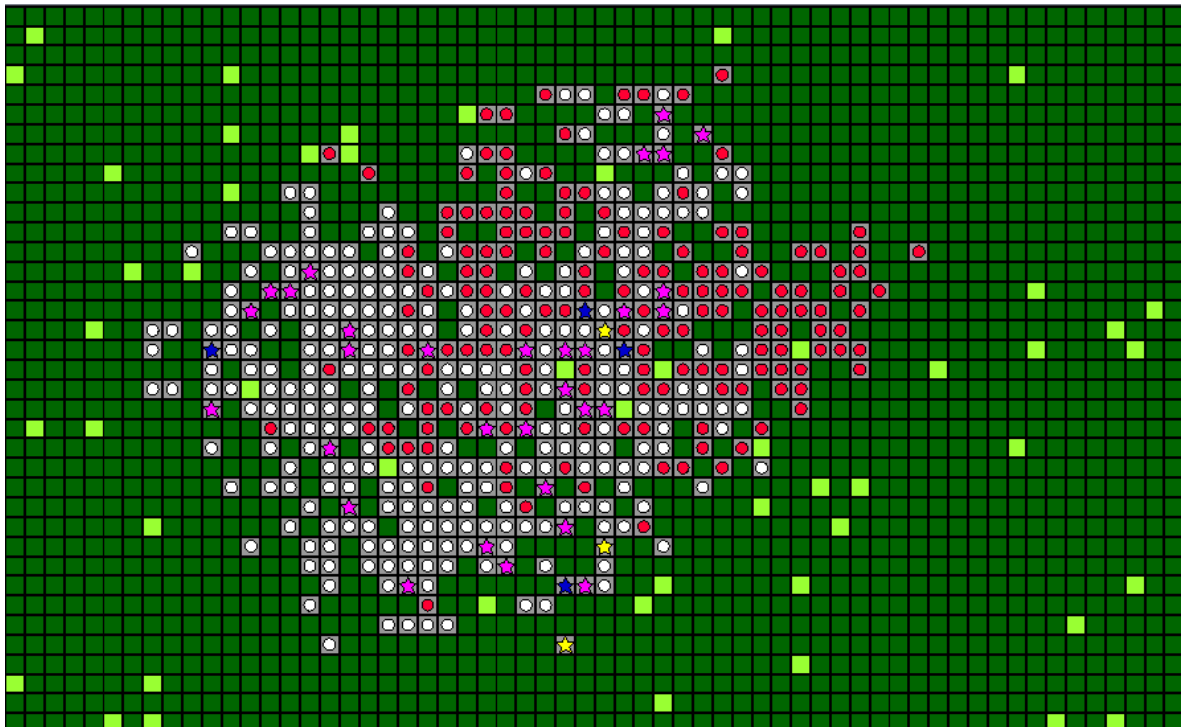


Figura 28. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 2.

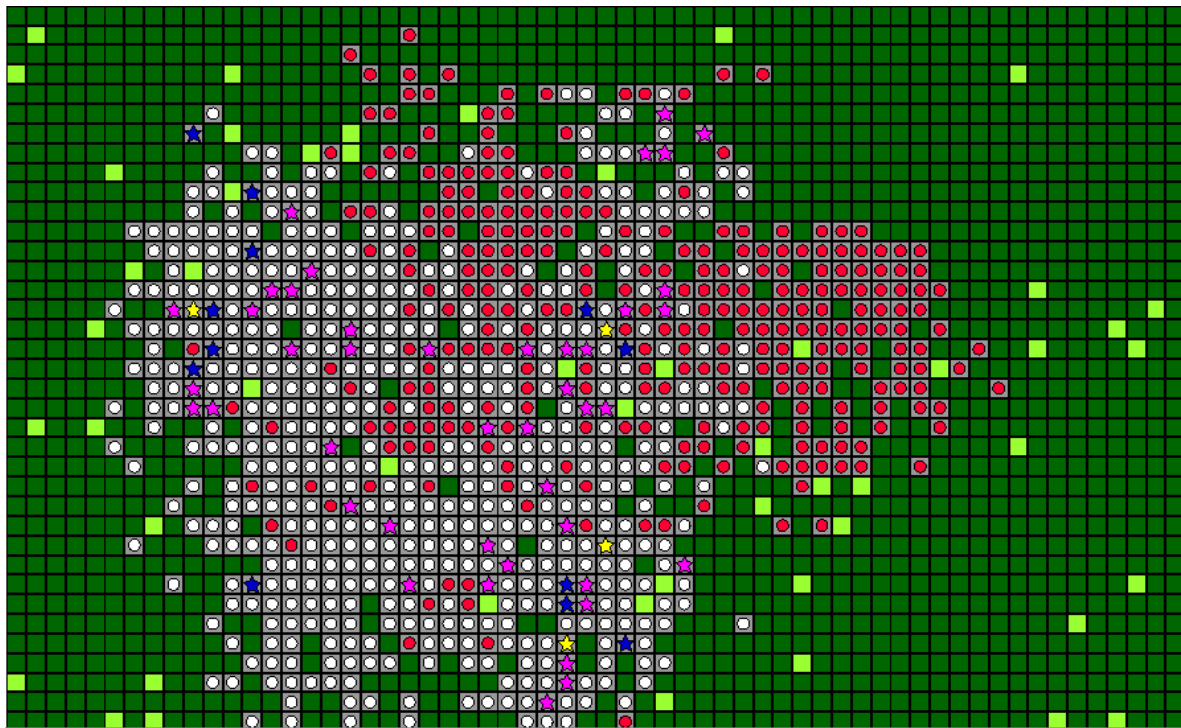


Figura 29. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 3.

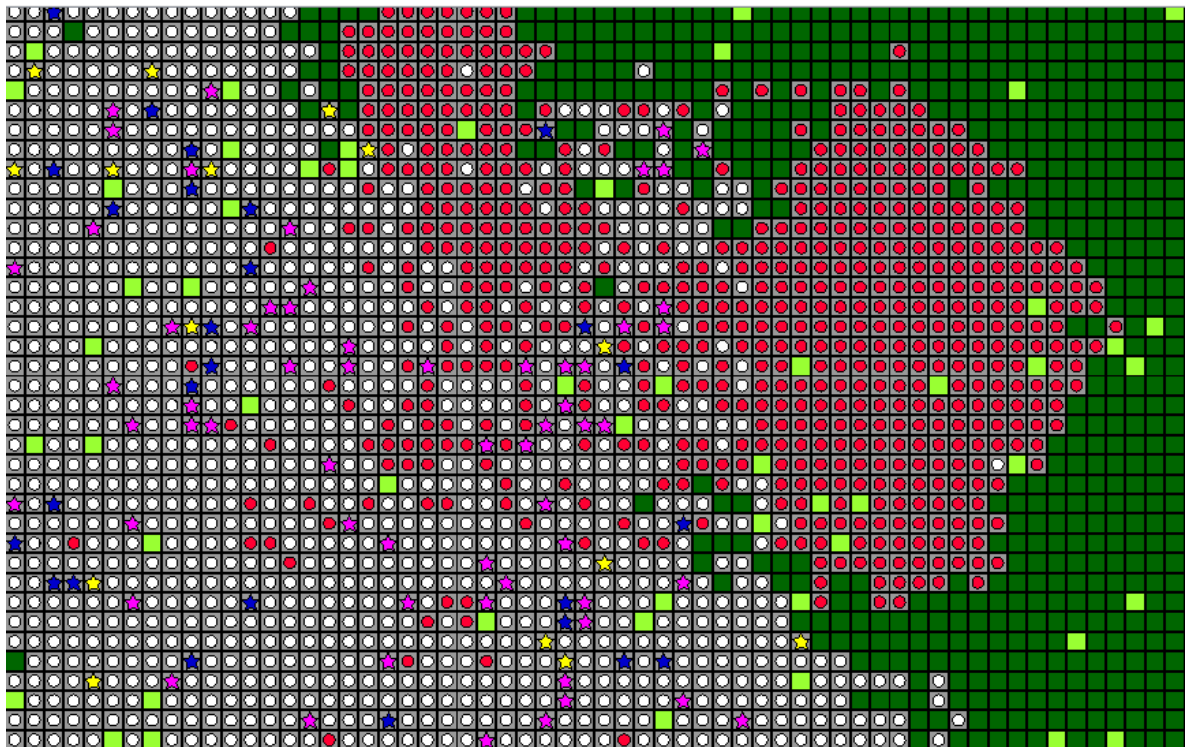


Figura 30. Resultados de simulación. Cambio condiciones iniciales. Paso 4.

