

LA EVOLUCION URBANA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE UN MODELO ESPACIO TEMPORAL: CASO GRAN MENDOZA

José L Puliafito

Universidad de Mendoza
Aristides Villanueva 773 , 5500 Mendoza, Argentina
email: jose.luis.puliafito@um.edu.ar

Palabras Clave: ecosistemas urbanos, evolución, modelo espacio-temporal, ecuaciones de transporte.

Resumen: *Se presentan aquí los principales elementos de un modelo matemático-informático de evolución urbana aplicado al Gran Mendoza como caso de estudio y sobre datos censales demográficos y catastrales entre los años 1990-91 y 2001. Mediante dicho modelo se busca evaluar el crecimiento urbano y su acomodamiento espacio-temporal utilizando para ello técnicas de representación GIS (Sistemas de Información Geográfica) en modo raster, en una grilla de 64x 86 elementos de 350x 350 m². Las regiones urbanas, en tanto tomadas como ecosistemas humanos de alta densidad, tienden a presentar ciertas relaciones estadísticas viriales y una ocupación territorial altamente estructurada, lo que en cierta extensión las asemeja a una red elastoplástica, es decir a una especie de sustrato virtual pseudo-cristálico. De esta forma y basándose en una analogía con el estado sólido de la materia y su modelo de bandas asociado, es posible tratar la evolución espacio-temporal urbana en situación cuasi estacionaria mediante sendas ecuaciones de transporte de dos agentes virtuales: el habitante (representativo de un individuo medio en interacción) y el recursión (representativo de sus recursos multidimensionales). El modelo desarrollado permite explicar los fenómenos de crecimiento variado a nivel de los Departamentos del Gran Mendoza así como la evolución y desarrollo de núcleos comerciales y residenciales, con el consecuente interés en estudios socio-económicos y urbanos de diversa naturaleza, y de impacto ambiental.*

1 INTRODUCCION

Los estudios de evolución y sustentabilidad de ecosistemas dependen en buena medida de la capacidad de modelar y simular fenómenos poblacionales variados en interacción entre sí y con el medio ambiente (Dinámica Poblacional). Este contexto es característico de las *ciencias de la complejidad*, en donde normalmente hay que integrar información fragmentada, de fuentes muy diversas y también de jerarquías diferentes. Aunque parece ser más una cuestión de una estructura de modelación que de una única opción integral -en la que conviven modelos estadísticos básicamente estáticos (taxonómicos o temáticos) con modelos dinámicos (crecimiento, competencia, decisión, etc.)-, cabe destacar aquí el rol central que adquieren los *modelos espacio- temporales*, ya que tienden a vincular el estrato de las descripciones temático espaciales con el estrato de los modelos dinámicos basados en la teoría de sistemas.

Durante la década del 90 los modelos temáticos espaciales se han desarrollado mucho aprovechando los Sistemas de Información Geográfica (SIG), pero recién durante la última mitad de la misma puede verificarse una actividad creciente en el sentido de incorporarles o acoplarles modelos espacio- temporales. En las disciplinas geofísicas vinculadas con la descripción del estado del medio ambiente, donde es común la aplicación de ecuaciones de continuidad del espacio y del tiempo, los modelos temáticos espaciales progresan hacia una *cartografía dinámica multivariable* en donde cada plano de información es tratado como información de densidad (SIG-*raster*), constituyendo así un espacio virtual caracterizado por vectores y tensores dependientes del tiempo⁷. En la Ecología el camino que se viene recorriendo es en cierta forma inverso, incorporando al análisis dinámico temporal tradicional más explícitamente el espacio (Ecología Espacial), como en el caso de los modelos de *metapoblación* (por ej. *patch sized environment* y *patch occupancy*) y en los modelos de *transición o "rule-based"*. El interés de todos ellos surge de la vinculación que existe entre la estructura espacial del medio ambiente (nicho) y de la población ocupante con las características de las especies, su desarrollo y supervivencia, e incluso su diversidad^{10,12}. Todo esto viene impulsando cada vez más aplicaciones de tipo *SIG dinámicas*.

En el campo de la modelación de la evolución urbana se sintetizan ambas tendencias; además de los modelos temáticos espaciales sobre SIG y los modelos dinámicos estructurales y no estructurales tradicionales (por ej. socioeconómicos y de crecimiento demográfico), la necesidad de integrar los aspectos espaciales con los aspectos dinámicos temporales, como por ejemplo en estudios prospectivos de transporte y servicios públicos, impulsa fuertemente la investigación de modelos espacio temporales³.

La mayoría de los intentos de modelación de la evolución espacio-temporal de los sistemas urbanos se reparten entre aproximaciones "*top-down*" basadas en ecuaciones de continuidad en derivadas parciales- no sólo lineales sino también con difusión de orden fraccional para explicar fenómenos con dependencias de largo alcance LRD¹, y aproximaciones "*bottom-up*", basadas principalmente en modelos de transición como el Automata Celular (CA)⁹. Mientras los primeros ponen énfasis en una *visión extensiva* del ecosistema (esto es en su consistencia y comportamiento como un todo), los segundos ponen más énfasis en una *visión detallada*, tratando de describir la auto-organización e innovación propias de la complejidad. De todas formas, en la misma medida que los modelos espacio temporales discretos (grillados) se han

vuelto más populares por el uso creciente de los SIG raster dinámicos, se ha abierto un mayor campo de aplicación para distintos tipos de modelos basados en CA¹², y más en general en aproximaciones continuo-discretas del tipo “*seamless*” (sin costura).

Por ejemplo, en los CA basados en un agente móvil, el número de agentes (la población) crece a partir de “semillas” implantadas, reproduciéndose y distribuyéndose en las celdas de fondo, de acuerdo a ciertas reglas de transición e información sobre su capacidad de desarrollo contenida en distintas capas². No muy alejados a éstos, algunos modelos seamless encaran el problema de modelación en términos de una dualidad partícula-campo, como en el método “*path-sampling*” utilizado mayormente en física para resolver ecuaciones de continuidad⁸; la complejidad multidimensional puede ser tratada aquí mediante partículas y campos en diferentes escalas, las que a su vez están asociadas a ecuaciones de transporte que pueden estar acopladas entre sí. También en forma paralela, otros modelos utilizan ecuaciones de convolución espacio-temporal con kernels limitados en el espacio (por ej. gaussianos) o incluso con kernels variables en el espacio (heterogéneos)¹⁴, todo lo cual conduce a describir los procesos espacio-temporales complejos como la propagación de paquetes de ondas, dispersivos o no dispersivos.

Como puede verse, los modelos seamless así como los modelos CA basados en agentes móviles, usan partículas -o mas bien pseudo partículas- para compaginar, en cierto modo, el comportamiento de tipo continuo propio de la visión extensiva con el comportamiento discreto y evolucionario propio de la visión de detalle; éstas pueden considerarse como descripciones a medio camino entre la cinética física clásica y la dinámica de sistemas inestables. Entre los aspectos que deben ser considerados aquí, figuran principalmente la reducción de la cantidad de información requerida, el entramado o empotramiento adecuado de los modelos contribuyentes o capas de información, y cómo establecer las escalas de las partículas o agentes representativos de los procesos incluidos.

En esta línea de pensamiento, un ecosistema no es la mera asociación de interacciones en un todo o una colección de elementos independientes fuertemente interactivos, sino una suma más o menos coherente de unidades elementales conformadas por los individuos vivientes y su espacio-ambiente próximo, tomado éste último como una representación multidimensional de los recursos necesarios para su subsistencia, incluido el espacio físico en sí mismo. En este contexto, las regiones urbanas, en tanto tomadas como ecosistemas humanos de alta densidad, tienden a presentar ciertas relaciones estadísticas viriales y una ocupación territorial altamente estructurada, lo que en cierta extensión las asemeja a una red elastoplástica¹¹.

De esta forma su comportamiento dinámico en condiciones estacionarias o cuasi estacionarias puede ser comparado con el estado sólido es decir a transiciones de estados en una especie de sustrato virtual pseudo-cristalino; así un *modelo equivalente básico* puede definirse en términos de un sustrato virtual con dos bandas de energía (una banda poblacional y una banda de recursos), en las que sus pseudo partículas asociadas, el *habitante* y el *recursón*, representan respectivamente, en principio de manera antisimétrica, la población interactuante y su estructura espacio-ambiente; el *habitante* y el *recursón* son agentes virtuales en alguna extensión similares a *integrone*s de Jacobs⁶. Aquí el habitante puede ser ciertamente considerado como un individuo medio, en términos de edad, sexo y otras características morfológicas, en un contexto paramétrico dado. En cambio el recursón es más

como una canasta de recursos, en la que el tipo y peso relativo de cada uno de ellos depende de las necesidades de la población y tendencias culturales presentes. En períodos cortos de modelación podemos esperar que sus cambios absolutos o sus “desplazamientos espectrales relativos” sean despreciables o al menos limitados. En tales condiciones la canasta puede ser reemplazada por un escalar o incluso por un único recurso contribuyente, como por ejemplo por los inmuebles o por los valores económicos de éstos, algo que puede ser apropiado y conveniente en muchas ciudades.

