

INTEGRACIÓN EN AMBIENTE SIG Y OTROS MÉTODOS PARA VOLVER MÁS EFECTIVO EL USO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN LA PLANIFICACIÓN URBANA Y DE TRANSPORTES

Charlie Williams Rengifo Bocanegra
Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Brasil
charlie@ppgep.ufrgs.br

Antônio Néelson Rodrigues da Silva
Universidade de São Paulo. Brasil
anelson@sc.usp.br

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es presentar procedimientos capaces de volver más efectiva la aplicación, en planificación urbana, de modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA). Una de las alternativas permite, por ejemplo, incorporarlos, de forma directa, a Sistemas de Informaciones Geográficas (SIG). Esta condición trae dos tipos de beneficios inmediatos y significativos. Por un lado, los modelos pueden utilizar, como variables de entrada, atributos de naturaleza espacial extraídos directamente del SIG. Además de eso, los datos de salida de los modelos pueden ser visualizados tanto en la forma numérica como a través de mapas temáticos, como se puede comprobar en el estudio del caso aquí presentado.

Otras alternativas fueron también exploradas para la reproducción del modelo de RNA en ambientes computacionales diversificados.

PALABRAS CLAVE: Redes neuronales artificiales, sistemas de información geográfica, planificación urbana, planificación de transportes.

ABSTRACT: The objective of this work is to introduce procedures developed to turn more effective the application of Artificial Neural Network (ANN) models in urban planning. One of the alternatives allows, for example, their direct integration into Geographic Information Systems (GIS). That condition brings two types of immediate and important benefits. On the one hand, the models can make use of spatial attributes directly extracted from GIS data as input variables. In addition, the model output data can be visualized either in numerical form or through thematic maps, as revealed by the case study presented here. Other

alternatives for the reproduction of the ANN model in diverse computational environments were also explored in this paper.

KEYWORDS:Artificial neural networks, geographic information systems, urban planning, transportation planning.

Recibido: 16/09/2003

Aprobado: 07/10/2004

1 Introducción

Modelos de Redes Neuronales Artificiales desarrollados para el área de planificación de transportes son encontrados con relativa frecuencia en trabajos teóricos, principalmente por la calidad de los resultados y estimados que pueden generar. No son, todavía, usados efectivamente la mayor parte del tiempo en aplicaciones prácticas, debido sobretodo a la falta de procedimientos que permitan el fácil uso de esos modelos por parte de los usuarios finales. Esta fue la motivación para la realización de este trabajo, cuyo objetivo principal es el desarrollo de procedimientos alternativos capaces de volver más efectiva la aplicación, en planificación urbana, de modelos construidos con Redes Neuronales Artificiales (RNA). Una de las alternativas presentada detalladamente en este trabajo consiste en un procedimiento que permite incorporar, de forma directa, modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) a un ambiente de Sistemas de Informaciones Geográficas (SIG). Esta condición trae dos tipos de beneficios inmediatos y significativos. Por un lado, los modelos pueden utilizar, como variables de entrada, atributos de naturaleza espacial extraídos directamente del SIG. Además, los datos de salida de los modelos, que en general caracterizan previsiones (para escenarios futuros, por ejemplo), pueden ser visualizados tanto en la forma numérica como a través de mapas temáticos.

El desarrollo de este trabajo tuvo como base una serie de modelos de generación de viajes urbanos que utilizaban como datos de entrada algunas variables socio-económicas obtenidas en la ciudad de Bauru,

filosofía
tecnología
artes

localizada en el estado de São Paulo, Brasil, capaces de caracterizar la movilidad de los domicilios; y una medida de accesibilidad, calculada con auxilio de recursos del propio Sistema de Informaciones Geográficas que sirvió como plataforma para el estudio.

Los modelos aquí presentados, originalmente entrenados y validados en un software específico de RNA, fueron posteriormente introducidos en el SIG, siendo su capacidad de realizar predicciones totalmente preservada en esta transición. En la fase inicial, aquella en la que se desarrolló el modelo de previsión de viajes, fueron identificadas las variables relacionadas a la movilidad que más influían en los viajes urbanos, en este caso el ingreso mensual por domicilio y el número de personas por domicilio. La medida de accesibilidad adoptada fue un índice de separación espacial, que considera la distancia promedio entre puntos de una red vial.

