

**Modelos Geo-Espaciales del Medio Urbano:  
El Caso de la Contaminación Ambiental**

**Pablo López Ramírez**

**CentroGeo**

**2008**



---

## Índice general

---

<b>I El modelaje urbano: De Von Thünen a los Autómatas Celulares y Sistemas Multiagentes</b>	<b>1</b>
<b>1. Modelos Clásicos de Uso de Suelo y Transporte</b>	<b>3</b>
1.1. Modelos descriptivos de uso del suelo . . . . .	3
1.2. Modelos integrados de uso de suelo y transporte . . . . .	7
1.2.1. Modelos de interacción espacial . . . . .	9
1.2.2. Localización . . . . .	14
1.2.3. El proceso de desarrollo del suelo urbano . . . . .	16
1.2.4. Oferta, demanda y equilibrio . . . . .	17
1.2.5. El sistema de transporte . . . . .	19
1.3. Limitaciones de los modelos tradicionales . . . . .	20
1.3.1. Dinámica . . . . .	20
1.3.2. Nivel de detalle . . . . .	21
1.3.3. Interfase con el usuario . . . . .	21
1.3.4. Flexibilidad . . . . .	21
1.3.5. Realismo . . . . .	22
<b>2. Geosimulación</b>	<b>23</b>
2.1. Sistemas Complejos . . . . .	25
2.2. Sistemas Complejos Adaptativos . . . . .	26
2.3. El concepto de Autómata . . . . .	33
2.4. Modelos basados en Autómatas Celulares . . . . .	33
2.4.1. Un modelo de AC para el crecimiento urbano . . . . .	35
2.5. Sistemas Multiagentes sobre espacios celulares . . . . .	38
2.6. Sistemas de Autómatas Geográficos . . . . .	40
2.7. Predicción Vs. Simulación . . . . .	41

2.8. Conclusiones: Los modelos como agentes cognitivos . . . . .	43
<b>II El caso de la contaminación ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México</b>	<b>47</b>
<b>3. La contaminación ambiental en la Ciudad de México</b>	<b>49</b>
3.1. El modelaje de la contaminación ambiental desde las Ciencias de la Atmósfera . . . . .	49
3.2. Los inventarios de emisiones y la dinámica urbana . . . . .	51
3.3. Conclusiones: El resto del camino . . . . .	59

---

## Índice de figuras

---

1.1.	Arreglo concéntrico de Von Thünen. El punto representa el mercado central, el círculo blanco corresponde a productos lácteos, el verde (2) bosque o carbón, el amarillo (3) granos y el rojo (4) ganado cárnico.	4
1.2.	Modelo de zonas concéntricas de Burgess . . . . .	5
1.3.	Modelo de sectores radiales de Hoyt (adaptado de Briassoulis, 2000 [8]). 1 ZCN; 2 Venta al mayoreo y manufactura ligera; 3 Zona residencial de clase baja; 4 Zona residencial de clase media y 5 Zona residencial de clase alta. . . . .	6
1.4.	Modelo de núcleos múltiples de Harris y Ulmann (adaptado de Briassoulis, 2000 [8]). 1 ZCN; 2 Venta al mayoreo y manufactura ligera; 3 Zona residencial de clase baja; 4 Zona residencial de clase media; 5 Zona residencial de clase alta; 6 Manufactura pesada; 7 Centro de negocios alterno; 8 Suburbio residencial; 9 Suburbio industrial. . . . .	7
1.5.	Diseño conceptual de los modelos clásicos de uso de suelo y transporte	8
1.6.	Funciones de utilidad para tres diferentes usos de suelo . . . . .	13
1.7.	Localización residencial en el marco de la teoría de utilidad urbana . . . . .	15
1.8.	Etapas en la modelación del sistema de transporte . . . . .	18
2.1.	Agregación y jerarquía en un SCA . . . . .	29
2.2.	Vecindades de Von Neumann (izquierda) y Moore (derecha) para un AC sobre una latís cuadrada . . . . .	34
2.3.	Diagrama de flujo para las reglas de transición. . . . .	36
2.4.	Diagrama de flujo del algoritmo evolutivo para calibrar el AC . . . . .	37
3.1.	Discretización espacial (a) y temporal (b) en los modelos meteorológicos . . . . .	51
3.2.	Integración de la información en la construcción de inventarios de emisiones . . . . .	52

3.3. Modelo para la generación de escenarios de emisiones . . . . . 57

## Parte I

# El modelaje urbano: De Von Thünen a los Autómatas Celulares y Sistemas Multiagentes





# CAPÍTULO 1

---

## Modelos Clásicos de Uso de Suelo y Transporte

---

En este capítulo se hará una revisión de los conceptos básicos involucrados en la modelación del uso de suelo y transporte en medios urbanos. Además, se describirán y examinarán algunos de los principales métodos surgidos de la escuela de geografía económica que se emplean en este tipo de modelos. Si bien es cierto que las metodologías que se expondrán aquí han caído en desuso y que el modelaje urbano en la actualidad se está moviendo hacia las técnicas matemáticas derivadas del estudio de sistemas complejos (como se verá en el capítulo 2) , los modelos derivados de la geografía económica siguen teniendo valor no sólo desde la perspectiva histórica sino también como herramientas que ayudan a entender cómo las fuerzas económicas pueden moldear el entramado urbano.

La aproximación, más bien de carácter histórico, al modelado urbano propuesta en este capítulo tiene dos objetivos principales; por un lado se trata de comenzar a entender a través de la evolución de los modelos urbanos, el complejo entramado de factores que dan lugar a los patrones espaciales que se observan en las ciudades y por otro lado, al comprender las carencias (tanto técnicas como conceptuales) de los modelos expuestos, se busca tener una visión más clara de lo que se puede y debe esperar de la nueva generación de modelos urbanos.

### 1.1. Modelos descriptivos de uso del suelo

En 1826 Johann Heindrich von Thünen desarrolló el que se acredita como el primer modelo de uso de suelo, von Thünen explicaba la distribución espacial de los cultivos en términos del balance entre el rendimiento de las cosechas, el precio

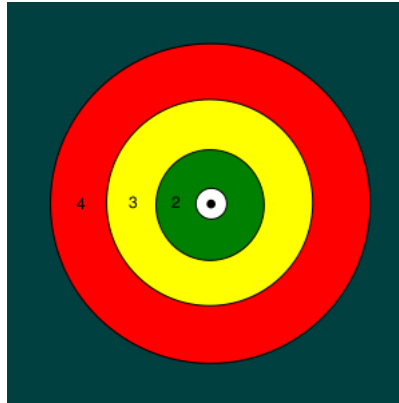


Figura 1.1. Arreglo concéntrico de Von Thünen. El punto representa el mercado central, el círculo blanco corresponde a productos lácteos, el verde (2) bosque o carbón, el amarillo (3) granos y el rojo (4) ganado cárnico.

en el mercado y el coste de transporte. Este balance determina el precio máximo que el granjero puede pagar por la tierra, y el tipo de cultivo será aquel que le rinda mayor ganancia a la distancia que se encuentra del mercado central. Von Thünen parte de las siguientes hipótesis para el desarrollo de su modelo:

- El espacio es homogéneo y no acotado.
- Existe un único mercado central.
- El transporte al mercado central es por medio de caballos o carretas.
- Se permite la producción de diferentes bienes de consumo, pero el costo de transporte para cada bien se asume como diferente (debido principalmente a diferencias en el volumen por peso de cada bien).
- La ganancia por unidad de área se asume constante para todos los productos.

El resultado de éste modelo es un arreglo concéntrico de los productos alrededor del mercado central como se ve en la figura 1.1, el modelo puede ser extendido para acomodar varios mercados centrales y el resultado seguirá siendo estable (Batty, 2006 [3]). La importancia de el modelo de Von Thünen no radica tanto en su aplicación a sistemas rurales, sino en su generalización al medio urbano, la cual sentó las bases para el desarrollo de la teoría contemporánea de economía urbana y por lo tanto al desarrollo de los modelos de interacción espacial (Alonso, 1964 [2])

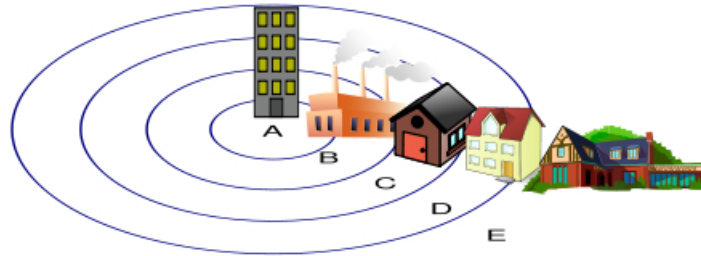


Figura 1.2. Modelo de zonas concéntricas de Burgess

Inspirado por la extensión del modelo de Von Thünen al medio urbano y por el desarrollo histórico de la ciudad de Chicago a través de la última década del siglo XIX, E. W. Burgess desarrolló el modelo de zonas concéntricas. La idea central es que el crecimiento de las ciudades se da en anillos concéntricos alrededor de una Zona Central de Negocios (ZCN). Burgess clasifica las zonas de crecimiento de la ciudad como se ve en la figura 1.2:

1. **A:** Distrito central de negocios
2. **B:** Zona de transición, caracterizada por manufactura ligera y enclaves residenciales.
3. **C:** Zona industrial y de residencias de bajos ingresos. En ésta zona se concentran las viviendas de la clase trabajadora y las industrias más pesadas.
4. **D:** Zona residencial caracterizada por viviendas más nuevas que las de la zona C, también tiene más comodidades. Es la zona donde habita la clase media.
5. **E:** Es la zona residencial más rica de la ciudad, las viviendas en ésta zona son usualmente más grandes y nuevas.

Si bien es cierto que este modelo resulta útil como una descripción del entorno urbano, son muchas las críticas que pueden hacerse. La primera, y quizá la más importante de todas, es que el modelo monocéntrico resulta demasiado rígido y esto hace que sea imposible describir adecuadamente los patrones de uso de suelo en casi cualquier ciudad. Por otro lado, la teoría de Burgess desprecia totalmente el efecto de la topografía y de las vías de comunicación en el desarrollo del entramado urbano, además de ignorar por completo la naturaleza dinámica del uso de suelo.

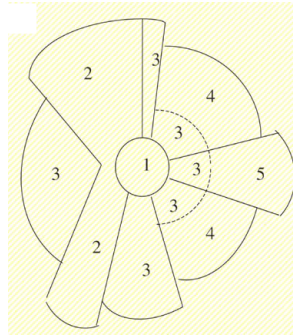


Figura 1.3. Modelo de sectores radiales de Hoyt (adaptado de Briassoulis, 2000 [8]).  
1 ZCN; 2 Venta al mayoreo y manufactura ligera; 3 Zona residencial de clase baja; 4 Zona residencial de clase media y 5 Zona residencial de clase alta.

Continuando con esta línea de pensamiento Hoyt propuso en 1939 la teoría de sectores radiales o de cuña, en su trabajo Hoyt trata principalmente con la distribución de las viviendas en el área urbana y trata con el problema de localización comercial e industrial sólo de manera tangencial. De acuerdo a este modelo, las viviendas de mayor ingreso tenderán a concentrarse alrededor de las rutas de más rápido acceso a la ZCN, de esta manera los anillos concéntricos de Burgess dan paso a sectores radiales como los que se ven en la figura 1.3. El modelo de Hoyt es importante porque considera a la dirección y la distancia con factores que dan forma a los patrones de uso de suelo, además, éste modelo reconoce que la ZCN no monopoliza la actividad de la ciudad. La mayor carencia de este modelo es que no considera la localización de las fuentes de empleo, y esto último se ha reconocido como una de las principales fuerzas que moldean la ciudad.

Finalmente, para concluir con el recuento de modelos descriptivos tenemos el modelo de núcleos múltiples desarrollado por Harris y Ullmann en 1945 que se ve en la figura 1.4. Éste modelo representa una innovación sustancial ya que considera que las ciudades tienen una estructura espacial celular, esto es, las ciudades tienden a desarrollar una multitud de núcleos que sirven como puntos focales para las tendencias de aglomeración. A su vez, dichas tendencias pueden producir a lo largo del tiempo usos de suelo dominantes y el desarrollo de centros especializados. Es evidente que este modelo describe mejor las ciudades que se observan hoy día, en donde se observa una tendencia a la especialización de algunos centros de negocios emergentes (en el sentido de que son posteriores a la ZCN), por ejemplo, la zona de Santa Fe en la Ciudad de México que se ha consolidado en los últimos años como un

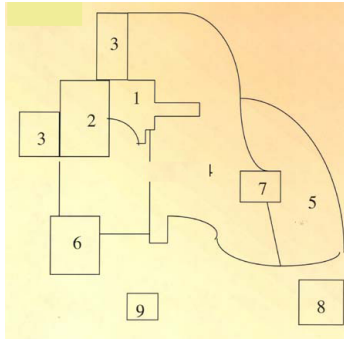


Figura 1.4. Modelo de núcleos múltiples de Harris y Ulmann (adaptado de Briassoulis, 2000 [8]). 1 ZCN; 2 Venta al mayoreo y manufactura ligera; 3 Zona residencial de clase baja; 4 Zona residencial de clase media; 5 Zona residencial de clase alta; 6 Manufactura pesada; 7 Centro de negocios alterno; 8 Suburbio residencial; 9 Suburbio industrial.

importante centro financiero y a su alrededor abundan los desarrollos inmobiliarios de alto nivel económico.

Hasta aquí hemos analizado modelos que tratan de describir la estructura espacial de las ciudades a partir de conceptos teóricos derivados de la geografía o de la economía, si bien estos modelos tienen valor como exploraciones teóricas del medio urbano, no resultan particularmente útiles en ejercicios de prospección o de planeación, ya que al ser puramente descriptivos (o sumamente simplificados como el caso del modelo de Von Thünen) no cuentan con mecanismos explícitos para evaluar escenarios futuros y responder a preguntas del tipo ¿Qué pasaría si ...? Históricamente la dirección que tomó el modelaje espacial para atacar este tipo de cuestiones fue la introducción del formalismo matemático derivado de la economía y de la física principalmente. En la siguiente sección se hará una breve revisión de los métodos más representativos de la escuela de geografía económica.

## 1.2. Modelos integrados de uso de suelo y transporte

La relación entre uso de suelo y transporte es fundamental en los sistemas urbanos, la distribución espacial de las actividades humanas en una ciudad (es decir, el uso de suelo) juega un papel determinante en el transporte dentro de la ciudad (ya sea de mercancías o de personas), y a su vez, los costos asociados con el transporte (costos que pueden ser tangibles o intangibles) son centrales al tomar decisiones de localización que pueden modificar el uso de suelo de la ciudad. Como

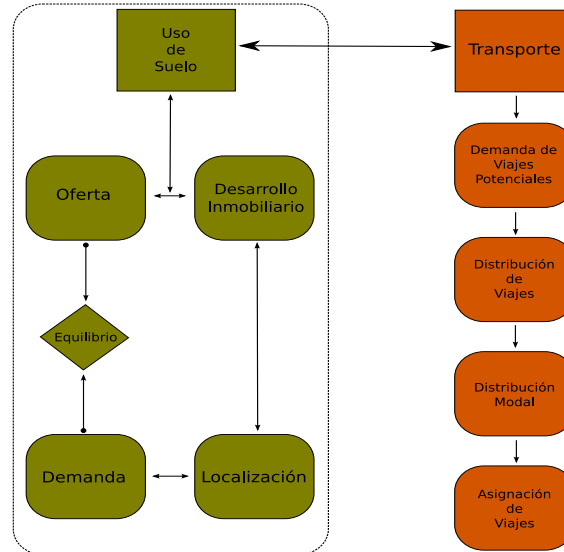


Figura 1.5. Diseño conceptual de los modelos clásicos de uso de suelo y transporte

se puede ver existe un juego circular entre el uso de suelo y el transporte y es por ello que en general se busca contar con modelos que acoplen estos dos sistemas en un sólo marco de trabajo, de ahí que se hable de modelos de uso de suelo y transporte.

La estructura general de este tipo de modelos se puede observar en la figura 1.5, en donde por un lado se tiene el modelo de uso de suelo, que a través de algún mecanismo de balance entre oferta y demanda o de alguna otra herramienta determina la distribución espacial de los usos de suelo, y por otro lado se tiene al modelo de transporte que determina los flujos entre las zonas consideradas por el modelo de uso de suelo. Típicamente los dos modelos se acoplan a través de la accesibilidad, que influencia la localización de hogares y compañías. Antes de continuar con la exposición de los pormenores de éste tipo de modelos conviene exponer brevemente algunos de los fundamentos metodológicos que los sustentan, con este objetivo, en las siguientes secciones se expondrán algunas de las principales técnicas de modelación empleadas en el estudio del uso de suelo y transporte.

### 1.2.1. Modelos de interacción espacial

La interacción espacial (IE) se puede definir como la comunicación a través del espacio o el movimiento que resulta de un proceso de decisión (Ding, 2007 [10]), en este proceso los tomadores de decisiones (ya sean estas organizaciones, habitantes u otro tipo de actor social) balancean los posibles beneficios de la interacción con los costos asociados con superar la distancia. Este tipo de modelos representan el núcleo de los modelos integrados de uso de suelo y transporte que podríamos llamar *clásicos*, y aunque el enfoque contemporáneo está cambiando hacia nuevos tipos de modelos, es conveniente revisar los principales conceptos involucrados en los modelos de interacción espacial.