Aunque esta analogía con el estado sólido de la materia, está obviamente limitada a describir *aproximadamente* ciertos procesos de la dinámica poblacional urbana, permite plantear un modelo espacio-temporal del tipo Automata Celular mediante ecuaciones de transporte acopladas de ambos agentes móviles. En condiciones estacionarias o cuasi estacionarias esto puede contribuir a una drástica reducción de esfuerzos computacionales y de la necesidad de información de base, tanto a los efectos del planteo del modelo en sí mismo como de su ajuste posterior.

2 CARACTERIZACIÓN DEL GRAN MENDOZA

En nuestro caso de estudio (Mendoza, Argentina), la caracterización se asienta primeramente sobre un proceso de homogeneización espacial y acondicionamiento de datos censales fuente demográficos y de recursos inmobiliarios (1990/92), que resulta en información grillada de densidad sobre una cuadrícula de elementos superficiales de 350x350 m², utilizando un SIG (ARC WIEW), y que es adecuadamente representativa de la situación real del área metropolitana a la fecha de los relevamientos censales (fig.1- arriba).

Un análisis estadístico de las variables mencionadas, revela la existencia de dos subsistemas, uno denso y más bien central y otro diluido y más bien periférico. El primero contribuye a la caracterización principal del aglomerado urbano, en tanto que el segundo a la interfase de expansión. El subsistema denso puede ser representado apropiadamente por estadísticas del tipo de Fermi Dirac (FD) y sus respectivas densidades espectrales (ec. 1 y 2):

$$\begin{cases} F(N_p) = 1 / (1 - e^{-(N_p - N_F)/N_T}) \\ \Delta N_p = A_p N_p^{1/2} F(N_p) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F(R_p) = 1 / (1 - e^{-(R_p - R_F)/R_T}) \\ \Delta R_p = B_r R_p^{1/2} F(R_p) \end{cases} \quad (2)$$

donde el primer par de ecuaciones representa al habitante y el segundo par al recursón. Los ajustes se logran con correlaciones de 0.98999 y 0.978 repectivamente (fig.1-abajo), con los parámetros resultantes mostrados en tabla 1.

Habitón (N _p)	N _F : Dens. de pob. de Fermi [hab/pixel]	1140
	N _T : Dens. de pob. térmica [hab/pixel]	165
	A _p : Dens. de estados de pob. [hab/pixel]	3198
Recursón (R _p)	R _F : Dens. de rec. de Fermi [millon\$/pixel]	8.5
	R _T : Dens. de rec. térmica [millon\$/pixel]	2.3
	B _r : Dens. de estados de rec. [millon\$/pixel]	424.6

Tabla 1: Parámetros de Fermi-Dirac correspondientes al Gran Mendoza 1990/2

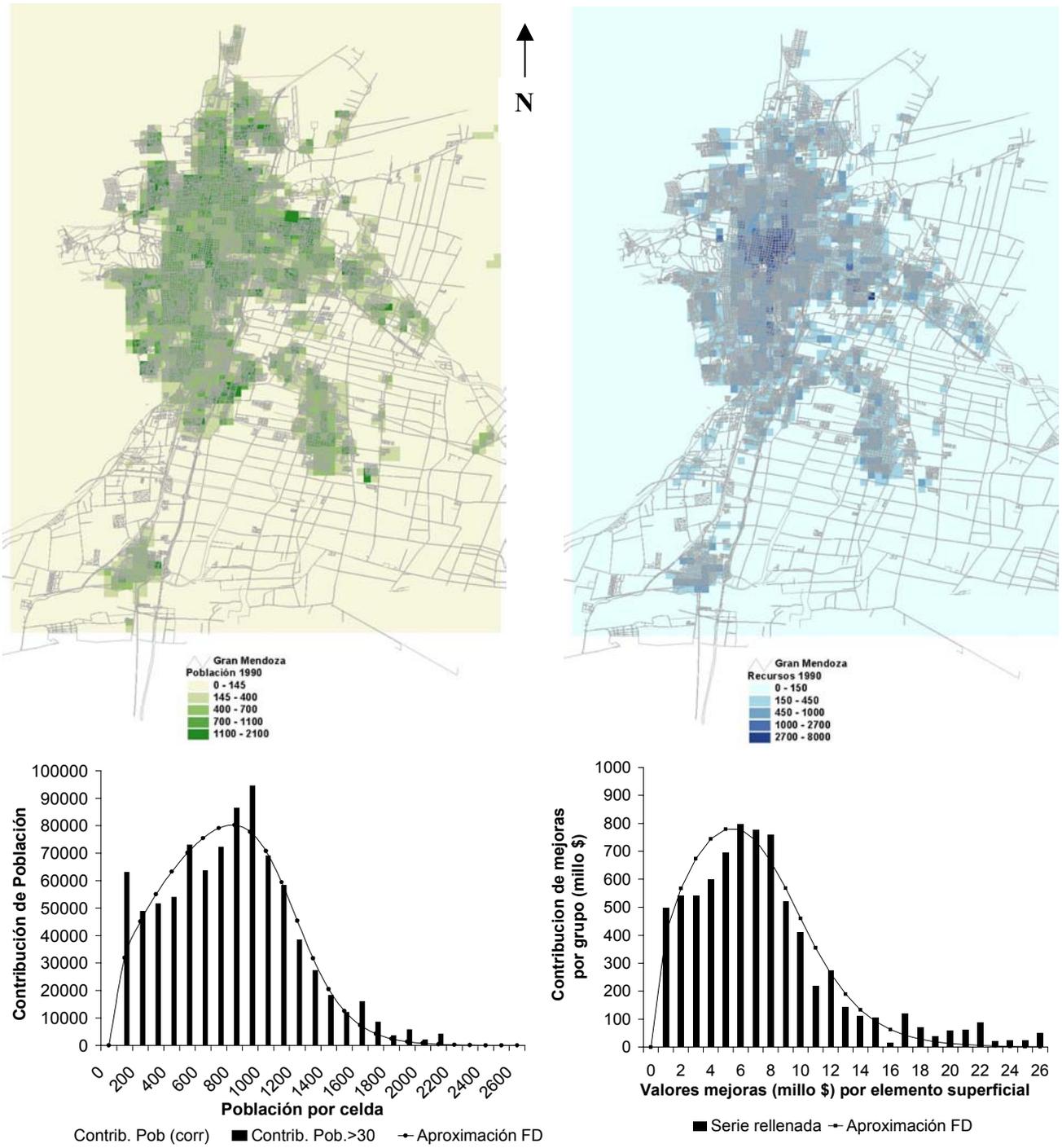


Fig 1- Caracterización del Gran Mendoza- Arriba: Imágenes raster GIS de la distribución de población (izq.) y de valores inmobiliarios (der.)- Abajo: Densidades espectrales de contribución por celda y sus correspondientes aproximaciones por densidades de distribución de Fermi-Dirac

Las aproximaciones FD ofrecen la oportunidad de construir un *modelo equivalente cristalográfico* (un sustrato virtual) cuyas propiedades⁵ posibilitan un escalamiento entre las densidades de población y de recursos y los estados del sistema, desde donde es posible una caracterización de las pseudo partículas y su estructura de bandas en condiciones estacionarias:

$$\delta N_p / \Delta \epsilon = 2/3 N_p / \epsilon \tag{3}$$

$$g_V(\epsilon) = (1/2\pi^2) (2m_p)^{3/2} / \check{a}_p^3 \epsilon^{1/2} \tag{4}$$

La ec. (3) representa un espacio de estado energético asociado (ϵ) con incertidumbre $\Delta\epsilon$, y la ec. (4) la densidad volumétrica de estados $g_V(\epsilon)$ en dicho espacio (vinculada directamente a A_p en la ec.1); aquí m_p representa una *masa eficaz* de la pseudo partícula habitante en tanto que $\check{a}_p = a_p / (2\pi)$, una constante de acción equivalente *propia* de la escala del proceso urbano.

Ajustando la incertidumbre energética $\Delta\epsilon$ a la mitad del exceso de energía biocinética diaria por encima del metabolismo de reposo (≈ 350 Cal. para un individuo de 75 kg) y la masa eficaz a la proporción biocinética de la masa media de un habitante ($\Delta\epsilon_{m\acute{a}x} / \epsilon_{b m\acute{a}x} m_{mhab}$ con $\epsilon_{b m\acute{a}x} \approx 3000$ Cal.) se obtiene una masa eficaz m_p de 12,83 kg y una acción $a_p = 153,9$ [J.seg]. El escalamiento se completa asumiendo que en condiciones estacionarias se cumple $k \cdot N_T = R_T$ (con $k = 13939,39$ [\$/hab] representativo de un recursón) (ec. 1 y 2), y que el recursón es un anti-fermión (eq. 5):

$$\begin{aligned} N_F / N_T &= (E_F - E_{BP}) / E_T \\ R_F / R_T &= (E_{BR} - E_F) / E_T \end{aligned} \tag{5}$$

Esto permite ajustar el modelo de bandas obteniéndose una representación análoga a un semi-metal (fig. 2 izq.), con el cero en el piso de la banda poblacional, el techo de la banda de recursos queda en 32 J y el nivel de Fermi en 20,05 J.