La selección de las variables más relevantes y de la topología de la red que presenta mejor desempeño es hecha a través de la prueba de diferentes combinaciones de esos elementos, sometidos también a variaciones de los parámetros de ajuste de la red, que permiten construir modelos bastante diversos y con desempeño variado. De esa forma, la realización de los procedimientos de entrenamiento, validación y prueba para diferentes conjuntos de datos y bajo diferentes configuraciones permite identificar aquella combinación que mejor reproduce los datos de salida a partir de los datos de entrada presentados a la red.

Estos mejores “modelos” fueron entonces transferidos para el ambiente SIG. Para la realización de esta etapa, es necesario que el software de RNA informe al usuario algunos parámetros importantes de la red entrenada. En primer lugar, es preciso saber cuál es la función de activación utilizada por el modelo. Es preciso conocer también los valores de los pesos entre los nodos en todas las ligaciones de la red entrenada, y los valores de los *bias* asociados a los nodos de esta red. Obteniendo estos elementos, es posible transformar el proceso de predicción de la red en una serie de instrucciones que pueden ser reproducidas en cualquier hoja de cálculo o, como en el caso aquí presentado, en Sistemas de Informaciones Geográficas que permiten realizar operaciones matemáticas de forma dinámica. En este último caso, los mapas temáticos generados a partir de los resultados encontrados, también pueden ser considerados dinámicos, pues responden inmediatamente a las alteraciones en los datos de entrada con alteraciones de los valores de salida representados en los mapas.

En el caso aquí estudiado, el modelo insertado en el SIG fue utilizado para estimar viajes a partir de datos del Censo General, realizado en 1991, y posteriormente analizar la evolución de los patrones de viajes, al comparar los resultados anteriores con valores de 1997. Antes de comentar sobre el método utilizado en el presente trabajo será realizada una breve introducción, presentada en los ítems 2 y 3, respectivamente, de los conceptos y aplicaciones de RNA así como de los SIG en planificación de transportes. En el ítem 4 se describirá el método utilizado y seguidamente se realizará el análisis de los resultados encontrados en el estudio de caso, ítem

5. En el ítem 6 serán propuestos otros procedimientos alternativos para la reproducción de modelos de RNA en ambientes computacionales diversificados. Finalmente, en el ítem 7, estarán las conclusiones del trabajo.

2. Redes neuronales artificiales y planificación de transportes

Según Braga *et al.* (1998) las Redes Neuronales Artificiales son sistemas paralelos distribuidos, compuestos por unidades de procesamiento simple (nodos) que calculan determinadas funciones matemáticas (normalmente no-lineales). Esas unidades generalmente son conectadas por canales de comunicación que están asociados a determinado peso. Las unidades realizan operaciones apenas sobre sus datos locales, que son entradas recibidas por sus conexiones. El comportamiento “inteligente” de una Red Neuronal Artificial viene de las interacciones entre las unidades de procesamiento de la red. Las Redes Neuronales Artificiales pueden presentar una o más capas intermedias o escondidas de neuronas. En el tipo de red denominado MLP (*Multilayer Perceptron*) se puede, por ejemplo, según Cybenko (1989), implementar cualquier función continua en una red con una capa intermedia. Ya la utilización de dos capas intermedias permite la aproximación a cualquier función (Cybenko, 1988).

La ventaja que tienen las RNAs es que no necesitan de conocimientos de especialistas para tomar decisiones; ellas se basan únicamente en los ejemplos históricos que les son dados: no es necesario informar porqué tal situación resultó en tal decisión en el pasado, o porqué tal decisión resultó en tal consecuencia.

Dependiendo del tipo de problema al cual son sometidas, las RNAs han presentado un desempeño considerado superior a los métodos estadísticos utilizados para el mismo fin (Falas, 1995). En el área de transportes, uno de los primeros estudios de aplicación de RNAs habría sido el de Nakatsuji y Kaku (1989), buscando resolver problemas relacionados con Ingeniería de Tráfico. En seguida, a lo largo de los años 90, el campo de estudios de transporte observó una verdadera explosión en el uso de Redes Neuronales (Dougherty, 1995). La habilidad para trabajar con datos incompletos hace a las RNAs especialmente atractivas para planificación en países en desarrollo, en los cuales algunos estudios están siendo desarrollados.