Separar las residencias por niveles sociales y ubicarlas en extremos de la ciudad, así como ubicar los centros de trabajo en el centro, tiene una gran incidencia en el cambio del uso del suelo urbano. Los resultados de la simulación revelan la aparición de dos barrios de distintas clases, cada uno desarrollado desde la ubicación inicial de las primeras residencias y completamente segregados. También se observa como los centros de trabajo son ubicados en el barrio de alta clase social.

En resumen, la validación muestra como el modelo representa bien las fluctuaciones y las relaciones entre las variables construidas en el horizonte temporal. La interacción de decisiones entre los agentes urbanizadores simula la competencia por el recurso suelo y esto junto con las limitaciones espaciales del simulador genera las dinámicas del cambio en el uso del suelo urbano observadas y esperadas teóricamente.

Adicionalmente el modelo puede representar interesantes comportamientos y reproducir los modelos teóricos clásicos que hemos mencionado en el estado del arte (anillos de Von Thunen, sectores de Hoyt, patrones urbanos de Clarke and Wilson, entre otros). Comportamientos como la concentración de grupos de bajos ingresos en casas de bajo nivel en el centro de la ciudad, ocupaciones urbanas de alta calidad fuera del suburbio

urbano, polarización de grupos sociales, congregación de bajos grupos sociales alrededor de centros de trabajo, grupos de altos ingresos evitando vivir con personas de bajo nivel social, etc. pueden ser representados por el modelo. En el siguiente capítulo se realiza un análisis de resultados desde el punto de vista del desarrollo sostenible, se muestran gráficos de sostenibilidad para las simulaciones anteriores y se discute cómo los cambios realizados entre una y otra simulación afectan algunos de los índices de sostenibilidad.

5. Análisis de resultados

En este capítulo se desarrolla un análisis de los resultados de las simulaciones presentadas en el capítulo anterior, desde el punto de vista del desarrollo sostenible urbano aplicando indicadores de sostenibilidad.

5.1 Indicadores de sostenibilidad

Además de construir simulaciones de cambio urbano, también nuestro interés es poder hacer análisis de sostenibilidad de la ciudad que se está simulando y representando. Para esto se usan indicadores de sostenibilidad que puedan ser medidos y programados en la simulación y que nos ayuden a entender que condiciones tiene la ciudad que se está simulando y de esta manera evaluar la sostenibilidad de la ciudad.

La conferencia de las naciones unidas sobre el medio ambiente y desarrollo, Earth Summit³, realizada en 1992 (United Nations 1997). Resaltó la importancia de los indicadores de sostenibilidad para los estudios de políticas y estudios científicos.

Los indicadores estudiados en esta tesis se basan en un programa de la división para el desarrollo sostenible de las naciones unidas⁴ (United Nations Department of Economic and Social Affairs 1999). Los indicadores de sostenibilidad involucran variables sociales,

³ La más grande conferencia de las naciones unidas sobre el medio ambiente y desarrollo realizada en Rio de Janeiro, Brasil en 1992. Participaron 172 Gobiernos, 172 Organizaciones no gubernamentales y 17000 personas. En esta conferencia se trataron temas relacionados con el desarrollo sostenible, el cambio climático, el agua, el transporte público entre otras. Pagina Web: <http://www.un.org/geninfo/bp/enviro.html>.

⁴ División que promueve el desarrollo sostenible mediante la cooperación técnica y creación de capacidad a nivel internacional, nivel regional y nacional. Pagina Web: <http://www.un.org/esa/dsd/>.

ambientales, económicas e institucionales (United Nations Commission on Sustainable Development 2005). Estos indicadores se explican brevemente a continuación:

5.1.1 Porcentaje de la población urbana viviendo por debajo de la línea de la pobreza

Este indicador mide la proporción de la población con un estándar de vida por debajo de la línea de la pobreza. La unidad de medida de este indicador es en porcentaje (%) y da señales de características sociales, igualdad y pobreza de una población. Como este indicador puede cuantificar la pobreza de una región, capturar la prevalencia de la pobreza en el tiempo y hacer comparaciones de nivel social es de gran consideración para incluir en informes de desarrollo sostenible.

En nuestro modelo y de una manera simplificada puede determinarse que porcentaje de la población es pobre, porque desde el comienzo se afirma que existe un grupo social desfavorecido y se le da una tasa de crecimiento poblacional exógena. De esta manera y durante todo el horizonte de simulación puede identificarse que Porcentaje de la población urbana es de bajo nivel social.

5.1.2 Tasa de desempleo

El desempleo es una de las principales razones de pobreza en los países y por ende puede dar indicios sobre el bienestar de una población. La tasa de desempleo es la proporción de personas desempleadas en el mercado laboral. Se mide en porcentaje (%) y da señales de características sociales, igualdad y pobreza de una población. Este indicador estima la mano de obra inutilizada de una región y es relevante para medir desarrollo sostenible cuando es posible cuantificar la tasa sobre el tiempo.

5.1.3 Área Residencial por persona

Definido como la cantidad del espacio en metros cuadrados (m²) en donde vive una persona. Este indicador es la clave para medir la calidad residencial y el bienestar de la población con relación a la infraestructura en vivienda. Un bajo nivel de este indicador es una señal de hacinamiento, malas condiciones de vida y generalmente en asentamientos de bajos ingresos, un espacio reducido por persona puede estar asociado a determinadas categorías de riesgos para la salud.

Las condiciones de los asentamientos están determinadas por los niveles de inversión de las viviendas. En el modelo el crecimiento poblacional de personas y el ahorro urbano determina la disponibilidad de viviendas de ambos niveles sociales. Las residencias de alto nivel social albergan 3 personas y las residencias de bajo nivel social 5. Implícitamente se le da un valor menor al indicador para personas de bajo poder adquisitivo.

5.1.4 Área Residencial por persona

Este indicador mide la tasa promedio anual del cambio en el tamaño de la población y mide cuán rápido está cambiando la población. El crecimiento poblacional afecta la sostenibilidad de una localidad a largo plazo y está relacionada con todos los factores que miden desarrollo sostenible. Este factor ejerce presión sobre todas las áreas (económicas, sociales, y ambientales) de la región, ya que una mayor población repercute en una menor accesibilidad a los recursos.

Dentro de los parámetros del modelo pueden ajustarse las tasas de crecimiento poblacional para ambos grupos sociales de bajo y alto nivel. Como veremos adelante, estas condiciones afectaran significativamente el cambio en la forma urbana y los demás indicadores de sostenibilidad.

