

MODELO CONCEPTUAL PARA LA EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA DE ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS DE DESARROLLO URBANO, EN EL MARCO DE LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL Y ENERGÉTICA-NUMEX

Jorge L. Karol¹, Irene Martini², Gustavo San Juan³, Carlos Discoli³, Olga Ravella⁴, Elías Rosenfeld⁵

IDEHAB, Instituto de Estudios del Hábitat, UI N° 2 y N° 6B, FAU, UNLP

Calle 47 N° 162 (1900), La Plata, Prov. de Buenos Aires.

[www.fau.unlp.edu.ar/investigación/institutos y centros](http://www.fau.unlp.edu.ar/investigación/institutos_y centros)

e-mail: jkarol@ciudad.com.ar; Tel: +54 (0221) 423-6587 int. 250.

RESUMEN: Este trabajo presenta el desarrollo conceptual y metodológico de un modelo de simulación de la dinámica urbana. El modelo se focaliza sobre la articulación entre consumo de Energía, Movilidad y Uso del Suelo y se orienta a (i) relacionar analíticamente estas tres dimensiones críticas para la sustentabilidad del sistema urbano; (ii) identificar brechas de sustentabilidad y los procesos decisorios que las *producen*; (iii) diseñar instrumentos, estrategias de intervención y políticas públicas que operan sobre nodos críticos de esos procesos; (iv) diseñar y ensayar – mediante experimentación numérica – trayectorias estratégicas y (v) evaluar sus efectos combinados en escenarios alternativos. Los resultados de los experimentos se expresan en variaciones de indicadores seleccionados de Sustentabilidad y Calidad de vida urbana. El modelo y los experimentos corren en una interfase entre investigadores y planificadores/gestores urbanos.

Palabras clave: Modelos de simulación. Dinámica Urbana. Experimentación numérica. Sustentabilidad. Calidad de vida. Uso del Suelo, Movilidad, Energía.

Homenaje a Oscar Varsavsky (1920-1976)

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del Modelo 'NUMEX' (PICT N° 1993) está financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. El objetivo general del trabajo es conducir y evaluar experimentos numéricos de estrategias y trayectorias alternativas que puedan guiar escenarios de *transición* hacia desarrollos urbanos sustentables. Se analizan los efectos de diversas combinaciones de *instrumentos de política* sobre la variación temporal de los patrones de consumo de Energía, Movilidad y Usos del Suelo (subsistema USEM, en adelante) y de ésta sobre la reestructuración y progresiva sustentabilidad del sistema urbano y sobre la calidad de vida de la población.

El modelo simula la dinámica urbano-regional que resulta de la interacción entre los componentes del subsistema USEM. Su diseño conceptual y su formulación matemática identifican y definen procesos causales de la insustentabilidad de los patrones predominantes de desarrollo urbano. El modelo *desagrega* los valores de *variables de estado* del subsistema, identificando y ponderando la incidencia de tres tipos de componentes (condiciones de contorno, decisiones de los actores involucrados e instrumentos de política pública) que condicionan y explican los procesos asociados a dichos valores.

Tras identificar instrumentos de intervención sobre los nodos críticos de esos procesos causales, se evalúa comparativamente - mediante *experimentación numérica* (Holland, 1961; Varsavsky, 1971) - la *viabilidad* ambiental, técnica, económica, social y político-institucional de diversas trayectorias y estrategias alternativas que combinan aquellos instrumentos, en busca de la transición a una mayor sustentabilidad urbana en el mediano y largo plazo. La información que el modelo procesa y genera - y el análisis estratégico que permite - alimentan y apoyan la construcción de *redes de aprendizaje compartido*, que relacionan a productores de conocimiento científico con quienes formulan planes y políticas públicas urbanas.

El modelo se aplica a la Micro Región del Gran La Plata, donde proyectos ya completados y en curso en las Unidades de Investigación N° 2 y N° 6B del IDEHAB permitieron generar bases de información válida y confiable y donde se cuenta con acceso adecuado a autoridades locales y regionales. Su desarrollo y aplicación involucra a una decena de investigadores y consultores (formados en arquitectura, ingeniería, matemática, ecología, geografía, economía, ciencia política y sociología) que vienen trabajando sobre Energía, Movilidad y Transporte, Usos del suelo, Calidad de vida, Sustentabilidad y Gestión urbana desde hace largos años (Rosenfeld, E. 1997); (Pérez, P. 2003); (Ravella, O. 2000), (Discoli, C. 2006/2009) (Discoli, C. 2005/2008); (San Juan, G. 2006).

¹ Investigador UI N° 6B-IDEHAB; ² Investigador Asistente CONICET; ³ Investigador Adjunto CONICET; ⁴ Directora UI N° 6B-IDEHAB; ⁵ Investigador Principal CONICET, Director IDEHAB.

MARCOS CONCEPTUALES DE REFERENCIA

La modelización de la ciudad en tanto sistema abierto, autoorganizado y complejo (Bourne, 1982) involucra tres operaciones conceptuales: (i) definición de su *estructura*, conformada por un conjunto finito de subsistemas; (ii) caracterización general de *dinámicas* urbanas, que resultan de las condiciones de interacción y articulación entre los subsistemas definidos; (iii) identificación de los *procesos* (Lefebvre, 1973; Gottdiener, 1988) y *prácticas sociales* (Harvey, 1990) de *estructuración* del espacio urbano (su producción, construcción, apropiación, dominación y significación) que configuran dicha dinámica y determinan su sustentabilidad.

La estructura urbana

La *estructura del sistema-ciudad* resulta de las condiciones dinámicas en que diversos subsistemas se articulan en un momento dado. Inicialmente, se identifican los siguientes dominios y componentes: (1) estructura del soporte natural; (2) medio ambiente; (3) modelos territoriales, atributos de escala, espaciales y físicos de la ciudad; (4) morfología urbana (densidad, homogeneidad, direccionalidad, compacidad); (5) fenómenos funcionales (conectividad, flujos, redes e infraestructuras físicas y espaciales); (6) fenómenos económicos (producción, circulación y consumos privados y colectivos de bienes y servicios; procesos de reproducción de la fuerza de trabajo); (7) fenómenos sociales (pautas y prácticas diferenciales de construcción, producción, apropiación y dominación del espacio por parte de diversos grupos y actividades sociales); (8) fenómenos culturales y simbólicos (apropiación social, atribución de significados y representaciones del espacio y el tiempo y (9) sistemas normativos, regulatorios y político-institucionales⁵.

Cada componente presenta diferentes patrones de variabilidad y cambio y despliega su comportamiento – en sus propios términos y con distintos grados de predictibilidad - en escalas y con temporalidades diversas en entornos específicos. En el *proceso de producción* social del espacio urbano, estas dimensiones se *espejan y expresan* las unas a las otras.

Todos estos componentes son *atravesados* por tres *vectores* que inciden sobre su articulación y comportamiento dinámico en momentos históricos determinados: (i) la lógica político-organizacional predominante del sistema; (ii) la conectividad externa de la ciudad y (iii) los *modos tecnológicos* (diversos ‘saber hacer’ y sus modalidades asociadas de consumo de energía, de recursos y de servicios por parte de unidades urbanas fijas y móviles, actividades y grupos sociales).

Dinámica urbana y transición hacia la sustentabilidad

La *dinámica urbana* queda determinada por el modo y las condiciones – históricamente determinadas – en que todos estos componentes y vectores se articulan entre sí. Esa articulación es configurada a través de *procesos* y *prácticas* de producción y estructuración social del espacio urbano, que se corporizan en *actores* sociales identificables. A través de esos procesos se *espacializan los grupos sociales y sus actividades*, se construyen sus soportes urbanos y se establecen o habilitan sus interconexiones. Esos procesos están mediados por una compleja trama de asignaciones y *decisiones* – ambientales, tecnológicas, económicas, sociales, culturales, institucionales y políticas- de actores públicos y privados, según sus relaciones estructurales y sus asimetrías de poder (Gottdiener, 1988). Esos procesos y decisiones configuran *estilos de desarrollo* (Pinto, 1976; Wolfe, 1976) o *tecnológicos* (Varsavsky, 1974) y definen niveles de sustentabilidad urbana.

Así, las modalidades de producción y consumo de energía, los patrones de movilidad y de uso del suelo (USEM) devienen motores principales de la estructuración social de la ciudad y de la *organización* del sistema urbano.

A través de la formalización matemática y la experimentación numérica de las relaciones mencionadas, el modelo evalúa la medida en que la *evolución* de las articulaciones entre los subsistemas (incluyendo sus procesos y decisiones) tiende a corregir desequilibrios y asimetrías ambientales, económicas y sociales. La *transición hacia la sustentabilidad* urbana puede expresarse así en términos de la disminución relativa del consumo de materia y energía y su distribución progresivamente equitativa por unidad de crecimiento territorial y poblacional.

Organizaciones de borde y redes de aprendizaje en la planificación urbano-regional

Las principales barreras y obstáculos al planeamiento integrado de las dimensiones ambientales, económicas, sociales e institucionales del Desarrollo Sustentable en el largo plazo – débiles conexiones temáticas, vacíos de información, racionalidades conflictivas, fragmentaciones institucionales, horizontes de corto plazo, lenguajes técnicos falazmente ‘neutrales’ (Karol & Suárez, 2007), interfases ciencia-política deficientes, incompletas y/o discontinuas - son algunos de los ‘puntos ciegos’ hoy ampliamente reconocidos en la comunidad internacional de la planificación y la gestión urbana (Gallopín, 1999, Kaule & van de Giesen, 2008). Esas asistematicidades y desarticulaciones (de y entre actores, dispositivos institucionales, políticas e instrumentos de regulación, etc.) forman parte de la *dinámica de producción de la insustentabilidad* urbana (Karol et al., 2007).

La elaboración de representaciones adecuadas y comunicables de la complejidad de algunos subsistemas urbanos y el desarrollo de instrumentos de intervención experimental en el mediano y largo plazo (Petts et al., 2006) que apoyen el proceso de *gestión de la transición* hacia la sustentabilidad procura encarar la solución de esos puntos críticos. El modelo funciona como un *objeto de borde* (Star & Griesemer, 1998) en espacios compartidos de información, experimentación y decisión, entre quienes producen conocimientos científicos y quienes formulan políticas y estrategias orientadas a una sustentabilidad creciente. La operación del modelo en ese *entorno de borde* (Guston et al., 2000) permite configurar

⁵ Estos 9 dominios configuran cuatro grandes dimensiones que - siguiendo aproximaciones conceptuales ya clásicas - pueden denominarse *Oikos* (1, 2); *Urbs* (3, 4), *Civitas* (5, 6, 7) y *Polis* (8, 9).

progresivamente redes institucionales y modelos de gestión adecuados y flexibles, a la luz de las conexiones temáticas a establecer en relación al sistema modelizado.

METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL MODELO

A partir de conjuntos seleccionados de indicadores de salida referidos a la sustentabilidad y a la calidad de vida urbana - que *resultan* de la articulación entre componentes del subsistema USEM - la aplicación de un proceso conceptual de *ingeniería inversa* permite reconstruir cadenas de causalidad, precedencia o conectividad e identificar procesos y nodos críticos ligados a la producción de la insustentabilidad urbana.

Este análisis inverso de las cadenas causales de las salidas del modelo relaciona componentes a través de leyes o hipótesis acerca de las conexiones de y entre otras variables (cada una con sus respectivos niveles de desagregación) hasta completar una secuencia que – a juicio de los investigadores y de sus instancias de validación y control – reproduce razonablemente su comportamiento y funcionamiento de manera operativa (Varsavsky, 1971). El resultado de este proceso es un conjunto de hipótesis plausibles sobre el comportamiento del sistema, bajo diversas *condiciones* y *modelos de gestión* (Holling, 1978).

Esta operación permite *localizar* y *definir* la naturaleza, características y componentes de diversas trayectorias alternativas de intervención, así como evaluar - en un entorno compartido entre actores diversos – la sensibilidad, aceptabilidad, razonabilidad, consistencia, conveniencia, integración y factibilidad de las estrategias, combinando e integrando distintos instrumentos de política en horizontes temporales diversos.

La experimentación numérica permite configurar y simular escenarios (Kemp-Benedict et al., 2002) en los que se elaboran, ensayan y evalúan los efectos cruzados de las intervenciones - mediante diversos instrumentos de política (de mitigación, corrección, prevención y/u orientación estratégica) - sobre los nodos críticos de los procesos causales y el de aquéllos sobre los indicadores de sustentabilidad y calidad de vida urbana.

Definición de las variables de salida del modelo ← identificación de cadenas causales ← desagregación de los elementos de las cadenas en componentes ‘técnicos’ y ‘políticos’ ← identificación de los instrumentos de política que afectan a los componentes técnicos ← selección de conjuntos de *instrumentos* de política (*estrategias*) a experimentar ← formalización, explicitación y análisis de *viabilidad* de las políticas a las que responden los instrumentos.

Características básicas del modelo NUMEX de simulación / experimentación numérica

- Es un modelo de tipo *contable* (Varsavsky, 1971; Heaps, 2002): sus ecuaciones sirven prioritariamente para definir el significado exacto de coeficientes y parámetros. Al igual que en algunos modelos usuales en planeamiento energético, sus variables de estado son descripciones *físicas* definidas por relaciones implícitas de tipo Insumo / Producto.
- Representa las interconexiones y simula la dinámica y comportamientos de los subsistemas analizados, describiendo matemáticamente *procesos* y *relaciones causales* de los niveles de sustentabilidad y de calidad de vida urbana resultantes. Dichos procesos derivan de decisiones de (y relaciones sociales entre) actores concretos, que se manifiestan *espacialmente* en diversas escalas. Se simulan decisiones (ver más adelante, *coeficientes de política*) y se analizan y evalúan sus resultados e impactos en términos de implicancias y costos (energéticos, ambientales, sociales, económicos y de uso de recursos y servicios críticos) en escenarios ad-hoc.
- El modelo no *sintetiza* sus resultados mediante índices escalares compuestos sino que, por el contrario, *analiza* – despliega, desagrega - *procesos de producción* de sus niveles de sustentabilidad y de calidad de vida, para identificar sus nodos críticos y puntos de intervención y definir instrumentos de política aplicables según la naturaleza del problema.
- Es un modelo *dinámico*: permite reproducir comportamientos históricos, desplegar trayectorias hipotéticas y explorar efectos combinados de estrategias alternativas de intervención sobre variables del subsistema USEM en el tiempo.
- El modelo es *teóricamente liviano* (Varsavsky, O. 1971). En lo posible, se evita introducir explícitamente *hipótesis teóricas* – como las incorporadas en ecuaciones de comportamiento, funciones de producción, de correlación y relaciones funcionales que asumen linealidad. Las variaciones de la mayoría de sus parámetros son exógenas. A medida que su uso y que las experimentaciones de política permiten adquirir conocimientos teóricos sobre ciertos parámetros, el cálculo se hace endógeno, con lo que el modelo se va *cargando* progresivamente.
- Es un modelo *escalable* (Varsavsky, O. 1971): se (re)diseña y opera mediante aproximaciones sucesivas, simulando enfoques *adaptativos* (ver más adelante) que incorporan diversos modos de tratamiento de las incertidumbres (Holling, 1978). Comenzando por la modelización de un conjunto reducido de relaciones entre componentes del subsistema USEM, su *escalabilidad* permite dar cuenta de mayores niveles de complejidad de la *organización* del sistema analizado – ya sea (i) por la consideración/incorporación/tratamiento de nuevas variables y dimensiones que determinan dinámicas urbanas o (ii) por la creciente desagregación de cada variable en diversos subíndices pertinentes para los análisis buscados. Su escalabilidad permite también incorporar progresivamente las especificaciones y desagregaciones que se van haciendo evidentes y necesarias, a medida que el modelo se estabiliza (a través de las simulaciones y experimentos) o a medida que se quiere ahondar y mejorar la capacidad explicativa de ciertas políticas.

- Es un modelo *multi-agente*: los diversos procesos analizados están operados y bajo el control de actores diversos. Una vez que el modelo está formulado en condiciones de *usabilidad* específicas⁶, su diseño y su operación a ‘*caja blanca*’ (por oposición a ‘*caja negra*’) permite a los actores involucrados debatir, acordar/discordar y reformular (mediante aproximaciones sucesivas) la representación de la dinámica del sistema y las intervenciones propuestas. Por tanto, no sólo opera como un modelo *deductivo* sino – esencialmente – como un modelo abierto de *producción* (diseño) y *construcción* (ensayo y viabilización) de estrategias y políticas públicas.
- El módulo central del modelo calcula el funcionamiento y la evolución de las demandas desagregadas de Energía, Movilidad y Suelo originada en las familias, empresas y gobierno. Algunos datos intermedios se calculan mediante sub-modelos periféricos de uso público (TRANUS, LEAM, LEAP) y otros desarrollados específicamente. Un sub-modelo permite simular y evaluar la *viabilidad política* de estrategias y escenarios alternativos (Arentze & Timmermans, 2003). Un mapa de alianzas y conflictos entre actores (Robirosa, 1978) calcula los intereses, afectaciones, posicionamientos, apoyos/rechazos y acuerdos/desacuerdos de los actores, todos ellos ponderados por su poder y su capacidad de alianzas en espacios de negociación.
- Los resultados de los experimentos - de políticas sectoriales e hipótesis sobre parámetros y variables no controlables - no se analizan mediante ecuaciones de optimización bajo restricciones dadas, sino que se exploran y revisan críticamente a través de *indicadores de viabilidad* – tanto numéricos como cualitativos (Gallopín, 1967) – de diversos tipos, tales como (i) brechas, insuficiencia de recursos, velocidades diferenciales, incompatibilidad entre políticas de oferta y demanda, desequilibrios en las cuentas de los actores (familias, empresas, gobierno), tasas de desempleo, capacidad productiva ociosa, escasez de oferta energética, etc.; (ii) elasticidades y propensiones implícitas en (y efecto de los desequilibrios entre) distintas hipótesis independientes propuestas para diversas variables y coeficientes; (iii) brechas e insatisfacciones entre expectativas y logros para procesos y/o actores determinados (infraconsumos energéticos, déficits de vivienda, desequilibrios ambientales, congestiones de tránsito, inequidades en accesibilidad, ingresos y consumos, insustentabilidad económica y/o ambiental, etc.) (Varsavsky, 1971); (iv) viabilidad institucional.
- Niveles de desagregación. Cada variable del modelo admite su desagregación en diversos subíndices, según corresponda al proceso a describir y/o a la naturaleza del experimento a conducir, limitada por la disponibilidad, la accesibilidad o la capacidad de elaborar datos en los niveles de desagregación requeridos. Las relaciones entre variables desagregadas (por ejemplo, (i) consumos energéticos residenciales por fuente según grado de consolidación de la localización territorial y grupos de población; (ii) niveles de contaminación aérea por modos de transporte según tipos de combustibles) se calculan en matrices n-dimensionales, los resultados de cuyas celdas alimentan los parámetros del modelo. Algunas desagregaciones pertinentes a la simulación/experimentación son:

A = Escala de la aglomeración

L = Localización = Central, suburbana, periurbana, rururbana, rural, etc.

ML= Micro-localización (polígonos determinados)

NJ= Niveles jurisdiccionales = nacional, provincial, municipal, comunal, local

MG= modelos de gestión= estatal centralizado, estatal descentralizado, privado, asociación público-privada, etc.

G = Grupos de población= Grupos ocupacionales, Estratos de Ingreso, otras

E = Calificación del empleo= no calif; calif no prof., calif prof, otras

S = Sectores = Agropecuario, Industrias de consumo, Industrias de Capital, Educación, Redes de servicios públicos, Servicios privados, Redes de transporte, etc.

SD = Sectores de demanda= Hogares, Empresas, Gobierno, otros

K = Propiedad del capital = Estatal, Privada Nacional, Privada Extranjero, Social, Cooperativa, etc.

T = Tecnología = combinaciones de recursos, de factores de producción, intensidad de capital, coeficientes de emisión

MT= Modos de transporte = tren, trolleybus, tranvía, omnibus, dos-ruedas, automóviles, otros

C = Tipos de combustibles utilizados =sólidos (carbón, leña), líquidos (naftas, fuel oil, gas oil, kerosene, otros)

E = Tipos de fuentes energéticas = energía eléctrica (red, otras fuentes); carbón, gas (natural, comprimido, licuado)

U = Usos finales de fuentes energéticas = calefacción, refrigeración, cocción de alimentos, calentamiento de agua, etc.

DCE = Tipos de dispositivos de consumo energético domiciliario (cocina, estufa, lámpara, etc.).

Cada tipo de parámetro utiliza *una desagregación diferente* según la cantidad máxima de categorías que tiene sentido identificar en una fase dada de la operación del modelo. Dado el gran número de componentes elementales del sistema, ninguna desagregación se lleva al ‘máximo’, sino al nivel ‘óptimo’ según las características del problema que se aborda. Tampoco se construyen matrices resultantes del cruce de *todas* las desagregaciones empleadas ni se producen datos correspondientes a todas y cada una de sus celdas. Los subíndices *se reagregan funcionalmente* (Varsavsky, O. 1971) y se opera sólo con el máximo número de ‘celdas’ necesarias para ilustrar las diferencias necesarias y útiles a cada ensayo.

ELEMENTOS DE LA FORMALIZACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO

Las ecuaciones expresan las cadenas y procesos causales de los valores que asumen las variables de *estado* de la calidad de vida y/o de la sustentabilidad urbana. Más en general, *el estado de cualquier variable en un momento dado puede entenderse como una respuesta adaptativa de los actores involucrados en la producción del espacio urbano a las condiciones de su contexto significativo, en la escala y temporalidad correspondiente*. Cada variable de estado puede, por tanto, descomponerse

⁶Su *especificidad* depende de la particular configuración de la red institucional de organismos y otros actores involucrados en las experimentaciones que se ensayen.

en dos elementos: (i) un componente real - usualmente expresado en términos de magnitudes (volúmenes, valores, etc.) y tendencias (tasas, elasticidades, propensiones, etc.) - y (ii) un conjunto de variables que expresan las *condiciones* específicas del entorno en el que aquella variable ocurre. Genéricamente, un ‘coeficiente técnico’ y un ‘coeficiente de política’ (que afecta al coeficiente técnico). Cualquier variable puede ser representada, por tanto, como el producto de ambos coeficientes. El modelo propone la fórmula (1) para indicar que el *estado* que una variable cualquiera del modelo asume en un momento dado [VAR_t] es el resultado del producto de un ‘coeficiente técnico’ de esa variable [CT_{VAR}] y un ‘coeficiente de política’ [CP_{CT}] que afecta a éste último.

$$VAR_t = CT_{VAR} \cdot CP_{CT} \quad (1)$$

La *reconstrucción inversa de las cadenas causales* consiste en ‘abrir’ progresivamente tantos [CT_{VAR}·CP_{CT}] como sea necesario y posible en función de la representación diseñada y de la información disponible. Por supuesto, siempre pueden abrirse más a medida que (i) se descubra cuáles son, (ii) se obtengan o produzcan los datos y (iii) se analice cuál es la mejor manera de introducirlos en el sistema de ecuaciones. En cualquier momento de su diseño y operación, estos componentes del modelo pueden también ser simplificados mediante análisis de sensibilidad.

Los ‘coeficientes técnicos’ [CT_{VAR}] caracterizan a cada elemento, con las desagregaciones que resulten pertinentes. Por ejemplo, una determinada matriz energética o una política de ordenamiento territorial o de transporte se expresa por un *perfil técnico* estructural (‘real’) específico para cada período y/o para cada localización, que especifica su *composición estructural*: origen y perfiles de las diversas modalidades de la demanda intermedia y el consumo final; espacialización de la demanda según distribución de usos del suelo y localización de actividades urbanas diversas; tipologías de consumos energéticos; fuentes energéticas; modalidades de interconexión; composición de (y relación entre) los vectores territoriales (fijos) y vehiculares (móviles) de la movilidad urbana y regional de personas, bienes y servicios, flujos, etc. Así, los coeficientes técnicos [CT_{VAR}] de una variable cualquiera en un momento dado [VAR_T] expresan el *perfil estructural* de cada elemento, al que se desagrega – con la extensión que corresponda - a la manera de un *árbol* (como en el modelo LEAP) o como un *vector* de una relación Insumo/Producto.

Cada coeficiente técnico [CT_{VAR}] puede estar afectado por uno o varios coeficiente/s de política [CP_{CT}]⁷. Los coeficientes de política [CP_{CT}] representan las condiciones de contorno que rodean, explican y *viabilizan* las condiciones en que el [CT_{VAR}] ocurre y se manifiesta. De hecho, cada [CT_{VAR}] está efectivamente definido, determinado o posibilitado por un conjunto de *condiciones específicas de contexto* (esto es, una combinación dada de [CP_{CT}] específicos) que configura su modo de ocurrencia en un momento dado. Los [CP_{CT}] se expresan a través de los instrumentos de política pertinentes al ‘coeficiente técnico’ y disponibles en el nivel jurisdiccional del decisor.

Para cada [CT_{VAR}], esos [CP_{CT}] admiten expresiones de diversos tipos: (i) tecnológicas (perfil energético, intensidad de capital, tipos de combustibles, capacidades de carga, extensión de redes de infraestructura y servicios, etc.); (ii) económicas (sistemas tarifarios, subsidios, impuestos, retenciones, señales de precio, estímulos, desgravaciones, aranceles, etc.); (iii) sociales (políticas migratorias, de empleo, de atención a requerimientos y accesibilidades diferenciales según grupos sociales o localización territorial de sus actividades, de capacitación, de estímulo a cambios en las modalidades de consumo energético, etc.); (iv) normativas (delimitaciones, permisos y prohibiciones, regulaciones, controles y verificaciones, etc.); (v) físicas (localización geográfica, provisión y/o disponibilidad de infraestructura, régimen de accesibilidades, etc.). Así, las opciones de política y las decisiones estratégicas son expresadas a través de coeficientes de control (variables instrumentales que son siempre exógenas). Su origen puede ser formal o informal, público o privado.

Ya se señaló más arriba que cada variable componente de las cadenas identificadas expresa y responde *adaptativamente* a un particular contexto complejo (espacial, tecnológico, energético, económico, organizacional, normativo, social y de estilos de consumo). En el modelo, la descomposición de cada variable en [CT_{VAR}·CP_{CT}] *explicita ese contexto* en el ámbito de la discusión *multiagente*, lo que facilita la formulación y el ensayo de instrumentos de política.

SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURA DEL MODELO

La lógica de *construcción* del modelo sigue puntualmente – aunque en sentido exactamente inverso - una recomendación clave de Forrester (1969:113): “El primer paso en la modelización de un sistema es generar un modelo que *Cree el problema* (que *produzca el síntoma*). Sólo si comprendemos los procesos que llevan a las dificultades podemos esperar reestructurar el sistema de modo que los procesos internos lo conduzcan en una dirección diferente”.

⁷ Una ‘política’ es un instrumento de decisión complejo e intencionado que comprende objetivos y estrategias distributivas de costos y resultados. Un ‘instrumento de política’ es un modo de afectar concretamente el comportamiento de una variable o de su contexto, introducido deliberadamente por un actor (público, privado, comunitario, de la sociedad civil, nacional o internacional, etc.) con capacidad de decisión. Un ‘coeficiente de política’ es una variable numérica (porcentaje, tasa, elasticidad, cuota, velocidad, proporción, peso, etc.) o cualitativa, cuya magnitud y variación se calcula exógenamente y que se incorpora al sistema de ecuaciones del modelo para afectar las *condiciones* en que ocurre un ‘coeficiente técnico’ de una variable dada.

NUMEX reconstruye cadenas causales⁸ a partir del problema 'ya definido', tal como es expresado por sus variables de salida (indicadores de sustentabilidad y calidad de vida urbana) que derivan de las relaciones entre los tres componentes del subsistema USEM. Queda así definida una secuencia de construcción del modelo ('desde el final hacia el comienzo') que difiere de su secuencia típica de operación ('desde el comienzo - datos iniciales - hacia el final - datos de salida o resultados'). La Figura 1 muestra las secuencias de construcción y operación del modelo.

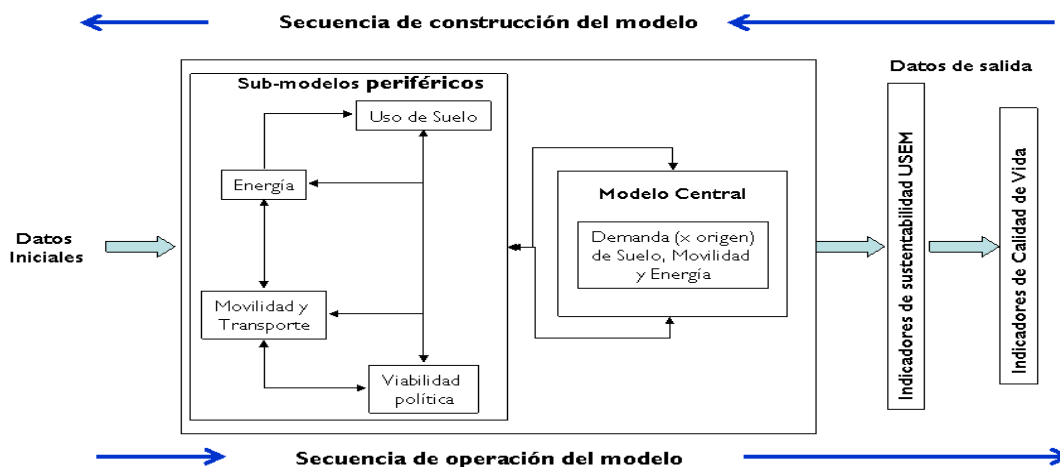


Figura 1. Secuencias de construcción y operación del modelo.

LÓGICA DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES.

Se asume que una determinada variable o indicador de salida es una función f . Todos los componentes de esa función se relacionan a través de una taxonomía jerárquica – una estructura de árbol - que los clasifica y relaciona según las desagregaciones necesarias para el modelo.

Como ejemplo, se asume que el nivel de emisiones de GEI y otros gases contaminantes derivadas del consumo energético es una función f de las condiciones específicas en que se articulan las demandas originadas en las distintas actividades que desarrollan grupos de población y actores sociales diversos. En base a la verificación de la composición de este supuesto (a través de ecuaciones contables) se proponen estrategias de mitigación y/o de prevención que operan sobre las condiciones de contexto en que esas relaciones ocurren.

En lugar de expresarlo como una función matemática 'cerrada', se desagrega su estructura de modo de poder identificar los 'coeficientes técnicos' que puedan ser modificados a través de los 'coeficientes de política' que configuran sus condiciones de contorno (lo que configura la forma básica $[CT_{VAR} \cdot CP_{CT}]$ ya mencionada. Considérese, por ejemplo, un árbol como el siguiente:

Variable resultado: Emisiones Contaminantes

→ Emisiones GEI

→ Emisiones GEI del sector Residencial

→ Emisiones GEI sector Residencial en áreas de alta consolidación

→ Emisiones GEI sector residencial por consumo Energía eléctrica + Gas natural etc. → →

Este razonamiento da lugar a la formulación matemática de las ecuaciones y luego a la desagregación de cada variable en pares $[CT_{VAR} \cdot CP_{CT}]$.

⁸ Mientras las 'variables de salida' de NUMEX equivalen a los indicadores de *Estado* e *Impacto* del modelo FPEIR (OCDE, 1984), sus 'cadenas de procesos' equivalen a la *composición dinámica* de los indicadores de *Fuerza Motriz* y *Presión*.

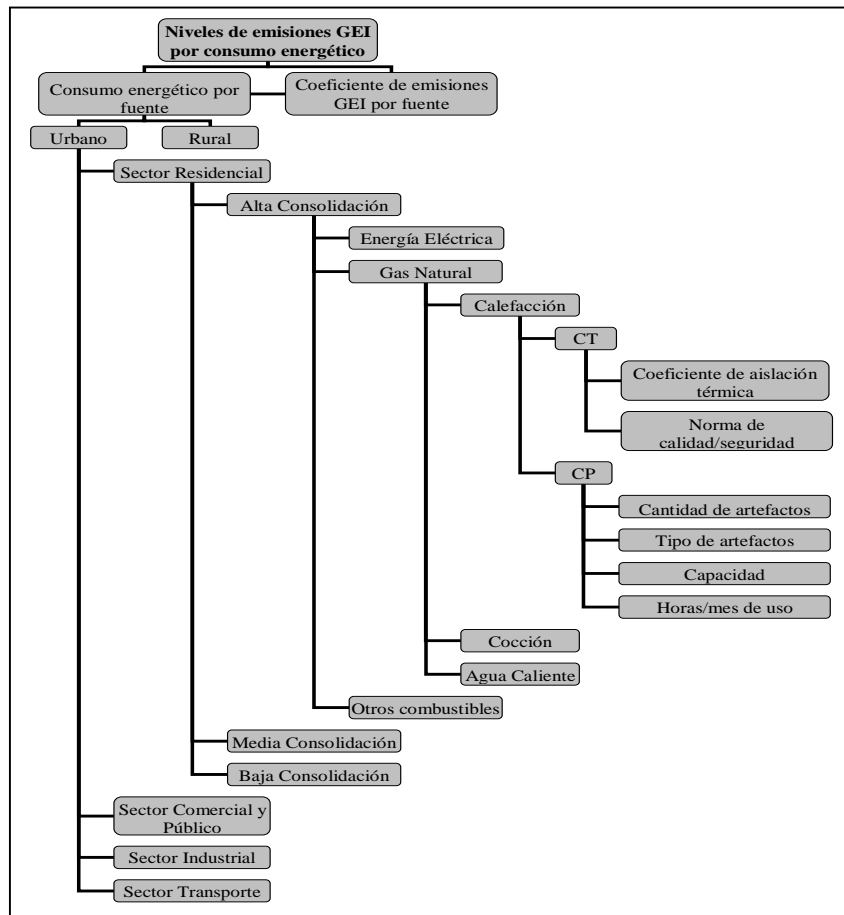


Figura 2. Estructura del sistema de ecuaciones.

En la secuencia que muestra la Figura 2, coeficientes ‘técnicos’ ($CT_{VAR,}$) tales como volumen de viviendas del grupo G o capacidades de los artefactos de tipo DCE son afectados por diversos tipos de *coeficientes ‘de política’* (CP_{CT}) tales como coeficientes de aislamiento térmico, normas de calidad/seguridad, y por *decisiones* tales como cantidad y tipos de artefactos)

CONCLUSIONES

Se espera que los atributos, características, arquitectura y estrategia de construcción del modelo permitan afrontar tanto los requerimientos de una adecuada representación de un fragmento de la dinámica urbana (que deriva de la interacción de tres vectores de fuerte incidencia en la estructuración socio-espacial de las ciudades) como los de una apropiada capacidad de comunicación y experimentación conjunta entre investigadores científicos y planificadores/gestores urbanos. Si esto se verifica, será factible (i) explicitar las interrelaciones entre tres dimensiones relevantes en la configuración de sistemas urbanos usualmente no consideradas de manera conjunta en la práctica de la gestión; (ii) identificar procesos principales que tienden a producir condiciones no sustentables del desarrollo urbano; (iii) identificar – sobre cada cadena causal - los ‘puntos de ataque’ más eficientes de las intervenciones políticas; (iv) ensayar - en entornos interdisciplinarios, multi-actorales y participativos - la construcción de trayectorias estratégicas integradas; (v) contribuir a mejorar el conocimiento y la comprensión sobre el rol de los objetos y organizaciones *de borde* en la mejora de las capacidades de gestión de la sustentabilidad urbana.

A partir del desarrollo conceptual del modelo,

(i) se identificaron, priorizaron y sistematizaron conjuntos de indicadores de sustentabilidad y de calidad de vida urbana (las variables de salida del modelo) ligados a dimensiones de (a) caracterización espacial básica; (b) usos del suelo; (c) redes, infraestructuras y equipamientos; (d) viviendas; (e) estructuras socioeconómicas; (f) movilidad; (g) energía; (h) calidad ambiental e (i) gestión ambiental.

(ii) se desagregaron, en cada componente del subsistema USEM, indicadores pertenecientes a los dominios Ambiental, Económico y Social, los que – siguiendo la metodología FPEIR – permiten identificar (a) Fuerzas conductoras, (b) Presiones; (c) Estados; (d) Impactos y (e) Respuestas (éstas identifican los instrumentos disponibles y/o necesarios para elaborar los ‘coeficientes de política’ que afectan a los ‘coeficientes técnicos’).

(iii) se está avanzando en la elaboración de la representación lógico-conceptual y gráfica de la dinámica urbana asociada a la articulación entre los patrones de uso del suelo, movilidad y Energía (USEM) y

(iv) se comenzó la elaboración del sub-modelo de análisis de la viabilidad política.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arentze, T.A., & Timmermans, H.J.P. (2003). A multi-agent model of negotiation processes between multiple actors in urban developments: a framework for and results of numerical experiments. Planning and Design.
- Bourne, L.(Ed., 1982), Internal structure of the city. Oxford University Press
- Discoli, C. (2006-09). Modelo de Calidad de Vida Urbana. Diagnóstico de necesidades básicas en infraestructura, servicios y calidad ambiental para áreas urbanas con demandas insatisfechas. Proyecto Acreditado UNLP, código 11/U083.
- Discoli, C. (2005-08). Sistema de diagnostico de necesidades básicas en infraestructuras, servicios y calidad ambiental en la escala urbana regional. PICT 2003 N° 13-14509.
- Forrester, J.W (1969), Urban dynamics, MIT Press, Cambridge, Mass
- Gallopín, G.C. (1997). Situational Indicators en Moldau & Billharz, Sustainability indicators, Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), Wiley.
- Gallopín, G.C. (1999). Generating, Sharing and Utilizing Science to Improve and Integrate Policy. Special Issue: 'Science and Sustainable Development '. The International Journal of Sustainable Development: 2(3): 397-410.
- Guston, D.H., Clark,W., Keating,T., Cash, D., Moser, S., Miller,C., Powers, C (2000). Report of the Workshop on Boundary Organizations in Environmental Policy and Science. Belfer Center for Science & International Affairs, Rutgers, S.U. N. Jersey.
- Gottdiener, M. (1988). The social production of urban space. U. of Texas Press
- Harvey, D. (1998). La condición de la posmodernidad, Amorrortu, Buenos Aires
- Heaps, C., (2002). Integrated Energy-Environment Modeling and LEAP, SEI-Boston and Tellus Institute
- Holland E., (1961). Simulation of economy with development and trade problems, MIT, Cambridge (Tesis)
- Holling, C.S. (Ed.) 1978. "Adaptive Environmental Assessment and Management". Wiley, Chichester.
- Kaule, G., van de Giesen, N.C. (2008) Bridging the gap between knowledge and policy action: Land use is the key – confidence is the condition. NMPI Network Working paper, en River Basins – From Hydrological Science to Water Management (IAHS Publ. 323)
- Karol, J., Ravella, O., Ainstein, L., Domnanovich, R., Aón, L., Frediani,J., Giacobbe, N., Agost, L., Alvarez, A., Fernández, L., Maqueda, L. y Villegas, R. (2007), La producción de la (in)sustentabilidad urbana. La gestión del uso del suelo, la energía y la movilidad (USEM) en grandes aglomerados. El caso de la micro-región del Gran La Plata, Argentina. Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples Niveles y Escalas, UMSS / Leuven U., Cochabamba, Julio.
- Karol, J. y Suárez, P. (2007) Adaptación al cambio climático, estructuras fractales y trampas discursivas. De la construcción del objeto a la construcción de la acción, Medio Ambiente y Urbanización, 67:25-44, IIED-AL, Buenos Aires.
- Kemp-Benedict, E., Heaps, C. & Raskin, P. (2002). Global Scenario Group Futures. Technical notes. Stockholm Environment Institute.
- Lefebvre, H. (1974). La production de l'espace. Anthropos, Paris.
- Petts, J., Owens, S. & Bulkeley, H. (2006). Boundary work: knowledge, policy, and the urban environment, Environment and Planning C: Government and Policy, volume 24:633 -643
- Pinto, A. (1976). Notas sobre los estilos de desarrollo en la América Latina, Revista de la CEPAL, 1° semestre.
- Pírez, P., Rosenfeld, E., Karol, J., San Juan, G. (2003). El sistema urbano-regional de redes de servicios e infraestructuras. Materiales para su estudio. EDULP- Editorial Universitaria de la Plata, ISBN N° 950-34-0268-9, La Plata
- Ravella, O., Aón, L., Olivera, H., Giacobbe, N., Frediani, J., Elizalde, E., Wright, S., Moro, S., Álvarez, L. (2000). La modelización integrada Transporte-Uso del suelo como herramienta de la planificación Urbana. Informe final Proyecto PIP/CONICET 4716, UI No. 6B, IDEHAB, FAU, UNLP.
- Robirosa, M.C. (1978). Metodología de planificación y gestión de asentamientos humanos. Programa FLACSO-UNESCO de Asentamientos Humanos, Costa Rica.
- Rosenfeld, E., Ravella, O., Discoli, C., Ferreiro, C., Czajkowski, J., San Juan, G., Rosenfeld, Y., Martini, I., Tesler, J. (1997) FIGUR. Programa Informatizado de Gestión Urbana y Regional'. Revista Energías Renovables y Medio Ambiente, ASADES. Volumen II, junio, pp.65-73.
- San Juan, G. et al. (2006). Estructura de un Atlas Urbano-Ambiental para la región del Gran La Plata. Sistematización de las variables intervinientes. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 10, pp. 37-44, CD, ISBN 0329-5184
- Star, S., L. & Griesemer, J. R. (1989). Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39. Social Studies of Science, 19, 387-420.
- Varsavsky, O. (1971). Proyectos nacionales. Planteo y estudios de viabilidad. Ed. Periferia, Buenos Aires.
- Varsavsky, O. (1974). Estilos tecnológicos Ed. Periferia, Buenos Aires.
- Wolfe, M. (1976). Estilos de desarrollo: ¿de quién y hacia qué?, Revista de la CEPAL, 1° semestre.

ABSTRACT: The paper presents the conceptual and methodological development of a simulation model of urban dynamics, based on the interaction between Energy, Land Use and Mobility patterns. The authors seek to (i) relate critical information related to the system's sustainability; (ii) identify sustainability gaps as well as the causal processes that *produce them*; (iii) produce scientific communication instruments that - through numerical experimentation - support the design and assessment of public policies and intervention strategies upon those processes' critical nodes and (iv) assess the combined effects of alternative strategic trajectories and scenarios. Experiments' results are expressed as variations of Sustainability and Quality of Life indicators. Both the model and its experiments run in a research/policy planning interface.

Keywords: Simulation models. Urban Dynamics. Numerical experimentation. Sustainability. Quality of Urban Life. Land use, Mobility, Energy.