En el área de planificación de transportes, algunos estudios fueron realizados: Shmueli *et al.* (1996) exploraron la aplicación de RNAs en la evaluación de herramientas para previsión de viajes, comparando el padrón de viajes entre hombres y mujeres, en Israel; Dantas *et al.* (2000) trabajaron con RNAs para la previsión de la demanda de viajes en el contexto de la planificación estratégica y Ruiz y Medina (2000) utilizaron las RNAs para obtener modelos de generación de viajes y compararlos con los modelos obtenidos a través de regresión lineal múltiple. De particular interés para el presente estudio es el trabajo desarrollado por Raia Jr. (2000), y posteriormente por Silva *et al.* (2002), que utilizaron Redes Neuronales Artificiales para estimar un Índice de Potencial de Viajes a partir de variables de movilidad y accesibilidad, con vistas a la planificación estratégica de transportes. Este modelo fue utilizado como base para el desarrollo del principal procedimiento aquí explorado, a través del cual se introduce un modelo de RNA en un Sistema de Informaciones Geográficas (SIG).

3. Sistemas de información geográfica para transportes

Un Sistema de Información Geográfica es constituido por un conjunto de "herramientas" especializadas en adquirir, almacenar, recuperar, transformar y emitir informaciones espaciales. Esos datos geográficos describen objetos del mundo real en términos de posicionamiento, con relación a un sistema de coordenadas, de sus atributos no aparentes y de las relaciones topológicas existentes. Por tanto, un SIG puede ser utilizado en estudios relacionados con el medio ambiente y recursos naturales, en la investigación de la previsión de determinados fenómenos o en el apoyo a las decisiones de planificación, considerando la concepción de que los datos almacenados representan un modelo del mundo real (Burrough, 1986). Según Antenucci *et al.* (1991), uno de los primeros proyectos que vinculó los resultados de análisis con mapas, para de esta forma facilitar su comprensión (prácticamente una versión preliminar de los actuales SIG), fue justamente un trabajo en el área de transportes, desarrollado en Detroit, EEUU, en 1955. En aquel proyecto fue desarrollada una salida gráfica para el programa de computadora, a través de la cual los flujos resultantes de los análisis eran representados por líneas de diferentes grosores.

Los relatos encontrados en la literatura más reciente, como en Lang (2000), por ejemplo, dejan claro que la tecnología ya fue asimilada para la aplicación práctica en diversos países y para diferentes propósitos en el área de transportes. La retrospectiva de los trabajos publicados con respecto a los SIG en transportes presentada por Silva (1998) no deja dudas de que esta es un área emergente también en Brasil. Según

aquel autor, el creciente número de artículos publicados ya despertaba, en esa ocasión, el interés de los profesionales de transportes, tanto los del medio académico, como los técnicos que viven diariamente con los problemas en las ciudades. El desafío de los SIG para transportes en el momento actual se encuentra, como afirman Verma y Dhingra (2001), en cuatro vertientes: i) asociación a sistemas especialistas y otras técnicas emergentes; ii) desarrollo de aplicaciones a través de Internet; iii) integración con ITS (*Intelligent Transportation Systems*); y iv) construcción de modelos temporales. Es exactamente en la primera de estas cuatro líneas que se encuadra esta investigación, al buscar asociar los recursos de una técnica de Inteligencia Artificial a un Sistema de Informaciones Geográficas.

4. Método

El principal procedimiento aquí discutido consiste en la introducción de un modelo de RNA en un ambiente de SIG para la generación dinámica de Índices de Potencial de Viajes y visualización espacial inmediata. En el caso estudiado, se propone una aplicación en la ciudad de Bauru a partir de los límites de los sectores utilizados por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística en el Censo Poblacional de 1996, aunque con datos extraídos de un estudio de O-D realizado en la misma ciudad en 1997. Para demostrar una posible aplicación de este tipo de herramienta, se utilizó el modelo arriba descrito para estimar viajes en otro período.

4.1. Obtención de datos básicos

El material básico necesario para dar inicio al desarrollo de este trabajo incluyó el mapa digitalizado del sistema vial de la ciudad de Bauru, los límites de los sectores censitarios del Censo General de 1991 y del Censo Poblacional de 1996, datos del ingreso promedio por domicilio por sector censitario (1991), datos del número de personas por domicilio por sector censitario (1991) y diversos datos de un estudio de O-D realizado en 1997. Los datos relativos a los límites de los sectores censitarios de 1991 y de 1996 fueron cedidos por la Secretaría de Planificación de Bauru, los datos sobre el ingreso mensual y número de personas por domicilio por sector censitario (1991) fueron adquiridos en el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (FIBGE, 2001), y todos los demás datos, así como los modelos de Redes Neuronales Artificiales para la predicción de un Índice de Potencial de Viajes, fueron los mismos empleados en los trabajos de Raia Jr. (2000) y Silva *et al.* (2002).