En general, los modelos de IE predicen la magnitud y la dirección de los flujos (ya sea de personas, bienes o comunicaciones) utilizando como variables independientes algunas propiedades estructurales de las zonas que se van a modelar y asumiendo alguna forma funcional para la variación de la influencia de las zonas con la distancia. Adicionalmente, es posible incluir constricciones en el modelo, es decir limitar la cantidad de flujos originados en una zona, o bien el flujo que entra a una zona o ambos. Para clarificar estas ideas analizaremos la forma más general del modelo de IE.

Asumamos que se está tratando de modelar el flujo de personas entre dos regiones o zonas de modelación denominadas  $i$  y  $j$ , entonces, el modelo de IE asume que el flujo de personas entre dichas zonas ( $T_{ij}$ ) será proporcional a la población de la zona de origen  $W_i$ :

$$T_{ij} \propto W_i \quad (1.1)$$

De igual manera se asume que el flujo  $T_{ij}$  es proporcional a alguna variable estructural de la zona de destino  $j$ , por ejemplo la cantidad de empleos disponibles o la oferta de bienes y servicios de dicha zona:

$$T_{ij} \propto W_j \quad (1.2)$$

Finalmente, es necesario asumir la forma funcional de la dependencia de la influencia de una zona con la distancia. Inspirados en la física, y en particular en la gravitación universal (Alonso, 1964 [2]), se asume que la interacción entre dos zonas ( $T_{ij}$ ) decae con alguna potencia  $\alpha$  de la distancia ( $d_{ij}$ ) entre las dos zonas:

$$T_{ij} \propto \frac{1}{d_{ij}^\alpha} \quad (1.3)$$

La introducción de ésta forma de interacción no proviene propiamente de ninguna teoría geográfica, sino más bien de una analogía con la ley de gravitación uni-

versal que es una muy conocida forma de interacción a distancia, en el caso de la IE, el exponente  $\alpha$  de la ecuación 1.3 permite ajustar la dependencia espacial a datos obtenidos en campo, esto da mayor flexibilidad al modelo que la adopción de la ecuación gravitatoria, en la que la variación con la distancia es inversamente proporcional al cuadrado de la misma. Una justificación común es pensar en  $\alpha$  como el efecto friccional de la distancia, es decir, como una medida de la resistencia implícita (ya sea por la dificultad del terreno o por los costos asociados) para superar una distancia dada. Combinando las ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3 se obtiene la forma más general del modelo de IE, donde  $\kappa$  es una constante de proporcionalidad asociada con las unidades de  $W_i$  y  $W_j$ :

$$T_{ij} = \kappa \cdot \frac{W_i W_j}{d_{ij}^\alpha} \quad (1.4)$$

Para resolver éste tipo de modelos lo que se hace es dividir la región de modelación en  $M$  zonas  $\{i_1, i_2 \dots i_M, \}$ , asociar a cada una de dichas zonas sus variables estructurales  $W_i$  y luego resolver el sistema de ecuaciones resultante. A partir de esta forma general, se pueden añadir suposiciones extra, por ejemplo la restricción por producción;

$$\sum_j^M T_{ij} = O_i \quad (1.5)$$

con esta suposición se asegura que la suma de todos los flujos que salen de la zona  $j$  sea igual a  $O_i$  que es la cantidad total de flujo que se *conoce* (a través de datos) que sale de la zona  $j$ . También es posible añadir una restricción por atracción, en la que el total de flujos ( $D_j$ ) que ingresan a la zona de destino  $i$  se asume conocido y entonces se añade la ecuación de restricción:

$$\sum_i^M T_{ij} = D_j \quad (1.6)$$

Resumiendo, las ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6 expresan la forma más general del modelo de interacción espacial doblemente restringido para un solo mercado. El marco puede fácilmente extenderse para acomodar varios mercados haciendo ecuaciones de estado (1.4) y de restricciones para cada bien o servicio considerado en el modelo.

Existen diferentes variaciones de la forma general que se ha expuesto, como los modelos de maximización de entropía (Fotheringham, 2000 [12]) o los modelos de elección discreta (Ding, 2007 [10]), sin embargo en el fondo todos se reducen formas matemáticas similares al modelo de IE (Torrens, 2000 [33]). En este sentido es



importante destacar que bajo el marco conceptual de los modelos de IE, el ejercicio de zonificación de un área urbana se reduce a un problema de optimización en términos matemáticos, es decir, zonificar un área urbana es equivalente a optimizar la solución de las ecuaciones constitutivas (ecuaciones 1.4 a la 1.6) sujetas a las condiciones que el modelador (o planeador) considere que optimice los flujos entre las zonas. Dichas condiciones pueden ser introducidas como constricciones en el costo total o en la cantidad de viajes o condiciones de minimización del tiempo de recorrido.

Desde el punto de vista operacional, la mayor dificultad de los modelos de IE estriba en su nivel de complicación, si pensamos que para su adecuada representación una región urbana puede ser dividida en unos pocos cientos de zonas de estudio, y que en un ejercicio de modelación se pueden considerar del orden de una decena de mercados, entonces el modelo se convierte en un sistema del orden de  $10^3$  o  $10^4$  ecuaciones acopladas dependiendo de las constricciones impuestas. Este volumen, inclusive para los estándares computacionales de hoy día, resulta poco manejable. Por otro lado, la división de la ciudad en zonas de estudio acarrea problemas de unidad de área modificable (Benenson, 2004 [4]). Además, para la adecuada caracterización de las zonas de estudio se necesita de datos exhaustivos del área de estudio y de técnicas de análisis estadístico y geoestadístico para agregar las variables censales y distribuirlas espacialmente. Dejando de lado el problema de falacia ecológica que resulta de este tipo de análisis, el requerimiento de información por sí mismo limita el espectro de aplicación, especialmente para países en vías de desarrollo.

### Modelos de elección espacial

Aunque operativamente son similares a los modelos de interacción espacial, los modelos de elección se derivan de la teoría de decisiones y buscan explicar los fenómenos de localización en términos del proceso de toma de decisiones. Dentro de esta familia de modelos los más comunes son los modelos de utilidad aleatoria, para simular el proceso de toma de decisión, los modelos de utilidad aleatoria parten de tres suposiciones básicas:

1. Se asume que el tomador de decisión es enfrentado con un conjunto discreto de alternativas de elección.
2. La elección tomada será aquella que represente la mayor utilidad (o satisfacción). Por ejemplo, en términos de localización de viviendas, la elección de un lugar dependerá del balance entre la satisfacción de las necesidades

del hogar (acceso a servicios, escuelas parques, etc.) y la disponibilidad de recursos económicos.

3. Las elecciones se hacen de manera probabilística (de ahí el término aleatorio), esto es, se asume que los tomadores de decisión tienen cierta probabilidad de hacer una elección determinada.

Operacionalmente, el marco es similar a los modelos de IE, la ciudad se divide en zonas de estudio, y cada zona es caracterizada por sus *variables de estado*, que por ejemplo, en el caso de la localización residencial estarían asociadas con las características típicas (o promedio) de las casas disponibles en cada zona de estudio. Después, se asume una forma de dependencia funcional para la utilidad en términos de las variables de estado, ésta dependencia es la manera de calcular la satisfacción de las necesidades del hogar. En general, la función de utilidad se deriva de la teoría clásica de la economía y por lo tanto comparte las mismas suposiciones, principalmente los principios de racionalidad perfecta y de ganancias decrecientes. Una explicación detallada de éste tipo de modelos escapa a los objetivos del presente trabajo, baste aquí decir que aunque los modelos de elección espacial son una alternativa a los modelos de IE que refleja mejor el carácter humano del uso de suelo en las ciudades, siguen siendo limitados en su espectro de aplicación, en buena medida porque comparte el marco metodológico de los modelos de IE y por lo tanto comparte también sus limitaciones, pero además, actualmente se reconoce que la delimitación entre las posibles alternativas de elección es difusa y no discreta (Torrens, 2000, [33])

### Teoría de la utilidad urbana

Ésta teoría fue popularizada por William Alonso (Alonso, 1964 [2]) en la década de los sesenta y se deriva en buena medida del modelo de Von Thünen que se discutió en la sección 1.1. Asumiendo que la ciudad sea monocéntrica (es decir, que existe una única ZCN) y la existencia de un número pequeño de usos de suelo diferentes, la teoría de la utilidad urbana dice que el arreglo espacial de las ciudades es el resultado de la competencia por la tierra entre los diferentes usos de suelo posibles, y que la habilidad para competir de dichos usos de suelo está determinada por la utilidad que puedan obtener a partir de la accesibilidad a la ZCN. El arreglo espacial resultante se puede ver en la figura 1.6; cercano a la ZCN, la utilidad más alta es para el comercio y mientras su curva de utilidad esté por encima de las demás éste será el uso de suelo predominante, hacia afuera de la ZCN la curva de mayor utilidad corresponde al uso de suelo industrial, y finalmente se tiene la zona residencial que en éste modelo se encuentra en la periferia de la ciudad. Cabe

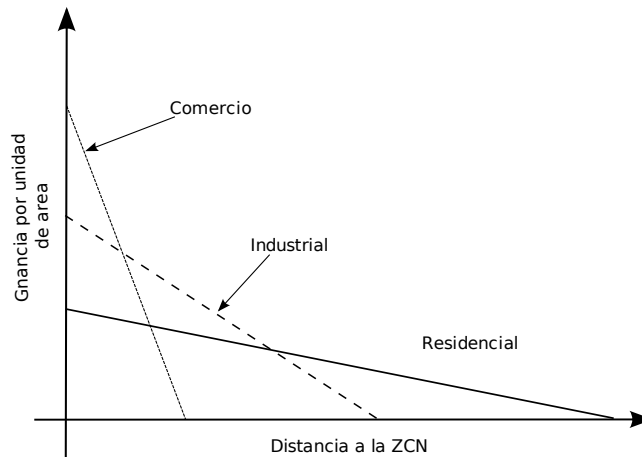


Figura 1.6. Funciones de utilidad para tres diferentes usos de suelo

mencionar aquí que este es sólo un ejemplo ilustrativo y que en general las curvas de utilidad pueden representar gradientes no lineales y un número mayor de usos de suelo.

Como se puede ver, una parte central de ésta teoría es la estimación de las funciones de utilidad para cada tipo de uso de suelo, la estimación de dichas funciones involucra cuestiones monetarias, pero también factores más intangibles como por ejemplo, en el caso residencial, serían las preferencias por la accesibilidad a espacios abiertos (parques), centros de entretenimiento la tranquilidad del lugar, etcétera. Estos factores intangibles resultan difíciles de cuantificar y por lo tanto de incorporar en las funciones de utilidad. A pesar de las limitaciones de la teoría, la utilidad urbana sigue siendo un componente fundamental en muchos modelos operacionales de uso de suelo y se han desarrollado variantes muy sofisticadas, como los modelos Hedónicos de precio, en los que el valor de una propiedad se descompone en sus factores constitutivos, como el número de habitaciones, cantidad de baños, accesibilidad a servicios y otros, a cada uno de estos factores se les asocia un precio de mercado, de modo que el precio de una propiedad es función de su localización y de sus características. Sin embargo, el utilizar el precio como única variable en la modelación de la localización es una limitante ya que deja fuera todo rasgo cultural o de valor asociado con las decisiones de localización, además, puede resultar difícil contar con información al respecto de los precios de las propiedades.

Con esto concluye la discusión sobre las técnicas subyacentes a la mayor parte de los modelos de uso de suelo y transporte, ahora se procederá a describir brevemente los componentes (submodelos) del modelo conceptual de la figura 1.5.

### 1.2.2. Localización

En este submodelo se simulan los mecanismos que rigen las dinámicas que afectan la localización espacial de las actividades dentro de una ciudad. Es de esperarse que estos mecanismos dependan del tipo de actividad, por ejemplo, las variables que afectan la localización de un comercio serán diferentes que las de una industria manufacturera o las de una vivienda. En vista de lo anterior, el modelo de localización se divide en una categorización amplia de las actividades urbanas, típicamente en localización industrial, comercial y residencial. Recientemente se ha observado un cambio en las ciudades de centros industriales a centros de comercio y servicios (Portugali, 2006 [27]; Boisier, 2002 [6]), es por ello que la localización residencial y comercial se consideran como centrales en este tipo de modelos, dejando de lado la localización industrial.

#### Localización residencial

Existen principalmente tres teorías que explican la localización residencial, la teoría de la utilidad urbana, la de minimización del costo de viaje y la de balance entre costo por vivienda y costo de viaje. En el marco de utilidad urbana, la decisión de localización de un hogar se expresa en términos de su función de utilidad como se ve en la figura 1.7. El hogar **A**, compuesto por jóvenes solteros o parejas sin hijos (en todo caso compuesto por asalariados) tendrá una menor necesidad de espacios abiertos y un ingreso relativamente alto, en consecuencia su curva de utilidad será más inclinada y tenderán a vivir cerca del centro de la ciudad. Por el contrario, el hogar **B**, compuesto por una familia requerirá de mayores espacios abiertos y de acceso a escuelas y servicios de recreación de modo que su curva de utilidad tenderá a ser mas plana y por lo tanto a localizar sus viviendas en la periferia de la ciudad.

Por otro lado, la minimización del costo de viaje supone que el único factor que influencia la localización de una vivienda es la reducción de la necesidad de transportarse. En consecuencia, asumiendo una ciudad monocéntrica, las localizaciones más buscadas serían aquellas cercanas a la ZCN y por lo tanto serían ocupadas por los hogares más pudientes, mientras que en la periferia se tendrían las viviendas de las familias de escasos recursos. Evidentemente, la minimización del transporte no es el único factor que afecta las decisiones de localización, de hecho, como ya se mencionó antes existen toda una serie de factores que influyen estas decisiones.

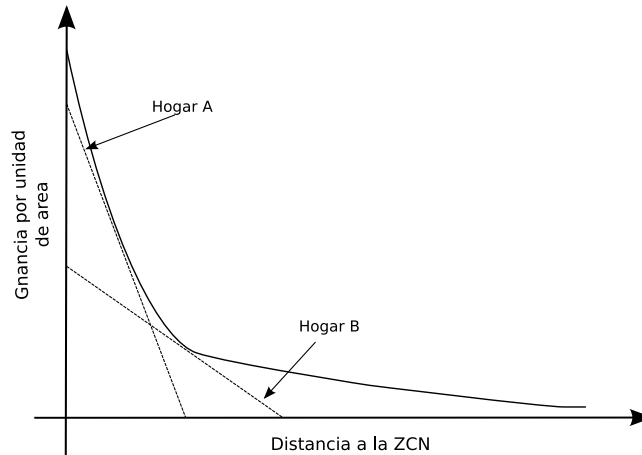


Figura 1.7. Localización residencial en el marco de la teoría de utilidad urbana

Entonces, para tener un marco más realista, se desarrolló la teoría de balance entre costo por vivienda y costo de viaje. De acuerdo a este marco, los hogares balancean entre el tiempo de viaje y el costo de la vivienda para tomar una decisión de localización, en términos geográficos esta situación nos lleva en principio a tener utilidades más altas para las viviendas situadas cerca de la ZCN y menores conforme nos alejamos de la misma. Sin embargo, el balance puede ser mucho más complicado al tomar en cuenta los factores intangibles, por ejemplo, para un hogar acomodado el balance entre precio de la vivienda y costo de viaje puede no ser un factor ya que podría costear ambos. En este caso, la decisión de localización podría tomarse en términos de accesibilidad a espacios abiertos o de disponibilidad de terrenos más amplios para construir. Además, las tecnologías modernas de transporte pueden hacer más accesibles a la ZCN a algunos suburbios suburbanos por encima incluso de lugares dentro del núcleo mismo de la ciudad. En conclusión, dentro de este marco metodológico (derivado de los modelos de IE y de la teoría de la utilidad urbana), resulta complicado incorporar algunos de los factores más importantes que están involucrados en las decisiones de localización residencial.

### Localización comercial

En términos de la teoría de utilidad, el uso de suelo comercial (o industrial) gana en la competencia a todos los demás usos de suelo, en particular al uso residencial

(salvo quizá en el caso de los complejos de departamentos), esto simplemente porque el uso comercial puede potencialmente derivar una mayor utilidad que cualquier otro. En términos de curvas de utilidad esto quiere decir que el uso comercial tendrá la pendiente más grande y por lo mismo estará localizado cerca de la ZCN, si se piensa un poco esta afirmación resulta una tautología ya que es precisamente la ZCN la que se caracteriza por una ocupación casi exclusivamente comercial. Por otro lado, al desarrollarse suburbios de clases altas, la necesidad de acceso a bienes y servicios se puede modificar, haciendo que surjan parches de actividad comercial y eventualmente el surgimiento de zonas de negocios alternas a la ZCN.

Para una revisión de cómo se utilizan las técnicas de modelación descritas en la sección 1.2.1 para modelar la localización urbana se refiere al lector al trabajo de Putman (Putman, 1979 [28]) que parte de la premisa de que la localización de los empleos es la fuerza dominante en la dinámica del uso de suelo o al trabajo de Ding (Ding, 2007 [10]), que desarrolló un modelo de localización residencial basado en la teoría de Alonso utilizando el marco de elección espacial.

### 1.2.3. El proceso de desarrollo del suelo urbano

Por desarrollo del terreno urbano se entienden dos procesos distintos, el primero es el desarrollo de terrenos previamente desocupados, y el segundo es el re-desarrollo o conversión de terrenos previamente ocupados para conferirles un nuevo tipo de uso de suelo (esto podría ser pasar de viviendas a comercios o de casas unifamiliares a condominios). El primer caso es poco frecuente en los núcleos consolidados de las ciudades debido a la casi nula disponibilidad de terrenos sin desarrollar, sin embargo es el proceso dominante en el crecimiento de la mancha urbana hacia áreas rurales. Por otro lado, la conversión de terrenos en los núcleos urbanos es central en la dinámica del uso de suelo, cuestión que es evidente en fenómenos como la gentrificación o el decaimiento de vecindarios o en el surgimiento de polos de desarrollo alternos a la ZCN.