Este modelo equivalente también puede satisfacer ciertos intercambios de carácter discreto de la población urbana, como es el caso del agua potable. En este caso la densidad de

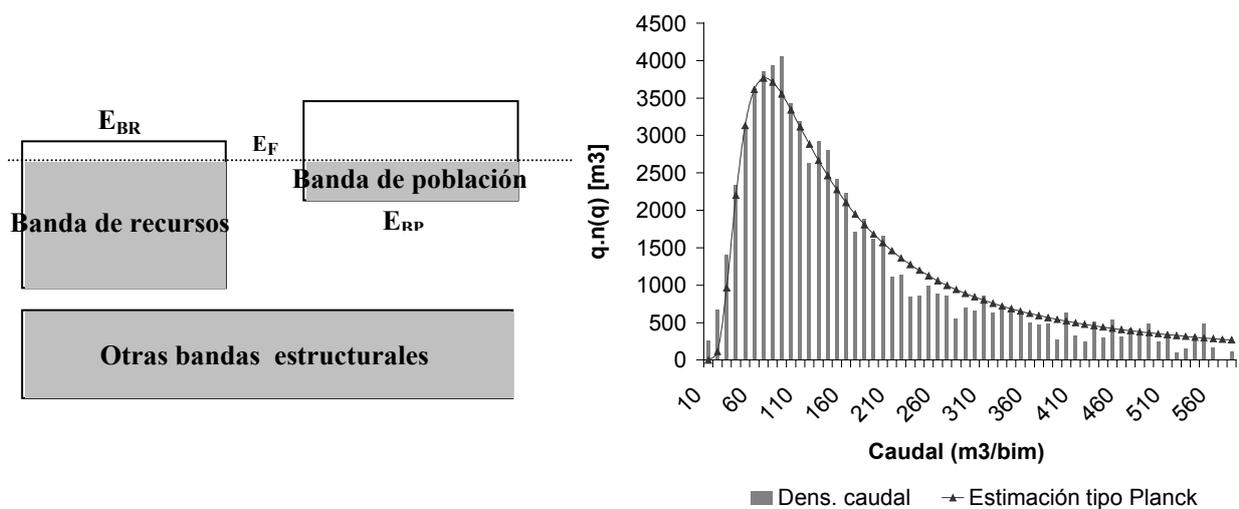


Fig. 2 Der: Estructura de bandas resultante similar a un semi-metal. Izq.: Densidad de consumo bimestral de agua potable y su aproximación.

consumo bimestral (relevada a partir de una muestra de 7500 medidores clase B EEC entre 1995-1997) muestra un comportamiento estadístico que puede ser comparado en alguna medida con el intercambio de fonones en el estado sólido:

$$q.n(q) = 4.16 \cdot 10^{-1} \frac{q_0^3 N}{q^3 \cdot (e^{q_0/q} - 1)} \quad (6)$$

la que puede ser ajustada con un coeficiente de correlación de 0,9867, con q_0 un caudal “térmico” de aproximadamente 200 [m3/bim] (fig. 2-derecha). Esta distribución puede ser derivada asumiendo que el consumo de agua potable en una conexión domiciliaria es principalmente discreto (por pulsos) y que puede ser descrito por un agente de intercambio apropiado. Suponiendo que gran parte del intercambio térmico de los habitantes debido al exceso de energía biocinética se intercambia así, el consumo térmico q_0 de agua potable se puede estimar con un margen de error del orden del 6%.

3 MODELO DE CIRCULACIÓN Y CRECIMIENTO

Al representar el sustrato virtual urbano con una estructura de bandas análoga a un semi-metal es posible prever procesos de conducción parecidos, tanto del tipo conducción libre como por movimiento de vacancias. El primero puede asociarse principalmente a la dinámica rápida de carácter cotidiano, en tanto que el segundo al transporte de mediano plazo que surge de la expansión. Resulta natural asumir que la dinámica poblacional adopta entonces un modelo transporte (circulación y crecimiento) similar:

$$\frac{\partial}{\partial t} p(x,y,t) = g_p(x,y,t,T) + 1/q_p \nabla \cdot \mathbf{J}_p(x,y,t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} r(x,y,t) = g_r(x,y,t,T) - 1/q_p \nabla \cdot \mathbf{J}_r(x,y,t)$$

en las que $[p(x,y,t); r(x,y,t)]$ representan las concentraciones superficiales de habitantes y recursos, $[g_p(x,y,t,T); g_r(x,y,t,T)]$ sus velocidades de crecimiento y $[\mathbf{J}_p(x,y,t); \mathbf{J}_r(x,y,t)]$ las densidades de corriente correspondientes, para lo cual se debe definir una *carga poblacional* equivalente q_p a la que nos referiremos más adelante. La parte de crecimiento del modelo de transporte especificado en el par de ecuaciones (7) sigue a su vez la forma:

$$\delta p = \eta_{0p} p_0 - \gamma p \cdot r / p_0 \quad (8)$$

$$\delta r = \eta_{0r} r_0 - \beta \gamma p \cdot r / r_0$$

donde $\delta p = g_p \Delta t$ y $\delta r = g_r \Delta t$ representan las variaciones de concentraciones en el intervalo Δt considerado, η_{0p} y η_{0r} las tasas libres de crecimiento, γ un factor de control mutuo de poblaciones y $\beta = r_0 / p_0$ un factor de calidad, con r_0 y p_0 las respectivas concentraciones estacionarias locales, a la temperatura estadística T_0 . Así el crecimiento para cada seudo partícula adopta la forma de un balance entre generación (producción) y recombinación (pérdida), tal como podría ocurrir en el caso de materiales sólidos dopados en situación de excitación extrínseca, forma que puede vincularse además a un *modelo presa-predador*⁴

típico de la dinámica poblacional en ecología. Ello requiere la definición de las tasas de crecimiento de población y recursos y de una tasa de recombinación que aquí puede interpretarse como una limitación cruzada de las tasas libres de crecimiento.

En cuanto a la parte circulatoria del modelo de transporte, ésta sigue la forma:

$$\begin{aligned} (1/q_p) \mathbf{J}_p(x,y,z,t) &= -\mu_p \cdot p \nabla V + D_p \cdot \nabla p \\ (1/q_r) \mathbf{J}_r(x,y,z,t) &= -\mu_r \cdot r \nabla V - D_r \cdot \nabla r \end{aligned} \quad (9)$$

Las corrientes adoptan en cada caso la forma de un balance dinámico entre una *corriente de corrimiento*, movilizada por el gradiente de un *potencial urbano*, y una *corriente de difusión*, movilizada por el gradiente de concentración correspondiente. Las corrientes exigen definir un potencial urbano apropiado (en la que interviene la carga poblacional mencionada), y un *tensor espacial de movilidad y corrimiento* $[\mu_p, D_p; \mu_r, D_r]$.

El modelo de transporte y crecimiento planteado es apropiado para la simulación de la evolución urbana en situaciones cuasi estacionarias, ya que es naturalmente realizable mediante un autómata celular bidimensional de agentes móviles, caracterizado con un conjunto parámetros que es función del espacio y de una “temperatura” estadística del sistema. Aquí, sin embargo, la ventaja adicional radica en que la analogía permite una aproximación que reduce las necesidades de parametrización del modelo al mínimo indispensable.

3.1 El potencial urbano y la carga poblacional equivalente

El potencial ha sido definido mediante una aproximación “bottom-up” análoga a la de Thomas-Fermi utilizada en la física del estado sólido, aprovechando el escalamiento realizado en el modelo de bandas; desde allí es posible definir también el valor de la carga poblacional. Para situaciones evolutivas urbanas que están principalmente gobernadas por *núcleos espaciales* de concentración de actividad, el modelo de Thomas -Fermi permite describir las inhomogeneidades en la distribución de población y recursos mediante una variación suave del nivel de Fermi, dentro de una única estructura de bandas (empobrecidas o enriquecidas por recursos y/o población). En cambio en situaciones evolutivas gobernadas por *fragmentación*, la descripción debe ser realizada por zonas, cuyas interfases pueden presentar transiciones muy abruptas y hasta estructuras de bandas distintas, implicando todo esto comportamientos locales no lineales. Asumiendo una monoestructura de bandas, un modelo de Thomas-Fermi adaptado al caso que nos ocupa puede explicitarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} q_p V(x,y) &\cong \varepsilon_{F0} - (\check{\alpha}_p^2 / 2m_p) \operatorname{sgz} \cdot (3\pi^2 |z(x,y)|)^{2/3} \\ z(x,y) &= p(x,y) - r(x,y)m_p/m_r \end{aligned} \quad (10)$$

El término energético dado por $\varepsilon_{F0} = (\check{\alpha}_p^2 / 2m_p)(3\pi^2 p_{0m})^{2/3}$ es el nivel de Fermi para temperatura estadística cero, donde $p_{0m} = 0,02675$ [hab/m²] representa la concentración media de habitantes en su estado de reposo; $z(x,y)$ por otra parte es la concentración “neta” asociada a la carga poblacional distribuida ($r(x,y)$ viene dado en [rec.]) con su signo (sgz).

Evidentemente el concepto de polaridad virtual viene asociado directamente al carácter antagónico partícula-antipartícula dado al par habitón-recursón, y que entre otras cosas se manifiesta en las distribuciones FD vistas, y en el crecimiento y dinámica complementaria que surge de un modelo tipo presa-predador. Así, el modelo de Thomas-Fermi se debe cumplir sin perjuicio de la ecuación de Poisson $\nabla^2 V(x,y) = -2\pi k_p (r'-p)$ (aquí r' se da en unidades homogéneas con p) en donde k_p puede ser definido como $k_p = q_p / \kappa_p$ por analogía con el campo eléctrico. Asumiendo un sistema de unidades en donde $\kappa_p = 1$, el potencial urbano vendrá dado en unidades $[(J/m)^{1/2}]$ y la carga poblacional equivalente en $[(J.m)^{1/2}]$.