El mapa digitalizado del sistema vial fue originalmente producido en el *software TransCAD*, desarrollado por la empresa Caliper Corporation, en los EEUU. Los límites de los sectores censitarios fueron obtenidos en mapas de papel, lo que exigió la digitalización de cada uno de esos sectores. Esto fue realizado directamente en el *software TransCAD*, siendo los sectores censitarios tratados como áreas. Fue también necesario georeferenciar los domicilios entrevistados en el estudio de O-D de 1997, así como digitalizar las zonas de tráfico en que fue dividida la ciudad de Bauru para el desarrollo del estudio de O-D. Los modelos de RNAs obtenidos del trabajo de Raia Jr. (2000) ya estaban en archivos del *software EasyNN* (desarrollado por Stephen Wolstenholme, en el Reino

Unido (más detalles pueden ser obtenidos en la página www.easynn.com, en *internet*), lo que permitió un análisis cuidadoso de los mismos, para verificar si deberían o no ser elaborados nuevamente. En este caso, la reconstrucción de los modelos podría ser hecha directamente a partir de los datos originales del estudio de O-D, obtenidos en archivos de hoja de cálculo.

4.2. Evaluación de los modelos originales y posterior reproducción a través de procedimientos alternativos

La primera etapa del procedimiento aquí discutido consiste en evaluar los modelos construidos en el *software* de Redes Neuronales, para la selección de la red de mejor desempeño. Es solamente a partir de estas redes que se debe efectivamente aplicar procedimientos alternativos capaces de reproducir el comportamiento de la RNA previamente entrenada en otros ambientes computacionales. Un primer procedimiento puede ser por ejemplo la reproducción, en una HOJA DE CÁLCULO, del modelo obtenido a través de las RNAs para generar Índices de Potencial de Viajes, basándose en el trabajo de Bocanegra y Silva (2002), en el área de transportes, o también en el de Guahyba (2001), en el área veterinaria. Para ello, el paso inicial es identificar la función de activación que fue utilizada para encontrar los valores de salida. En el caso de estudio, el simulador empleado, el *software EasyNN*, usa la función sigmoidal logística para encontrar el modelo analizado. Inicialmente se encuentra, con esa función, el valor de salida entre la capa de entrada y la capa oculta y, usando ese resultado, se vuelve a usar la función sigmoidal logística para encontrar los valores que pasan de la capa oculta hacia la capa de salida. En las ecuaciones (1) hasta la (4) se muestran las características de la función

sigmoidal logística empleada para cada caso.

$$F(u_j) = \frac{1}{1 + e^{-u_j}} \quad (1)$$

Donde, u_j es igual a:

$$u_j = a_{0j} + \sum_{i=1}^I a_{ij} x_i \quad (2)$$

Donde:

- a_{ij} = Pesos del nodo de entrada i para el nodo oculto j
- x_i = Valor de entrada del nodo i
- a_{0j} = *Bias* del nodo oculto j
- I = Número de nodos de entrada

$$F(v_k) = \frac{1}{1 + e^{-v_k}} \quad (3)$$

Donde, v_k es igual a:

$$v_k = b_{0k} + \sum_{j=1}^J b_{jk} y_j \quad (4)$$

Donde:

- b_{jk} = Pesos del nodo oculto j para el nodo de salida k
- y_j = Valor de salida para el nodo oculto j
- b_{0k} = *Bias* del nodo de salida k
- J = Número de nodos ocultos

El empleo de las ecuaciones (1) y (3) supone que los datos están normalizados entre 0 y 1. Para eso, se emplea la ecuación (5):

$$Y_i = \left[\frac{(X_i - X_{\min}) \times (Y_{\max} - Y_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} \right] + Y_{\min} \quad (5)$$

Para $i = 1 \dots n$

Donde:

Y_i = valor normalizado

X_i = valor a ser normalizado

X_{\min} = menor valor del intervalo de origen de normalización

X_{\max} = mayor valor del intervalo de origen de normalización

De esa forma, una vez normalizados los datos de entrada, es posible, disponiendo de una red previamente entrenada, conocer los valores de los pesos y *bias* requeridos para el empleo de las ecuaciones (2) y (4), pues el *software* informa esos valores al usuario, si es requerido para hacerlo. Con estos elementos, esas ecuaciones pueden ser fácilmente insertadas en otros ambientes tales como, por ejemplo, una hoja de cálculo. De esa forma, los resultados de salida obtenidos con las ecuaciones pueden ser entonces confrontados con los resultados generados por el *software* en que la red fue entrenada. Esta verificación debe ser hecha con todos los procedimientos propuestos. Si el procedimiento fue realizado correctamente, los resultados deben ser idénticos, conforme fue verificado con el modelo que presentó el mejor desempeño para la previsión del Índice de Potencial de Viajes, aquí estudiado.

La introducción del modelo de RNA en un SIG puede ser hecha de manera análoga a lo que ha sido hecho con la hoja de cálculo. En el caso presentado, en que se usa el *software TransCAD*, una vez introducido el modelo en el SIG se procederá a estimar los viajes de la ciudad de Bauru, para el año de 1991. Esos resultados serán comparados con los datos de viajes

reales para el año de 1997, siendo la comparación realizada punto a punto. Los resultados obtenidos con la aplicación de este procedimiento serán presentados y comentados en el próximo ítem.

5. Resultados obtenidos

Conforme se detalló en el ítem anterior, después de la obtención de los datos básicos tuvo inicio la primera etapa del trabajo de análisis, que consistía en evaluar si alteraciones en los modelos propuestos por Raia Jr. (2000) podrían mejorar su desempeño en términos de capacidad de predicción. Como lo discutido en Bocanegra (2002), después de analizar detalladamente las bases de datos utilizadas por Raia Jr. (2000) y agregar o retirar variables a los modelos por él propuestos, se concluyó que el desempeño de los modelos con más de tres variables no presentó mejora significativa con relación a los modelos anteriores. Así, se optó por trabajar aquí con el modelo simplificado original, en el cual eran utilizadas solamente tres variables de entrada (ingreso mensual, número de personas e índice de accesibilidad de tipo separación espacial) y una variable de salida (número total de viajes por domicilio). Este modelo tiene un R^2 igual a 0,69 y un Error Cuadrático Medio igual a 3,86. Fue a partir de este modelo que se pudo efectivamente aplicar procedimientos alternativos capaces de reproducir el comportamiento de la RNA previamente entrenada para generar Índices de Potencial de Viajes con base en variables de movilidad y accesibilidad, en diferentes tipos de ambientes computacionales, como lo discutido en Bocanegra (2002) y Bocanegra y Silva (2002). Por tanto, la ecuación (6), utilizada en este trabajo, fue construida por Bocanegra (2002) con datos extraídos

directamente del *software* de RNA. Los valores en **negrita** son los pesos de las conexiones entre neuronas y aquellos en *itálicas* o *cursivas* son los valores de los *bias* asociados a cada neurona, como se puede ver también en la Figura 1. Además, en esta figura están representadas las tres neuronas de entrada, las cuatro neuronas de la capa intermedia y la neurona de salida, así como las conexiones entre ellas.

$$\begin{aligned}
 \text{IPV} = & ((1/(1+\text{EXP}(-(((1/(1+\text{EXP}(-(((\text{RMD}-0)/ \\
 & (14000-0)) * \mathbf{0,060732}) + (((\text{NPD}-1)/(9-1)) * \mathbf{11,676608}) + (((\text{AC}-4,99)/(10,78- \\
 & 4,99)) * \mathbf{1,303802}) + 3,577654)))) * \mathbf{-1,203891}) + \\
 & ((1/(1+\text{EXP}(-(((\text{RMD}-0)/(14000- \\
 & 0)) * \mathbf{13,127956}) + (((\text{NPD}-1)/(9-1)) * \mathbf{11,919379}) + (((\text{AC}-4,99)/(10,78- \\
 & 4,99)) * \mathbf{4,466596}) + 6,303575)))) * \mathbf{-2,122853}) + ((1/(1+\text{EXP}(-(((\text{RMD}-0)/(14000- \\
 & 0)) * \mathbf{-1,583252}) + (((\text{NPD}-1)/(9-1)) * \mathbf{11,088837}) + (((\text{AC}-4,99)/(10,78-4,99)) * \\
 & \mathbf{0,000152}) - 1,453863)))) * \mathbf{-15,312986}) + ((1/ \\
 & (1+\text{EXP}(-(((\text{RMD}-0)/(14000-0)) * \mathbf{-12,074375}) \\
 & + (((\text{NPD}-1)/(9-1)) * \mathbf{5,576448}) + (((\text{AC}-4,99)/ \\
 & (10,78-4,99)) * \mathbf{-3,122853}) - 4,748315)))) * \mathbf{-8,882975}) + 1,898874)))) * 28) + 2
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Donde, IPV: Índice de Potencial de Viajes, en viajes por domicilio; IMD: Ingreso promedio mensual por domicilio; NPD: Número de personas por domicilio; AC: Índice de accesibilidad.