5.1.5 Población de asentamientos de bajo y alto nivel social

El indicador mide el tamaño poblacional de asentamientos urbanos de bajo y alto nivel social. Como el indicador se enfoca en la clasificación de asentamientos humanos este indicador mide la marginalidad de condiciones de vida humanas. El indicador mide el número de habitantes viviendo en distintos tipos e asentamientos.

Este indicador permite identificar cuantas viviendas de bajo nivel social existen en la ciudad, las cuales se caracterizan por ausencias en servicios públicos, bajos niveles de seguridad y en el peor de los casos viviendas propensas a enfermedades en la población, conformación de zonas ilegales y zonas de alto riesgo (deslizamiento).

5.1.6 Área Rural como porcentaje del suelo total

Este indicador mide la cantidad de área rural de una localidad sobre el tiempo y se mide en porcentaje (%). Las áreas rurales cumplen roles ecológicos, socio-económicos, y culturales en muchos países, proveen alimentos, poseen diversos ecosistemas, hábitat silvestre y natural, conservan el agua y suelo y filtran contaminantes entre otros. El propósito de este indicador es mostrar el agotamiento del área rural sobre el tiempo. Un decremento rápido y continuo de las áreas rurales puede ser una señal de prácticas insostenibles en la zona de estudio.

5.1.7 Producto interno bruto per cápita

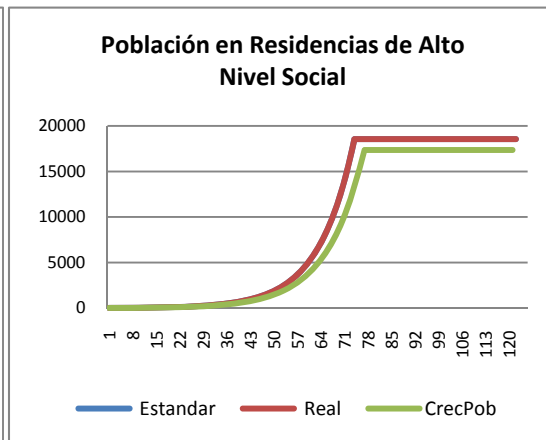
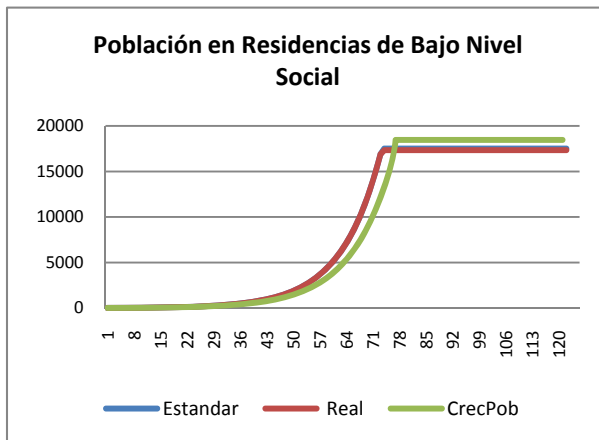
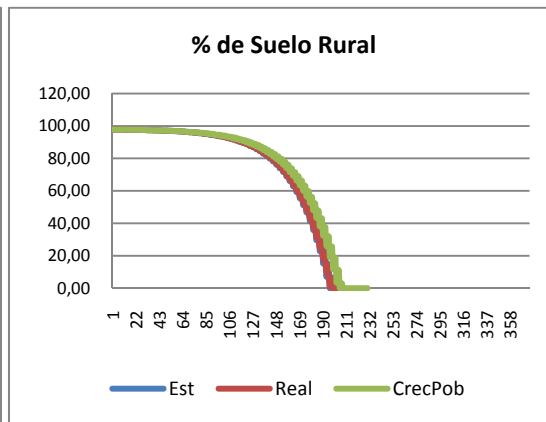
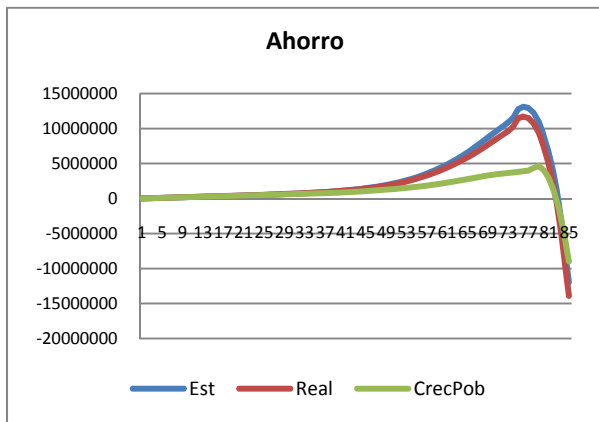
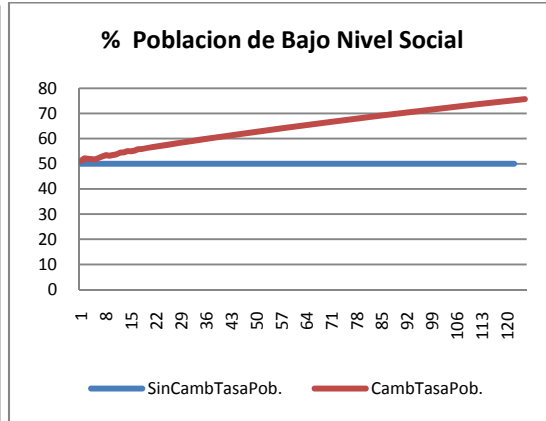
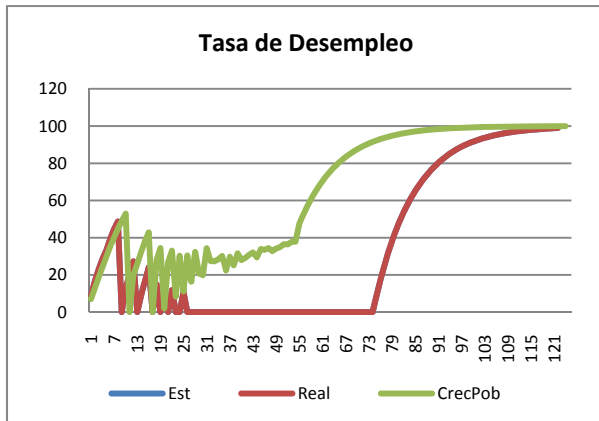
El producto interno bruto per cápita es una medida estándar de crecimiento económico básico. El indicador mide el nivel y la medida de la producción económica total y refleja los cambios en la producción total de bienes y servicios. Además revela el ritmo de crecimiento del ingreso per cápita y la tasa que los recursos se están agotando.

El poder medir el crecimiento en la producción de bienes y servicios es muy importante para los aspectos económicos y de desarrollo de una localidad, ya que este crecimiento muestra patrones de consumo de las personas y el uso de los recursos renovables. En el modelo el cambio en la actividad económica está asociada la construcción de centros de trabajo que otorgan un ingreso base a las personas que son contratadas.

5.2 Indicadores de sostenibilidad aplicados a los resultados

Las gráficas de la figura 31 revelan el comportamiento de los indicadores de sostenibilidad discutidos en el apartado anterior y otros análisis de resultados para los escenarios mostrados anteriormente en el apartado 5.1. Los gráficos muestran cómo todos los prototipos de ciudad modelados, alrededor del año 73 entran en crisis económica producto del agotamiento del recurso suelo. Este comportamiento, resultado de la interacción de los agentes construidos está muy relacionado con el planteamiento teórico mostrado en la validación dinámica.