En términos puramente teóricos, el desarrollo de suelo urbano es generado por un exceso en la demanda del mismo, este exceso induce a los desarrolladores inmobiliarios a invertir y desarrollar terrenos que satisfagan dicha demanda. Un terreno será desarrollado (ya sea por primera vez o reconvertido) si el desarrollador estima que es posible obtener una utilidad al hacerlo, en este sentido, los desarrolladores hacen un balance entre el costo total de desarrollar el terreno y el precio de venta, si el balance resulta positivo, el terreno será desarrollado. En la estimación del costo de un desarrollo inmobiliario intervienen una serie de factores; el precio del suelo, el costo de la construcción (materiales, mano de obra, etcétera), los permisos e impuestos necesarios y probablemente el costo del financiamiento. En cuanto a

la estimación del precio de venta, quizá el factor más delicado sea el tiempo de desarrollo y venta, que suelen ser periodos relativamente largos (comparados con otro tipo de inversiones) lo que propicia que la inversión quede expuesta a factores económicos externos (devaluaciones y crisis financieras por ejemplo) o a cambios originados por la dinámica propia de la ciudad (decaimiento del vecindario o cambios en el uso de suelo circundante), que pudieran afectar el precio final de venta (Adams, 1994 [1]).

Además de las consideraciones anteriores, el fenómeno de la especulación inmobiliaria dificulta aun más el modelaje del desarrollo del suelo urbano. En todo momento, los desarrolladores inmobiliarios mantendrán sin desarrollar alguna proporción del terreno disponible por motivos especulativos, esperando obtener a posteriori una ganancia mayor. Para que un desarrollador inmobiliario obtenga una utilidad neta de un proyecto es necesario tomar en cuenta varios factores, primero la ganancia final debe ser superior a la generada por otro tipo de inversiones, en caso de que el capital usado para el desarrollo sea producto del financiamiento, la ganancia debe superar el interés generado por el financiamiento durante el tiempo de desarrollo, además, durante este lapso, la propiedad genera cobros de impuestos que deben también tomarse en cuenta (Bramley, 1995 [7]). En todo caso, la parte central de este argumento es que la decisión del momento óptimo para invertir en un desarrollo inmobiliario (y por lo tanto del lapso que la tierra es retenida para la especulación) es subjetiva y está sujeta a factores humanos que son difíciles de manejar en el marco de los modelos tradicionales de uso de suelo y transporte, ésta situación ha llevado a que la mayor parte de este tipo de modelos no tengan un mecanismo explícito para el desarrollo del suelo urbano (Torrens, 2000 [33]).

#### 1.2.4. Oferta, demanda y equilibrio

El marco operacional clásico de los modelos de uso de suelo y transporte está fundamentado en la teoría económica, es por esto que el mecanismo de equilibrio entre oferta de suelo y demanda del mismo juega un papel central. En principio se podría pensar que la oferta total de tierra en una ciudad es fija, aunque los procesos de incorporación de áreas rurales y ocupación de reservas naturales añaden nuevos terrenos a las ciudades. Sin embargo, la cantidad disponible de tierra desarrollable es sumamente dinámica y depende por ejemplo de la intensidad de uso del suelo, de las políticas de planeación pública, de la especulación inmobiliaria, etcétera.

Por otro lado, la demanda es en principio dominada por la utilidad (en términos económicos) esperada de una decisión de localización. En este sentido, se habla de dos tipos de utilidad generada por la ocupación, la utilidad por el uso y la utilidad

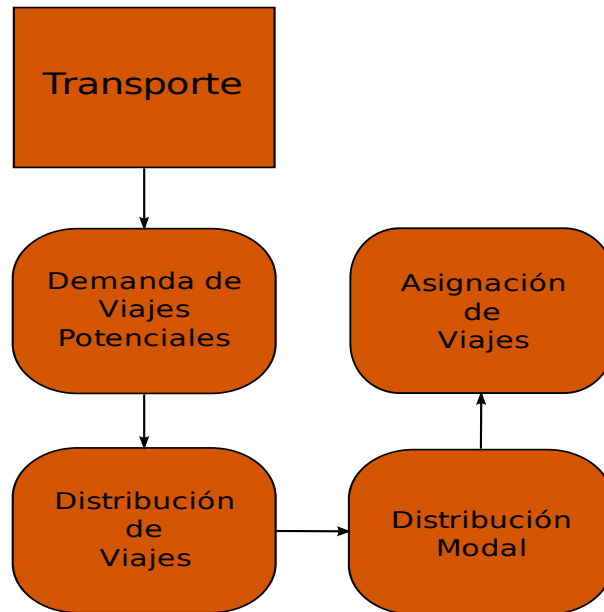


Figura 1.8. Etapas en la modelación del sistema de transporte

por intercambio. La primera se refiere al provecho que se obtiene del usufructo de una locación particular, en el caso de un negocio por ejemplo, la utilidad de uso se refiere al exceso de clientes con respecto a otras locaciones posibles. La utilidad por intercambio es aquella generada por la compraventa de inmuebles y está íntimamente ligada al proceso de desarrollo del suelo que se discutió anteriormente.

Bajo el marco de la teoría de la utilidad urbana, y los modelos de IE, el equilibrio entre oferta y demanda es modelado a través de constricciones como las expresadas en las ecuaciones 1.5 y 1.6, sin embargo este método no tiene una justificación desde la teoría geográfica sino que está basado en consideraciones puramente económicas. De hecho, la misma noción de equilibrio entre oferta y demanda es discutible (Adams, 1994 [1]) ya que debido a los tiempos inherentes al desarrollo inmobiliario, la dinámica de la oferta varía más lentamente que la demanda, de modo que es la demanda el mecanismo que domina en la determinación del precio de un inmueble. Esta falta de simetría entre oferta y demanda ocasiona que el mercado inmobiliario se encuentre en general fuera de equilibrio.



### 1.2.5. El sistema de transporte

Tradicionalmente el sistema de transporte se modela en un proceso de cuatro etapas como se ve en la figura 1.8. En la primera etapa se generan los viajes potenciales que salen de cada zona de estudio, en la etapa de distribución los viajes generados en la etapa anterior son localizados en los destinos posibles. Estas dos etapas normalmente son el resultado de un modelo de IE en el que se divide a la ciudad en unidades llamadas zonas de análisis de tráfico (ZAT) que son caracterizadas por sus variables de estado (habitantes en edad laboral en el caso de las zonas de origen y cantidad de empleos disponibles para las zonas de destino), de esta manera es posible obtener una matriz de viajes entre todas las ZAT. En la tercera etapa, los viajes generados y localizados en las dos etapas anteriores se distribuyen entre los diferentes medios de transporte disponibles (coche particular, transporte público) mediante algún mecanismo de desagregación (típicamente los datos de transporte generados por las autoridades). Finalmente, en la etapa de asignación, se asignan los viajes por tipo de transporte a segmentos específicos de la red vial. Las dos últimas etapas del proceso son modeladas generalmente utilizando el marco de elección espacial asignando la opción que optimice en cada caso el costo generalizado del viaje (es decir, no sólo el costo económico sino también el tiempo de viaje).

Durante mucho tiempo los sistemas de uso de suelo y de transporte se trabajaron de manera independiente, sin embargo, siempre se ha reconocido que estos dos sistemas están fuertemente interrelacionados y a partir de la década de los noventa se han hecho varios intentos por acoplar los dos sistemas al nivel de modelación. Este acoplamiento en la práctica se da a través de la generación de viajes y del concepto de accesibilidad. La accesibilidad puede ser definida como la facilidad con que las actividades ofrecidas en una zona puede ser alcanzadas desde otra zona usando un modo de transporte en particular. En estos términos, la accesibilidad de una locación particular influencia el precio de dicha localización y entonces juega un papel importante a la hora de determinar (por ejemplo mediante funciones de utilidad) los usos de suelo que dominan una zona de estudio. A su vez los usos de suelo dominantes determinan tanto los viajes generados como los viajes esperados por una zona de estudio.

Con esto concluye la exposición de los modelos tradicionales de uso de suelo y transporte, en lo que resta del capítulo se hará un breve análisis de las principales deficiencias y virtudes de este tipo de modelos.

### 1.3. Limitaciones de los modelos tradicionales

En 1973 Douglas Lee (Lee, 1973 [22]) anunciaba el fin de los modelos urbanos de gran escala, en su artículo hacía referencia a siete *pecados capitales* de este tipo de modelos. Algunas de las críticas que hacía iban encaminadas a las dificultades técnicas de su implementación, por ejemplo se hablaba de la voracidad de datos que tenían los modelos de gran escala (Lee hablaba de que la base de datos para modelar San Francisco constaba de más de 30,000 registros) y de los problemas computacionales derivados del alto grado de complicación de los sistemas de ecuaciones que definían los modelos. Actualmente la mayor parte de las dificultades técnicas han sido resueltas, el manejo de grandes volúmenes de datos no es más un problema, y los avances en eficiencia computacional (a nivel tanto de hardware como de técnicas de programación) han solventado en buena medida los principales problemas computacionales. Sin embargo, la mayor parte de las críticas que se hicieron desde el punto de vista conceptual siguen vigentes, en particular aquellas que Lee llamaba *Wrong-headedness* y *Complicatedness*. La primera tiene que ver con que los modelos no estaban contruidos para reflejar el comportamiento de la ciudad, sino por el contrario, estaban hechos para poder adaptarse a los datos disponibles. La segunda, por otro lado, tiene que ver con que al trabajar en el nivel agregado, los modelos urbanos presuponían muchas de las estructuras que se supone tendrían que modelar, es decir, dado que los modelos ignoraban por completo el comportamiento a nivel microscópico de la ciudad, las estructuras (patrones espaciales) que resultaban del modelado estaban sujetas a problemas de unidad de área modificable y falacia ecológica. En resumen, los modelos de la época no estaban suficientemente sustentados en ninguna teoría geográfica y eso debilita su posición como herramientas válidas para investigar el medio urbano.

Un punto de partida importante para superar las limitaciones de los modelos urbanos (en particular los de uso de suelo y transporte) son los lineamientos del TMIP (*Travel Model Improvement Program* [18]). Partiendo de un punto de vista operacional, el programa ha establecido una serie de necesidades críticas que los modelos deben buscar cumplir, desde aspectos relacionados con las interfaces con el usuario hasta cuestiones conceptuales como el tratamiento zonal y el manejo de la dinámica. A continuación se describirán los puntos principales que destaca el TMIP como centrales en la construcción de modelos urbanos.

#### 1.3.1. Dinámica

Los modelos de uso de suelo deben ser capaces de reproducir la habilidad de las ciudades de cambiar en el tiempo. Tradicionalmente la dinámica se introduce

a los modelos a través de cortes seccionales de datos temporales (por ejemplo datos censales cada diez años), sin información alguna de lo que sucede entre dos cortes temporales. Es cierto que en la mayor parte de los casos dichos cortes son los únicos datos temporales que existen y por lo tanto siempre serán la principal fuente de información para la calibración, pero incorporar en los modelos de forma explícita mecanismos para tratar la dinámica urbana permitiría generar escenarios futuros más realistas y además, al evaluar diferentes mecanismos dinámicos, podría favorecer el avance en el campo de la teoría geográfica urbana.

### 1.3.2. Nivel de detalle

Los ejercicios de modelación deben buscar un nivel óptimo de resolución espacial y de desagregación socioeconómica para representar los fenómenos que se busca modelar. Es necesario incluir una mayor variedad de usos de suelo y representar los hogares en categorías socioeconómicas menos agregadas. En éste sentido las técnicas de microsimulación pueden ayudar a encontrar niveles adecuados de desagregación socioeconómica, mientras que la manipulación y transformación de los datos espaciales para llevarlos al nivel de detalle requerido se puede hacer a través de técnicas desarrolladas en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

### 1.3.3. Interfase con el usuario

Los modelos deben de ser capaces de comunicarse con los usuarios. Una parte central de esto es por supuesto la visualización, pero también es importante que los modelos sean desarrollados teniendo en cuenta las demandas de la sociedad y la política pública en general. Esto no quiere decir que los ejercicios de modelación urbana deban ser siempre concebidos como herramientas de apoyo en la planeación de políticas públicas, sino más bien, que al partir de inquietudes sociales, los modelos, además de ser capaces de contribuir en la planeación, tenderán a reflejar mejor el modo en que la sociedad influye en la construcción de la ciudad.

### 1.3.4. Flexibilidad

Es importante que los modelos de uso de suelo y transporte sirvan a un rango amplio de escalas espaciales, los fenómenos locales, generados por la interacción a nivel individual, deben integrarse de manera transparente con los fenómenos globales que afectan a la ciudad en su conjunto. Por otro lado, los modelos deben ser diseñados modularmente en componentes que puedan ser probados y usados individualmente, de esta manera se mejora en la portabilidad de los modelos y en la generalización de las representaciones.

### 1.3.5. Realismo

El comportamiento de los individuos que constituyen una ciudad es una fuerza importante en la generación de patrones espaciales, los modelos urbanos deben incorporar mecanismos que permitan representar los diferentes patrones conductuales de los individuos, las organizaciones y el gobierno en un mismo marco de modelaje. Los modelos tradicionales expuestos en este capítulo centran su atención en los fenómenos globales que afectan a la ciudad (por ejemplo las fuerzas económicas y los ordenamientos públicos), mientras que el comportamiento individual es ignorado o bien incorporado aleatoriamente (como en los modelos de elección espacial), esto ocasiona que, por un lado el rango de aplicación de los modelos sea reducido, y por otro lado, los resultados obtenidos sean poco realistas y abiertos a críticas desde la teoría geográfica.

Hasta aquí se han examinado las metodologías más representativas del modelaje urbano *clásico* así como sus limitaciones. Como hemos visto, la mayor parte de las limitaciones provienen de una pobre conceptualización del medio urbano que resulta demasiado rígida en sus suposiciones y centrada excesivamente en la dimensión económica. En el siguiente capítulo se propondrá un marco de modelaje basado en la teoría de sistemas complejos adaptativos que pretende superar dichas limitaciones conceptuales.

## CAPÍTULO 2

---

### Geosimulación

---

Una característica común de los modelos descritos en la sección 1.2 es que todos ellos están fundamentados en una visión sistémica del medio urbano, la ciudad es vista como un sistema formado por la articulación de subsistemas que se identifiquen como sustantivos al problema que se este tratando. Por ejemplo, en el caso de los modelos integrados de uso de suelo y transporte, en un primer nivel de abstracción, el sistema urbano se separa en los subsistemas de transporte y uso de suelo, a su vez cada uno de dichos subsistemas es conceptualizado, como se ve en la figura 1.5, como la articulación de otros subsistemas. Partiendo del enfoque sistémico, Forrester (Forrester, 1969 [11]) con su modelo *Urban Dynamics* y Lowry (Lowry, 1969 [24]) con el *Modelo de Metrópolis*, introdujeron los primeros tratamientos formales (en términos matemáticos) para el estudio de la estructura (en el caso de Lowry) y dinámica urbanas (en Forrester). Ambos modelos estaban desarrollados a partir de conceptos derivados de la dinámica de sistemas y de las ciencias económicas. Las ideas centrales detrás de la aplicación de la dinámica de sistemas al estudio de las ciudades, o en términos más generales al estudio de sistemas sociales, son, por un lado, que al tratarse en todos los casos de sistemas estos tendrían que compartir las mismas propiedades generales que cualquier otro tipo de sistemas (como proponía von Bertalanffy [36]), pero por otro lado, y esto es más importante para la discusión, que la dinámica de los sistemas sociales evolucionaba siempre hacia estados de equilibrio determinados por el entorno del sistema y por las variables internas del mismo. De acuerdo a esta visión las ciudades se encuentran, en principio, en equilibrio con su entorno (donde por entorno se entiende todo aquello que no es controlado por la misma ciudad) y los cambios que se observan en las ciudades son respuesta a modificaciones en éste último, pero

que una vez asimilados dichos cambios la ciudad estaría una vez más en un estado de equilibrio. Una consecuencia lógica de la visión anterior es que la planeación de las ciudades es un ejercicio de diseño, diseño social en este caso, y que existe una solución óptima al problema general de la planeación urbana. Si bien es cierto que esta conclusión es sumamente rebatible (por ejemplo en Boisier, 2002 [6]) y que el papel del modelaje en la labor de planeación urbana hoy día se concibe de manera muy diferente (y de esto se hablará más adelante en éste capítulo), existen algunos elementos que es muy importante rescatar de los modelos clásicos. Por un lado la visión sistémica del medio urbano, a partir de éste paradigma es claro que las ciudades no pueden ser entendidas a partir de la disección y descripción por mas exhaustivas que estas sean, la ciudad debe ser entendida como un todo compuesto de subsistemas más o menos independientes que se interrelacionan y se articulan entre sí. Y por otro lado, al introducir dinámicas no lineales en sus modelos (y por lo tanto al reconocer que la dinámica urbana es en esencia no lineal), tanto Lowry como Forrester apuntaban en la dirección de la simulación por computadora de los procesos urbanos como una herramienta de enorme valor en la investigación y en la práctica del modelaje urbano.