Una vez conocida la ecuación, que constituye la parte más importante del modelo, su introducción en un SIG puede ser realizada de forma casi directa. En la Figura 2 se observa, por ejemplo, la pantalla del *software*

TransCAD con la opción “fórmula dinámica”, en el momento de introducir la ecuación (6). A través de este comando, la fórmula se vuelve disponible en una de las columnas de la tabla del SIG, teniendo como referencia datos de otras columnas. De esta forma, cualquier alteración en los valores de las columnas que contienen los datos de “entrada” producirá nuevas predicciones en la columna de “salida”. Con esto, cualquier predicción del modelo puede reflejarse inmediatamente en salidas gráficas en el mapa en que se visualiza el contenido de la tabla en cuestión. Para demostrar una posible aplicación de este tipo de herramienta, se utilizó el modelo arriba descrito para estimar viajes en otro período, tomando como datos de entrada para el mismo, los resultados del censo demográfico de 1991. Una opción aún más interesante sería utilizar los datos del censo demográfico de 2000, pero en la ocasión en que este estudio fue concluido, aún no estaban disponibles en el nivel de agregación necesario para esta aplicación (sectores censitarios).

A partir de los datos del ingreso mensual y número promedio de personas por domicilio, obtenidos en el censo general del país en 1991 (FIBGE, 2001), y del índice de accesibilidad de tipo separación espacial, calculado en el SIG, se procedió a estimar el número de viajes en la ciudad de Bauru para el año 1991. La distribución de viajes por zona censitaria es mostrada en la Figura 3. Claramente se puede notar la tendencia de que las zonas periféricas son las que exhiben el mayor número de viajes, entre 10 y 13 viajes, aproximadamente, por domicilio, mientras un número menor de viajes es realizado en las zonas centrales (con unas pocas excepciones en los valores intermedios, cercanos del centro o en la periferia). En este caso, el tamaño del domicilio es sin duda el

factor preponderante en el número de viajes estimados, aunque para el modelo también se tome en consideración las otras dos variables de entrada. Con las predicciones obtenidas para 1991 fue entonces posible evaluar cómo los patrones de viajes se habrían alterado desde aquel año hasta 1997, ocasión en que eran conocidos los viajes reales a través del estudio de O-D. En la Figura 4 se muestra la relación entre los viajes estimados de 1991 y los viajes reales de 1997. En este caso, los valores de las zonas fueron atribuidos a los nodos de la red vial de la ciudad, para permitir comparaciones directas, ya que los contornos de las zonas de 1991 difieren de los correspondientes a las zonas de 1996. Lo que se puede apreciar en esa Figura es que la mayor parte de los viajes disminuyeron entre 1991 y 1997. También se pueden notar las zonas de la ciudad donde habría ocurrido un aumento de los viajes, aunque el modelo, de la forma como fue concebido, no permita diferenciar entre los medios de transporte utilizados, ya que en él están incluidos todos los modos de transporte urbano (ómnibus, bicicleta / a pie, carro como conductor, carro como pasajero).

6. Otros procedimientos

El uso práctico de las RNAs en la planificación urbana y de transportes no está restringido solamente a su introducción en hojas de cálculo ni tampoco a su combinación con los SIGs. Hay otros procedimientos que pueden ser desarrollados para volver más efectivo el uso de los modelos de RNAs. En el caso del modelo construido para generar Índices de Potencial de Viajes, por ejemplo, los procedimientos siguientes fueron también desarrollados para transferirlos e integrarlos a otros ambientes computacionales.