En la figura 31 la etiqueta “Est” de color azul hace referencia a la primera corrida, la etiqueta “Real” de color rojo para la segunda corrida, y la etiqueta “Crecpob” de color verde para la tercera corrida respectivamente. La grafica del recurso suelo rural para los tres escenarios ilustra la significativa reducción del recurso natural con un decrecimiento casi exponencial del porcentaje de suelo rural. El ahorro para los escenarios estándar y real crece a una tasa casi exponencial hasta que aproximadamente en el año 73, llega al límite del crecimiento y disminuye rápidamente en los años posteriores. EL ahorro para el escenario de crecimiento poblacional, aunque también llega a su límite, tiene un crecimiento menor en comparación con los otros dos escenarios. La razón radica en que hay una mayor proporción de personas de bajo nivel social que reciben menos ingresos que los de alto nivel, en comparación con los otros dos escenarios que se mantiene constante en un 50% tal como se ve en la grafica de porcentaje de población de bajo nivel social.



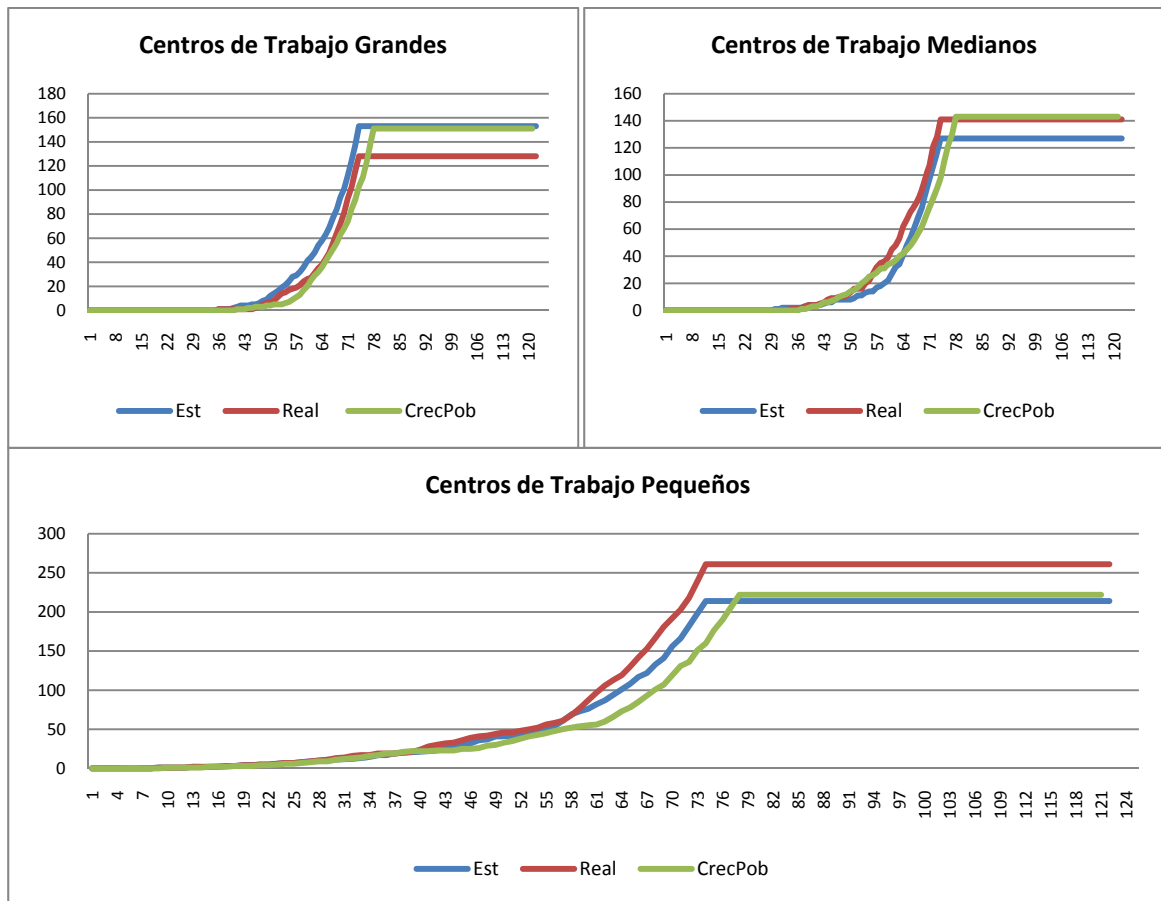


Figura 31. Gráficos de sostenibilidad y análisis de resultados.

La grafica de desempleo muestra como para los escenarios estándar y real, en los primeros años de la ciudad, fluctúa el porcentaje de población desempleada, luego se estabiliza en cero por un largo periodo (abundancia económica) y finalmente, cuando la ciudad entra en crisis se desborda el desempleo en un crecimiento acelerado. Para el escenario de crecimiento poblacional se observa que al comienzo también hay fluctuaciones pero la tendencia siempre es creciente y afectada por la crisis económica urbana.

La población de personas en barrios de bajo nivel social y alto nivel social también se estanca en el tiempo, reflejando el agotamiento del suelo y de los recursos económicos. Se observa que para el escenario de crecimiento poblacional la proporción de viviendas no es la misma aumentando coherentemente la población de personas viviendo en residencias de bajo nivel social.

Por último, los gráficos de infraestructura revelan también un límite al crecimiento por el agotamiento del espacio y el flujo económico. Se observa además, como el cambio en las preferencias de los urbanizadores y en el crecimiento poblacional afectan los niveles de infraestructura de una ciudad a otra. El conjunto de los indicadores simulados, muestran que definitivamente todas las ciudades simuladas son insostenibles a futuro y tiene una vida económica corta. Teniendo un comportamiento más crítico la simulación relacionada con el crecimiento poblacional la cual muestra mayores índices de pobreza, desempleo, disminución del capital económico urbano y la misma y acelerada reducción natural de los otros dos escenarios.

En el siguiente capítulo se enuncian las principales conclusiones sobre el modelo y análisis desarrollados en esta investigación, también se plantea el trabajo futuro para este modelo.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Los análisis de dinámicas del uso y distribución de recursos naturales son complejos porque la interacción de los humanos con los ecosistemas genera interacciones múltiples variables, y fenómenos sorprendentes difíciles de estudiar. Adicionalmente, para entender cómo el uso de estos recursos afecta a “la ciudad”, se deben conocer los procesos fundamentales de estas interacciones en un contexto socio-económico y espacial.

En el trabajo se identifican cinco agentes económicos que interactúan en la ciudad y que afectan significativamente el cambio en el uso del suelo urbano. Estos son: El agente urbanizador, el agente persona, el agente gobierno, el agente empleador y el agente suelo (considerado aquí como un agente). A estos se les definen atributos, métodos de comportamiento y la información que comparten entre ellos o que intercambian con el ambiente (interacción).

Los métodos y atributos que describen cada agente son condensados en un diagrama de clases UML que permite estructurar un lenguaje de modelamiento visual y facilita la construcción del modelo de agentes. El diagrama ilustra el orden, la relación y las secuencias que deben ser programadas para representar el modelo de agentes.

Las decisiones de los agentes urbanizadores se formulan a partir de funciones Cobb-Douglas en función de los factores de densidad, preferencia social y distancia promedio a los centros de producción. Cada factor posee un peso relativo (nivel de preferencia) que define la importancia de este factor en la simulación. Los pesos toman rangos de valores que varían de 0 a 1 y son elegidos por el experimentador para aproximar comportamientos urbanos.

En el primer caso base simulado, las preferencias de los agentes urbanizadores son las mismas, sin importar su clase. Los resultados muestran cómo la ciudad crece sin un patrón particular y se observa la mezcla de ambos grupos sociales en todo el territorio. La distribución de las residencias para este caso base de simulación es uniforme, toda la infraestructura está mezclada y no hay segregación.

En un segundo escenario se intenta aproximar el comportamiento real observado en el sector, y se ajustan preferencias que le dan mayor valor al factor distancia de los constructores de bajo nivel social y mayor valor al factor social para los constructores de alto nivel social. Los resultados muestran una ciudad más segregada que la del escenario base, en la ciudad aparecen barrios de alto y bajo nivel social formados alrededor de la infraestructura comercial y los centros de trabajo se construyen en los barrios de alto nivel.

El tercer escenario modelado posee un aumento en la tasa de crecimiento poblacional de las personas de bajo nivel social. Este escenario permite descubrir cómo el crecimiento poblacional afecta el cambio en la forma urbana y la sostenibilidad a largo plazo de la ciudad. Los resultados muestran cómo la ciudad se llena de residencias de bajo nivel económico y posee índices económicos bajos.

Cuando las simulaciones se corren en el límite máximo del horizonte temporal el comportamiento de la ciudad se torna limitante con relación al desarrollo y en las actividades productivas. Los índices de sostenibilidad urbana reflejan patrones limitantes al crecimiento cuando ocurre el agotamiento del suelo.

Cuando se formulan condiciones extremas en las preferencias de los constructores la ciudad se torna completamente segregada. Existe una completa separación en las clases sociales y los centros de trabajo se ubican en los barrios de bajo nivel social dada la motivación extrema del constructor de bajo nivel social por construir cerca de la zona comercial. Por otro lado, los cambios en las condiciones iniciales del modelo poseen una gran influencia en los resultados de las simulaciones. En particular se observa que la ubicación inicial de las residencias promueve la aparición de los barrios de distintas clases en dichas ubicaciones.

Los índices de sostenibilidad programados en las simulaciones revelan información detallada sobre las condiciones en las que se desarrolla la ciudad simulada. Las graficas de desempleo para los escenarios modelados muestran como el porcentaje de la población desempleada fluctúa a comienzos del desarrollo urbano y luego se hace creciente cuando la disponibilidad laboral se agota. El escenario de crecimiento poblacional alto para personas de bajo nivel social muestra mayores índices de desempleo en comparación con los otros dos escenarios.

Los gráficos de porcentaje de suelo rural en todos los escenarios muestran un agotamiento inminente del recurso. Por otro lado, los gráficos del ahorro urbano para todos los escenarios simulados, muestra límites al crecimiento en respuesta al agotamiento del suelo y a las actividades productivas. El escenario de crecimiento poblacional acelerado para las personas de bajo nivel social muestra comportamientos de crecimiento reducidos y menos eficientes económicamente.

Uno de los aportes más importantes de este trabajo es haber esbozado la programación y el modelamiento para enfrentar el problema del cambio en el uso del suelo urbano. Se espera que este trabajo pueda contribuir a futuros estudios que involucren técnicas de programación más avanzadas, combinadas con nuevas formulaciones matemáticas (teoría de juegos y estrategia) e implementaciones de tipo SIG (sistemas de información geo-referenciados).

En la revisión del estado del arte de los modelos que han sido construidos para representar el problema del cambio y uso del suelo urbano, se pudo observar que existen innumerables estudios y desarrollos de modelos en el tema tratado, condición que imposibilita citarlos todos de manera específica y detallada. Sin embargo en Colombia pocos proyectos, esquemas y trabajos se han desarrollado para la formulación de modelos y técnicas que permitan entender sistemas del tipo interacción humano – uso de recursos. Colombia es un país que tiene una gran necesidad de análisis en todos sus procesos económicos, socio-ecológicos y naturales por la riqueza inmensa en sus recursos naturales, por la dificultad en la accesibilidad de los mismos, por los problemas sociales y económicos que la han caracterizado por años, por la idiosincrasia de su pueblo, por el manejo de políticas de uso y distribución de recursos, etc. Se requiere urgentemente en de estudios especializados que aporten al entendimiento de dichos

sistemas fundamentales y que contribuyan al planteamiento de políticas para desarrollo sostenible del país.

Dentro de los esquemas de modelación revisados, se identificó que hay mucho por aportar con respecto a la toma de decisiones individuales y colectivas en los modelos. Se cree que un desarrollo más exigente en esta dimensión puede contribuir a obtener nuevos patrones dinámicos y comportamientos hasta ahora desconocidos por los investigadores.

Las reglas dinámicas que le permiten el cambio de las principales variables al modelo adoptan la idea de vecindario donde los sitios (celdas) son inmediatamente influenciadas si alguna ubicación cercana cambia su actividad. Las distintas corridas del modelo, con modificación de parámetros y condiciones iniciales, revelan patrones característicos de desarrollo urbano en las ciudades y ayudan a identificar la gran influencia que poseen las variables económicas, sociales y la toma de decisiones individual en la forma y dinámica del cambio en el suelo urbano.

Asimismo la validación del modelo general construido, revela una estructura coherente con los supuestos y aproximaciones metodológicas en las cuales se basa el modelo. Igualmente los comportamientos del modelo son validados con una respuesta coherente de las simulaciones frente a las pruebas de cambios de parámetros y preferencias de los agentes urbanizadores.

Por último es importante mencionar que en el concepto de desarrollo sostenible urbano, la variable prioritaria es el bienestar de la población local a largo plazo. Si esta noción logra hacerse operativa, se pueden construir indicadores de desarrollo sostenible urbano con base en la medición de indicadores ya desarrollados y vinculados: al equilibrio económico, al desempleo, a la preservación de los recursos naturales y al desarrollo de la infraestructura de la ciudad en cuanto tal. Se vio que con los resultados de las simulaciones, se pueden hacer análisis de desarrollo sostenible para las ciudades modeladas. La sostenibilidad aquí tratada en términos indicadores y formulados con las especificaciones de la ONU, ofrece una fácil manera de cuantificar la sostenibilidad y se considera que a futuro puedan ser un buen punto de partida para otras técnicas de medición.

Para que la herramienta aquí desarrollada pueda comenzar a aplicarse de forma práctica es necesario estudiar con mayor profundidad los factores que afectan al toma de decisiones de los agentes del sistema urbano, junto con relaciones matemáticas que revelen comportamiento estratégico (teoría de juegos) entre los mismos, los cuales son omitidos en este análisis.

También es necesario que se fusionen los modelos desarrollados con sistemas de información geo-referenciada y con mapas que permitan revelar detalles de las dinámicas del cambio en el uso del suelo urbano en condiciones espaciales reales y en tiempo real.

La discusión e interacción con expertos de diferentes áreas de trabajo urbano (urbanistas, ambientalistas, arquitectos, sociólogos, entre otros). Puede también seguir contribuyendo en el análisis sistémico urbano con el fin de aclarar más comportamientos urbanos, realimentaciones internas, interacciones y efectos de las variables con la explotación de los recursos.

Finalmente es necesario estudiar futuros esquemas de medición de sostenibilidad, con el fin de tener más esquemas para comparar en el largo plazo, resultados de simulaciones desarrolladas y hacer análisis de desarrollo sostenible de nuestras ciudades.

A. Anexo: Estructura base de programación

A continuación se describen las principales secuencias de programación que se ejecutan durante el desarrollo del modelo. El lenguaje de programación que se usa es la programación orientada a objetos en JAVA.

```
Public class Inicializador {
    public Context build(Context context) {
        //Define protocolos para instaurar el contexto y la proyección.
        //Define protocolos para instaurar el agente suelo y pintarlo en la
        proyección.
        //Define protocolos para añadir al modelo todos los agentes e instaurar los
        agentes iniciales y necesarios en el modelo.
        //Define protocolos para instaurar las condiciones iniciales (residencias,
        centros y población iniciales).
        //Define protocolos para evaluar las propiedades iniciales del suelo: precio,
        densidad, distancia, preferencia social.
        //Define protocolos para asignar trabajo y residencias a población inicial.
        //Define protocolos para calcular ingresos de la población y ocupación del
        suelo iniciales.
    }
}
```

```
public class Gobierno {

    public void step() {
        // Esquema de tiempo del mundo virtual (Unidad de Tiempo Discreto)
```

```
// Innova método público stepNatalidad()
// Innova método público stepAhorro()
// Innova método público LicenciarConstruccionCenTrabajo();
// Innova método público LicenciarConstruccionResRicas();
// Innova método público LicenciarConstruccionResPobres();
}

public void stepNatalidad() {
    //Define protocolos para obtener los niveles del crecimiento poblacional
    //Define protocolos para calcular el numero de personas de ambos grupos
    sociales que entran paso a paso en el modelo.
    // Crea las personas de ambos grupos sociales y los introduce en el
    modelo.
}

public void stepAhorro() {
    //Define protocolos para calcular sumar todos los ahorros individuales de
    cada persona y asi obtener el ahorro global o de la ciudad.
}

public void licenciarConstruccionCenTrabajo() {
    //Define protocolos para verificar si hay suficientes personas en busca de
    empleo y suficiente ahorro municipal para emitir tipos de licencias de
    construcción de centros de trabajo de distinta capacidad.
    //Invoca al método Estudiar() del Constructor de Centros de Trabajo que
    ejecuta el estudio de posibles ubicaciones para construir el centro.
}

public void licenciarConstruccionResSa() {
    // Define protocolos para verificar la viabilidad en la construcción de
    Residencias de alto nivel social.
    // Emite la licencia de construcción con base en al demanda de
    residencias y el ahorro urbano.
```

```
        //Invoca al método Estudiar() del constructor de Residencias de alto nivel
        económico que ejecuta el estudio de posibles ubicaciones para construir la
        residencia.
    }

    public void licenciarConstruccionResSb() {
        // Define protocolos para verificar la viabilidad en la construcción de
        residencias de bajo nivel social.
        // Emite la licencia de construcción con base en la demanda de
        residencias y el ahorro urbano.
        //Invoca al método Estudiar() del constructor de Residencias de bajo nivel
        económico que ejecuta el estudio de posibles ubicaciones para construir la
        residencia.
    }

    public long getResidenciasSb() {
        // Retorna el número de Residencias de bajo nivel social encontradas en el
        modelo
    }
    public long getResidenciasSa() {
        // Retorna el número de Residencias de alto nivel social encontradas en el
        modelo
    }
}

Agente Constructor {

    public double getUtilidad( ){
        // Este método obtiene el nivel de utilidad para el Constructor en un suelo
        determinado
    }

    public void Estudiar( ){
```

```
//Define protocolos para estudiar suelos rurales e identificar el conjunto de
objetos estudiados el de mayor utilidad para construir.
// Invoca al método Construir()
}

public void Construir( ){
    //Identifica la posición de la construcción en la proyección.
    //Agrega el objeto de construcción en la proyección.
    // Actualiza los atributos del suelo construido y del vecindario.
    // Gasta ahorro del gobierno
    //Transforma en el suelo construido el suelo rural en urbano.
    //Si el objeto construido es un centro de trabajo envía la referencia del
objeto construido al agente empleador y activa el método AsignarEmpleo()
encargado de emplear personas desempleadas.
    //Si el objeto construido es una residencia envía la referencia del objeto
construido al método asignarResidencia () encargado de asignar la
residencia a personas que no tengan vivienda y que estén en condiciones
de comprarla.
    // Llama al método asignarResidencia()

public void asignarResidencia( ){
    // Define protocolos para asignar a la residencia construida personas que
no tengan vivienda y que estén en condiciones de comprarla
    // Actualiza atributos del gobierno.
}

Agente Empleador {
    public void asignarEmpleo ( ){
        // Define protocolos para asignar empleos a las personas, según la
capacidad del centro construido.
        // Actualiza atributos del gobierno.
    }
}
```

```
Agente Persona {  
    public void stepAhorro( ){  
        //Define protocolos para calcular y almacenar la distancia de la residencia  
        //donde vive hasta el centro de trabajo donde labora.  
        //Calcula gastos y costos de transporte de la personas de grupo social.  
        // Define protocolos para medir al ahorro individual de cada persona de  
        // grupo social.  
        // Actualiza atributos del gobierno.  
    }  
}
```


B. Anexo: Como construir un contexto en repast.

Para definir un contexto, se usa la siguiente estructura semántica de programación (Repast 2010):

Primero se identifican y se usan las siguientes clases predefinidas con el comando import que ayuda al compilador a localizar las clases que se desean utilizar para la construcción de contextos:

```
import repast.simphony.dataLoader.ContextBuilder (Interfaz);  
import repast.simphony.context.Context;  
import repast.simphony.util.ContextUtils;
```

Estas clases pertenecen a la extensa biblioteca de clases de la herramienta Repast, y tienen la estructura semántica para construir un contexto. Un segundo paso necesario es crear la clase inicializadora (la cual se explicará posteriormente) del modelo que implementa la interfaz "ContextBuilder". Esta interfaz tiene como miembro (propiedades, procedimientos y eventos) principal el método Context build que recibe como argumento un objeto de tipo Context tal como se muestra a continuación :

```
public class Nombre implements ContextBuilder {}  
public Context build(Context context) {}
```

En este método se instancia el objeto contexto (context) y a partir de referencias a este objeto se construyen proyecciones (objetos que hacen cumplir las relaciones entre los agentes como se explicara a continuación) del modelo con sus características y dimensiones. También en el cuerpo de este método se instancian los objetos (agentes)

iniciales, se agregan los mismos al contexto, se fijan sus ubicaciones en la proyección, y se asignan sus propiedades por medio de argumentos.

Definido el contexto los agentes pueden moverse dentro y fuera del mismo, si las circunstancias que rodean al agente en particular cambian. Las acciones de los agentes pueden producir cambios que modifican el estado de otros agentes y contextos. Como resultado, los agentes dentro del contexto están diseñados para cambiar de conductas ya sea sobre la base de su entorno u sobre la base de otros contextos a los cuales pueden migrar.

Bibliografía

Abraham, J. y Hunt, J. (2002): Spatial market representations: concepts and application to integrated planning models, University of Calgary, Canada. Department of Civil Engineering. 49th annual North American Meetings of the regional Science Association International.

Adams, D., Alig, R., Callaway, B., McCarl, A y Winnett, S. (1996): The forest and agricultural sector optimization model (FASOM): model structure and policy applications, Research Paper PNW-RP-495. Portland: U.S. Department of Agriculture, Pacific Northwest Research Station.

Agarwal, C., Green, G., Grove, M., Evans, T y Schweik, C. (2000): A review and assessment of land-use change models dynamics of space, time, and human choice. Center for the Study of Institutions. Population, and Environmental Change, Indiana University, Bloomington, Indiana.

Alberti, M y Waddell, P. (2000): An Integrated urban development and ecological simulation model. UrbanSim. University of Washington. USA.

Alzate, J., Bules, A., Rave, C., Giraldo, J., Martínez, C., Restrepo, J., Cadena A., Smith R,

Chejne, F. (2007): Evaluación de alternativas para la planificación energética sostenible del sector transporte de la región metropolitana del Valle de Aburrá". Medellín, Colombia. Ed: Area Metropolitana Del Valle De Aburrá ISBN: 978-958-44. V. 1, pp: 36.

Alligood, K., Sauer, T y Yorke J. (1996): Chaos an introduction to dynamical systems. New York: Springer.

Anas, A y Kim, I. (1996): General equilibrium models of polycentric urban land use with endogenous congestion and Job agglomeration. *Journal of Urban Economics*. V. 40, pp: 232-256.

Anas, A., Arnott, R y Small K. (1998): Urban spatial structure. University of Buffalo, Boston College, and the University of California at Irvine. pp: 1 – 59.

Alonso, W. (1964): Location and land use: towards a general theory of land rent. Cambridge, Massachusetts. Harvard University Press; Trad. It.: Valore e uso del suelo urbano, Padua, Marsilio.

Argonne National Laboratory. (2010). Repast 2010. <http://repast.sourceforge.net>.

Asher, W. (1999): Resolving the hidden differences among perspectives on sustainable development. Kluwer Academic Publishers, pp: 351-377.

Batty, M. (2005): Cities and Complexity. Massachusetts: MIT.

Barlas, Y. (1996): Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review* V.12 Number 3.

BEA (BUREAU OF ECONOMIC ANALYSIS). (1994): Accounting for mineral resources: issues and BEA's initial estimates. *Survey of Current Business*, pp: 50-72.

Berry, M., Brett, C., Hazen, C., MacIntyre, R., y Flamm, R. (1996): LUCAS: A system for modelling land-use change. *IEEE Computational Science and Engineering*, V. 24.

Box, G., y Jenkins, G. (1976): Time series analysis: forecasting and control. Universidad de Wisconsin, U.S.A, Holden-day.

Bonabeau, E. (2001): Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. In *Proc. National Academy of Sciences* 99(3): 7280-7287.

Brenner, T. (2008): Agent learning representation: advice modelling economic learning. *Handbook of Computational Economics*, Capt. 53. Jena.

Briassoulis, H. (2009): Analysis of land use change: theoretical and modelling approaches. [http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/Chapter3\(Theories\).html](http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/Chapter3(Theories).html)

Cadena A., Alzate, J., Rave, C., Martínez, C y Smith R. (2007): "Modelos para analizar el desarrollo del transporte urbano del Valle de Aburrá con consideraciones económicas, energéticas y ambientales. Medellín, Colombia Revista De Ingeniería. ISSN: 0121-4993. Ed: Ediciones Uniandes V. 25 fasc.N/A, pp: 114 – 121.

Camagni, R. (2005): Economía Urbana. Barcelona: Antoni Bosh.

Casti, J. (1997): Would-be worlds: how simulation is changing the world of science, New York: Wiley.

Checkland, P. (2000): An application of soft systems methodology. In Rosenhead, J. (Eds), Rational Analysis for a Problematic World: Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict, John Wiley & Sons, Chichester, pp: 101-19.

Checkland, P. (1999): Systems thinking systems practice. John Wiley & Sons, Ltd, Baffins Lane, Chichester, pp: 101-19.

Chirivi, E., García D y Montoya V. (2010). Edificación de vivienda en Colombia. Balance primer semestre de 2010. Camacol. Informe económico. Julio de 2010. ISSN 2011-7442. Editor: Néstor Preciado S.

Chirivi, E., García D y Montoya V. (2010). Escasez de suelo y precios de la vivienda en Colombia. Informe económico. Septiembre de 2010. ISSN 2011-7442. Editor: Néstor Preciado S.

Chomitz, K y Gray, D. (1996): Roads, land use, and deforestation: a spatial model Applied to Belize. World Bank Economic Review, pp: 487–512.

Clarke, K, Hoen, S y Gaydos I. (2000): Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automation model of urban growth.

<http://geo.arc.nasa.gov/usgs/clarke/calib.paper.html>. (último acceso: 15 de Abril de 2009).

Clarke, M y Wilson, A. (1985): The dynamics of urban spatial structure: the progress of a research program. Transactions of the Institute of British Geographers, New Series, V. 10, No. 4, pp: 427-451.

Christaller, W. (1933) Die zentralen orte in sudden deutschland. English translation by BASKIN, C. W. Central places in southern Germany (New Jersey)

Czamanski, S. (1964): A model of urban growth, papers and proceedings of the Regional Science Association, V.13, pp: 177 – 200.

Deala, B y Schunk, D. (2004): Spatial dynamic modelling and urban land use transformation: a simulation approach to assessing the costs of urban sprawl. Ecological Economics, pp: 79-95.

Dendrinis, D. (2000): Land development and amenities: a predator - prey interaction. The annals of regional science, pp: 1-14.

Duffy, J. (2008): Agent-Based models and human subject experiments. Handbook of Computational Economics, V. 63. Pittsburgh.

Dyner I y Quintero A. (2009): Modelo de caracterización de la dinámica de potencialidades del suelo, integrando autómatas celulares y dinámica de sistemas." Colombia. Evento: Encuentro Colombiano de dinámica de sistemas, ponencia: Libro: Encuentro Colombiano de dinámica de sistemas: el reconocimiento de la variedad en las prácticas y posibilidades de la dinámica de sistemas en Colombia, Division Editorial Y De Publicaciones Uis Universidad Industrial De Santander, V.1, pp: 260 – 282.

EPA. (2000): Projecting land-use change: a summary of models for assessing the effects of community growth and change on land-use patterns. EPA/600/R-00/098, Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH, pp: 260.

European Environment Agency (2000): Environmental Signals 2000, Environmental Assessment Report No. 6.

Fergus, A y Rowney J. (2005): Sustainable development: lost Meaning and Opportunity. *Journal of Business Ethics*, pp: 17–27.

Felsen, M y Wilensky, U. (2007): NetLogo urban suite - economic disparity model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/UrbanSuite-EconomicDisparity>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modelling, Northwestern University, Evanston, IL.

Fitz, H., DeBellevue, E., Costanza R., Bou, R y Sklar F. (1996): Development of a general ecosystem model for a range of scales and ecosystems. *Ecological Modelling*. V. 88, pp: 263–295.

Forrester, J. (1969): *Urban dynamics*. Portland.

Forrester, J and Senge, P. (1980): Test for building confidence in system dynamics models. *TIMS Studies in the Management Sciences*. Massachusetts Institute of Technology. V.14, pp: 209 -228.

Fuentes, E. (2006): *La Economía Clásica*, Galaxia Gutenberg, pp: 164 – 245.

Garzón L y Olaya Y. (2010): Estudio de las dinámicas de movilidad residencial y su efecto en el uso del suelo del Área Metropolitana del Valle de Aburra. Tesis de grado para obtener el título de Maestría en Ingeniería de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.

Gilruth, P., Stuart E y Robert I. (1995): A dynamic spatial model of shifting cultivation in the highlands of Guinea, West Africa. *Ecological Modelling*, pp: 179–197.

Hardie, L, y Peter J. (1997): Land use with heterogeneous land quality: an application of an area base model. *American Journal of Agricultural Economics*, pp: 299-310.

Hartwick, J, y Nancy O. (1998): The economics of natural resource use. Queens: Addison Wesley Longman.

Herden, G., Knoche, N., Seidl, C y Trockel, W. (1999): Mathematical utility theory: utility functions, models and applications in the social sciences. Journal of Economics Zeitschrift für Nationalökonomie Supplementum, Supplement 8. Springer.

Jennings, N. R. (2000): On agent-based software engineering. Artificial Intelligence, 117:277-296.

Hoyt, H. (1939): The structure and growth of residential neighborhoods in American cities", Washington, U.S. Government Printing Office.

International Institute for Sustainable Development. (2010): Compendium of Sustainable Development Indicator Initiatives and Publications, <http://iisd1.iisd.ca/measure/compendium.htm>.

Kaufmann, R y Seto, K. (2008): Modelling the drivers of urban land use change in the Pearl River Delta, China: integrating remote sensing with socioeconomic data. Land Economics. V. 79, nº 1, pp: 106-121.

Verda, K y Dragicevic, S. (2006): Assessing cellular automata model behavior using a sensitivity analysis approach. Computers, Environment and Urban Systems, pp: 1-33.

Koomen, E., Groen, J., Borsboom, J y Scholten, H. (2002): Modelling the fragmentation of open space. A framework for assessing the impact of land use change on open space. Paper for the 42 congress of the European Regional Science Association, V.11.

Landis, J. (1992): A new generation of metropolitan simulation models. Working Paper 573, University of California at Berkeley. Institute of Urban and Regional Development, University of California., Berkeley.

Landis, J. (1995): Imagining land use futures: Applying the California Urban Futures Model. APA Journal, pp: 438-457.

Landis, J., Monzon, P., Reilly, M y Cogan, C. (1998): Development and pilot Application of the California urban and biodiversity analysis (CURBA). Model presented at the 1998 ESRI International User Conference.

Lin, L., Sato, Y y Zhub, H. (2003): Simulating spatial urban expansion based on a physical process. *Landscape and Urban Planning*, pp: 67-76.

Lincoln Institute of Land Policy. (2010): *Land Lines*. Editor: Ann LeRoyer V.22, Number 2.

LOSCH, A. (1954) *The economics of location* (New Haven).

Lowry, I. (1964): *A model of a metropolis*, RM-4035-RC, Santa Mónica, Rand Cooperation: traducción italiana: *Modello di una metropolis*, Nápoles, Guida Editori (1972).

LTER. The U.S. Long Term Ecological Research Network. (2007): *Integrative science for society and the environment: A plan for research, education, and cyber-infrastructure in the U.S. Long Term Ecological Research Network. The Decadal Plan for LTER*, Albuquerque, New Mexico: LTER Network Office Publication Series, pp: 154.

Mertens, B y Lambin, E. (1997): *Spatial Modelling of Deforestation in Southern Cameroon*. *Applied Geography*, pp: 143-162.

Moglen, G., Gabriel, S y Faria, J. (2003): *A framework for quantitative smart growth in land development*. *Journal of the American water resources association*. pp: 13.

Morales, S y Olaya, Y. (2010): *Modelo para estimar el impacto de la creación de clusters industriales en la economía urbana*. Tesis de grado para obtener el título de Maestría en Ingeniería de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.

North, D. (1955): *Location theory and regional economic growth*. *Journal of Political Economy*, junio, pp: 243-58.

Wilensky, U. (1999): *NetLogo*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modelling, Northwestern University, Evanston, IL.

O'Callaghan, J. (1995): NELUP: An Introduction. *Journal of Environmental Planning and Management*, pp: 5-20.

OECD. Organization for Economic Cooperation and Development. (2009): http://www.oecd.org/home/0,2987,en_2649_201185_1_1_1_1_1,00.html (último acceso: 24 de Mayo de 2009).

Pérez, J. (2004): Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible. *Cuadernos de investigación urbanística*, pp: 7-18.

Reilly, W. (1931): *The law of retail gravitation* (New York).

Rionda J. (2004): Algunas consideraciones en torno a cómo medir el nivel de bienestar social. *Contribuciones a la Economía*. Texto completo en <http://www.eumed.net/ce/>.

Senge, P y Gardini, C. (1998): *La quinta disciplina: el arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Management (Granica).

Sterman, J. (2000): *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Mcgraw-Hill.

Swallow, S., Talukdar, P y Wear, D. (1997): Spatial and temporal specialization in forest ecosystem management under sole ownership. *American Journal of Agricultural Economics*, pp: 311-326.

Tesfatsion, L. (2008): Agent-based computational economics: a constructive approach to economic theory. *Handbook of Computational Economics*, Capt. 50. Ames.

The Eclipse Foundation (2010): Eclipse. <http://www.eclipse.org>.

United Nations Economic and Social Council. (1994): *Assessment of Progress Achieved in Promoting Sustainable Human Settlement Development*, Report of the Secretary-General, Commission on Sustainable Development, Second Session, 16-27.

United Nations. (1996): Second International Conference on Human Settlements (Habitat II), Istanbul, Turkey.

United Nations, Earth Summit +5 (1997): Programme for the Further Implementation of Agenda 21.

United Nations Department of Economic and Social Affairs. (1999): CSD Work Programme on Indicators of Sustainable Development Progress Report, Background Paper No. 7, Commission on Sustainable Development, Seventh Session, New York, 19-30.

United Nations Commission on Sustainable Development. (2005): indicators of sustainable development: guidelines and methodologies. Work programme on indicators of sustainable development, Division for Sustainable Development.

United Nations Commission on Sustainable Development. (2000): Progress Report on the Implementation of the Work Programme on Education, Public Awareness and Training, Report of the Secretary-General, Eighth Session, 24 April-5 May.

United Nations Commission on Sustainable Development. (2000): Report of the Eighth Session, Economic and Social Council, Official Records, Supplement No. 9, 30 April 1999 and 24 April-5 May, 2000.

USGS. Science for a Changing World. (2005): Analyzing Land Use Change In Urban Environments. Information on the Urban Dynamics Research Program, Washington.

Veldkamp, A, y Fresco, L. (1996): CLUE: A conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological Modelling*, pp: 253–270.

Vincent, J. (1997): Resource depletion and economic sustainability in Malaysia. *Environment and Development Economics*, pp: 19-37.

Voinov, A. (1999): Patuxent landscape model: integrated ecological economic modelling of a watershed. *Environmental Modelling and Software*, pp: 473–491.

Von Thunen J. (1826): *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*, Hamburgo, Puthes.

Waddell P. (2003): *Introduction to urban simulation: design and development of operational models*. University of Washington. USA.

WCED. World Commission on Environmental and Development. (1987): UN documents. gathering a body of global agreements. Editado por NGO Committee on Education. Junio de 1987. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (último acceso: 20 de Noviembre de 2009).

Wear, D., Liu, R., Foreman, J y Shef, R. (1999): *The Effects of Population Growth on Timber Management and Inventories in Virginia*. *Forest Ecology and Management*, pp: 107-115.

Weber, A. (1909): *Über den Standort der Industrien* (Tubingen). English translation (1957) *The theory of the location of industries* (Chicago).

Wilson, A. (1981): *Geography and the Environment*. Leeds: Jhon Wiley & Sons Ltd.

Wingo, L. (1961): *Transportation and urban land*, Washington, D.C., Resources for the future.

Wood, E., Lewis, J., Taan, G y Lietzow, R. (1997): *The development of a land cover change model for Southern Senegal*. Presented at Land Use Modelling Workshop, EROS Data Center.

World Conservation Union (IUCN). (1992): *Fourth World Congress on National Parks and Protected Areas*, Caracas, Venezuela, 10-21 February.

Yichun, X., Batty, M y Zhaoz, K. (2006): *Simulating emergent urban form using agent-based modelling: Desakota in the Suzhou-Wuxian Region in China*. *Annals of the Association of American Geographers*, pp: 477-496.