Partiendo de las ideas anteriores (la visión sistémica y la simulación digital), una dirección que ha tomado el desarrollo de una nueva generación de modelos urbanos es partir de una visión más de *abajo hacia arriba* en la construcción de los modelos. Hoy día se reconoce ampliamente que muchas de las estructuras urbanas y su evolución espacio-temporal pueden ser mejor entendidas a partir del estudio de las interacciones locales y las acciones individuales (ver por ejemplo Benenson, 2004 [4] para una perspectiva desde el modelaje matemático y Boisier, 1997 [5] para una visión más cualitativa). En este sentido, el campo de las ciencias de la complejidad ha aportado métodos para construir estos nuevos modelos, herramientas matemáticas como los autómatas celulares y los sistemas multiagentes han dado nueva vida al modelaje urbano. Esta *nueva ola* de modelos urbanos viene acompañada de nuevos desarrollos teóricos en la concepción del medio urbano, las ciudades son vistas como estructuras cuya estabilidad en el tiempo depende ya no del equilibrio, como en la visión sistémica clásica, sino más bien del constante cambio y adaptación a las nuevas condiciones que su medio ambiente le impone. En el resto del presente capítulo se expondrán por un lado algunas de las herramientas de modelaje derivadas del estudio de sistemas complejos aplicados al medio urbano, y por otro lado las consecuencias a nivel teórico de dichas aplicaciones.

## 2.1. Sistemas Complejos

La primera distinción entre sistemas simples y sistemas complejos se debe a Warren Weaver quien introdujo a mediados del siglo XX los conceptos de complejidad organizada y desorganizada. Dentro el contexto científico, Weaver distingue entre sistemas simples, aquellos que pueden ser descritos por un número reducido de variables y sistemas complejos, aquellos que necesitan un gran número de variables para su descripción. De éste último tipo de sistemas, aquellos que presentan complejidad desorganizada son comparables a los sistemas que estudia la mecánica estadística, un gran número de moléculas interactuando entre sí sin que se observe el surgimiento de estructuras estables (en termodinámica, por ejemplo, la distribución de velocidades de las moléculas de un gas da lugar a la temperatura, pero no se observa que las moléculas del gas tengan ningún arreglo espacial estable). Por otro lado, los sistemas de complejidad organizada se caracterizan por estar formados por una gran cantidad de elementos independientes, fuertemente relacionados entre sí y que de alguna manera dan lugar al surgimiento de estructuras estables sin la necesidad de una dirección central. Los ecosistemas son un ejemplo claro de éste tipo de comportamiento, la estructura global (o sea el ecosistema, la selva, el desierto o el bosque), es mantenida por las interacciones entre los individuos y los componentes físicos (el suelo, el agua, etc.) que forman el ecosistema. Otra característica de éste tipo de sistemas es que están dominados por procesos no lineales, por ejemplo, si en un ecosistema se extingue una única especie las consecuencias para el total del ecosistema pueden llegar a ser desastrosas y puede incluso llegarse a ver comprometida la existencia del mismo aun cuando la especie extinta represente únicamente, digamos, el 5% de la biomasa total. Son justamente estos sistemas de complejidad organizada los que forman el cuerpo de estudio de lo que se ha dado en llamar Ciencias de la Complejidad, y de aquí en adelante, cuando se hable de Sistemas Complejos (SC) se trata de éste tipo de sistemas.

A partir de las características mencionadas arriba es posible construir una definición informal de SC: Un SC está formado por un gran número de entidades relativamente simples y fuertemente relacionadas entre sí, sin un control central, y cuyo comportamiento global exhibe propiedades emergentes complejas. En éste contexto "relativamente simples" quiere decir que su papel funcional dentro del sistema es simple con relación al comportamiento global del sistema. En principio, cada componente podría ser un SC en sí, pero su rol funcional dentro del sistema es más sencillo de explicar que el comportamiento global del mismo; pensemos en un hormiguero, cada hormiga es en su propio derecho un organismo complicado, pero el papel de cada hormiga en el comportamiento global del hormiguero es relativamente simple.

El concepto de ‘propiedad emergente compleja’ es más difícil de definir, en principio se refiere a que el comportamiento global del sistema no sólo es complejo, sino que se deriva de la acción individual de los componentes, además el mapeo del comportamiento individual al comportamiento global es no trivial. En este sentido, la no linealidad de los SC juega un papel central, el todo es más que la suma de las partes. Para clarificar las ideas volvamos al ejemplo anterior; algunas especies de hormigas forrajeras cultivan hongos dentro del hormiguero para alimentar a sus larvas, éste comportamiento no está ‘programado’ en cada hormiga en particular (ninguna hormiga *sabe* cómo cultivar hongos), pero el ensamble de los comportamientos individuales da lugar al comportamiento emergente, el hormiguero cultiva hongos, además, a partir del estudio individual de cada tipo de hormiga que compone el hormiguero es imposible deducir el comportamiento global del mismo.

Hay otra característica de los SC que de alguna manera está implicada por las propiedades mencionadas arriba, pero que por la importancia que tiene en la discusión posterior conviene examinar por separado. Los SC son capaces de responder de más de una manera a cambios en el medio ambiente, la posibilidad de *elección* en la respuesta está dada por las dinámicas no lineales del sistema, estas dinámicas pueden amplificar heterogeneidades microscópicas (en este contexto microscópicas se refiere al nivel individual más que a una escala particular) ocultas. Los fundamentos matemáticos de la aseveración anterior son complicados y escapan al objetivo del presente trabajo (para una revisión más detallada se recomiendan los libros de John Holland *Emergence: From Chaos to Order* [17] y *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [16]), en este momento es suficiente con entender que en SC el determinismo científico queda limitado por la imposibilidad de conocer a priori la respuesta del sistema a un conjunto de condiciones iniciales dadas.

## 2.2. Sistemas Complejos Adaptativos

Examinemos con detenimiento un par de SC que presentan características muy especiales. En primer lugar el sistema inmunológico humano, éste está formado por un enorme número de entidades móviles, llamadas anticuerpos, que se encargan de combatir las infecciones (antígenos) que atacan al cuerpo humano, ahora bien, los antígenos (principalmente de naturaleza bioquímica como los virus y las bacterias) se presentan en una infinidad de variaciones, no sólo por la cantidad de virus y bacterias que atacan al organismo, sino también por su capacidad de mutar rápidamente, entonces, no es suficiente con que el organismo tenga una *lista* completa de todos los posibles invasores y que de esta manera genere anticuerpos para combatir a cada uno de ellos. Más bien el sistema inmunológico cambia constantemente y nunca conserva una configuración fija lo que le permite adaptarse y aprender para



permitir a sus anticuerpos repeler ataques de antígenos desconocidos. Sin embargo, a pesar de que el sistema inmunológico está en perpetuo cambio conserva una coherencia fundamental, de hecho, es posible identificar de manera inequívoca a una persona a partir de su sistema inmune.

Otro caso interesante es el sistema nervioso central de los mamíferos, al igual que el sistema inmunológico, éste está formado por una enorme cantidad de células (neuronas) y cada una de ellas está conectada de manera directa con otros cientos o miles de neuronas, la información se transmite en esta red en forma de pulsos eléctricos entre las neuronas (en el sistema inmune la información se transmite por medio de *mensajes* químicos), ahora bien, aun cuando en su propio derecho cada neurona es una célula sumamente complicada, es evidente que el arreglo global, es decir el sistema nervioso es mucho más complejo, y permite a los mamíferos enfrentarse a situaciones nuevas, partiendo de las experiencias anteriores, es decir tiene la capacidad de aprender. Esta capacidad del sistema nervioso está dada más por las interacciones entre las neuronas que por las acciones individuales de cada una, además, ocurre en ausencia de un control central, es decir, no existe una neurona *comandante* que dirija las acciones del ensamble.

Los dos ejemplos descritos anteriormente son interesantes porque presentan un caso particular de SC, aquellos que tienen la capacidad de aprender o adaptarse a cambios en su medio ambiente o de reaccionar de manera exitosa ante estímulos nuevos, a éste tipo de sistemas se les conoce como Sistemas Complejos Adaptativos (SCA) y representan uno de los campos más prometedores dentro de las ciencias de la complejidad. Ahora bien, para que el término SCA sea más que una etiqueta y se convierta en una teoría científica, es necesario que, a pesar de las particularidades exhibidas en cada uno de estos sistemas, existan propiedades que sean comunes a todos los sistemas de éste tipo. Existen varias propuestas al respecto de las características compartidas por todos los SCA, pero la más aceptada es la propuesta por Holland (Holland, 2004 [15]), que comprende siete características básicas, de las cuales cuatro son propiedades y tres son mecanismos. A continuación se expondrán dichas características básicas y se buscará relacionarlas con sus manifestaciones en el medio urbano.

### Agregación (Propiedad)

La agregación entra en juego en el estudio de SCA de dos maneras diferentes. Primero como una técnica que permite al investigador modelar dichos sistemas, extrayendo las características de los agentes que son relevantes al problema que se va a trabajar y de esta manera agrupando en una misma categoría a agentes que difieren sólo en las características desechadas, de esta manera se obtiene una

tipología de los agentes relevantes para un ejercicio de modelaje particular.

Por otro lado, la agregación es una propiedad intrínseca de los SCA, los agentes, a través de sus interacciones tienen la propiedad de agregarse en meta-agentes de una jerarquía superior (ver figura 2.2). Por ejemplo, en el caso de un hormiguero cada hormiga tiene un comportamiento sumamente estereotipado, y si las condiciones ambientales salen del estereotipo de la hormiga ésta seguramente morirá, sin embargo el hormiguero completo es un organismo mucho más complejo, que puede adaptarse a cambios drásticos en las condiciones ambientales, en este caso el hormiguero constituye el meta-agente formado por el agregado de las interacciones entre las hormigas individuales. Los meta-agentes formados por agregados de agentes individuales también tienen la posibilidad de actuar del mismo modo que los agentes e incluso pueden servir como agentes que se agregan para formar meta-meta-agentes en un nivel superior de la jerarquía del sistema.

En el caso de las ciudades, en principio, los agentes podrían ser todos los habitantes de la ciudad, pero estos se agregan de diferentes maneras, por ejemplo formando corporaciones o sindicatos, a su vez estos meta-agentes tienen capacidad de acción, y de hecho es posible observar que también se agregan formando federaciones de sindicatos o carteles de corporaciones.

Finalmente, es importante mencionar que los dos sentidos descritos de la agregación en SCA no son del todo independientes entre sí, frecuentemente los agregados que ocurren de manera natural en un SCA (es decir, agregados en el segundo sentido), sirven como base para modelar sus interacciones como agentes, es decir como agregados en el primer sentido.

### Etiquetado (Mecanismo)

El etiquetado, o más propiamente dicho, la selección por etiquetas, es un mecanismo fundamental para la formación de meta-agentes. Por ejemplo, en el caso de los anticuerpos del sistema inmune, los *sitios activos* (las estructuras proteínicas de los anticuerpos que son químicamente activas), les permiten adherirse a los antígenos. Otros ejemplos de etiquetado son las banderas de los ejércitos que les permiten a los soldados (agentes) reconocer a sus compañeros y agruparse para atacar al enemigo. Los patrones visuales y las feromonas que permiten el apareamiento selectivo también son ejemplos de etiquetado.

Una característica importante del mecanismo de etiquetado es que permite a los SCA manipular las simetrías entre sus agentes constitutivos, permitiéndoles distinguirse entre sí facilitando de este modo la discriminación y la cooperación.

Un ejemplo casi trivial de etiquetado en las ciudades es el de los nombres de las calles y las direcciones, estas permiten a los agentes desplazarse a lugares pre-

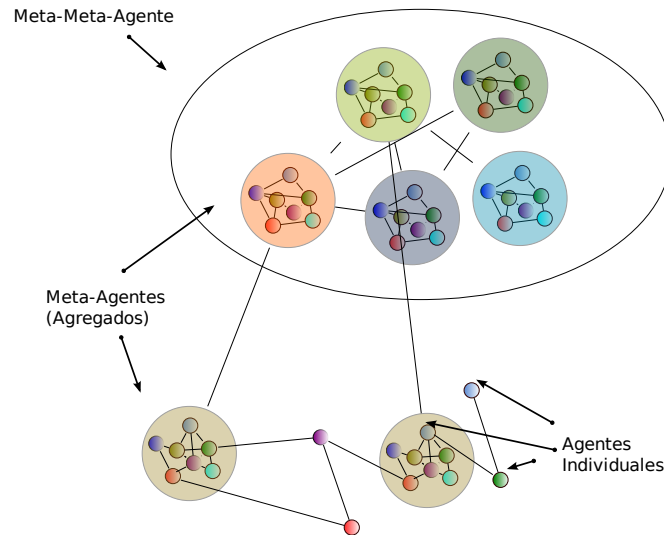


Figura 2.1. Agregación y jerarquía en un SCA

viamente desconocidos. Los logotipos de las firmas comerciales y de los partidos políticos son también ejemplos de etiquetados que permiten el surgimiento de meta-agentes dentro de las ciudades.

### No-Linealidad (Propiedad)

En matemáticas, se dice que un sistema es lineal si la salida  $O$  del sistema es proporcional a la entrada  $I$ :

$$O = \alpha \cdot I$$

Por ejemplo, la ganancia al hacer una inversión a renta fija es una función lineal de la cantidad invertida. Pensemos ahora en la ecología de una especie sujeta a una disponibilidad finita de alimento, en principio, cuando la población de la especie es pequeña, ésta puede seguir creciendo, eventualmente el tamaño de la población estará en equilibrio con la cantidad de alimento, pero la inercia del crecimiento ocasionará que la población aumente todavía un poco más, de modo que la comida no será suficiente para alimentar al total de la población y en consecuencia ésta comenzará a decrecer hasta que otra vez exista alimento disponible para todos los animales y así sucesivamente. En este caso el tamaño de la población no es

proporcional a la cantidad de alimento y por lo tanto la dinámica del problema es no lineal.

La idea de la linealidad está íntimamente ligada con el reduccionismo científico, de acuerdo a dicha postura los sistemas naturales pueden ser entendidos solamente en términos de cómo funcionan sus partes, por supuesto, si el sistema es lineal con respecto a todas sus componentes entonces esta afirmación es válida, pero evidentemente muchos sistemas no funcionan de esta manera, por ejemplo el hormiguero citado anteriormente; por más que comprendamos perfectamente cómo funciona cada tipo de hormiga, esto no será suficiente para entender cómo funciona el hormiguero en su conjunto.

La no-linealidad es una propiedad fundamental en la emergencia de comportamientos o patrones en los SCA, en los que las propiedades importantes no pertenecen a cada individuo sino a los agregados.

### Estructura de Red (Propiedad)

Una característica común de los ejemplos de SCA que se han expuesto hasta aquí es que todos comparten una estructura del tipo nodo-conector-recurso. En el caso del sistema nervioso por ejemplo, los nodos procesadores son las neuronas, mientras que los conectores son precisamente las conexiones entre las neuronas y el recurso que se transmite es la información (a manera de impulsos eléctricos). Esta característica dota a los SCA de una estructura de red, en la que se tienen una gran cantidad de nodos conectados entre sí y transmitiéndose diferentes tipos de recursos (ya sea como información, energía o materia prima). Esta estructura de red tiene dos consecuencias muy importantes para todos los SCA. Primero el llamado *efecto multiplicador*, supongamos que en un nodo de la red se introduce un recurso adicional, este nuevo recurso pasará de nodo en nodo transformándose en el camino y produciendo a su vez una cadena de cambios. Veamos un ejemplo del efecto multiplicador en economía. Al contratar a un constructor para hacer una casa, el pago que se hace sirve a su vez para que el constructor pague a sus empleados, que a su vez gastarán una parte de su pago en comprar alimentos, pagar renta, etc. Para cuantificar la situación, supongamos que por cada peso que se le paga al constructor 80 % es pagado por el contratista a sus empleados, que a su vez gastan el 80 % y así sucesivamente. De esta manera después de una etapa, sólo 0.8 del recurso original queda disponible, y después de dos etapas sólo queda  $0.8 * 0.8$  del recurso original de modo al final del ciclo se tiene que la cantidad de recursos es  $1 + 0.8 + (0.8)^2 + (0.8)^3 + (0.8)^4 + \dots = \frac{1}{1-0.8} = 5$ , es decir, el efecto de la red en la acción original se ve multiplicado por cinco.

El otro efecto importante de la estructura de red de los SCA es el efecto de

reciclaje o, en términos matemáticos, los ciclos de retroalimentación. Pensemos en las selvas tropicales, los aguaceros torrenciales lixivian el suelo ocasionando que los nutrientes sean drenados hacia los ríos, situación que ocasiona que el suelo de las selvas sea particularmente pobre en nutrientes, de hecho cuando se tala la selva y se substituye por cultivos se obtienen siempre rendimientos mediocres. Sin embargo, la selva virgen es uno de los ecosistemas con mayor diversidad y biomasa, esto sólo se puede entender a partir de la capacidad de la selva para reciclar los recursos desechados por las especies que la habitan.

En las ciudades, los efectos de red son evidentes en muchos fenómenos cotidianos (más allá de los efectos en la economía), por ejemplo, un accidente en una calle puede desencadenar congestiones en varias manzanas alrededor del accidente. Los efectos de reciclaje se ven por ejemplo en la enorme cantidad de familias que dependen económicamente de la industria de la basura.

### **Diversidad (Propiedad)**

Los SCA presentan gran diversidad en las formas y acciones de sus agentes. La persistencia de un agente depende de su adaptación a las condiciones impuestas por los demás agentes y el medio ambiente. Se puede pensar que cada agente (o más bien cada tipo de agente) ocupa un nicho en el SCA determinado por las interacciones centradas en dicho agente. La aparición de nuevos recursos en la red o de un nuevo tipo de agente puede precipitar la aparición de nuevos tipos de agentes o bien la extinción de tipos previamente exitosos, en este sentido la diversidad de tipos dentro de un SCA debe ser entendida como una característica dinámica del sistema.

En referencia a las ciudades la diversidad en los agentes que actúan en ella es evidente, las acciones de empresas (de diferentes sectores productivos y financieros), organizaciones gubernamentales, sindicatos e individuos cada cual con diferentes perspectivas e intereses se conjugan para dar forma al entramado urbano.

### **Modelos internos (Mecanismo)**

Para que los agentes (o meta-agentes) de un SCA puedan adaptarse a nuevas condiciones, es necesario que tengan un mecanismo para predecir los resultados de sus acciones y para aprender del éxito o fracaso de sus estrategias. Los modelos internos proveen el mecanismo necesario para dicho aprendizaje (adaptación). Los modelos internos pueden ser tácitos o explícitos, el mimetismo de los animales es un ejemplo de un modelo interno tácito, los animales que se mimetizan, ya sea con su entorno o con otros animales, lo hacen a partir del conocimiento, implícito en su historia evolutiva, de la ventaja que les confiere el aparentar pertenecer a

una especie diferente o el confundirse con su entorno. Por otro lado, los modelos internos también pueden ser explícitos como en el caso de los modelos económicos que utilizan las firmas financieras para predecir el comportamiento de los mercados.

Este es quizá uno de los aspectos más importantes de la teoría de SCA en lo que toca al modelaje urbano, bajo este contexto los modelos del medio urbano pueden ser interpretados como modelos internos del sistema y en este sentido contribuir a tener un mejor entendimiento de los cambios provocados por las acciones de los agentes del sistema urbano. El tema de los modelos internos y su papel en el modelaje urbano es central en el presente trabajo y por ello se discutirá con mayor profundidad en la sección 2.8 hacia el final del presente capítulo.

### **Bloques de construcción (Mecanismo)**

En general, un modelo interno está basado en muestras incompletas de un medio ambiente en constante transformación, sin embargo, para que los modelos tengan éxito en el sentido evolutivo o de aprendizaje, estos deben ser capaces de aplicarse a situaciones novedosas. En realidad, se trata de buscar regularidades que permitan reutilizar modelos generados para una situación específica fuera del contexto para el cual fueron diseñados. Por ejemplo, los humanos poseemos la habilidad de descomponer imágenes visuales complejas en bloques elementales que nos permiten identificar situaciones conocidas en contextos que previamente no conocíamos; es posible reconocer un puesto de comida callejera en lugares en los que nunca hemos estado, aún cuando no conozcamos el lenguaje local, a partir de la comparación con las escenas familiares de puestos de comida que hemos visto anteriormente. El mecanismo que dota a los modelos internos de la flexibilidad necesaria son los bloques de construcción, en términos generales, estos bloques representan una abstracción de la situación modelada en entidades que puedan ser reutilizables por otros modelos internos, se puede hacer una analogía con los juegos de construcción (como el logo), en los que una pequeña variedad de piezas diferentes permite armar prácticamente una infinidad de construcciones diferentes.

En lo que toca a la interpretación de las ciudades como SCA, el mecanismo de los bloques de construcción de los modelos internos del sistema nos indica la existencia de *objetos* (puede tratarse de agentes, relaciones, etcétera) que aparecen de manera regular en diferentes problemas urbanos, ya sea que se trate de modelos de diferentes fenómenos en una misma ciudad o bien del mismo fenómeno en diferentes zonas urbanas.

Después de haber revisado estos siete conceptos básicos comunes a todos los SCA, conviene ahora estudiar las herramientas matemáticas que nos van a permitir la construcción de simulaciones computacionales, en las siguientes secciones se

revisarán algunos conceptos básicos de la modelación computacional de SCA. A pesar de que los métodos que se expondrán tienen aplicaciones en todo el espectro de los SCA, nos centraremos en los usos de estos en el modelaje urbano.

### 2.3. El concepto de Autómata

El autómata es la idea fundamental a partir de la cual es posible construir modelos de SCA. Esencialmente, un autómata es un mecanismo de procesamiento cuyas características cambian con el tiempo de acuerdo a sus características internas, un conjunto de reglas e información externa. En términos formales se define un autómata  $A$  como un conjunto finito de estados  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  y un conjunto  $T$  de reglas de transición.

$$A \equiv (S, T) \quad (2.1)$$

Las reglas de transición definen el estado del autómata  $S_{t+1}$  en el tiempo  $t+1$  a partir del estado  $S_t$  en el tiempo  $t$  y la información externa  $I_t$ . En principio, no existen restricciones en cuanto a la naturaleza de las reglas de transición y estas pueden ser formuladas en términos de operaciones matemáticas o de expresiones condicionales o una combinación de ambas.

$$T : (S_t, I_t) \rightarrow S_{t+1} \quad (2.2)$$

Es importante notar el manejo discreto del tiempo, en los autómatas éste no transcurre de manera continua sino en *paquetes* discretos, facilitando la simulación de procesos accionados por eventos pero dificultando la interpretación del tiempo.

### 2.4. Modelos basados en Autómatas Celulares

Una primera aproximación al uso de los SCA en la modelación urbana son los modelos basados en Autómatas Celulares (AC). Los AC son una clase particular de los autómatas definidos en la sección 2.3 que se caracterizan por tener una localización e interconexión espacial definidas a través de un entramado del espacio. En este sentido cada celda del entramado es un autómata y se entiende que cada autómata es vecino de otros autómatas de acuerdo a convenciones de vecindad preestablecidas. En la figura 2.2 se puede ver un AC definido sobre un entramado rectangular con dos tipos de vecindades diferentes.

Las características de un AC son esencialmente las mismas que las definidas por las ecuaciones 2.1 y 2.2 sólo que en este caso la información  $I$  se deriva de

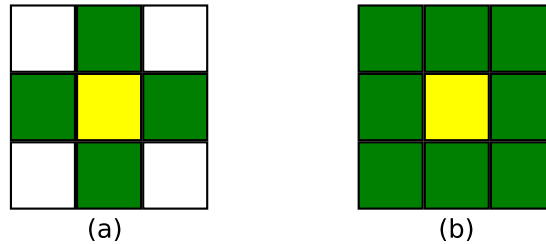


Figura 2.2. Vecindades de Von Neumann (izquierda) y Moore (derecha) para un AC sobre una latís cuadrada

un contexto celular, es decir, de los estados de los autómatas vecinos. En términos formales, un elemento (autómata)  $A$  de un AC se define como:

$$A \equiv (S, T, R) \quad (2.3)$$

Donde  $S$  y  $T$  son, como en la ecuación 2.1, los estados del autómata y las reglas de transición respectivamente mientras que  $R$  define la vecindad de donde  $A$  extrae la información externa  $I$ . Al igual que en el caso general las reglas de transición en los AC pueden ser combinaciones de operaciones matemáticas y expresiones condicionales. Es importante notar que en los AC las celdas y las relaciones de vecindad permanecen fijas a lo largo del tiempo, la información puede propagarse en el espacio mediante procesos de difusión, pero la acción a distancia no es posible, es decir, una celda no puede influenciar instantáneamente a otra que no sea su vecina.

En la práctica, los modelos de AC han sido usados para estudiar una amplia variedad de fenómenos urbanos: dinámica del uso de suelo (Webster y Wu, 1999[37]), crecimiento a nivel regional (Semboloni, 1997 [30] y Serrano, 2005 [31]) y policentrismo (Wu, 1998 [38]) entre otros. En estas, y en la mayor parte de las aplicaciones urbanas de los modelos de AC, las celdas (autómatas) se asocian con unidades espaciales agregadas (por ejemplo píxeles de una imagen satelital) y los estados de la celda representan posibles usos de suelo o bien niveles de densidad poblacional. Con el fin de clarificar la manera en la que los modelos de AC son utilizados en el contexto de la dinámica urbana, a continuación se expondrá un ejemplo paradigmático de este tipo de aplicaciones.



### 2.4.1. Un modelo de AC para el crecimiento urbano

Serrano y Santillana [31] desarrollaron un modelo para simular la expansión de la zona suburbana de Topilejo (localizada al Sur de la Ciudad de México), la aproximación que se tomó fue partir de la densidad de construcciones para modelar la expansión urbana en lugar de partir de la densidad poblacional. Esta decisión se tomó por la disponibilidad de imágenes aéreas del área de estudio a partir de las cuales fue posible extraer dicha información, además, dado que los píxeles de las imágenes aéreas y satelitales son cuadrados la combinación de diferentes fuentes de información (ortofotos e imágenes satelitales), resulta menos problemática que la extrapolación de información censal que normalmente se encuentra en bases de datos vectoriales.

Para simular la expansión urbana el modelo toma cuatro capas de información externa:

- Distancia a las vías de comunicación. A cada celda de la simulación se le asigna la distancia más corta a alguna calle dentro del área de estudio.
- Pendiente del terreno. A partir de las curvas de nivel de la zona de estudio se construyó un mapa de pendientes asignando a cada celda el valor promedio de la pendiente en dicha celda.
- Distancia a la mancha urbana. Igual que en la distancia a las vías de comunicación, en ésta capa se asigna a cada celda el valor de la menor distancia entre la celda y la mancha urbana.

La entrada del modelo es una imagen clasificada de la región de estudio en las siguientes categorías, que constituyen el conjunto de estados  $S$  del AC y los valores numéricos que se les asignó:

- Despoblado = 0
- Levemente construido = 1
- Medianamente construido = 10
- Densamente construido o consolidado = 100

A partir de la información anterior, y con la restricción de que los cambios de estado se dan de manera paulatina (es decir, el estado de una celda sólo puede cambiar al nivel inmediato superior) se construyen las reglas de transición  $T$  del AC, estas reglas son una combinación de información local (extraída de las celdas

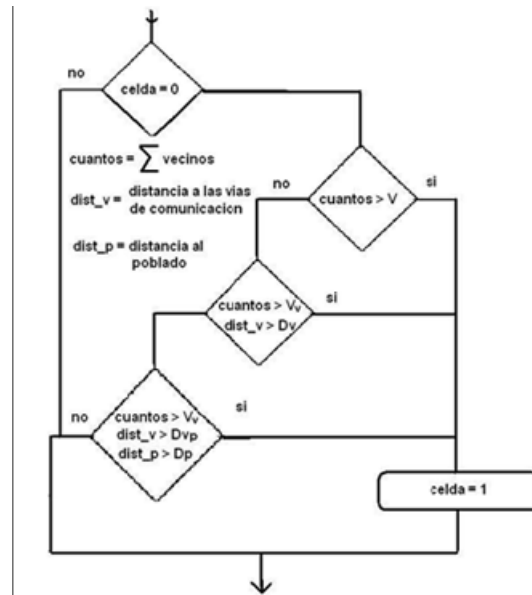


Figura 2.3. Diagrama de flujo para las reglas de transición.

vecinas) y modificaciones globales como la distancia a las vías de comunicación. A manera de ejemplo en la figura 2.3 se puede ver el diagrama de flujo para la transición entre los dos primeros estados del AC. Como se puede ver, existen tres mecanismos para cambiar del estado 0 al 1: difusión por vecinos  $cuantos > V$ , dispersión por vías de comunicación  $dist_v > D_v$  y  $cuantos > V_v$  y expansión por densidad  $dist_v > D_{vp}$  y  $cuantos > V_v$  y  $dist_p > D_p$ . En éste caso  $P = \{V, D_v, V_v, D_{vp} y D_p\}$  es el conjunto de parámetros que permiten ajustar el modelo a las observaciones.

El ajuste de los parámetros del modelo consiste en comparar la salida contra algún escenario conocido y escoger el conjunto de parámetros que mejor reproduzca la salida. En el caso del presente modelo la calibración involucra el ajuste simultáneo de ocho parámetros, es evidente que probar todas las combinaciones posibles es imposible y por lo tanto es necesario encontrar una metodología que permita llevar a cabo un ajuste aceptable en un tiempo razonable. Con dicho fin se implementó un algoritmo genético para explorar el espacio de parámetros, el algoritmo parte de generaciones de ocho individuos cada uno con un conjunto diferente de parámetros, se corre el modelo para cada individuo (es decir, para cada conjunto de parámetros) y se compara la salida con una imagen clasificada del lugar de estudio para obtener el índice de similitud morfológica, los conjuntos de parámetros más ‘exitosos’ (que en este caso son aquellos con mayor índice de similitud) son

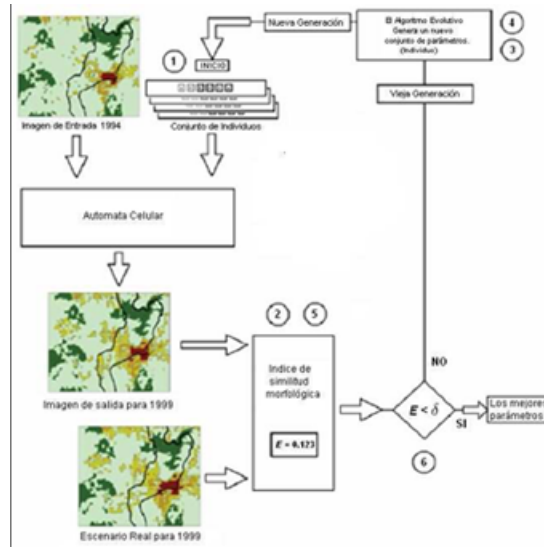


Figura 2.4. Diagrama de flujo del algoritmo evolutivo para calibrar el AC

hibridados entre sí para construir la siguiente generación de individuos y de esta manera se procede iterativamente hasta conseguir una adecuación satisfactoria. En la figura 2.4 se puede observar el diagrama de flujo para el algoritmo genético, la principal ventaja de este método es su eficiencia computacional (Serrano, 2005 [31]) ya que permite encontrar una solución satisfactoria sin necesidad de explorar exhaustivamente el espacio de parámetros. Existen otras metodologías que permiten llevar a cabo este tipo de ajustes, y de hecho la discusión al respecto del significado mismo de calibrar un modelo de este tipo es una cuestión abierta (Batty, 2006 [3]) y de gran importancia en la actualidad, hacia el final del presente capítulo se discutirá brevemente el tema de la calibración y sus implicaciones en cuanto al significado y uso de los modelos de SCA en el estudio de fenómenos urbanos.

Como se puede ver a partir del modelo expuesto aquí, los AC ofrecen al modelaje urbano la posibilidad de simular los procesos urbanos de *abajo hacia arriba*, a partir de las interacciones locales es posible reproducir el crecimiento de la mancha urbana e incluso deja espacio para probar, a través de las reglas de transición, diferentes hipótesis al respecto del tipo de procesos que dominan en este fenómeno, sin embargo, este mismo ejemplo sirve para exponer algunas de las principales limitaciones de los AC como herramientas de modelación. Por un lado se tiene el problema de la interpretación geográfica de las celdas del autómata, en este caso las celdas son una clasificación relativamente simple del espacio y por ello representan

promedio agregados de las variables de interés, esta situación de alguna manera nos trae de vuelta a la discusión del nivel de agregación en el modelado urbano, el uso de celdas impuestas sobre el espacio geográfico resulta demasiado artificial y despierta inquietud al respecto de la dependencia de los resultados en la elección particular del entramado de modelación. Por otro lado, los AC no están bien equipados para tratar con fenómenos que ocurren de *arriba hacia abajo*, como las restricciones impuestas por planes de desarrollo o zonificación, en los AC éste tipo de fenómenos son introducidos normalmente a través de irregularidades impuestas al espacio más que como componentes explícitas del modelo, es decir, los modelos de AC no están capacitados para modelar la forma en la que la estructura global de una ciudad influencia los procesos a escala local.

En lo que toca a la interpretación geográfica de las celdas, la dirección que se ha tomado es el uso de AC generalizados. El formalismo matemático de los AC puede ser extendido de manera directa para acomodar vecindades irregulares e incluso permitir que las relaciones de vecindad no sean homogéneas en el espacio y en el tiempo (Torrens, 2001 [34]), éste tipo de autómatas permiten, en principio, trabajar con unidades de terreno que tengan sentido geográfico por sí mismas, por ejemplo partir de parcelas de terreno (o unidades de catastro) para hacer simulaciones de uso de suelo, evitando así los problemas de interpretación que se discutieron anteriormente. Sin embargo, existe una cantidad importante de fenómenos y procesos urbanos que no son adecuadamente cubiertos por los AC, en particular los fenómenos que tratan con los efectos de la movilidad de los agentes de una ciudad. Situaciones como el proceso de desarrollo urbano (discutido en la sección 1.2), que involucra tanto a habitantes tomando decisiones al respecto de dónde vivir, y por lo tanto relocalizándose, como a agentes inmobiliarios que pueden ser dueños de varias propiedades y que deciden cuando vender en función de variables locales y de fenómenos externos a la ciudad no son bien modeladas por los AC de modo que es necesario encontrar una herramienta que permita acomodar dichas situaciones.

## 2.5. Sistemas Multiagentes sobre espacios celulares

Para introducir la movilidad y los procesos de toma de decisiones en esta nueva generación de modelos urbanos es necesario recurrir al concepto de agente. Un agente es, al igual que los AC, un autómata, sin embargo de una naturaleza distinta. Existen diferentes caracterizaciones de los agentes, pero en general se coincide en que un agente autónomo es (Franklin y Graesser, 1996 [13]):

”Un sistema que está situado en un medio ambiente y que a su vez forma parte del mismo, el agente es capaz de *sentir* el medio ambiente y de actuar sobre el de acuerdo a sus propios objetivos para causar un cambio en lo que el agente *sentirá* en

el futuro.”’

Partiendo de la definición anterior, un Sistema Multi Agentes (SMA) es una comunidad de agentes situados en un medio ambiente. En este caso comunidad hace referencia a las relaciones que guardan entre sí los agentes individuales. La naturaleza de dichas relaciones es muy diversa y puede variar desde agentes reactivos, que simplemente sienten el medio y reaccionan de acuerdo a la información obtenida, hasta agentes cooperativos, que son capaces de asociarse en la consecución de sus objetivos.

Un ejemplo de la aplicación de SMA a al modelación urbana se puede ver en el modelo *Free Agents Over Cellular Space* desarrollado por Juval Portugali [26]. En éste modelo, se toma como base un AC que representa los estados de ocupación de las parcelas de una ciudad y sus condiciones socioeconómicas, y se introducen agentes libres que poblarán dichas celdas. Los agentes representan a habitantes que quieren comprar (o rentar) una propiedad para habitarla, y se les asigna una serie de preferencias principalmente a partir del grupo de edad y socioeconómico del que forman parte, por ejemplo, los agentes jóvenes y sin hijos tienen preferencia por localizaciones cerca de centros de entretenimiento o laborales por encima de lugares espaciosos en los suburbios. En el modelo, el estado de cada celda es modificado por la interacción con las celdas vecinas de igual manera que en los AC, pero además, cada celda puede cambiar de estado a partir de las características de los agentes que lleguen a poblarla.

La integración de los conceptos de AC y SMA brinda una serie de nuevas posibilidades de modelación, bajo éste marco es posible simular la forma en la que el proceso de toma de decisiones a nivel individual afecta los patrones emergentes en la ciudad, de éste modo se cuenta con una herramienta para tratar desde *abajo hacia arriba* los procesos involucrados en el desarrollo de la tierra que en los modelos clásicos dependían fundamentalmente de las variables económicas globales de la ciudad.

En conclusión, los SMA sobre espacios celulares (o mejor dicho, sobre espacios celulares generalizados), parecen estar muy cerca del tipo de herramientas que se están buscando para construir modelos urbanos, sin embargo falta un paso fundamental, darles características geográficas a los medios de modelación. Los SMA son hoy día usados en diferentes ejercicios de simulación social (en modelos económicos por ejemplo) y existen herramientas de software para desarrollar éste tipo de modelos, pero la mayor parte de las aplicaciones desarrolladas hasta ahora no son explícitamente espaciales y por lo tanto no cuentan con los mecanismos para incluir en las simulaciones procesos de decisión mediados por el espacio, o dicho de otro modo, no se cuenta con interfaces explícitas para incluir variables espaciales en los procesos de toma de decisiones. Con el fin de solventar esta última dificultad en

la siguiente sección se describirá un paradigma a partir del cual es posible integrar modelos basados en AC y SMA de una manera geográficamente relevante.

## 2.6. Sistemas de Autómatas Geográficos

A partir de la revisión de los modelos clásicos de uso de suelo (capítulo 1), y de lo que se ha hablado hasta el momento sobre geosimulación, es posible identificar intuitivamente una serie de mecanismos fundamentales para simular un sistema urbano:

- Una tipología de las entidades. Cuáles son las entidades que interesan al problema que se está trabajando y cómo representar dichas entidades en una simulación computacional.
- El espacio en el que están situadas, en cuanto a extensión y resolución de la información.
- Las relaciones espaciales entre las entidades.
- Los procesos que gobiernan el cambio en las propiedades de las entidades.
- Los procesos que gobiernan los cambios en la localización de las entidades.

Por otro lado, el mecanismo de los bloques de construcción nos sugiere que las simulaciones urbanas se generen a partir de objetos que tengan un significado geográfico, es decir, para que los modelos puedan ser reutilizados, sus componentes fundamentales deben ser abstracciones de entidades relevantes en el contexto de la geografía urbana. Con estas ideas en mente, y partiendo de los mecanismos arriba mencionados, Benenson y Torrens (Benenson, 2004 [4]), proponen como marco de modelación el concepto de Sistemas de Autómatas Geográficos (SAG), partiendo de los conceptos de autómatas y de agente descritos en secciones anteriores, se desarrolló un nuevo tipo de autómata, llamado Autómata Geográfico, que es una extensión del concepto de autómata que incluye explícitamente la funcionalidad de tomar en cuenta el espacio y el comportamiento espacial.

Formalmente es posible definir un SAG  $G$  como la articulación de siete componentes:

$$G \equiv (K; S, T_S; L, M_L; N, R_N) \quad (2.4)$$

Donde  $K$  denota el conjunto de tipos (es decir la ontología) de automata que contiene el SAG, el par  $S, T_S$  corresponde al binomio estados del autómata  $S$  y

reglas de transición  $T_S$ ;  $L$  contiene las convenciones e localización y  $M_L$  las reglas de movimiento de cada tipo de autómata, mientras que  $N$  representa a los vecinos del autómata y  $R_N$  son las reglas de vecindad que determinan como un autómata se relaciona con sus vecinos. Supongamos que el estado del autómata  $G$  al tiempo  $t$  es  $S_t$  y que el autómata está localizado en  $L_t$ , entonces, a partir de la información externa  $I_t$  definida por sus vecinos  $N_t$ , el estado localización y su vecindad al tiempo  $t + 1$  quedan definidos por las reglas de transición:

$$T_s : (S_t, L_t, N_t) \rightarrow S_{t+1} M_L : (S_t, L_t, N_t) \rightarrow L_{t+1} R_N : (S_t, L_t, N_t) \rightarrow N_{t+1} \quad (2.5)$$

Planteado de éste modo la exploración con un SAG se convierte en un problema de investigación cualitativa y cuantitativa del comportamiento espaciotemporal de  $G$ . La principal ventaja del formalismo anterior es que los autómatas individuales (los componentes del conjunto  $G$ ), están dotados de la capacidad de considerar explícitamente el comportamiento interactivo espacial de objetos geográficos elementales en un sistema. Para entender mejor cómo funciona un SAG a continuación se describirán los tres pares de estados y reglas de transición.

Una descripción exhaustiva de la construcción de modelos derivados de lo SAG escapa a los objetivos del presente trabajo, baste aquí con mencionar que la herramienta existe y ha sido utilizada exitosamente en diferentes ejercicios de modelación (Torrens, 2007 [35] y Benenson, 2004 [4] por citar algunos ejemplos). En este momento conviene más retomar la discusión en el nivel teórico y examinar algunas consecuencias de abordar el modelaje urbano desde la perspectiva de SCA, en particular es de interés revisar el concepto de validación e interpretar el papel que juega el modelaje en el contexto de las investigaciones urbanas.

## 2.7. Predicción Vs. Simulación

El paradigma de SCA aplicado al estudio de fenómenos urbanos (o sociales en general) va más allá de simplemente aumentar el arsenal matemático disponible para atacar este tipo de problemas, presenta implicaciones teóricas que es importante analizar con detenimiento. En primer lugar tenemos el problema de la cerradura, un concepto clave en la teoría general de sistemas es la demarcación clara entre un *sistema de interés* y su entorno, para el funcionamiento del sistema se reconoce que es necesario el intercambio de energía (o información) entre sistema y medio ambiente, pero en principio la definición del sistema debe contener todas las cantidades y cualidades necesarias para su funcionamiento, y más aun, un principio fundamental del buen diseño de sistemas es que las interacciones hacia el interior

sean mucho más fuertes que las interacciones con el medio ambiente, de esta manera los sistemas son dotados de una cierta independencia de su entorno y entonces es posible trabajar con ellos de manera aislada. La perspectiva de SCA modifica radicalmente esta cuestión, en lugar de asumir que los sistemas se encuentran en equilibrio con su entorno los SCA son sistemas lejos del equilibrio y la ocurrencia de patrones estables es consecuencia del cambio continuo, además, en vista de que el foco de atención se centra en las interacciones, la definición de una frontera entre el sistema y el medio ambiente se torna difícil. Un ejemplo clásico de éste problema se puede ver en el modelo de segregación residencial de Scelling [3], en éste modelo, una preferencia ligera por vivir cerca de individuos del mismo grupo social (en el caso del modelo original los grupos eran separados por preferencias religiosas), genera patrones de segregación espacial muy estrictos y homogéneos, el modelo trabaja en un vecindario particular, pero la dinámica de la segregación no puede ser entendida sin considerar a la ciudad completa dentro del modelo.

Ahora bien, todo ejercicio de modelación implica necesariamente una abstracción y simplificación del sistema real, una parte de esta simplificación consiste en cerrar artificialmente el sistema a través de cortes analíticos y por lo tanto se pierde en la descripción parte del sistema de estudio, de hecho, se puede decir que todo sistema que no puede ser cerrado y separado de su medio ambiente es necesariamente impredecible, es imposible capturar todas las entidades y procesos relevantes al problema de estudio porque entonces el sistema se volvería infinito en extensión y variedad. En vista de lo anterior es necesario revisar los conceptos de validación y de predicción en el contexto de modelos derivados de SCA.

Una característica común de los modelos clásicos estudiados en el capítulo 1, es que todas las relaciones establecidas en los modelos son verificables contra la realidad codificada en datos, mientras que en los modelos basados en SCA si bien las relaciones son explícitas no siempre es posible contrastarlas con observaciones, por ejemplo, en el AC descrito en la sección 2.3 es posible validar la salida del modelo contra observaciones reales, pero no es posible validar cada uno de los procesos que llevan a las celdas a cambiar de estado. En general, los modelos de SCA consisten de una mezcla de suposiciones contrastables e incontrastables, ya sea porque no existen los datos contra los cuales contrastarlos o porque la naturaleza misma de las suposiciones lo hace imposible, los modelos de SCA son sólo parcialmente contrastables contra evidencia empírica de modo que, en términos tradicionales, no son modelos validables y por lo tanto no son predictivos, o por lo menos no lo son en el mismo sentido que los modelos de la física Newtoniana por ejemplo. De hecho, la teoría misma de SCA restringe la capacidad predictiva de cualquier modelo de este tipo de sistemas, en particular las propiedades de no-linealidad y la estructura de red en conjunto con el mecanismo de modelado interno (descritos en la sección



2.2), implican que el sistema puede evolucionar de diferentes maneras a partir de un mismo conjunto de condiciones iniciales.

La predicción es la generación de eventos desconocidos en el futuro, en los modelos tradicionales (inspirados por la dinámica de sistemas), el foco está en la predicción de los estados de equilibrio futuros a partir de información pasada. Este tipo de modelos son validados (esto es en el conjunto completo de sus aseveraciones) contra información, codificada en datos de un momento conocido, y la habilidad del modelo de reproducir la situación conocida genera la confianza para usar las predicciones al respecto de eventos desconocidos. En los modelos de SCA la situación es diferente, estos nunca pueden ser validados completamente, y por lo tanto su habilidad para reproducir situaciones conocidas es limitada al igual que lo es su capacidad predictiva, de hecho la intención es probar diferentes escenarios y considerar a cada uno como un futuro posible. La manera usual de llevar a cabo dicho proceso es a través de cambios en la estructura del modelo, modificar algunas de las suposiciones, codificadas en reglas de transición por ejemplo, y hacer experimentos virtuales para probar la robustés del modelo y mejorar el entendimiento a nivel teórico del problema de estudio.

En resumen, los modelos de SCA no son en general validables, pero a través de la experimentación virtual y de la contrastación con la información disponible, es posible generar confianza en la plausibilidad de las hipótesis subyacentes. En pocas palabras, como consecuencia de la visión del medio urbano como un SCA la simulación se convierte en la herramienta de trabajo por encima de la predicción. Este hecho modifica radicalmente el papel de los modelos, tanto en el ámbito de la investigación como en el de su uso en el contexto de la política pública. En la siguiente sección se abordará el papel del modelaje urbano desde esta nueva perspectiva.

## 2.8. Conclusiones: Los modelos como agentes cognitivos

El hecho de que los modelos urbanos derivados de la perspectiva de SCA no tengan el poder predictivo de los modelos más tradicionales no debe ser interpretado como una limitación, es una consecuencia teórica del estudio de las ciudades como sistemas complejos. En este sentido, es necesario encontrar el papel que juega el modelaje bajo ésta nueva perspectiva. En primer lugar los modelos de SCA son por definición generativos, son más una herramienta para probar nuevas estructuras de modelación y diferentes hipótesis del medio urbano que mecanismos para construir modelos comprensivos con fuertes capacidades predictivas como los modelos

tradicionales. La capacidad de los modelos de SCA para acomodar información cualitativa y modelación heurística tiene un enorme potencial para enriquecer la teoría urbana, el rango de hipótesis que es posible estudiar con este tipo de modelos es mucho más amplio.

Por otro lado, la perspectiva de SCA no sólo modifica la manera en que se construyen los modelos, también implica un cambio en la concepción de las ciudades. Si desde el punto de vista de la dinámica de sistemas las ciudades se conciben como entidades cuasi-estáticas, en equilibrio, que sólo responden a modificaciones en el medio ambiente, desde los SCA las ciudades son construidas por las interacciones de sus componentes; habitantes, instituciones, infraestructura, etcétera. La concepción del medio urbano sugerida por la perspectiva de SCA trae al primer plano la importancia de las acciones individuales de sus habitantes, sus deseos y aspiraciones son una componente fundamental de los procesos que dan lugar a las propiedades emergentes que se observan, y por consecuencia, la acción local es una herramienta importante para lograr que las propiedades que emerjan del conglomerado de individuos e instituciones sean positivas para el desarrollo de la ciudad.

Ahora bien, en los SCA los modelos internos en conjunto con los bloques de construcción (sección 2.2) permiten prever las consecuencias de emprender ciertas acciones o enfrentarse a situaciones novedosas. En las ciudades, es claro que los individuos que la habitan y los conglomerados emergentes poseen modelos internos que les permiten evaluar sus acciones y aprender de los resultados, en el caso de los agentes individuales, los modelos internos son casi siempre implícitos, es decir, el conocimiento tácito que tienen los habitantes de la ciudad les permite actuar exitosamente dentro de un medio ambiente en constante transformación. Por otro lado, en el caso de las organizaciones e instituciones los modelos internos son en muchas ocasiones explícitos, como en el caso de los modelos con los que se maneja el flujo vehicular en algunas metrópolis del primer mundo. En términos generales, es posible interpretar entonces el papel del modelaje espacial en las ciudades como el de generar modelos internos del sistema, sin embargo, no todos los modelos del medio urbano tienen la capacidad de funcionar como modelos internos. Para clarificar esta cuestión, recordemos la crítica al modelaje urbano expresada por Lee (Lee, 1973 [22]) y que se discutió en la sección 1.3 del capítulo 1, en particular el problema que Lee llamaba *Wrong-headedness*, que tiene que ver con la tendencia en la escuela tradicional de modelaje urbano a construir modelos encaminados a reproducir los datos disponibles más que a incluir explícitamente los mecanismos que dan lugar a la aparición de los patrones observados. Los modelos desarrollados de este modo, son entonces una especie de aproximación estadística a la realidad urbana, suponen (implícitamente) que las condiciones que dan lugar a una *fotografía* de la ciudad (es decir un corte temporal codificado en datos) permanecerán constantes

y que por lo tanto es suficiente con capturar las tendencias para predecir el desarrollo futuro del fenómeno modelado. Sin embargo, la propiedad de no-linealidad de los SCA indica que las tendencias no son adecuadas para capturar la dinámica de los sistemas y por lo tanto los modelos desarrollados de este modo no tienen la capacidad de funcionar como modelos internos.

Entonces, ¿Qué características debe tener un modelo para poder funcionar como un modelo interno del SCA? En primer lugar, es necesario que se incluyan de manera explícita los mecanismos dinámicos que dan lugar a las estructuras estables que se observan, además, es necesario que los modelos sean lo suficientemente flexibles como para poder modificarse y aplicarse a fenómenos diferentes a aquellos para los que fueron originalmente desarrollados. El paradigma de la Geosimulación apunta a resolver estas dos cuestiones, por un lado, al incluir en los modelos generados de esta manera los mecanismos de cambio, la dinámica de la ciudad se hace explícita en el modelo. Por otro lado, la construcción de simulaciones a partir de SAG (sección 2.6) implica el uso de *objetos* geográficos, los agentes base de la simulación son representaciones de entidades que existen en el medio geográfico, esto permite su uso en diferentes tipos de simulaciones. Por ejemplo, un modelo de la dinámica de uso de suelo incluiría agentes que representen a los terratenientes y a las familias que buscan una casa, estos mismos agentes podrían ser utilizados también en un modelo de segregación espacial del medio urbano o en un modelo de localización comercial

En conclusión, los modelos urbanos derivados del paradigma de la geosimulación, es decir de la perspectiva de SCA, están dotados de las cualidades necesarias para ser interpretados como modelos internos del medio urbano. Sin embargo, para que esta interpretación esté completa es necesario discutir el papel que tienen los modelos como herramientas de diálogo colectivo, cómo insertar los modelos en el contexto de la investigación interdisciplinaria o de la política pública. En éste sentido, Occeli (Occelli, 2006 [25]) sostiene que los modelos urbanos, una vez inmersos en alguno de los contextos arriba mencionados, juegan el papel de un agente cognitivo, es decir, de un mediador entre el fenómeno real y las abstracciones o modelos mentales de los actores involucrados. Siguiendo esta línea de pensamiento, los modelos urbanos se insertan en un ciclo cibernético entre los usuarios y los desarrolladores, de una forma similar al modelo de doble hélice virtual del desarrollo de artefactos cibercartográficos (Reyes, 2006 [29]) pero en un nivel superior de complejidad (o quizá el término más adecuado aquí sería de complicación), ya que, al contrario de los artefactos cibercartográficos, los modelos urbanos tienen una fuerte componente matemática que dificulta la interacción con la sociedad. En éste sentido, los modelos urbanos podrían insertarse en lo que Reyes llama soluciones complejas de geomática, que son, al igual que los atlas cibercartográficos, herramientas para la

comunicación de mensajes espaciales, pero que por la naturaleza del problema que tratan requieren componentes de modelaje matemático más complejas.

De esta manera concluye el capítulo dedicado a establecer la perspectiva de SCA para el estudio del medio urbano, es importante hacer notar que no se trata de decir que esta perspectiva es la única forma válida de estudiar o modelar las ciudades, sino más bien lo que se busca es establecer que el marco teórico propuesto es relevante en tanto que ofrece una manera de integrar el conocimiento generado por diferentes disciplinas, además de permitir la construcción de modelos que tienen las características necesarias para ser utilizados como herramientas prospectivas en los contextos de la investigación o de la política pública. Para entender mejor el valor de la teoría de SCA aplicada al estudio del medio urbano, en la segunda parte del trabajo se elaborará un marco conceptual para el estudio de la contaminación atmosférica derivado de la aplicación del paradigma de SCA.

## Parte II

# El caso de la contaminación ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México



## CAPÍTULO 3

---

### La contaminación ambiental en la Ciudad de México

---

En la primera parte del trabajo se construyó, tomando como eje conductor el modelaje espacial, un marco conceptual, derivado de la teoría de sistemas complejos adaptativos, para el estudio del medio urbano. En particular se estableció la posibilidad de generar modelos geográficos de fenómenos urbanos a partir de dicha perspectiva. Ahora, en la segunda parte del trabajo, se utilizará el marco conceptual desarrollado en la primera parte para abordar el problema de la contaminación atmosférica en las grandes urbes.

El tema de la contaminación atmosférica es interesante en este contexto no sólo por la importancia que tiene en sí mismo como problemática social, sino que además es ilustrativo del potencial que tiene la perspectiva de SCA para integrar, bajo un mismo marco teórico información, modelos y conocimiento generados en diferentes disciplinas. En particular, es necesario integrar modelos generados a partir de dos bases epistemológicas totalmente distintas, por un lado los modelos de fisicoquímica atmosférica, que tienen fundamento en el reduccionismo científico y por otro lado los modelos de uso de suelo y transporte construidos a partir de la perspectiva de SCA, que es, en cierto sentido, lo opuesto del reduccionismo.

#### 3.1. El modelaje de la contaminación ambiental desde las Ciencias de la Atmósfera

Para las ciencias de la atmósfera el problema de la contaminación consiste en estimar las concentraciones de gases contaminantes en la atmósfera a partir de una base de emisiones. Dichos contaminantes, emitidos como resultado de las

actividades cotidianas en una ciudad, son dispersados en la atmósfera por procesos de advección (transporte horizontal), difusión (a nivel partículas) y transporte turbulento (esto es el flujo convectivo en la capa más baja de la atmósfera). Sin embargo, los contaminantes emitidos no permanecen inertes en la atmósfera, la radiación solar da lugar a un sinnúmero de reacciones entre los contaminantes (y con los componentes naturales del aire), que generan productos químicos secundarios. El ejemplo más claro de este tipo de contaminantes secundarios es el ozono, que no es emitido directamente a la atmósfera sino que es el resultado de diferentes reacciones fotoquímicas que involucran compuestos orgánicos (cadenas a base de carbono) y óxidos de Nitrógeno.

Como se puede ver, el modelaje de la contaminación involucra dos componentes distintas pero íntimamente ligadas; los procesos meteorológicos que dispersan los contaminantes y los procesos fotoquímicos que dan lugar a las especies químicas presentes en la atmósfera. En la práctica, los modelos más avanzados de contaminación atmosférica (MCA) acoplan un modelo de meteorología local, que transporta las especies químicas, y uno de fotoquímica que se encarga de procesar las reacciones que suceden en la atmósfera.

Los modelos de meteorología local resuelven las ecuaciones de la mecánica de fluidos para un área determinada de la atmósfera (se considera escala local al orden de unos pocos cientos de kilómetros), sujetos a las condiciones de frontera en el exterior del área de estudio. Para lograr lo anterior la práctica común es discretizar las ecuaciones en el tiempo y en el espacio de manera que los resultados (es decir las variables meteorológicas) se obtienen en una malla regular sobre el área de modelación y a intervalos fijos de tiempo (Grell, 2000 [14]) como en la figura 3.1.

Por otro lado, el mecanismo fotoquímico estipula el tipo de reacciones entre las diferentes especies químicas presentes en la atmósfera y las condiciones atmosféricas bajo las cuales dichas reacciones ocurren, entonces, en cada iteración en el tiempo, el modelo meteorológico pasa al modelo fotoquímico las variables atmosféricas relevantes (por ejemplo velocidad de viento, temperatura, humedad e intensidad de radiación solar), y éste último, a partir de sus mecanismos de reacción, determina las concentraciones de cada contaminante en la siguiente iteración temporal. Es importante notar aquí que la base de emisiones de la que se parte tiene que estar espacializada, es decir, las emisiones deben estar colocadas en el lugar en el que ocurren y además, debe estar desagregada temporalmente para que los MCA sean capaces de capturar la variabilidad espacio-temporal de la contaminación (Grell, 2000 [14]), a estas bases de emisiones desagregadas espacio-temporalmente se les conoce como inventarios de emisiones.



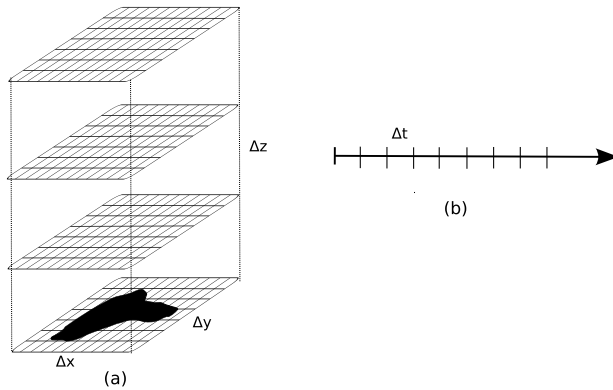


Figura 3.1. Discretización espacial (a) y temporal (b) en los modelos meteorológicos

En la actualidad los modelos meteorológicos de escala local son ampliamente utilizados como herramientas de pronóstico y, si se cuenta con suficientes datos (de estaciones meteorológicas y radiosondeos por ejemplo) sus predicciones pueden ser muy confiables, los modelos acoplados de meteorología y fotoquímica todavía no alcanzan el mismo grado de aceptación como herramientas de pronóstico pero están bien establecidos como herramientas de diagnóstico, es decir, para entender mejor los mecanismos atmosféricos que influyen las concentraciones de contaminantes.

## 3.2. Los inventarios de emisiones y la dinámica urbana

Los inventarios de emisiones son fundamentales, como fuente de información, en el modelaje fisicoquímico de la contaminación atmosférica, pero, como se verá más adelante, son también el punto de entrada para estudiar el fenómeno desde un punto de vista más amplio. Es razonable pensar que a raíz del auge en el desarrollo de modelos meteorológicos y fotoquímicos, en el futuro cercano se pueda contar con herramientas que permitan hacer buenas predicciones a corto plazo de los niveles de contaminación esperados dada una base de emisiones, de hecho, en algunos países con mayor disponibilidad de datos, esto ya se hace (Grell, 2000 [14]). Entonces, un siguiente paso en el modelaje de la contaminación es el uso de las herramientas fisicoquímicas para estudiar el desarrollo del fenómeno en el mediano y largo plazo, es decir, ligar la dinámica de las ciudades (como se estudió en la primera parte del trabajo) a los procesos involucrados en la generación de contaminantes. Para entender esta relación, y cómo los inventarios de emisiones pueden ser utilizados como

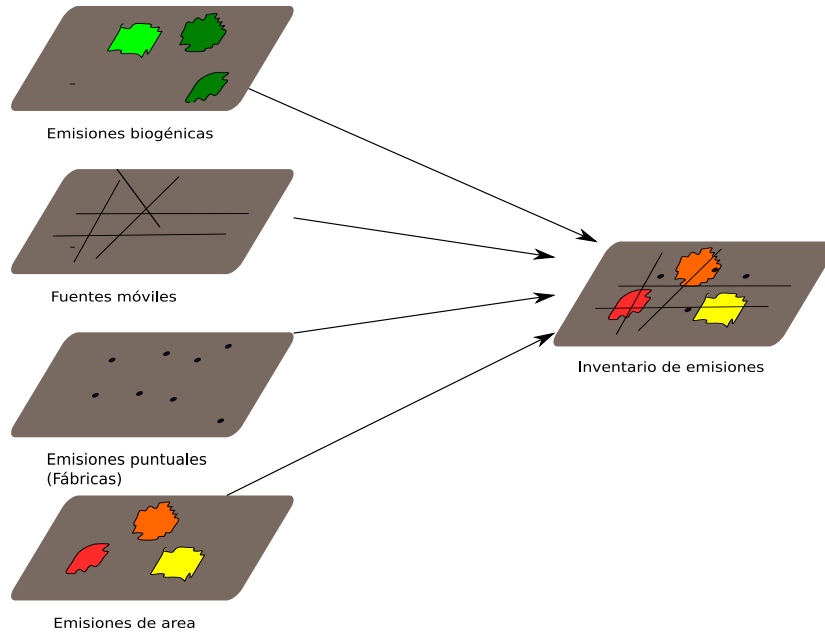


Figura 3.2. Integración de la información en la construcción de inventarios de emisiones

liga entre los conceptos de la dinámica urbana y la contaminación atmosférica, es necesario estudiar con cierto detenimiento el proceso de construcción de inventarios de emisiones.

El procedimiento típico para la construcción de inventarios de emisión es dividir las fuentes de contaminantes en cuatro tipos de acuerdo a los procesos involucrados en la producción de contaminantes y la geometría de las fuentes de emisión (figura 3.2):

- **Fuentes puntuales.** Son aquellas en las que la emisión puede ser abstraída como si ocurriese en un punto geométrico fijo, por ejemplo las chimeneas de las fábricas
- **Fuentes móviles.** Son las emisiones de los vehículos, se conocen también como fuentes de línea debido a que la práctica común es asignar las emisiones a segmentos de la red vial.
- **Fuentes de área.** Ésta categoría aglomera a todas las fuentes de emisión que no están consideradas en los dos tipos anteriores, por ejemplo las emisiones

producidas al pintar una casa o un coche o al operar un estacionamiento (aunque el proceso de emisión en éste caso corresponde al de fuentes móviles, al no estar localizada la operación de estacionamientos en segmentos de calle, la práctica común es tratarlos como fuentes de área). En general se puede decir que ésta categoría abarca las emisiones generadas por la actividad productiva de una zona determinada.

- **Fuentes biogénicas.** Son las emisiones generadas por los procesos naturales en plantas y animales. En ésta categoría caen los subproductos de la respiración vegetal (por ejemplo, los eucaliptos producen una cantidad importante de hidrocarburos aromáticos) así como los gases emitidos por la descomposición de las heces de animales. Muchas de las emisiones biogénicas no son en general consideradas contaminantes (en particular las que resultan de la respiración vegetal), pero sí operan como precursores de diferentes reacciones químicas que dan lugar a contaminantes secundarios como el Ozono.

En el caso de los dos primeros tipos de fuentes, la construcción de los inventarios es relativamente sencilla, la información de los censos económicos puede ser utilizada para localizar las fuentes puntuales y a partir de la actividad productiva particular se puede recurrir a las bases de datos internacionales para determinar la cantidad y tipo de emisiones. De igual manera la misma información puede utilizarse para obtener las principales actividades productivas en un área determinada y luego utilizar una base de datos de emisiones para construir los inventarios. Por supuesto que en éste momento estamos dejando fuera de la discusión una serie de detalles importantes, como la desagregación temporal de las emisiones y la validez de utilizar bases de datos generales para estimar las emisiones de casos particulares, pero en este momento el énfasis no es en la construcción detallada de inventarios sino en la idea general de lo que estos representan.

Por otro lado, las emisiones biogénicas, en particular las producidas por las plantas, se estiman a partir de modelos de dosel, que a partir de los tipos de plantas presentes en un área verde dada y de información de la radiación solar incidente (que puede provenir de un modelo meteorológico), calculan los subproductos químicos derivados de la respiración de las plantas en el dosel así como la absorción de especies químicas en la atmósfera (Smiatek, 2005 [32]).

El caso de las emisiones por fuentes móviles es más complicado y requiere de más información para su construcción. Es necesario conocer datos sobre la flota vehicular, los tipos de coches que se utilizan, las distancias que se recorren, los lugares por donde circulan, etcétera. La Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) desarrolló una metodología para la obtención de inventarios de fuentes móviles (EPA, 2001 [19]), a partir de datos

tomados en campañas intensivas de monitoreo vial, que ha resultado muy exitosa para obtener inventarios fidedignos. Como parte de ésta metodología se incluye la posibilidad de modelar la espacialización del tráfico en la ciudad mediante un modelo de interacción espacial, partiendo de la información censal y de encuestas de origen-destino.

La revisión que se hizo de la construcción de inventarios de emisiones pone de manifiesto y clarifica la relación que existe entre las actividades realizadas en la ciudad y la generación de contaminantes. Es evidente que la distribución espacial de las actividades en una ciudad afecta a la distribución del tráfico en la misma y viceversa, la distribución del tráfico influye a la distribución espacial de las actividades urbanas, de éste modo se hace patente que estudiar la evolución de los inventarios de emisiones en el plazo estratégico es también estudiar la evolución de la ciudad misma.

Para aclarar este último punto es conveniente estudiar un par de trabajos realizados por investigadores de la UNAM en los que se emplean modelos atmosféricos para evaluar el impacto a largo plazo de los cambios en la urbanización de la Ciudad de México. El primer trabajo (Jazcilevich y Jáuregui, 2000 [20]), trata de cuantificar la influencia de la desecación de los lagos en el fenómeno de la isla de calor urbana (el aumento en la temperatura promedio en el interior de las ciudades al compararla con la temperatura en las inmediaciones), para hacerlo se emplea un modelo meteorológico local y se estudian los perfiles de temperatura bajo diferentes coberturas lacustres y de urbanización. Una conclusión interesante de dicho estudio es que, contrariamente a lo esperado, la influencia de la desecación de los lagos tiene un mayor impacto en la isla de calor de la Ciudad de México que los procesos de urbanización, ésta conclusión, además de ser interesante por sí misma, muestra que al estudiar la relación entre meteorología y urbanización en el largo plazo se pueden obtener resultados sorprendentes que modifiquen las concepciones establecidas al respecto de dichas relaciones.

Un segundo ejemplo de este tipo de estudios es el trabajo publicado por Jazcilevich y García (Jazcilevich y García, 2003 [21]) al respecto del impacto en términos de calidad del aire de dos posibles localizaciones para el nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México. En este trabajo, primero se hace un estudio sobre los efectos en urbanización y tráfico de vehículos de las dos posibles localizaciones del aeropuerto y después estos dos escenarios se toman como base para generar inventarios de emisiones. Para generar los escenarios de urbanización se recurrió a las investigaciones sobre los procesos históricos de urbanización en la Ciudad de México (Delgado, Chias, et al, 2001 [9]) así como a las legislaciones vigentes en la materia, el resultado es un modelo cualitativo del crecimiento urbano, que tiene un buen fundamento en los procesos sociales que han dado lugar al crecimiento

de la ciudad, pero que carece de la sistematización necesaria para ser utilizado en otras investigaciones. En cuanto a los escenarios de tráfico vehicular, se asume que la circulación por las avenidas de acceso a los posibles sitios del nuevo aeropuerto es función únicamente de la cantidad de pasajeros esperados por las nuevas terminales aéreas, y que la circulación en el resto de las avenidas de la ciudad permanecerá constante. Si bien estas suposiciones representan un punto de partida para estudiar el fenómeno, es evidente también que son poco realistas y que no responden a un conocimiento de los procesos urbanos, sino más bien a la falta de otro tipo de recursos para modelar la dinámica de la ciudad.

Este segundo ejemplo resulta de particular interés porque utiliza un modelo urbano para estimar las consecuencias de la construcción de un nuevo aeropuerto. Dicho modelo es de naturaleza enteramente cualitativa lo cual no le resta validez como herramienta para estudiar la evolución de la contaminación (sobre todo en vista de que la evolución de las ciudades tiene fuertes componentes cualitativas como se vió en la primera parte del trabajo), sin embargo, una cuestión que sí le resta utilidad como herramienta de planeación es el hecho de que el modelo urbano sea implícito, es decir que no exista una manera transparente de, partiendo de las hipótesis relevantes (planteadas por los investigadores) sobre los procesos de cambio que dominan el crecimiento de la ciudad, llegar al escenario de crecimiento propuesto en dicha investigación. Entonces no es sólo que el tratamiento de la relación entre el uso de suelo y el transporte sea insuficiente, sino que además los modelos urbanos utilizados deben hacerse explícitos de modo que sea claro para los 'usuarios' potenciales cómo las hipótesis sobre la evolución urbana se articulan para dar lugar a los escenarios futuros.

En conclusión, a partir del estudio de la construcción de los inventarios de emisiones se pudo establecer una liga entre la evolución de la ciudad y la de la contaminación atmosférica, esta liga se da justamente a través de los inventarios de emisiones, en particular a través de la relación entre dichos inventarios y la dinámica del uso de suelo y transporte en la ciudad. De hecho, es posible argumentar que, en el fondo, el estudio de la dinámica de los inventarios de emisiones es análogo al estudio de la dinámica del uso de suelo y transporte, ya que al comprender (y modelar) ésta última, entonces se tendría un panorama futuro de la distribución espacio-temporal de las diferentes actividades de la ciudad (y por lo tanto de los patrones de tráfico), que serviría como base para la estimación de los escenarios de emisiones futuros.

Es importante notar que al acoplar un modelo de dinámica urbana para estimar los escenarios de emisiones futuros con un modelo fisicoquímico de la atmósfera para conocer las concentraciones de contaminantes que surgen de dicha base de emisiones, se están combinando modelos que surgen de dos epistemologías difer-

entes, por un lado los modelos atmosféricos, de naturaleza determinista, y por otro lado los modelos urbanos que, como se vió en la primera parte del trabajo, son mas bien generativos, y por lo tanto sus resultados no pretenden predecir el futuro (en el sentido determinista), sino más bien construir escenarios viables a partir de la investigación interdisciplinaria y de la interacción con los actores sociales involucrados en el problema. Para salvar la brecha entre estas dos epistemologías distintas, una posibilidad es la interpretación del acoplamiento entre los modelos fisicoquímicos y urbanos como un modelo interno (pensado como en la sección 2.2) del sistema urbano, es decir, como un mecanismo que, a partir de información incompleta, permite explorar las posibles consecuencias futuras de emprender ciertas acciones. En el contexto de la contaminación esto se podría traducir en la evaluación a priori de diferentes iniciativas para abatir los niveles de contaminación atmosférica y sus consecuencias nocivas en la sociedad. Es cierto que éste tipo de ejercicios ya se llevan a cabo, por ejemplo en el trabajo arriba citado de Jazcilevich [21] o en la metodología de la EPA [19], en donde se sugieren formas de estimar el impacto en reducción de contaminantes de iniciativas globales del tipo *Hoy no circula*, sin embargo, por un lado, el rango de estrategias de mitigación que es posible probar con la metodología de la EPA es limitado, se reduce esencialmente a estrategias de caracter global impuestas por el gobierno (dejando de lado el papel de la sociedad civil tanto en la generación como en la mitigación de los efectos de la contaminación), y por otro lado, en el trabajo de Jazcilevich, el hecho de que los modelos de dinámica urbana sean implícitos y enteramente cualitativos deja lugar a la especulación y resta credibilidad a este tipo de ejercicios. Entonces, para que el acoplamiento entre los modelos fisicoquímicos y los de dinámica urbana pueda ser interpretado como un modelo interno del sistema urbano, es necesario que cumplan con dos características fundamentales que se derivan de las conclusiones de la primera parte del presente trabajo (sección 1.3 en el capítulo 1):

- Los modelos espaciales que generan los escenarios urbanos futuros deben ser explícitos, de esta manera sería posible validar los resultados de los modelos urbanos generando mayor confianza en los resultados que arrojen.
- Además, dado que la dinámica urbana involucra procesos cualitativos, los modelos deben tener la flexibilidad suficiente para acomodar diferentes hipótesis sobre los procesos de cambio que son relevantes en la evolución temporal de los inventarios de emisiones.

Ahora, a partir de lo que se ha estudiado aquí sobre contaminación, y de la exposición sobre modelaje urbano de la primera parte del trabajo, estamos en condiciones de hacer un primer acercamiento al modelo conceptual que nos va a permitir

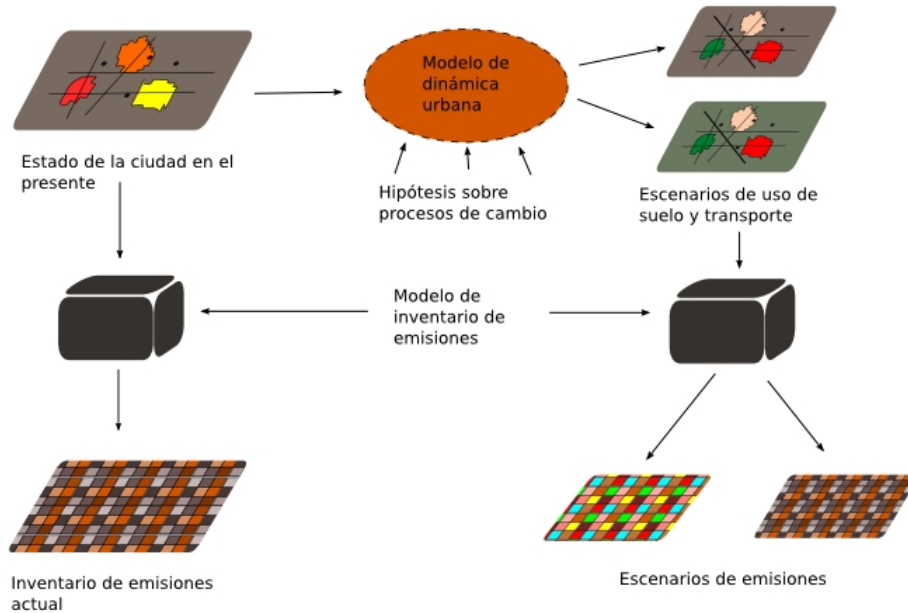


Figura 3.3. Modelo para la generación de escenarios de emisiones

integrar la dinámica urbana (en el mediano y largo plazo) en la investigación sobre contaminación atmosférica.

En un primer nivel de abstracción, el modelo conceptual de un sistema para la generación de escenarios futuros de emisión puede verse en la figura 3.2, a partir de la información sobre el estado actual de la ciudad se construye un escenario futuro mediante un modelo de uso de suelo y transporte derivado del marco de SCA, luego, a partir de la misma metodología usada para construir los inventarios de emisiones actuales, pueden utilizarse los resultados de la modelación urbana para construir las emisiones futuras. Este último es un punto importante, ya que mantener la posibilidad de usar la misma metodología para los inventarios actuales y sus proyecciones futuras asegura que los resultados obtenidos sean comparables.

El siguiente paso en la construcción del modelo conceptual que estamos buscando es definir la forma de modelar la dinámica del uso de suelo y transporte. La elección de un modelo urbano particular (o mejor dicho, de un conjunto de modelos urbanos), depende del problema específico que se esté tratando, por ejemplo, si lo que se busca es probar la eficacia de estrategias globales de mitigación, como podría ser la sustitución de los taxis en la ciudad por vehículos híbridos (coches que pueden funcionar tanto con electricidad como con gasolina), entonces la metodología de la

EPA basada en modelos de interacción espacial sería una alternativa razonable, dado que no es de esperarse que la sustitución de taxis por nuevas tecnologías afecte de ninguna manera la distribución espacio-temporal del tráfico o de las actividades productivas en la ciudad. Por otro lado, si se busca evaluar el impacto que tendría en términos de contaminación atmosférica la construcción de una nueva vialidad o un nuevo esquema de zonificación en la ciudad, entonces una mejor alternativa sería la construcción de simulaciones locales para estimar los cambios que se darían en los patrones de tráfico y de uso de suelo a partir de las modificaciones propuestas. Por ejemplo, pensemos que el estado actual de la ciudad, caracterizado por una distribución espacio-temporal de las actividades de la misma, se ve perturbado por la introducción de un factor externo, digamos, la construcción de una nueva vialidad, es de esperarse que dicha construcción afecte los patrones de tráfico por lo menos en la cercanía de la construcción (aunque, debido a los efectos de red, la modificación de los patrones de tráfico posiblemente afectaría una zona mucho más amplia), esta modificación del tráfico cambia también los tiempos de recorrido de las personas que entran y salen de dicha zona, de modo que ésta se 'acerca' o se 'aleja' (pensando en las distancias como tiempo de recorrido) de otras zonas de la ciudad, entonces, su valor por localización (como se discutió en el capítulo 1) también se ve alterado y por lo tanto puede haber un cambio en el uso de suelo dominante en la zona, que a su vez acarrearía un cambio en las emisiones de área para dicha zona, que se suma al cambio en las emisiones por fuentes móviles debidas a la modificación en los patrones de tráfico. En este tipo de casos se podría recurrir a modelar los procesos locales (es decir en los lugares donde se introdujeron las perturbaciones), mediante simulaciones basadas en Sistemas de Autómatas Geográficos y generalizar los resultados obtenidos a través de modelos de interacción espacial. Como se puede ver de esta discusión, cada ejercicio de modelación requiere la selección de herramientas particulares que sean capaces de reproducir los fenómenos que interesan, es por ello que no es posible en este momento adentrarse mucho más en el desarrollo del diseño de la herramienta geomática para el estudio de la contaminación, pero a partir de el ejemplo que se esbozó, se puede ver el potencial que tiene el estudio de la contaminación desde el modelaje urbano.

Así concluye la discusión sobre la relación que existe entre la dinámica (en el largo plazo) de la emisión de contaminantes y el modelaje del uso de suelo y del transporte. En la siguiente sección se analizarán las conclusiones que surgen del presente trabajo, y se establecerá la agenda de trabajo futuro necesario para construir una solución compleja de geomática para tratar el problema de la contaminación.



### 3.3. Conclusiones: El resto del camino

En esta segunda parte del trabajo se ha abordado el tema de la contaminación atmosférica, primero desde el punto de vista del modelaje físico-químico y luego, a través de los inventarios de emisiones, se ligó a la dinámica urbana. Al hacer esto, queda de manifiesto que, por un lado, el fenómeno de la contaminación es mucho más complejo que la simple dispersión de contaminantes, pero por otro lado, que la perspectiva de SCA aplicada a fenómenos urbanos permite acoplar de manera explícita modelos cualitativos y cuantitativos. La interpretación del meta-modelo resultante (figura 3.2) como un modelo interno del sistema permite además usarlo como una herramienta generativa, es decir, al contrario que los modelos deterministas, los modelos construidos a partir de la perspectiva de SCA funcionan como herramientas de diálogo, en donde se pueden contrastar diferentes visiones sobre la evolución del fenómeno estudiado y a través de esta comparación construir una visión consensuada del futuro.

La relevancia de este último punto queda de manifiesto al pensar en introducir una solución compleja de geomática, derivada del modelo conceptual planteado aquí, dentro del contexto de la política pública. El diseño e implementación de políticas involucra, en mayor o menor medida, la construcción de consensos entre los diferentes actores involucrados (Lindblom, 1979 [23]), pero teniendo en cuenta la información científica disponible. La flexibilidad que provee el uso de la geosimulación en los modelos urbanos aunada a la confianza que se tiene en los modelos fotoquímicos como herramientas predictivas permite atender simultáneamente ambas cuestiones, de modo que los modelos derivados de la perspectiva aquí expuesta tienen, al menos en potencia, las cualidades necesarias para insertarse en el contexto de la planeación y evaluación de políticas públicas.

Es evidente que lo expuesto en el presente trabajo no es suficiente para construir la solución compleja de geomática que se está buscando. Falta especificar las simulaciones necesarias para la construcción de los procesos de escala local y el modo en el que dichas simulaciones van a interactuar con los modelos de mayor escala, también es necesario estudiar más a fondo las cuestiones de validación de los escenarios de emisiones futuros. Por otro lado, la componente de comunicación de la solución compleja que se busca no ha sido tratada en lo absoluto, en este sentido es interesante estudiar el papel de la visualización como herramienta para captar el interés de los actores involucrados.

Si bien es cierto que el esbozo de modelo conceptual expuesto en el presente trabajo no es suficiente para construir una herramienta geomática completa, sí representa un punto de partida necesario para estudiar la contaminación atmosférica desde un punto de vista más amplio. La perspectiva de SCA y su aplicación al es-

tudio de fenómenos urbanos, en particular al caso de la contaminación atmosférica, muestran que el papel de la geomática va más allá de la recolección y procesamiento de información espacial y puede servir como base para que, a través de la dimensión espacial, se puedan integrar modelos y conocimiento que, si bien pudieron haber sido contruidos a partir de epistemologías distintas, comparten el mismo fundamento geográfico.

---

## Bibliografía

---

- [1] ADAMS, D. *Urban Planning and the Development Process*. UCL Press, London., 1994.
- [2] ALONSO, W. *Location and Land Use*. Harvard University Press, 1964.
- [3] BATTY, M., AND TORRENS, P. Modelling and prediction in a complex world. *Futures* 37, 7 (2006), 745–766.
- [4] BENENSON, I., AND TORRENS, P. *Geosimulation: Automata-based Modeling of Urban Phenomena*. WILEY, 2004.
- [5] BOISIER, S. El vuelo de una cometa. una metáfora para una teoría del desarrollo territorial. *Revista EURE, U.Católica de Chile, Instituto de Estudios Urbanos*, 69 (1997).
- [6] BOISIER, S. ¿y si el desarrollo fuese una emergencia sistémica? *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales* 35, 138 (2003).
- [7] BRAMLEY, G., BARTTLET, W., AND LAMBERT, C. Planning, the market and private housebuilding. The Natural and Built Environment Series 4, UCL Press, London., 1995.
- [8] BRIASSOULIS, H. Analysis of land use change: Theoretical and modeling approaches. In *The Web Book of Regional Science* ([www.rrri.wvu.edu/regscweb.htm](http://www.rrri.wvu.edu/regscweb.htm)), S. Loveridge, Ed. Regional Research Institute, West Virginia University., 2000.
- [9] DELGADO, J., CHÍAS, L., SOBRINO, J., TELLEZ, C., MORALES, C., AND ZAMUDIO, V. Evaluación comparativa de los sitios para la ubicación del nuevo aeropuerto internacional de la ciudad de México. Tech. rep., Programa Universitario del Medio Ambiente, PUMA, 2001.

- 
- [10] DING, G., AND O'KELLY, M. Choice-based estimation of alonso's theory of movement: Methods and experiments. Aceptado para su publicación en *Environment and Planning A*, 2007.
- [11] FORRESTER, J. W. *Urban Dynamics*. Pegasus Communications, 1969.
- [12] FOTHERINGHAM, A. S., BRUNSDON, C., AND CHARLTON, M. *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*. Sage, London, 2000.
- [13] FRANKLIN, S., AND GRAESSER, A. Is it an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agent. In *Intelligent Agents III. Agent Theories, Architectures, and Languages*, J. P. Müller, M. J. Wooldridge, and N. R. Jennings, Eds. Springer-Verlag, 1996.
- [14] GRELL, G. A., EMEIS, S., STOCKWELL, W. R., SCHOENEMEYER, T., FORKEL, R., MICHALAKES, J., KNOCHÉ, R., AND SEIDL, W. Application of a multiscale, coupled mm5/chemistry model to the complex terrain of the totalp valley campaign. *Atmospheric Environment* 34 (2000).
- [15] HOLLAND, J. *El orden oculto: De cómo la adaptación crea la complejidad*. Fondo de Cultura Económica, 2004.
- [16] HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992.
- [17] HOLLAND, J. H. *Emergence, from chaos to order*. Oxford university press, 1998.
- [18] [HTTP://TMIP.FHWA.DOT.GOV/](http://tmip.fhwa.dot.gov/), T. M. I. P.
- [19] INTERNATIONAL, R. Mexico emissions inventory program manuals. Tech. rep., EPA, USA, 2001.
- [20] JAZCILEVICH, A. D., FUENTES, V., JAUREGUI, E., AND LUNA, E. Simulated urban climate response to historical land use modification in the basin of mexico. *Climatic Change* 44, 4 (2000).
- [21] JAZCILEVICH, A. D., GARCIA, A., RUIZ-SUAREZ, L. G., CRUZ-NUÑEZ, X., DELGADO, J., AND CHIAS, L. B. An air quality modeling study comparing two possible sites for the new international airport for mexico city. *JOURNAL AIR AND WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION* 53, 3 (2003).
- [22] LEE, D. B. Requiem for large-scale models. *SIGSIM Simul. Dig.* 6 (1973).

- 
- [23] LINDBLOM, C. E. La ciencia de salir del paso. In *La hechura de las políticas*, L. A. Villanueva, Ed. Porrúa, 2007.
- [24] LOWRY, I. S. *Model of Metropolis*. Rand Corporation, 1969.
- [25] OCCELLI, S., AND RABINO, G. Cognitive modeling of urban complexity. In *Complex Artificial Environments: Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities*, J. Portugali, Ed. Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [26] PORTUGALI, J. Self-organization and the city. *J. Artificial Societies and Social Simulation* 5, 2 (2002).
- [27] PORTUGALI, J. The scope of complex artificial environments. In *Complex Artificial Environments: Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities*, J. Portugali, Ed. Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [28] PUTMAN, S. H. *Urban Residential Location Models*. Kluwer Academic Publishers., 1979.
- [29] REYES, C. Cybercartography from a modeling perspective. In *Cybercartography: Theory and Practice*, F. Taylor, Ed. Elsevier, 2006.
- [30] SEMBOLONI, F. An urban and regional model based on cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24, 4 (1997).
- [31] SERRANO, F. *Simulación de un Sistema Urbano usando Autómatas Celulares*. UNAM, 2005.
- [32] SMIA TEK, G. Soap-based web services in gis/rdbms environment. *Environmental Modelling & Software* 20, 6 (2005), 775–782.
- [33] TORRENS, P. How land-use transportation models work. Working Paper 20, Center for Advanced Spatial Analysis, 2000.
- [34] TORRENS, P. Can geocomputation save urban simulation? throw some agents into the mixture, simmer and wait ... Working Paper 32, Center for Advanced Spatial Analysis, 2001.
- [35] TORRENS, P. A geographic automata model of residential mobility. *Environment And Planning B: Planning and Design*, 34, 2 (2007), 200–222.
- [36] VON BERTALANFFY, L. *General System Theory. Foundation, Development, Applications*. Braziller, 1968.

- [37] WEBSTER, C. J., AND WU, F. Regulation, land-use mix, and urban performance. part 1: theory. *Environment and Planning* 31, 8 (1999).
- [38] WU, F. An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automatic city. *Environment and Planning* 25, 5 (1998).