6.1. Reproducción de la RNA entrenada a través de un programa de computadora

Otro procedimiento desarrollado para volver más inmediata la aplicación de los modelos, permitiendo diversos análisis, fue la elaboración de un programa de computadora escrito en *Visual Basic*¹. Este tipo de programa, aunque simple, permite la construcción de interfaces bastante amigables para el usuario final, tal como la mostrada en la Figura 5.

En este caso, para obtener un estimado del número de viajes (visualizado en el lado derecho de la pantalla) basta seleccionar los valores de cada variable de entrada (renta mensual, número de personas y accesibilidad), moviendo las "scroll bar" asociadas a cada una de ellas, mostradas en el lado izquierdo de la Figura 5. Un ejemplo de variación de estos valores puede ser visto en la Figura 6: un ingreso mensual de R\$1500, 2 personas por domicilio y un índice de accesibilidad igual a 6,5 km, conducen a un estimado de cerca de 5 viajes.

6.2. Desarrollo de ábacos

Otro procedimiento explorado fueron los ábacos, construidos a partir del modelo de Red Neuronal replicado en una hoja de cálculo. Fueron construidos gráficos que ilustran la relación entre las tres variables de entrada (ingreso mensual, número de personas por domicilio e índice de accesibilidad del tipo separación espacial) y la variable de salida (número total de viajes por domicilio). En la Figura 7 se puede evaluar el impacto del ingreso y de la accesibilidad en la generación de viajes para domicilios con diferentes números de personas (ordenados desde 1 persona, en la parte superior izquierda de la figura, hasta 9 personas en la parte inferior central de la figura).

7. Conclusiones

Este trabajo tuvo como objetivo el desarrollo de un procedimiento capaz de volver más efectivo el uso de un modelo de Redes Neuronales Artificiales generado para estimar un índice de potencial de viajes, ya que son pocos los trabajos en esta misma línea desarrollados en el área de Transportes. Abdel-Aty y Abdelwahab (2001a y 2001b), por ejemplo, procuraron facilitar el uso y la comprensión de modelos de RNA explorando el uso de gráficos, mientras que Bocanegra y Silva (2002) lo hicieron también a través del uso de hoja de cálculo. En el presente trabajo, por otro lado, lo que se buscó fue la integración, de forma directa, de un modelo de RNA a un SIG, teniendo como base los modelos originalmente desarrollados por Raia Jr. (2000) para estimar viajes urbanos. Los modelos utilizaban como datos de entrada algunas variables socioeconómicas obtenidas en la ciudad de Bauru, localizada en el estado de São Paulo, Brasil, capaces de caracterizar la movilidad de los domicilios, y una medida de accesibilidad, calculada con auxilio de recursos del propio Sistema de Informaciones Geográficas que sirvió como plataforma para el estudio.

El procedimiento desarrollado en este trabajo presentó un buen potencial como herramienta para uso práctico, habiendo sido demostrada, a través de una aplicación, la viabilidad de uso del mismo. Se demostró que es simple introducir la ecuación de un modelo de red neuronal artificial, desde que se saben los pesos entre las conexiones y el tipo de función de activación usado por el simulador de redes neuronales. Un punto importante es que el procedimiento se mostró flexible y de fácil adaptación para otras aplicaciones en el área de

transportes. Además de la capacidad de realizar predicciones, su uso permite observar de forma clara, por ejemplo, el comportamiento de los valores de salida como consecuencia de variaciones en los datos de entrada, o sea, análisis de sensibilidad. La inserción de modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) en un ambiente de Sistemas de Informaciones Geográficas (SIG) trae aún otros beneficios inmediatos y significativos. Por un lado, los modelos pueden de hecho utilizar, como variables de entrada, atributos de naturaleza espacial extraídos directamente del SIG, como fue comprobado por la medida de accesibilidad aquí empleada. Además, los datos de salida de los modelos, que en general caracterizan previsiones (para escenarios futuros, por ejemplo), pueden ser visualizados tanto en la forma numérica como a través de mapas temáticos. Estos últimos presentan gran capacidad de síntesis y transmisión de la información, así sea para individuos sin formación técnica, que muchas veces es el caso de los tomadores de decisión. Además, los mapas temáticos generados a partir de los resultados encontrados también pueden ser considerados dinámicos, pues responden inmediatamente a las alteraciones en los datos de entrada con alteraciones de los valores de salida representados en los mapas.