Desde el punto de vista de la contribución individual de un habitante, el potencial urbano representa una medida de su energía de reserva, resultado de la capacidad del individuo de coleccionar recursos del ambiente, y por lo tanto puede ser expresada como una convolución entre una ventana $S_c'(r)2\Delta r$ de "captura" y la densidad espacial $\rho(r)$ de recursos:

$$U_p(r) = - (1/4\pi\zeta) \int_0^r S_c'(r-r') \rho(r') 2\Delta r dr' \quad (11)$$

donde ζ es una constante del proceso. Esta definición de energía potencial resulta apropiada ya que tomando una ventana gaussiana y una distribución de recursos localizada (por ej. tipo disco) se obtiene una función espacial en forma de pozo que reconoce las regiones dadas por los tres grados de homogeneidad clásicos ($K_h=2$ parabólica para $r \leq 1,5 r_0$, $K_h=1$ lineal para $1,5 r_0 < r < 2r_0$ y $K_h=-1$ coulombiana para $r \geq 2 r_0$, con r_0 un radio característico).

Ello permite ajustar un pseudo potencial individual "apantallado" $V_p(r) = U_p(r)/q_p$ al radio característico r_{p0} de la pseudo partícula habitante (1,37 m), tal como se hace en las redes cristalográficas en el estado sólido (el apantallamiento se refiere al efecto de reducción del alcance del potencial libre coulombiano debido a la presencia de "cargas" vecinas), es decir del tipo $V_{ap}(u) = (1/u) e^{-ks_n u}$, en la que ks_n es un radio normalizado de apantallamiento. Así:

$$ks^2 = 6\pi q_p^2 p_{0m} / \epsilon_{Fm} \rightarrow q_p = [\epsilon_{Fm} ks^2 / (p_{0m} 6\pi)]^{1/2} \quad (12)$$

con la que es posible determinar un valor $q_p = 5.832 [(J.m)^{1/2}]$ para la carga poblacional equivalente.

La fig. 3 muestra el potencial urbano (por equipotenciales) obtenido a partir de la previa representación GIS del par de ecuaciones (10) y que puede verse como un gran pozo de potencial de profundidad variable. Las zonas de potencial más profundas (más claras) son las dominadas por concentración de habitantes, es decir las áreas residenciales densas, en tanto

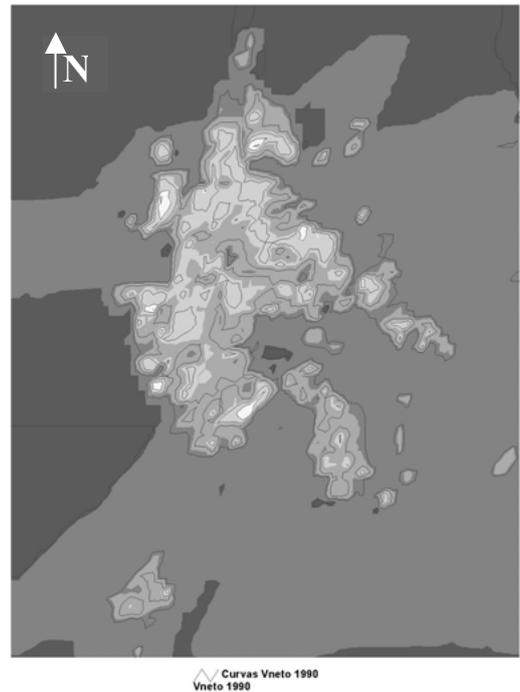


Fig.3. Representación GIS del potencial urbano en el Gran Mendoza (por zonas equipotenciales).

que las zonas de potencial menos profundas (más oscuras) son las dominadas más por concentraciones de recursos correspondientes ya sea a núcleos comerciales, industriales o también a áreas residenciales menos densas y de mayor calidad de infraestructura. En el centro de la ciudad, por ejemplo, se destaca el núcleo comercial más importante en donde tiene lugar una buena parte de la inyección de recursos metropolitana.

3.2 Parámetros de crecimiento

A partir del par de ecuaciones (8) y dado que $p = p_0 + \delta p$ y $r = r_0 + \delta r$, para situaciones de crecimiento normal en las que $\delta p/p_0 \ll 1$ y $\delta r/r_0 \ll 1$, se tiene (despreciando las potencias cuadráticas) las variaciones relativas de concentración siguientes:

$$\begin{aligned} \delta p/p_0 &\cong [\eta_{0p} - \beta\gamma(1+\eta_{0r})] / [1+\gamma(1-\eta_{0p})+\beta\gamma(1+\eta_{0r})] \\ \delta r/r_0 &= \eta_{0r} - (1/\beta)(\eta_{0p} - \delta p/p_0) \end{aligned} \tag{13}$$

en la que el factor de calidad urbana $\beta = r_0/p_0$ es función del espacio $\beta(x,y)$, es decir un parámetro variante píxel a píxel. Utilizando esta última propiedad es posible ajustar el modelo de crecimiento de la [ec. 13] a nuestro caso de estudio, computando el factor de calidad urbana medio por departamento β_{md} y asociándolo a su tasa de crecimiento poblacional anual prevista al inicio de la década del 90 (tabla 2 y fig. 4).

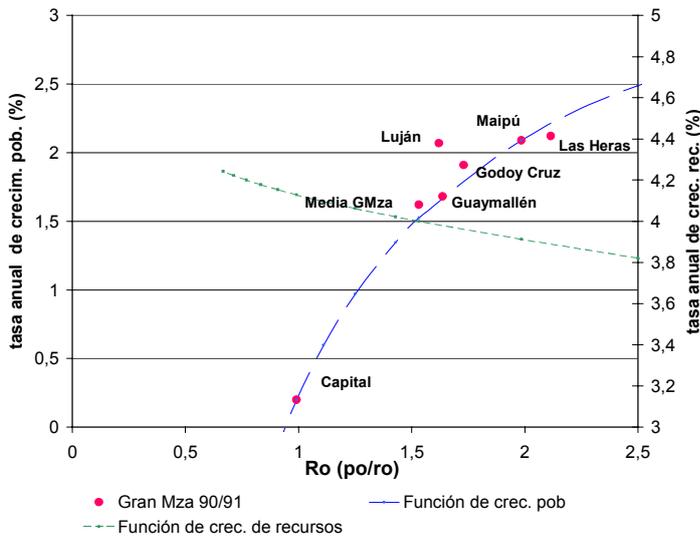


Fig. 4- Tasas demográficas del Gran Mendoza (90/91) como función de la inversa del factor de calidad β , y su ajuste al modelo teórico de crecimiento .

La fig. 4 muestra la muy buena correspondencia entre el modelo teórico y los valores puntuales de los distintos departamentos, incluyendo el valor medio del Gran Mendoza (con 1,67 %). Sólo Luján de Cuyo aparece algo separado del resto, lo que puede ser justificado por su todavía incipiente integración al área metropolitana a la fecha censal (ver mancha aislada al sur en la fig. 3). La fig 4 muestra también el modelo teórico de crecimiento de recursos;

Departamento	Tasa anual
Capital	0,20 %
Godoy Cruz	1,91 %
Guaymallén	1,69 %
Las Heras	2,12 %
Luján	2,07 %
Maipú	2,09 %

Tabla 2- Tasas departamentales de crecimiento demográfico anuales del Gran Mendoza al comienzo de los 90.

Parámetro	Valor
Tasa libre de crecimiento demográfico η_{0p}	4,2 %
Tasa libre de crecimiento de recursos η_{0r}	8,1 %
Factor de control mutuo γ	3,66 %

Tabla 3- Parámetros de crecimiento para el Gran Mendoza 90/91

aunque su discriminación por departamento no estaba disponible, es claro que ésta depende de la composición socioeconómica de los mismos, pudiendo ajustarse por lo menos a la media metropolitana esperada (alrededor de 4 %). La tabla 3 muestra los parámetros de crecimiento resultantes cuyos valores resultan coherentes con las tasas libres netas esperadas (la tasa demográfica libre es representativa del índice neto de reproducción en tanto que la tasa económica libre es representativa del interés aplicado a préstamos hipotecarios en U\$S).

3.3 Parámetros de movilidad y difusión

El ajuste de los parámetros de difusión y crecimiento surge de una hipótesis de cuasi equilibrio de partida $J_p(t=0) \cong 0$ y $J_r(t=0) \cong 0$ (excitación local débil), tal como se hace en la ecuación de Einstein. Sin embargo, a diferencia de los medios homogéneos (como los semiconductores monocristalinos dopados débilmente) aquí no se cumple la relación de Einstein $k_p T/q_p = D_p/\mu_p = D_r/\mu_r$, aunque es posible esperar una relación que desempeñe un papel sustituto por la cual los parámetros de difusión queden en función de los de movilidad a una dada temperatura estadística. En efecto, partiendo de dicha condición de cuasi equilibrio se puede escribir:

$$\left| dr/dp \right|_0 \cong r_0/p_0 = \beta(x,y) \quad (14)$$

La ec. (14) sería estrictamente válida en condiciones genuinamente estacionarias; en tanto que en condiciones cuasi estacionarias puede considerarse como un límite o más bien tendencia, por la cual producido un desequilibrio local débil de concentraciones (por crecimiento), éstas se acomodan buscando conservar el factor de calidad anterior. Ya que esto está directamente vinculado a la aplicabilidad del modelo de Thomas –Fermi para el potencial, combinando la ec. (10) con la ec. (14) se obtiene:

$$D_p/\mu_p = D_r/\mu_r = D/\mu \cong 2/3 \varepsilon_F(x,y)/q_p \quad (15)$$

que para los casos no homogéneos sustituye a la relación de Einstein. Independientemente, esta relación puede calcularse píxel a píxel mediante:

$$D/\mu \cong (\varepsilon_F/q_p) p_0^{1/3} \frac{d}{dp_0} \left| p_0 - r_0 m_p/m_r \right|^{2/3} \cong \frac{2 \varepsilon_{P0} \left| 1 - (\delta r/\delta p)_0 m_p/m_r \right|}{3 q_p \left| 1 - \beta(x,y) m_p/m_r \right|^{1/3}} \quad [16]$$

en la que $(\delta r/\delta p)_0$ se obtiene del modelo de crecimiento expresado en la ec. (13), y que ha sido graficada para nuestro caso estudio en la fig. 5

La distribución de puntos sobre datos reales comprueba la hipótesis cuasi estacionaria, ya que la mayoría de éstos se encuentran próximos a la curva límite $(p_0/1000)^{2/3}$ tal como surgiría de aplicar directamente la [ec.14]. Se ha graficado también la relación de Einstein $k_p T/q_p \cong 0,51 [(J/m)^{1/2}]$ que representa el valor medio D/μ y que cruza la curva límite en una densidad de 250 [hab/píxel]; ello establece y satisface las dos regiones observadas en las distribuciones FD: subsistemas urbanos diluido ($D < k_p T \mu/q_p$) y denso ($D > k_p T \mu/q_p$).

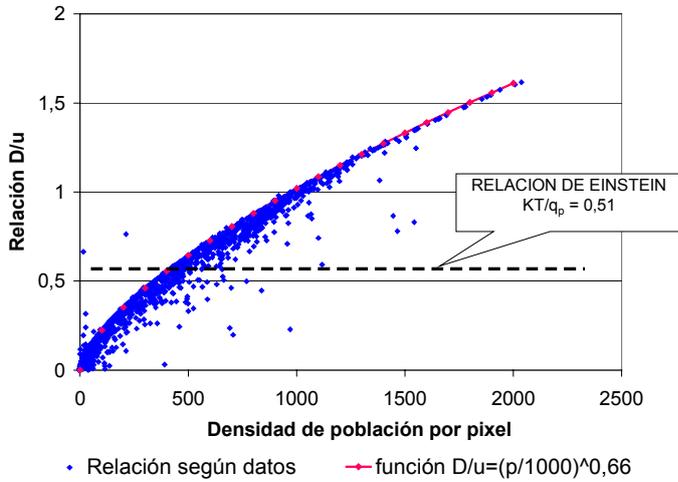


Fig. 5- Relación de los parámetros de difusión a movilidad como función de la población por celda. La curva límite con potencia 2/3 es consistente con procesos difusivos tipo LRD.

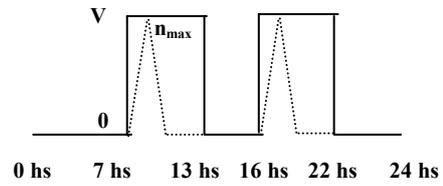


Fig. 6- Aproximación al ciclo diario del potencial urbano instantáneo y de los eventos de transporte en un sentido positivo

Parámetro	habitón	recursón
Tiempo libre medio (τ_p, τ_r) [min]	25	~25
Movilidad efectiva (μ_{p0}, μ_{r0}) [(J.m) ^{1/2} sec/kg]	1,1523 10 ⁻⁰⁴	2,59 10 ⁻⁰⁵
Difusión "térmica" (D_{p0}, D_{r0}) [m ² /seg]	5,91 10 ⁻⁵	1,51 10 ⁻⁵

Tabla 4- Parámetros de circulación medios considerando un potencial urbano pulsante

La relación D/μ permite estimar los parámetros de difusión locales a partir del cálculo independiente de las movilidades correspondientes a cada pseudo partícula, definidas análogamente al estado sólido:

$$\begin{aligned} \mu_p &= q_p \tau_p / m_p \\ \mu_r &= q_r \tau_r / m_r \end{aligned} \tag{17}$$

En el par de ecuaciones (17) los tiempos "libres" medios τ_p y τ_r pueden interpretarse como *tiempos de relocalización*, considerando que el balance dinámico entre las corrientes de corrimiento y difusión en realidad no es instantáneo sino logrado por promedio en un término diario a través de flujos alternados de personas y recursos, principalmente debidos al ciclo de actividad día-noche. Esto implica la "conmutación" de un *potencial urbano instantáneo*, que tiene por valor eficaz el considerado anteriormente. La suma de los pequeños desbalances entre los transportes reales cotidianos en sentidos opuestos, resulta en un transporte neto ya sea hacia la concentración de personas o recursos o hacia la dispersión de éstos. Este criterio relaciona directamente el régimen dinámico urbano cotidiano- más fácilmente cuantificable por otros estudios-, con el régimen medio de transporte de mediano y largo plazo, hacia el cual está más orientado el presente modelo.

En nuestro caso de estudio, asumiendo un ciclo de doble turno como el mostrado en la fig. 6, y considerando una movilización total diaria del orden del 60% de la población, resulta un τ_p del orden de 27 min.; este valor es consistente con el que surge de computar los viajes, distancias y velocidades promedios realizadas por la población mediante transporte público y privado al principio de los 90 (~25 min.). Para simplificar se ha considerado que τ_r es representativo principalmente del movimiento virtual de caudales (dinero) que producen las mismas personas en tránsito y por lo tanto posee un valor similar a τ_p .

El cálculo de las movilidades aún requiere una consideración adicional. Tomando el caso del habitante, puede verse que el régimen dinámico descrito (instantáneo y puntual) posee inherentemente incertidumbres $\Delta l = 2\pi r_{p0}$ (r_{p0} es el radio característico del habitante) y $\Delta t = \tau_p$; sin embargo al pasar al régimen medio espacial de largo plazo hay que considerar en cambio el muestreo espacio-temporal del modelo, que afecta a las corrientes con incertidumbres propias L_p (contorno de un píxel de 350 m de lado) y T_0 (el que puede reducirse a un mínimo de 24 hs). Así la movilidad μ_p según la ec. (17) debe reemplazarse por una *movilidad efectiva* $\mu_{p0} = \mu_p (\Delta l/L_p)(\Delta t/T_0)$, ocurriendo otro tanto para el caso de la movilidad del recursón; ello conduce a los valores expresados en la tabla 4. A partir de estos valores es posible calcular píxel a píxel los parámetros de difusión.

Una idea de la expansión de la ciudad, la ofrece la media “térmica” de los parámetros de difusión de recursos dada por la relación de Einstein $D_{r0} = k_p T \mu_r / q_p$ (tabla 4) y que corresponde a unos 477 m² anuales por habitante; cuando comparamos este valor con la superficie media por habitante (289 m²) resulta una expansión relativa de 1,65. Ya que éste último valor corresponde prácticamente a $1 + \beta_0$, siendo $\beta_0 = 0,65$ el factor de calidad medio de la ciudad como conjunto, resulta que la expansión relativa por habitante en exceso es precisamente β_0 , es decir que el reacomodamiento de la ciudad debido al crecimiento demográfico se realiza preservando en la media el factor de calidad anterior (hipótesis cuasi estacionaria).

4. IMPLEMENTACION DEL MODELO DE TRANSPORTE Y CRECIMIENTO

El esquema general de cálculo que implica el modelo hasta aquí presentado, consiste en un proceso iterativo de n períodos (se han utilizado períodos anuales), en los cuales, a partir de un estado inicial, se computa celda a celda (64×86 elementos de 350×350 m²) el potencial y el crecimiento y transporte de población y recursos, llenando así sucesivamente una base de datos grillada de evolución. Las entradas paramétricas del modelo están dadas por las tasas libres de crecimiento y de control mutuo de población y recursos, así como por sus respectivas movilidades. Aunque el modelo ha sido calibrado para una situación cuasi estacionaria representativa del inicio de la década del 90, los resultados para una simulación de cinco años muestran buena correspondencia con las tendencias de crecimiento y distribución vistas en tal década, esperándose cerrar un ciclo completo de estudio y ajuste cuando se disponga de los datos crudos del censo poblacional 2001, así como las actualizaciones catastrales correspondientes.

4.1 Evaluación de la incertidumbre espacio temporal

La incertidumbre asociada al estado inicial limita la máxima resolución espacial y temporal del modelo y puede incluso causar su inestabilidad. Incluye el efecto combinado de errores de recolección, muestreo y acondicionamiento de los datos censales demográficos y catastrales, los que además no constituyen series estrictamente cotemporales.

Una vía de evaluar el impacto de tales errores es correr el modelo sobre un período anual (un paso de tiempo de simulación) sin incluir crecimiento alguno ni de población ni de recursos. En un contexto en el que la divergencia de población sobre el conjunto completo de

píxeles (5984 elementos) resulta prácticamente nula (-0,0174 hab.) -como cabría esperar de una operación correcta del modelo- el test arroja los resultados mostrados en la fig. 7. En ésta pueden verse la serie de divergencias de población por celda (izq.) y su distribución porcentual de valores sobre los píxeles no nulos (1338 casos) (der.).

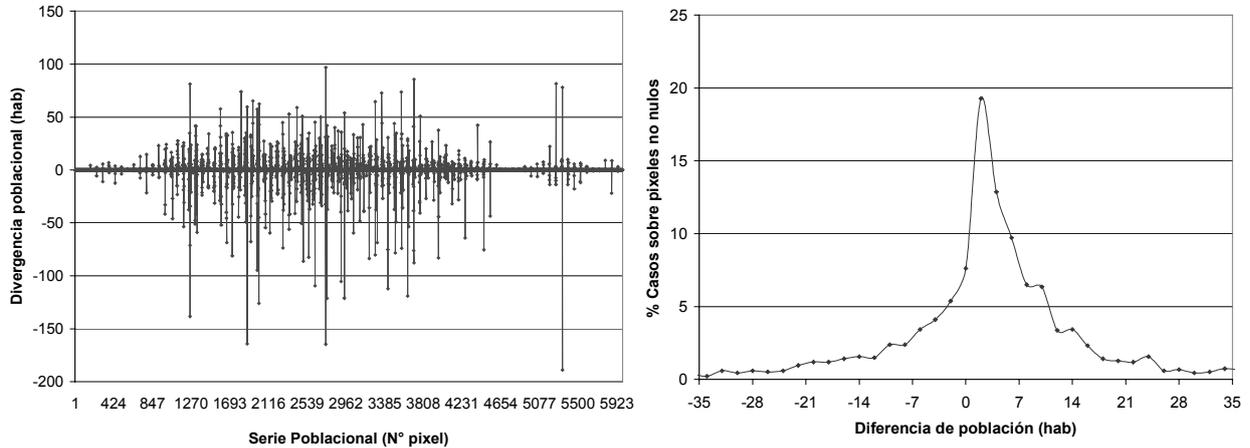


Fig. 7- Divergencia poblacional y su distribución de casos sobre píxeles no nulos

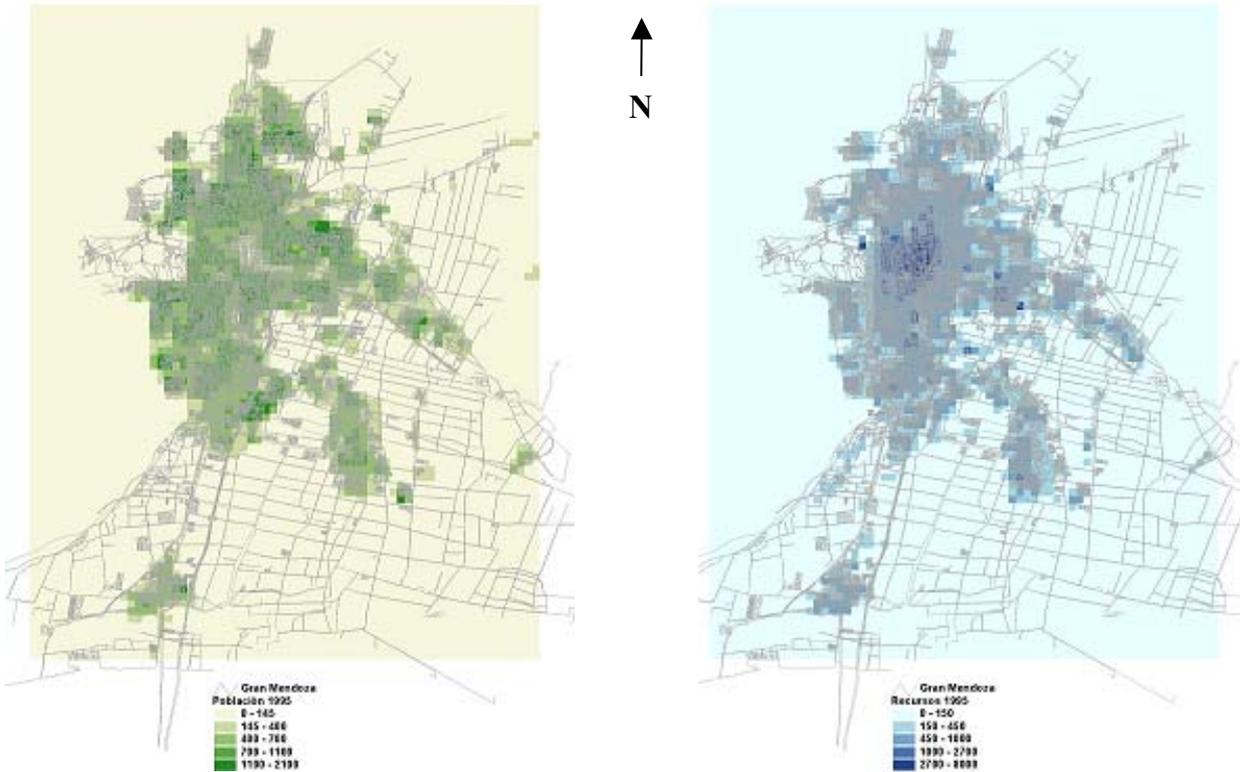
El 80 % de los casos se encuentra comprendido en un intervalo de +/-10 habitantes y el 70% en un intervalo +/- 7 habitantes; considerando que la población media por píxel es de 425 hab/píxel, la divergencia relativa media se sitúa entre 2,34% y 1,64 %. Como el valor inferior es prácticamente el crecimiento anual demográfico esperado para el Gran Mendoza en 1990/91, la incertidumbre temporal resulta en un orden de 1 a 1,4 años.

Asimismo, los valores máximos de divergencia corresponden a -188 hab (población media local 515 hab) y +97 hab (población media local 781 hab) es decir componen un intervalo máximo de -36,5 % a +12,4 %; éstos valores extremos son algo grandes pero pierden importancia al considerar la baja frecuencia de los picos mayores (es el del orden del 1,5 %) y además cuando evaluamos la divergencia en una ventana móvil de 3x3 píxeles, las que se reducen respectivamente a -20 hab (sobre 7033 hab) y a +3 hab (sobre 7033 hab), es decir a un orden de +/-0,43 % o menos. Comparando estos valores máximos de divergencia local con la divergencia media anterior resulta una incertidumbre espacial no mayor a un píxel.

Este test permite verificar simultáneamente la viabilidad de la hipótesis cuasi estacionaria con respecto al orden de la resolución espacio-temporal del modelo, así como la adecuada selección del tamaño del píxel y el paso de tiempo de simulación, en relación a la incertidumbre inherente a los datos. También permite generar un estado virtual en el que los errores se reducen a una fluctuación estacionaria asociada a la resolución del modelo, y que puede considerarse como partida para los ensayos de simulación completos.

4.2 Respuesta operacional del modelo

El ensayo de simulación ha consistido en una corrida de cinco años con paso anual, a partir de los parámetros del modelo y datos correspondientes a 1990/91. La fig.8 muestra un reporte sintético de la evolución de las principales variables de estado, y los mapas resultantes de población y recursos para el año 5 de simulación.



VARIABLES DE ESCENARIO EVOLUTIVO

q	KT(0)	gp0(%)	gr0(%)	gamma(%)	up	Dp(media)	ur	Dr(media)
5,84	2,99	4,2	8,01	3,66	5,25E-05	2,69E-05	1,18E-05	6,04E-06

EVOLUCION GENERAL GRAN MENDOZA

	Población	Recursos	R/P	Ef	Tp	Tr	Tr-p	Tterm
0	814548,4626	531461,971	0,65246206	-22,76121583				0,00%
1	827658,1739	553469,49	0,66871748	-22,78381016	1,61%	4,14%	2,49%	0,10%
2	840585,9862	576519,851	0,6858547	-22,80459992	1,56%	4,16%	2,56%	0,19%
3	853315,0136	600689,489	0,70394811	-22,82515729	1,51%	4,19%	2,64%	0,28%
4	865830,9863	626063,175	0,72307781	-22,84493704	1,47%	4,22%	2,72%	0,37%
5	878129,5143	652743,56	0,74333404	-22,86357252	1,42%	4,26%	2,80%	0,45%
	7,81%	22,82%	13,93%	0,45%				

EVOLUCION POR DEPARTAMENTOS

	población (0)	población (5)	recurso (0)	recurso (5)	Tasa pob	Tasa rec	p/r (0)	p/r
Capital	185082,07	186395,726	186457,473	230830,6732	0,70%	19,22%	0,9926235	0,80749982
Guaymallén	183181,41	199107,245	111886,99	137510,6593	8,00%	18,63%	1,63720027	1,44794045
Godoy Cruz	123606,01	134427,618	71413,0066	86956,1731	8,05%	17,87%	1,73086131	1,5459238
Las Heras	200438,67	223383,2	94735,3032	115244,125	10,27%	17,80%	2,11577589	1,93834784
Luján	47586,06	51751,8633	29362,7158	35991,12907	8,05%	18,42%	1,6206287	1,43790608
Maipú	74654,26	83063,8618	37606,4817	46210,80064	10,12%	18,62%	1,98514343	1,79749887
	814548,48	878129,514	531461,971	652743,5603	7,24%	18,58%	1,53265619	1,3452902

Fig. 8 – Simulación en condiciones cuasi estacionarias, a partir de los datos disponibles de población y catastro del Gran Mendoza. en 1990/91. Arriba: Mapas de población (izq.) y recursos (der.) en el año 5 de evolución. Abajo: Reporte sintético de evolución quinquenal

Se puede observar un incremento general de población del 7,81 % y de un 22,8 % en recursos, con un pequeño incremento de la temperatura estadística del 0,4 % (calculada a partir de la variación del nivel de Fermi medio). La variación de población resulta de una tasa neta anual que decae desde el 1,61 % al 1,42 %, mientras que la variación de recursos resulta de una tasa neta anual que incrementa desde el 4,14 % al 4,26 %.

Considerando la distribución del crecimiento demográfico, se observa un cambio en la participación por departamento en el que Capital decae en contribución (crecimiento total de 0,7 %) contra Las Heras que la incrementa (crecimiento total de 10,27 %). Inversamente, en la distribución del crecimiento de recursos el cambio se produce aumentando la participación de Capital (con un crecimiento del 19,22 %) contra una disminución de la participación de Las Heras (con un crecimiento del 17,88%). El resto de los departamentos se sitúa en una franja central de variaciones relativas más cercanas a los valores medios del Gran Mendoza.

El marco evolutivo se complementa con la fig. 9 en la que se observa la distribución del factor de calidad β del estado inicial y del estado final, así como la densidad espectral de población para el estado final. Ambos gráficos muestran un comportamiento cualitativo al final de la evolución que preserva el original mostrando a su vez las pequeñas variaciones esperables; al respecto cabe indicar que hay un incremento del β medio de 0,65 a 0,74 en tanto que la densidad espectral de población mantiene la densidad de distribución FD con sólo un aumento del 6,9% en el número de estados poblacionales por celda (N_p).

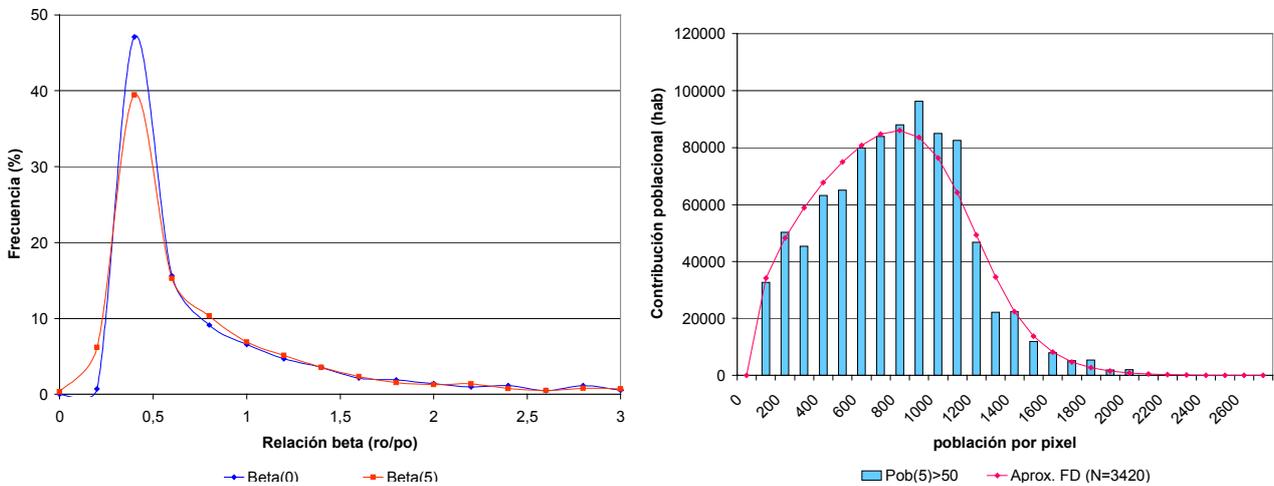


Fig. 9- Estadísticas principales del estado simulado (5) . Arriba: relación de recursos β comparada. Abajo: Nueva contribución poblacional por pixel y su aproximación FD (los valores de N_F y N_T son los mismos que en el estado cero). La población de corte se ha seleccionado en 50 hab/pixel para ambos gráficos.

De este comportamiento general se pueden extraer dos importantes conclusiones parciales: a) el modelo se mantiene estable de acuerdo a la hipótesis cuasi estacionaria asumida, y b) las tasas de crecimiento tanto generales (Gran Mendoza) como departamentales, evolucionan siguiendo la tendencia esperada, como surgiría de los modelos de progresión estadística usuales.

Finalmente, presentamos algunos aspectos espaciales del ensayo de simulación en cuestión. Para ello nos referiremos a la fig 10, que permite realizar una comparación cualitativa entre los estados iniciales y finales de población y recursos, a través de observación de la evolución de áreas de equidensidad; las principales referencias geográficas se especifican en el mapa inicial de población.

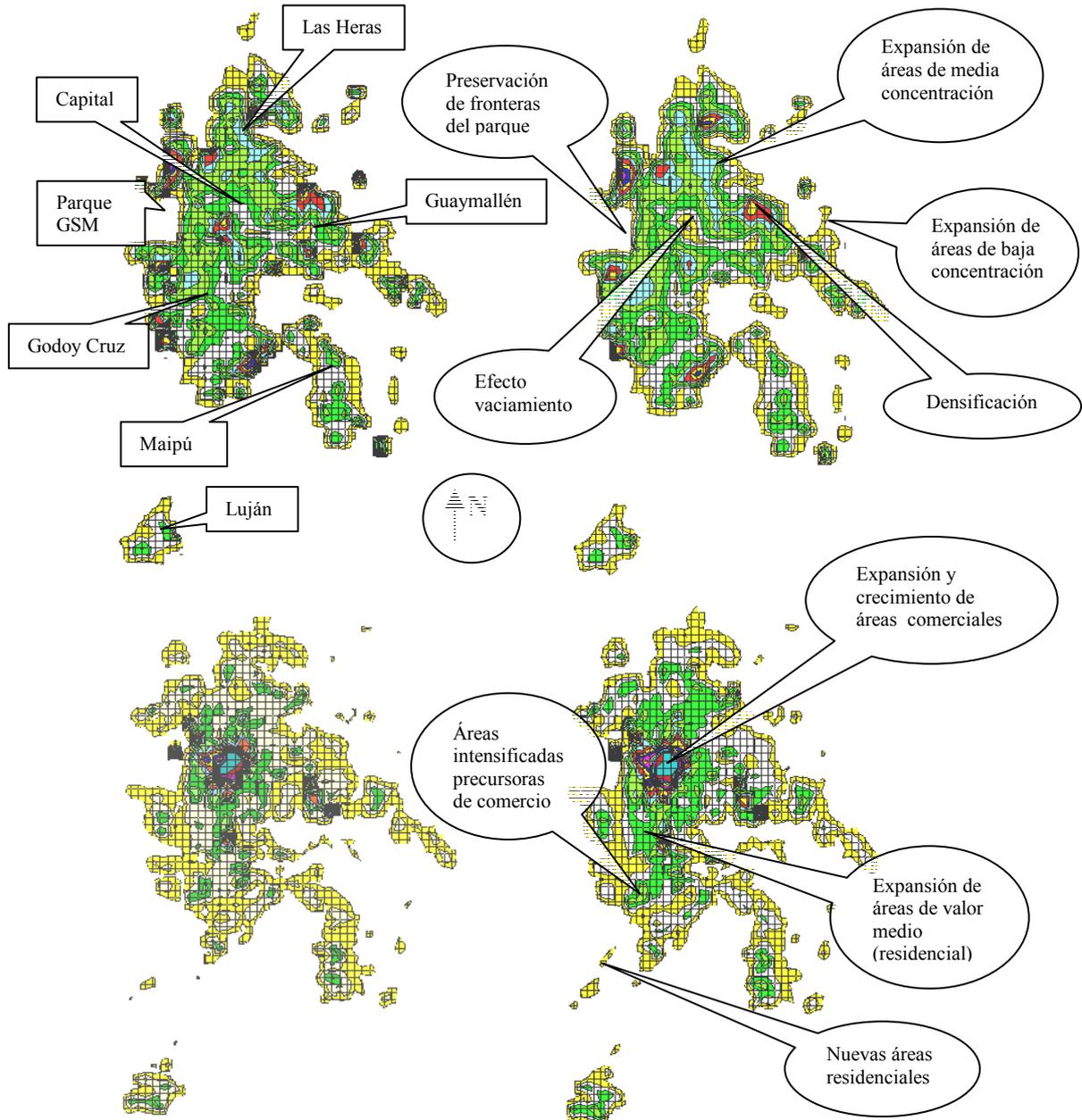


Fig. 10: Comparación entre estados de 1990/1 (izquierda) y estados finales (derecha); los mapas superiores corresponden a las distribuciones de habitantes y los inferiores a las de recursos.

Con respecto a la distribución espacial de población se pueden resaltar los siguientes comportamientos:

- a) EFECTO VACIAMIENTO: La zona central de baja densidad correspondiente al departamento Capital (centro principal de actividades) se profundiza e incrementa su extensión. Este efecto es equivalente a la depleción que ocurre en el estado sólido en la zona de inyección.
- b) EXPANSIÓN DE DENSIDADES MEDIAS: Rodeando la zona central de vaciamiento se incrementa la densidad poblacional (con densidades de 1000 a 1200 hab./píxel) y además tienden a interconectándose áreas de 800 a 1000 hab./píxel. Esto conforma una suerte de frente de onda que se propaga principalmente hacia Godoy Cruz sur.
- c) DENSIFICACION: Las zonas de alta densidad (1200 a 1400 hab./píxel) se incrementan en extensión, excepto por las ubicadas alrededor del centro de la ciudad que se contrae.
- d) EXPANSION DE FRONTERAS DE BAJA DENSIDAD: Una inspección detallada muestra una expansión territorial en las fronteras de baja densidad; esto puede resaltarse construyendo un mapa diferencial con los píxeles cuyas densidades estén comprendidas entre 50-200 hab./píxel y hayan sufrido un crecimiento mayor al 50 %. En general éstos tienden a rodear el área metropolitana, pero hay mayor actividad hacia el noreste y sur que hacia el norte.
- e) PRESERVACIÓN DE FRONTERAS CRÍTICAS: Un punto importante con respecto a la operación cualitativa del modelo la constituye la efectiva preservación de fronteras que normalmente no deberían alterarse, como es el caso del Parque General San Martín (GSM) al oeste de la ciudad y que se muestra como una entrada en forma de U.

Con respecto a la distribución espacial de recursos, destacamos los siguientes comportamientos:

- f) CRECIMIENTO Y EXPANSIÓN DE ÁREAS COMERCIALES: La zona central del departamento Capital, que siendo el centro comercial principal representa la zona de inyección de recursos, incrementa su extensión. Esto puede verse como un frente de alta densidad (1200-1400 rec./píxel) que se propaga hacia el oeste y sur, con alguna tendencia a conectarse con Godoy Cruz. El núcleo departamental de Godoy Cruz también se expande pero hacia el sur. Otro centro de importancia está en Guaymallén que se intensifica pero prácticamente no registra expansión.
- g) EXPANSIÓN E INTENSIFICACIÓN DE ÁREAS DE VALOR MEDIO: Un área amplia de 600-800 rec./píxel, se ha consolidado conectando áreas anteriormente aisladas en el norte y noreste con similares en el sur, con un incremento de intensidad; esto puede ser interpretado como consolidación de infraestructura residencial de mejor calidad, quizás representativa del incremento medio del factor β observado en la fig. 9. También hay intensificación de áreas de valores medios en el sur de Godoy Cruz, y en los centros locales de Luján y Maipú (1000-1200 rec./píxel) éstos pueden considerarse como precursores de desarrollo comercial, tomando en cuenta sus valores β mayores.
- h) NUEVAS AREAS RESIDENCIALES: Nuevas manchas aisladas aparecen, que por ejemplo tienden a conectar el Sur de Godoy Cruz con Luján de Cuyo. Como aún registran baja densidad poblacional, ellas representan infraestructura habitacional ocasional (fin de semana).

Aunque pueden construirse mapas iniciales y finales del factor de calidad β para interpretar mejor el tipo local de evolución y actividad, la sola consideración de los aspectos espaciales vistos aquí, ya muestra los efectos que cabrían esperar en una modelación espacial por otros medios. Particularmente interesante es el efecto depleción en el centro de la ciudad, algunas veces denominado efecto “rosquilla” (donut), que aquí surge naturalmente como consecuencia del crecimiento competitivo y difusión de recursos y habitantes.

Por otro lado, y a pesar que la simulación está restringida a parámetros estacionarios ideales, las principales tendencias de evolución espacial en el Gran Mendoza durante la década pasada, están claramente representadas. Tal es una correspondencia cualitativa, pero adquiere gran importancia cuando consideramos la buena respuesta en el tiempo de las variables de estado medias, vista anteriormente. Todo ello es un signo de consistencia interna del modelo así como de su capacidad de representar situaciones reales.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo de evolución urbana, construido sobre un autómata celular de agentes móviles, que se basa en una analogía con el estado sólido de la materia. A partir del estudio de las propiedades estadísticas de la distribución espacial de habitantes y de los bienes inmobiliarios en el Gran Mendoza, ajustadas a densidades de distribuciones de Fermi-Dirac, ha sido posible la caracterización de las pseudo partículas, y de la estructura de bandas asociada, adoptando en el caso de estudio una forma análoga a un semi-metal.

Tomando plena ventaja de la analogía con el estado sólido, la distribución de agentes ha sido vinculada a una concentración neta de carga poblacional equivalente y a un potencial urbano apropiado, utilizando para ello una aproximación de Thomas –Fermi. Esto permite realizar una descripción estática de la región urbana en términos de la teoría de campo.

Con estos elementos se puede plantear la dinámica urbana con ecuaciones de transporte en ambas pseudo partículas, similares a las que se utilizan en estado sólido. La parte circulatoria del modelo adopta la forma de balance entre componentes de corrimiento y de difusión, y describen el proceso de concentración y dispersión de población y recursos que se verifica en las ciudades. La parte de producción del modelo, descrito en términos de generación-recombinación de las pseudo partículas, es a su vez comparable a un modelo presa –predador habitual de la dinámica poblacional en Ecología. Utilizando la caracterización de pseudo partículas es posible ajustar los coeficientes de difusión, movilidad y crecimiento al comportamiento urbano conocido, con un enfoque tipo “bottom-up” que disminuye la necesidad de parametrización al mínimo indispensable.

El modelo de transporte y crecimiento resultante ha sido ensayado en condiciones estacionarias para un período de cinco años, a partir de datos censales disponibles para el Gran Mendoza en 1990/91. El ensayo muestra que las variables de estado principales evolucionan en el tiempo como se esperaría a partir de progresiones estadísticas clásicas, en tanto que la respuesta espacial es compatible con los principales efectos esperados en la evolución de corto y mediano plazo en una ciudad, así como con las tendencias verificadas en el Gran Mendoza durante la década pasada. Se pueden realizar ensayos en condiciones más realistas, utilizando estadísticas recientes para toda la década.

Con la metodología y modelo aquí tratados se abren nuevos caminos para abordar la evolución urbana. En este sentido, y aún cuando se ha presentado dicho modelo en forma autocontenida, es posible combinarlo a través de sus entradas paramétricas con otros modelos CA (por ej. en sucesivas escalas empotradas) o con modelos socio-económicos no espaciales, orientándolo así a simulaciones de plazos más largos, en la que se requiere incorporar innovación y escenarios cambiantes. También ofrece la posibilidad de describir desarrollos fragmentados mediante zonas con estructuras de bandas distintas y comportamientos no lineales en las interfases resultantes.

6 REFERENCIAS

1. Angulo J.M, Ruiz Medina M.D, Anh V., 2001- Space-Time Fractional Stochastic Diffusion, in Mateu J. & Montes F. (ed.) *Spatio-Temporal Modelling of Environmental Process*- Castelló de la Plana: Universitat Jaume I.- Spain.
2. Batty M., Torrens P., 2001- Modeling Complexity: The Limits to Prediction - *CYBERGEO*, No 201, 04 décembre 2001
3. Batty, M, 1996; Visualizing urban dynamics- in Longley, Batty (eds) *Spatial Analysis : Modelling in a GIS Environment*, 297-320
4. Bossel H., 1986 (lectura) - *Ecological System Analysis: An Introduction to Modeling and Simulation*- German Foundation for International Development (DSE) and Food and Agriculture Development Center (ZEL)- Fed. Rep. Germany
5. Kittel C., 1995 (lectura)- Introducción a la Física del Estado Sólido- *Ed. Reverté- Spain (Introduction to Solid State Physic, Sixth edition by John Wiley & Sons Inc.)*
6. Mayr, E., 1998 (lectura) - Así es la Biología- *Ed. Debate SA- Spain*
7. Mitas L., Brown W. M., Mitasova H., 1997, Role of dynamic cartography in simulations of landscape processes based on multi-variate fields. *Computers and Geosciences*, Vol. 23, No. 4, pp. 437-446
8. Mitasova, H; Mitas L. 2000 Modeling spatial processes in multiscale framework: exploring duality between particles and fields. Pl. talk at GIScience2000 conference, Savannah, GA.
9. Park S. and Wagner D. F. 1997 Incorporating cellular automata simulators as analytical engines in GIS, *Transactions in GIS*, 2(3), 213-231.
10. Pascala, S; Levin, S. 1997- Biological Generated Spatial Pattern and the Coexistence of Competing Species- Princeton University Press pages 296-317.
11. Popov V.L., Psakhie S.G., 2001- Theoretical principles of modeling elastoplastic media by movable cellular automata method. (I) - *Physical Mesomechanics*, 4 I 15-25
12. Tilman, D; Kareiva, P. 1997 *Spatial Ecology: The Role of Space in Population Dynamics and Interspecific Interactions*- Princeton University Press
13. Torrens P., 2002- How cellular models of urban systems work. (1.theory)- *CASA Paper 18* -Centre for Advanced Spatial Analysis- University College London
14. Wikle C., 2001- A kernel-based approach for Spatiotemporal Dynamic Models, in Mateu J. & Montes F. (ed) *Spatio-Temporal Modelling of Environmental Processes*- Castelló de la Plana: Universitat Jaume I.- Spain