En resumen, este estudio de caso ilustra bien el potencial de la herramienta que nace de la integración de modelos de RNA en diversos ambientes computacionales (y particularmente en los SIG) para la planificación de transportes, sean para previsión de viajes o para otros fines, desde que la localización de los valores estimados como salida sea importante en el contexto de análisis y toma de decisión. Además, es importante destacar

Integración en ambiente sig y otros métodos para volver más efectivo el uso de las redes neuronales artificiales en la planificación...
Charlie Williams Rengifo Bocanegra/ Antônio Néilson Rodrigues da Silva

la ampliación de las posibilidades de realización de análisis de sensibilidad, ya promisorias si sólo son considerados los modelos de RNA y los SIG de forma separada.

Notas

¹ *Software* desarrollado por la empresa Microsoft Corporation. <http://microsoft.com/Brasil/vbasic>.

Bibliografía

Abdel-Aty, M.A. y Abdelwahab, H.T. (2001a) **Development of artificial neural network models to predict driver injury severity traffic accidents at signalized intersections**. Actas del 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. En CD-ROM. Washington D.C., 27p.

Abdel-Aty, M.A. y Abdelwahab, H.T. (2001b) **Applying fuzzy - Artmap neural networks to predict driver's injury severity in traffic accidents**. Actas del 9th World Conference on Transportation Research. En CD-ROM. Seúl, Corea del Sur, 13p.

Antenucci, J.C.; Brown, K.; Crosswell, P. y Kevani, M.J. (1991) **Geographic Information Systems: a guide to the technology**. New York, EEUU, Van Nostrand Reinhold.

Bocanegra, C.W.R. (2002) **Procedimentos para tornar mais efetivo o uso das redes neurais artificiais em planejamento de transportes**. São Carlos. Tesis de Maestria, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Bocanegra, C.W.R y Silva, A.N.R. (2002) **Replicando el comportamiento de una red neuronal artificial entrenada para estimar un índice de potencial de viajes**. En: Portilla, A.I. y Diaz, J.M. (Eds), V Congreso de Ingeniería del Transporte. Santander, España.

Braga, A.P.; Carvalho, A.P.L.F. y Ludemir, T.B. (1998)

Fundamentos de redes neurais artificiais.
XI Escola Brasileira de Computação, UFRJ.

Burrough, P.A. (1986)

Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford, UK, Clarendon Press.

Cybenko, G. (1988)

Continuous valued neural networks with two hidden layers are sufficient. Technical Report, Dep. Computer Science, Tufts University, Medford, EEUU.

Cybenko, G. (1989)

Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems* 2 (4), pp.303-314.

Dantas, A.; Yamamoto, K.; Lamar, M.V. y Yamashita, Y. (2000)

Modelo neuro-geo-espacial para previsão da demanda de viagens no contexto do planejamento estratégico. En: Setti, J.R.A. y H.B.B. Cybis (Eds), Panorama nacional da pesquisa em transportes 2000. ANPET, Brasil.

Dougherty, M. (1995)

A review of neural networks applied to transport. **Transportation Research, Part C**, v.3, n.4. p.247-260.

Falas, T. (1995)

Neural networks in empirical accounting research: an alternative to statistical models. **Neural Network World** 5 (4), pp.419-432.

FIBGE (2001)

Censo Demográfico 1991 - **Microdados da amostra São Paulo (exceto a região metropolitana de São Paulo).** Rio de Janeiro, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 1991. En CD-ROM.

Guahyba, A.S. (20 01)

Utilização da inteligência artificial (redes neurais artificiais) no gerenciamento de reprodutoras pesadas. Porto Alegre. Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Porto Alegre.

Lang, L. (2000)

Transportation GIS. ESRI Press, Redlands, EEUU.

Nakatsuji, T. y Kaku, T. (1989)

Application of neural network models to traffic engineering problems. Proceedings of Infrastructure Planning 12, pp.297-304.

Raia Jr., A.A. (2000)

Acessibilidade e mobilidade na estimación de um índice de potencial de viagens utilizando redes neurais artificiais. São Carlos. Tesis de Doctorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Ruiz, T. y Medina, J.R. (2000)

Modelos de generación de viajes. Análisis comparativo de la utilización de redes neuronales y regresión lineal múltiple. En: Colomer J.V. y Garcia, A. (Eds), IV Congreso de Ingeniería del Transporte. Valencia, España.

Shmueli, D.; Salomon, I. y Shefer, D. (1996)

Neural network analysis of travel behavior: