



### **Proyecto**

Simulador de expansión urbana  
basado en autómatas celulares  
SPU MEyD

### **Director**

Dr. Santiago Linares  
CIG | FCH UNCPBA | CONICET

### **Equipo**

Lic. María Carolina Miranda del Fresno  
CINEA | FCH UNCPBA

Dra. Mariana del Fresno  
PLADEMA | FCEX UNCPBA | CICPBA

### **Desarrolladores**

Tootab IT Solutions  
[www.tootab.com](http://www.tootab.com)



<b>Contenidos</b>	<b>Pág.</b>
1. Presentación	2
2. Introducción	4
3. Requerimientos técnicos	6
4. Escenarios futuros	7
4.1. Preparación de datos	8
4.1.1. Área de estudio	8
4.1.2. Zonas urbanizadas	8
4.1.3. Restricciones	9
4.1.4. Variables y factores	9
4.1.4.1. Tipo de variables	10
4.1.4.2. Mapas de distancia	11
4.1.4.3. Formato vectorial a ráster	13
4.1.4.4. Formato GRID a formato TIFF	14
4.2. SACcity	16
4.2.1. Barra de herramientas	16
4.2.2. Calibración	17
4.2.2.1. Variables	18
4.2.2.2. Ponderar	20
4.2.2.3. Ejecutar	23
4.2.2.4. Validación	27
4.2.2.4.1. Comparación Visual	27
4.2.2.4.2. Matriz de confusión	28
4.2.3. Simulación	31
4.3. Análisis y visualización	31
4.3.1. Análisis del patrón de expansión urbana	34
4.3.2. Análisis de la cantidad de cambios	35

## 1. Presentación

En el marco de la Convocatoria 2016 a Proyectos de Vinculación Tecnológica "Universidades Agregando Valor" (Dirección Nacional de Desarrollo Universitario y Voluntariado – Sec. de Políticas Universitarias - Ministerio de Educación y Deportes de la República Argentina), se llevó a cabo el proyecto "Simulador de expansión urbana basado en autómatas celulares" con el objetivo de desarrollar una aplicación de simulación computacional basada en modelos de autómatas celulares (AC), adaptable y extensible, para el estudio y comprensión del fenómeno del crecimiento y expansión urbana. Resultado de este proyecto, surge la herramienta SACcity v\_2.7.6, desarrollada por un equipo interdisciplinario de trabajo, dada la necesaria convergencia de aportes tanto del área de la simulación y modelización computacional, de la geografía urbana y análisis espacial mediante tecnologías de la información geográfica y del conocimiento sobre planificación y ordenamiento territorial y procesos ambientales. Esta aplicación constituye la segunda versión de la herramienta SACcity, siendo que en 2011 se había desarrollado la primera versión en el marco de un Trabajo Final de la carrera Ingeniería de Sistemas (UNICEN), la cual se ejecutaba en ArcGIS 9.3 puesto que fue desarrollada en utilizando ArcGIS Engine 9.3.

SACcity es una herramienta computacional apropiada para el estudio del crecimiento y expansión urbana mediante la simulación de escenarios futuros, de modo de poder anticipar el posible patrón de expansión de una ciudad. La posibilidad de definir las propias variables que afectan al crecimiento urbano, de agruparlas en factores y ponderarlos entre ellos, permite analizar cuál es el factor y las variables que más influyen en la ecuación. El modelo incorpora para su ejecución, la configuración del grado de aleatoriedad y de los factores de difusión y propagación, brindando como resultado una imagen con las celdas convertidas en cada iteración y una matriz de confusión para evaluar la validez de la simulación.

SACcity está dirigido a planificadores urbanos, geógrafos, científicos ambientales, desarrolladores, investigadores y otros interesados en la planificación y gestión territorial de áreas urbanas.



El presente documento tiene como objetivo presentar la Guía de Usuario de SACcity para que pueda ser empleado en diferentes contextos urbanos. En este caso se expondrá un ejemplo para la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina.

## 2. Introducción

Frente a los actuales patrones de crecimiento y expansión de las ciudades, aparecen entre las principales preguntas ¿cómo continuará creciendo la ciudad según la tendencia actual? ¿Los sitios hacia donde crecería serán los más convenientes? ¿Cuáles serán las áreas más afectadas?, entre otros interrogantes. Una manera de intentar responderlos, es poder modelizar el crecimiento urbano en vistas a identificar aptitudes de expansión que permitan desarrollar una estrategia de planificación y ordenamiento territorial sustentable.

SACcity surge como una herramienta computacional compatible con Sistemas de Información Geográfica (SIG), basada en los modelos de AC, desarrollada con el fin de estudiar y comprender en profundidad el fenómeno del crecimiento y expansión urbana.

Las herramientas basadas en AC cuentan con experiencias exitosas en otras partes del mundo, cuyos resultados han sido aplicados en su comunidad como un insumo para orientar a los planificadores locales en la regulación y ordenamiento del crecimiento. Del mismo modo, se espera que los resultados que puedan obtenerse al emplear SACcity, sean empleados para evaluar posibles readecuaciones de los planes de desarrollo urbano de diferentes ciudades, en vistas a orientar la reutilización de zonas degradadas y abandonadas, evitar el crecimiento urbano desmesurado, asegurar un urbanismo de usos del suelo mixtos y procurar la conservación, renovación y reutilización apropiada de la herencia cultural y natural urbana.

El modelo utilizado, modelo de AC combinado, es una adaptación del desarrollado por White y Engelen (1997)<sup>1</sup>, al que se le introducen los factores de difusión y propagación considerados en el modelo de Clarke *et al.* (1997)<sup>2</sup>, más la incorporación del método de decisión multicriterio basado

---

<sup>1</sup>White, R. y Engelen, G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 24. Nº 2. p. 235–246.

<sup>2</sup>Clarke, K. C.; Hoppen, S. y Gaydos, L. J. A self modifying cellular automaton of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*. Vol. 24. Nº 2. 1997. p. 247-261.

en el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, del inglés Analytic Hierarchy Process) que permitirle la ponderación de variables y factores. El mismo, está compuesto por: un **conjunto finito de estados**: cada celda tiene dos estados posibles, urbanizado o no-urbanizado, es decir, que solo es posible la transición del estado no-urbanizado a urbanizado; la **vecindad**: se empleó una matriz de  $9 \times 9$  celdas, lo que significa una vecindad de 81 celdas; **reglas de evolución**: el número  $n_i$  de celdas que conforman el autómata, que deben tener un estado "urbanizado" en el tiempo  $t$ , es considerado como un parámetro externo que determina la cantidad de cambios que van a tener lugar en el autómata. El modelo determina las celdas en las cuales el potencial para la transformación al estado "urbanizado" es la más alta y distribuye  $n_i$  entre esas celdas; y un **reloj virtual de cómputo**: cada iteración del modelo supone una aplicación de la regla de evolución, así, cada iteración representa una unidad de tiempo de crecimiento.

Y puesto que contar con la situación real de las áreas urbanas permite validar el resultado, se emplean dos métodos de comparación de las simulaciones: la comparación visual de los mapas resultantes y una evaluación cuantitativa mediante matrices de confusión, la cual permite deducir cuatro medidas relativas a la exactitud de los resultados: exactitud global, exactitud del usuario, exactitud del productor y coeficiente Kappa.

### 3. Requerimientos técnicos

SACcity es una aplicación desarrollada en lenguaje Java, por lo que se requiere la última versión de Java.

Es compatible con los siguientes sistemas operativos:

- Windows 10 (8u51 y superiores)
- Windows 8.x (escritorio)
- Windows 7 SP1
- Windows Vista SP2
- Windows Server 2008 R2 SP1 (64 bits)
- Windows Server 2012 y 2012 R2 (64 bits)
- Mac con Intel que ejecuta Mac OS X 10.8.3+, 10.9+
- Oracle Linux 5.5+1
- Oracle Linux 6.x (32 bits), 6.x (64 bits)<sup>2</sup>
- Oracle Linux 7.x (64 bits)<sup>2</sup> (8u20 y superiores)
- Red Hat Enterprise Linux 5.5+1, 6.x (32 bits), 6.x (64 bits)<sup>2</sup>
- Red Hat Enterprise Linux 7.x (64 bits)<sup>2</sup> (8u20 y superiores)
- Suse Linux Enterprise Server 10 SP2+, 11.x
- Suse Linux Enterprise Server 12.x (64 bits)<sup>2</sup> (8u31 y superiores)
- Ubuntu Linux 12.04 LTS, 13.x
- Ubuntu Linux 14.x (8u25 y superiores)
- Ubuntu Linux 15.04 (8u45 y superiores)
- Ubuntu Linux 15.10 (8u65 y superiores)

Se requiere como mínimo las siguientes características del equipo: memoria RAM de 128 MB, espacio en disco de 124 MB para JRE, 2 MB para Java Update, y 30 MB para la aplicación, con un procesador Pentium 2 a 266 MHz.

SACcity no requiere instalación previa ni conexión a internet, simplemente se descarga la carpeta y con doble clic sobre la aplicación se accede a la ventana principal desde donde se la comenzará a utilizar. Es independiente de otro software, sin embargo, la operación de preparación de datos y visualización de resultados requieren de un software SIG (como ArcGIS o QGIS).

## 4. Escenarios futuros

Esta guía presenta los pasos necesarios a llevarse a cabo para simular el crecimiento y la expansión urbana de una ciudad en SACcity.

Se encuentra estructurado en tres grandes etapas: A. Preparación de los datos, B. Calibración y simulación, C. Análisis y visualización de los resultados. La mayor parte del proceso de modelización en este tutorial emplea ArcGIS 10.6 (no excluyente), mientras que SACcity se implementa para el proceso de simulación.



### Caso ejemplo: Ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina.

Este documento constituye una guía para modelizar procesos de crecimiento y expansión urbana en ciudades, utilizando SACcity v.2.7.6. A continuación se irán recorriendo los pasos necesarios a realizar tomando como ejemplo el caso de la ciudad de Tandil.

**Nota:** La cantidad de variables y factores seleccionados en esta práctica es básica para que resulte sencilla la comprensión del proceso de simulación. Sin embargo, se recomienda emplear una mayor cantidad de variables y factores, a los fines de aproximarse lo más posible a los fenómenos de la realidad.



## 4.1. Preparación de datos

*Esta etapa deberá  
llevarse a cabo  
utilizando un SIG*

### 4.1.1. Área de estudio

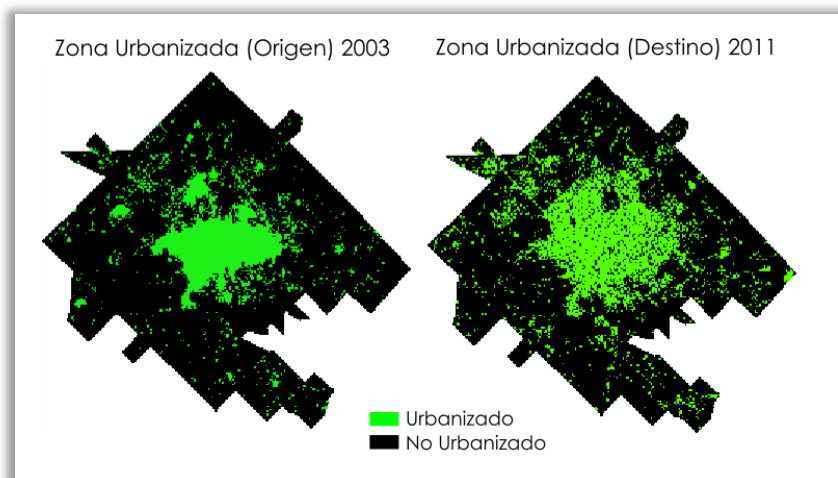
El primer paso será seleccionar el área de estudio con límites geográficamente definidos, los cuales deberán coincidir con el área geográfica de las variables de crecimiento urbano.

Todas las variables deberán estar homogeneizadas a una matriz de idénticas dimensiones, es decir, de la misma cantidad de filas y columnas, con una misma extensión, resolución espacial y sistema de proyección.

### 4.1.2. Zonas urbanizadas

Seguidamente se deben obtener dos imágenes TIFF del área urbanizada, que se utilizarán como la "Zona Urbanizada de Origen" y la "Zona Urbanizada de destino", las que se utilizarán para calibrar el modelo.

En este ejemplo se consideró como imagen origen, la mancha urbana de la ciudad en el año 2003, y como imagen destino, la mancha urbana de Tandil en el año 2011.



La mancha urbana de una ciudad puede obtenerse mediante distintos procesamientos como clasificación supervisada/no supervisada o mapeo de usos del suelo.

Estas imágenes también deberán estar homogeneizadas a una matriz de idénticas dimensiones, es decir, de la misma cantidad de filas y columnas, con una misma extensión, resolución espacial y sistema de proyección.

### 4.1.3. Restricciones

Seguidamente y con el mismo formato y condiciones indicadas en 4.1.2, se podrá incorporar una imagen de restricciones (aquella capa de zonas donde no se permite la urbanización, ya sea por la presencia de cuerpos de agua o reservas naturales, sitios reservados a otros usos del suelo, etcétera).

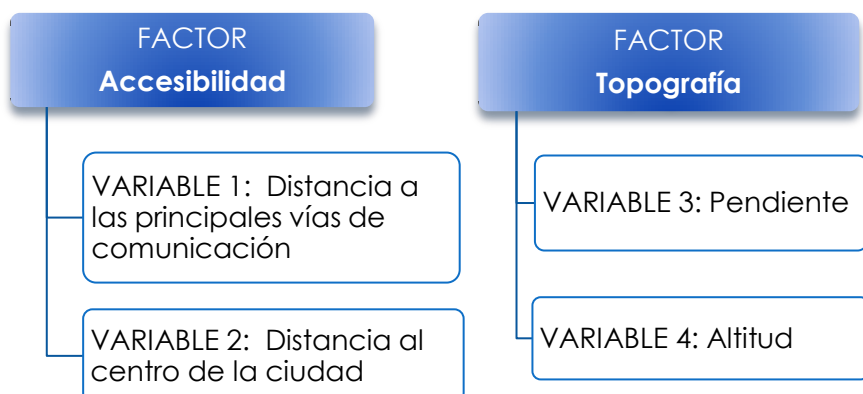
Para Tandil se tuvieron en cuenta espacios verdes públicos y grandes parcelas destinadas a actividades de servicios públicos.



### 4.1.4. Variables y factores

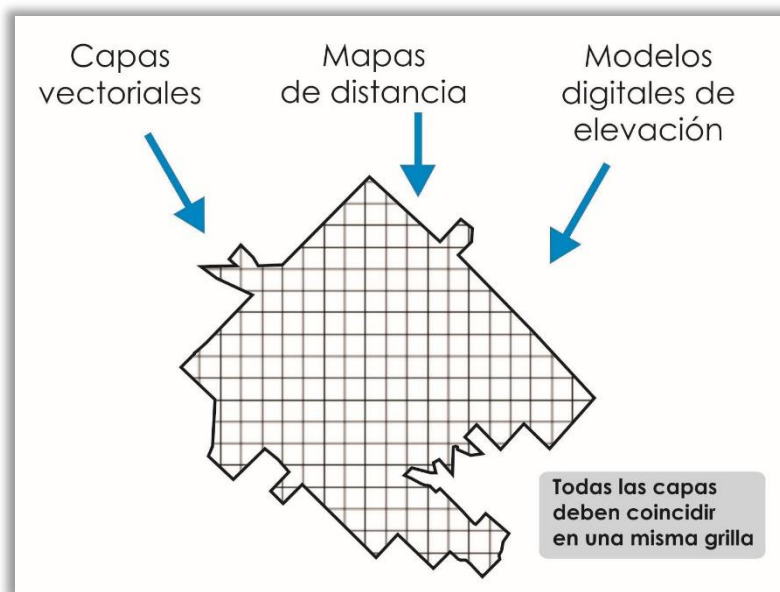
El siguiente paso es seleccionar los factores que se consideren que más influyen en el crecimiento urbano, los que estarán compuestos por variables, con un mínimo de 1 variable por cada factor.

Para el caso ejemplo se seleccionaron 2 factores (accesibilidad y topografía), cada uno de ellos conformado por 2 variables:



Cada variable deberá estar representada en forma digital en un SIG (se puede partir de una capa vectorial o ráster pero finalmente se deberá llevar todas las capas a un ráster en formato TIFF).

Como ya se ha mencionado, al igual que las capas de zonas urbanizadas y de restricciones, las variables deberán estar homogeneizadas a una matriz de idénticas dimensiones, es decir, de la misma cantidad de filas y columnas, con una misma extensión, resolución espacial y sistema de proyección.



Para ello se recomienda seguir los siguientes pasos:

#### 4.1.4.1. Tipo de variables

Variables continuas,  
discretas o  
cualitativas

En el caso de partir de variables de tipo **continuas** como cercanía/lejanía a vías de comunicación, centro de la ciudad, altitud, pendiente, etcétera, se procederá a confeccionar un mapa de distancia.

En el caso de partir de variables de tipo **discretas o cualitativas** como usos del suelo, áreas con restricciones, espacios públicos, etcétera, que se encuentren en formato vectorial, deberán ser convertidas a formato ráster.

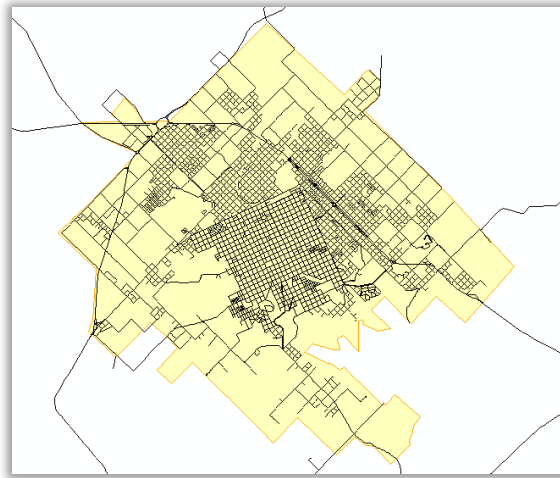
Finalmente cada uno de las capas resultantes (en formato GRID) deberá ser convertida a formato TIFF, que es el tipo de formato que admite SACcity.

#### 4.1.4.2. Mapas de distancia

##### Ejemplo en ArcGIS

En **ArcGIS** abrir ArcToolbox e ingresar a la herramienta: Spatial Analyst Tools | Distance | Euclidean Distance

*Ejemplo:* Para confeccionar el mapa de la variable "Distancia a las principales vías de comunicación", se partió de la capa vectorial de calles de Tandil y la capa vectorial que delimita el área de estudio (ambas con el mismo sistema de referencia, pero diferente extensión espacial).



Y se siguen las siguientes indicaciones, en:

'Input ráster o feature source data' se ingresa la capa de calles de la ciudad (*Calles\_2014*),

'Output distance raster' se busca la carpeta donde se guardará el raster resultante,

'Name' se le otorga un nombre de menos de 13 caracteres<sup>3</sup> (*dist\_viascomu*).

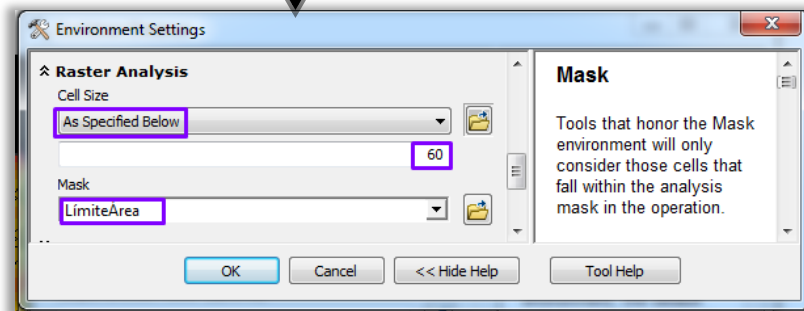
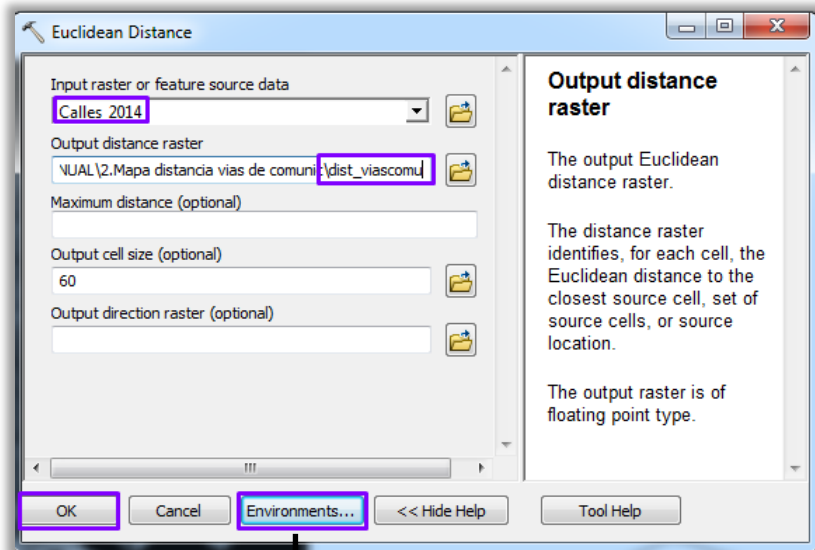
Ingresando en 'Environments | Raster Analysis' en:

'Cell Size' señalando la opción 'As Specified Below' ya agregar el tamaño del pixel (60 en este caso)

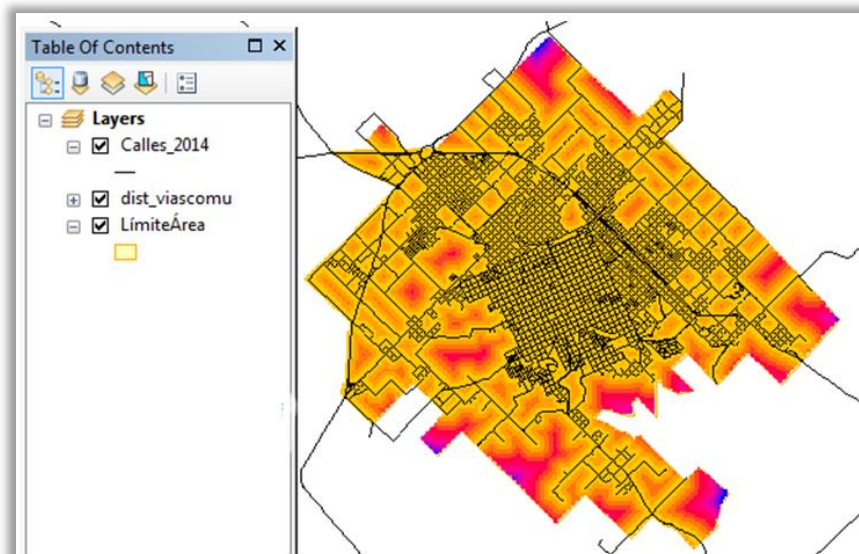
'Mask' se agrega la capa que delimita el área de estudio (*LimiteÁrea*) de manera de asegurar que el nuevo ráster posea la misma extensión que el área de estudio.

Al aceptar se vuelve a la ventana inicial (el resto de las opciones puede dejarse por defecto) y de le da 'Ok'.

<sup>3</sup> Se recomienda utilizar nombres cortos y evitar el uso de signos y caracteres especiales.



Como resultado se obtiene una capa ráster (*dist\_viascomu*) en formato GRID (botón derecho sobre la capa 'Properties | Source | Format') con la misma extensión espacial del área de estudio (LímiteÁrea).



#### 4.1.4.3. Formato vectorial a ráster

##### Ejemplo en ArcGIS

En **ArcGIS** abrir ArcToolbox e ingresar a la herramienta: Conversion Tools | To Raster | Polygon to Raster

Para el caso de Tandil, se utilizó una capa de pendientes en formato vectorial (polígonos). Para ello se ingresa en:

'Input Feature' la capa vectorial (*pend*),

'Value field' el atributo que se desea transformar a ráster (en este caso el que posee el valor de las pendientes *GRIDCODE*),

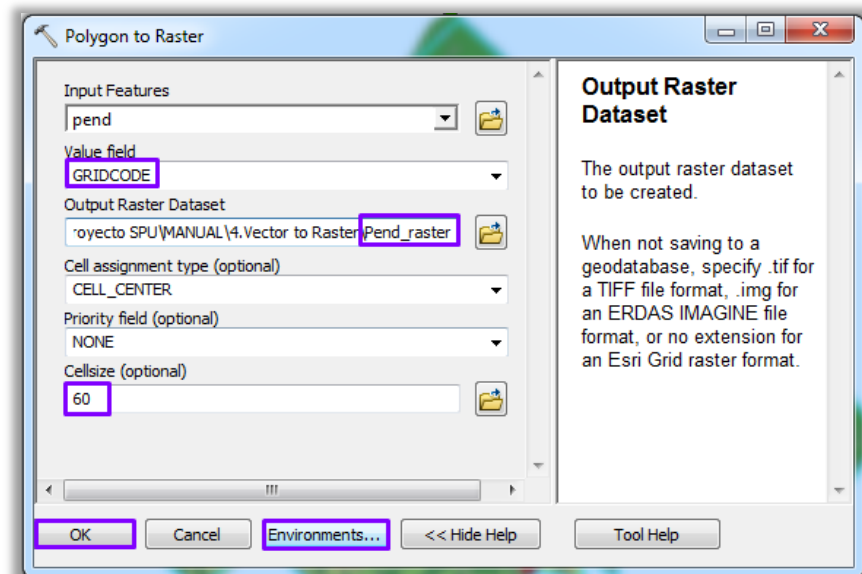
'Output Raster Dataset' se busca la carpeta en que se lo guardará y se coloca un nombre (de menos de 13 caracteres),

'Cell assignment type (optional)' se sugiere *CELL\_CENTER*,

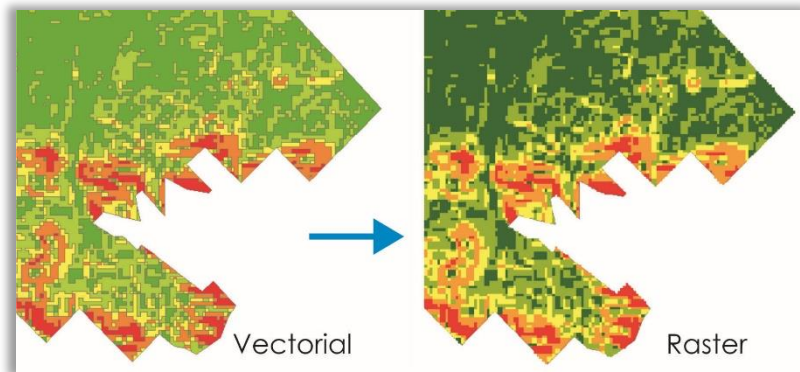
'Priority field' se sugiere *NONE*,

'Cell size (optional)' se colocará el tamaño del celda definido (60 en este caso),

'Environments' se procede de igual manera a la indicada en 4.1.4.2 y se le da 'Ok'.



Se pasa así de un formato vectorial a un formato ráster, en formato GRID (ello se lo puede verificar en las propiedades de la capa (pestaña 'Source')).

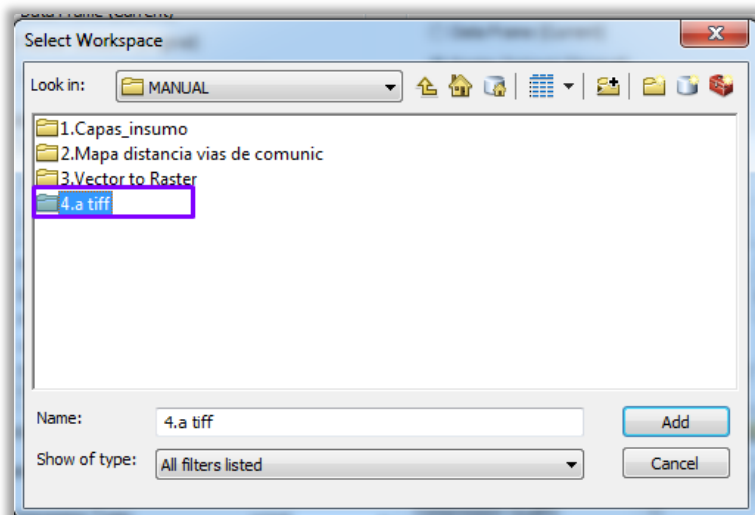


#### 4.1.4.4. Formato GRID a formato TIFF

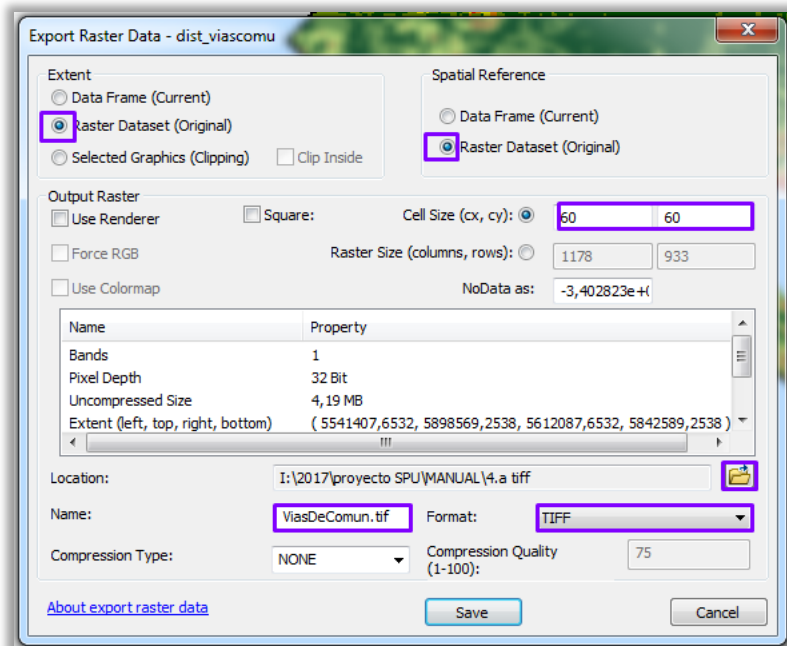
##### Ejemplo en ArcGIS

En **ArcGIS** pulsar el botón derecho sobre el nombre de la capa e ingresar a la opción 'Data | Export Data'.

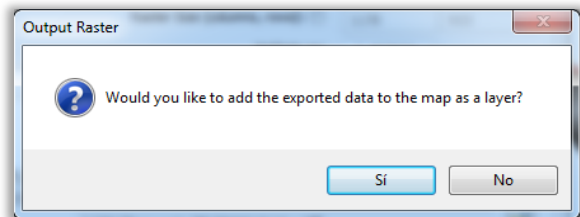
*Ejemplo:* se utiliza la capa elaborada en el paso 4.1.4.2. (*dist\_viascomu*). Al ingresar en la ventana se debe verificar que en 'Extent' y en 'Spatial Reference' se encuentre tildada la opción Raster Dataset (Optional), en tamaño del celda se asignará el tamaño (60 este caso) y en Environments se procede de igual manera a la indicada en 4.1.4.2. En 'Location' se buscará la carpeta donde se lo guardará, procurando que esta quede marcada en el interior del espacio de la pantalla del explorador sin hacer doble clic para que la carpeta se abra.



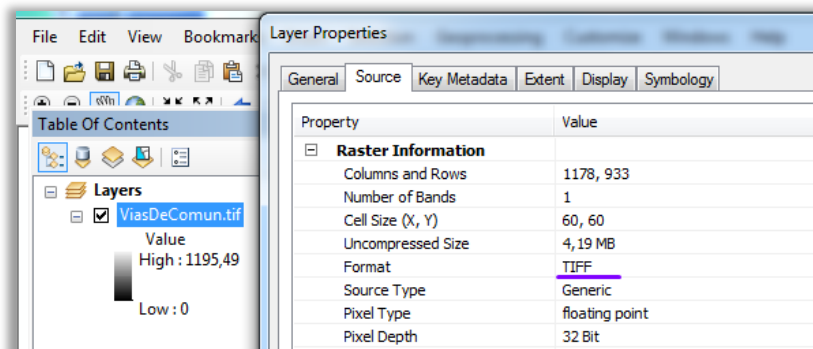
En 'Name' se coloca el nombre del nuevo archivo (*ViasDeComun*) y en 'Format' se indicará el formato de salida TIFF, el resto de las opciones pueden dejarse por defecto, y se le da 'Save'.



A continuación aparecerá la siguiente notificación, para agregar el nuevo archivo entre las capas visualizadas. Si opta por 'No' el archivo se guardará en la carpeta indicada pero lo visualizará en ese momento.




El nuevo formato puede verificarse entre las propiedades de la capa (botón derecho sobre la capa 'Properties | Source').

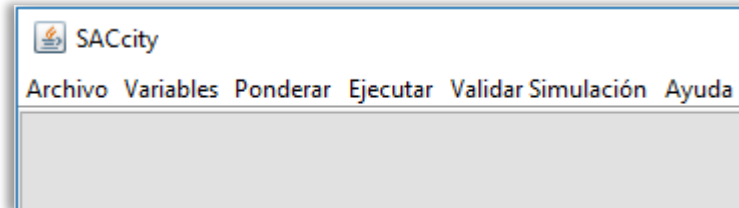




## 4.2. SACcity

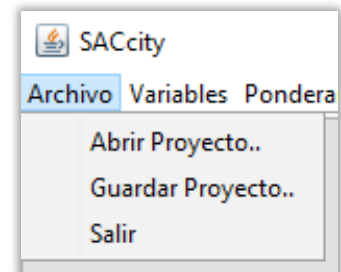
### 4.2.1. Barra de herramientas

Una vez descargado SACcity se abrirá la carpeta `sacCITY_V2.7.6` y haciendo doble clic sobre el archivo  `saccity_v2.7.6` se abrirá la ventana del programa, cuya barra de herramientas contiene las siguientes opciones:

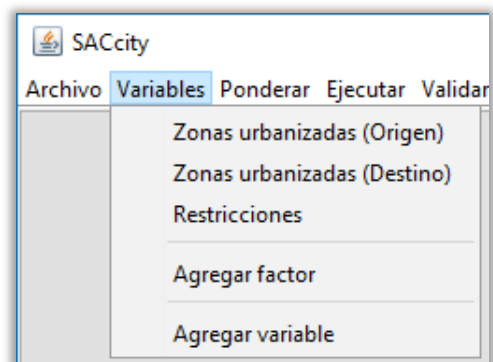


Archivo: posee tres opciones

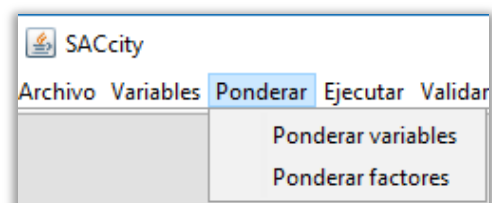
**a. Abrir Proyecto** para recuperar un proyecto previamente guardado; **b. Guardar Proyecto** para poder volver a trabajar sobre un proyecto conservando las variables y factores incorporadas, las capas cargadas, la ponderación definida y la configuración del modelo combinado; y **c. Salir** para cerrar el proyecto y el programa (si no se guardó el proyecto y se le da Salir, se perderán los cambios realizados).



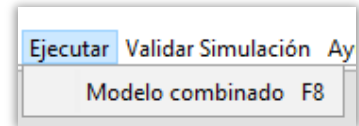
Variables: en esta pestaña se cargan las capas de zonas urbanizadas (origen y destino), la capa de restricciones, los nombres de los factores y las variables y sus respectivas capas (este punto se ampliará en 4.2.2.1.).



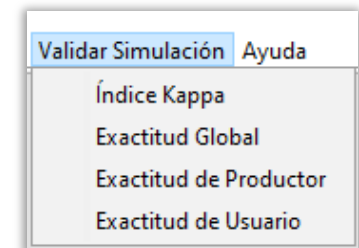
Ponderar: aquí se ponderan las variables y los factores definidos (este punto se ampliará en 4.2.2.2.).



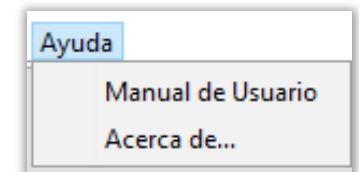
Ejecutar: una vez cargada la información anterior, se configura el Modelo combinado que incluye el número de iteraciones, la cantidad de celdas a transformar en cada una, el grado de aleatoriedad, el factor de difusión y de propagación, el umbral, para obtener los resultados de la simulación (este punto se ampliará en 4.2.2.3.).



Validar Simulación: aquí se obtienen los resultados de la matriz de confusión: los índices Kappa, de Exactitud Global, de Productor y de Usuario (este punto se ampliará en 4.2.2.4.).



Ayuda: aquí encontrará el presente manual y los datos del equipo que desarrolló SACcity v.2.7.6.



## 4.2.2. Calibración

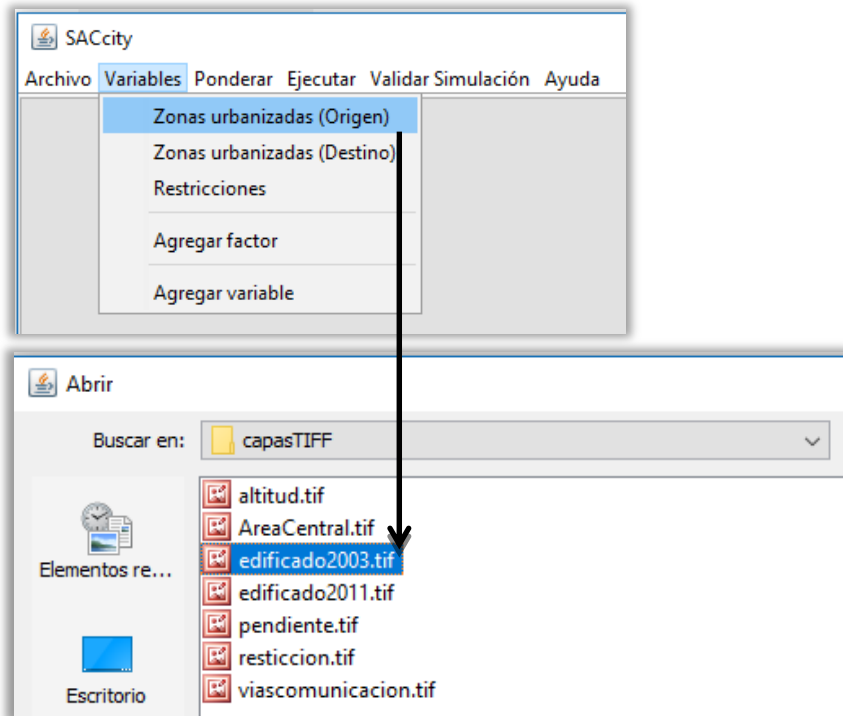
La calibración es un paso fundamental, para validar el modelo, es decir, para obtener escenarios que se asemejen a la realidad, de modo que tras la calibración del mismo en un espacio de tiempo pasado, éste será capaz de reproducir dinámicas pasadas para posteriormente proyectar la tendencia observada hacia el futuro.<sup>4</sup>

En esta etapa, se trabajará con las dos imágenes de Zonas urbanizadas, con la de Origen y la de Destino, a fin de explorar cual es la calibración, es decir, cuáles son las variables y factores, las ponderaciones y el valor de aleatoriedad, difusión, propagación, que mejor se ajusta y predice la imagen de destino. A partir de allí, se trabajará en la elaboración de escenarios futuros.

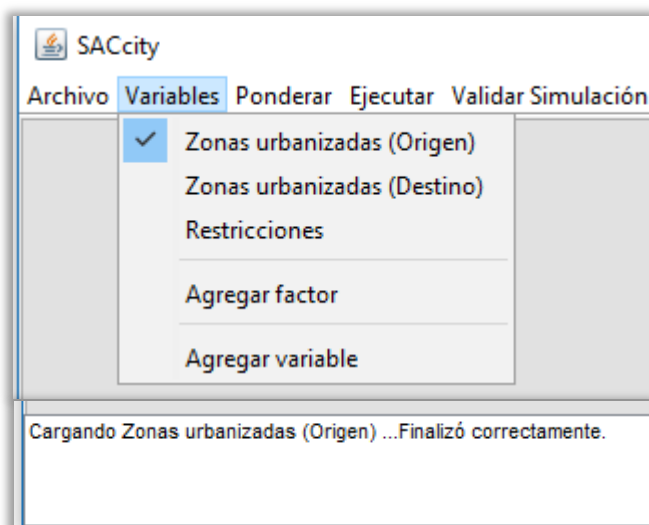
<sup>4</sup>González, P. B., Benavente, F. A., & Delgado, M. G. (2015). Propuesta de validación parcial de modelos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares mediante análisis de sensibilidad. Ciencias Espaciales, 8(2), 409-430. <https://lamjol.info/index.php/CE/article/view/2090>

#### 4.2.2.1. Variables

En esta pestaña lo primero que se cargará es la Zona urbanizada (origen). Para ello se hace clic en 'Variables | Zonas urbanizadas (Origen)' y se busca el archivo correspondiente en la carpeta en que se encuentra guardado (*edificado2003.tif*).



Si la capa se cargó correctamente, aparecerá con un tilde y en la parte inferior de la ventana de SACcity indicará que la carga ha finalizado correctamente.

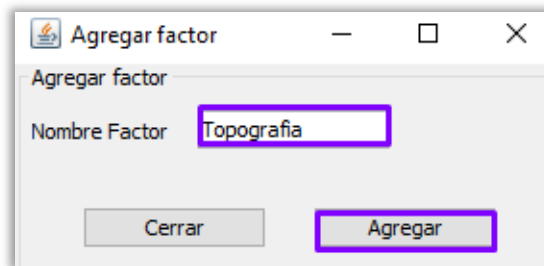


### Agregar factor

En caso de equivocación, puede ingresar de la misma manera y reemplazarla por la correcta.

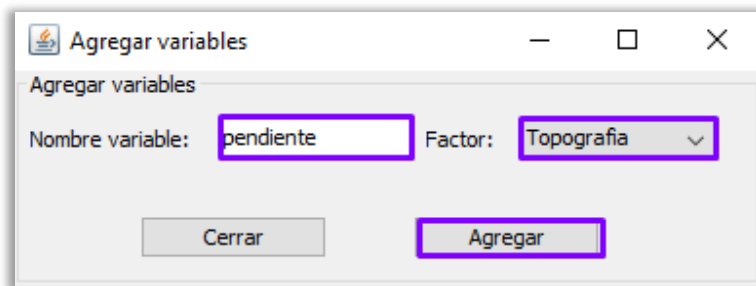
De igual forma se procederá con la capa correspondiente a Zonas urbanizadas (Destino) y Restricciones.

A continuación se agregarán los FACTORES definidos. Para ello, se hace clic en 'Variables | Agregar factor', en 'Nombre Factor' se coloca su denominación (*Topografía*) y se hace clic en 'Agregar'. De igual manera se procede con el resto de los factores que se desee incorporar.

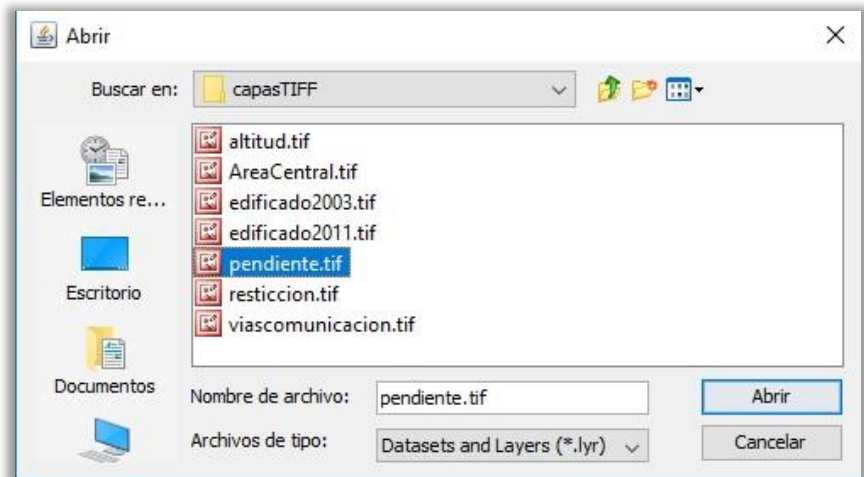


### Agregar variables

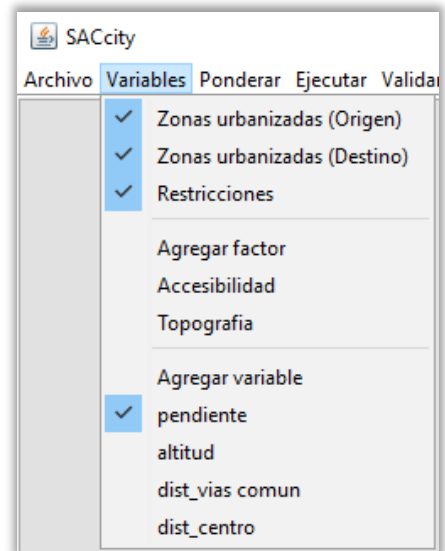
Seguidamente se agregan las variables definidas haciendo clic en 'Variables | Agregar variable'. En la ventana emergente, se indicará en 'Nombre variable' la denominación otorgada (*pendiente*) y en 'Factor' se abrirá el menú desplegable para indicar a que factor corresponde la variable ingresada, y se le da 'Agregar'. Así se procederá con cada una de las variables.



Seguidamente, se cargan las capas de las variables en formato .tif haciendo clic en 'Variables | nombre de la variable (*pendiente*)' y buscándola en la carpeta en que esté guardada.

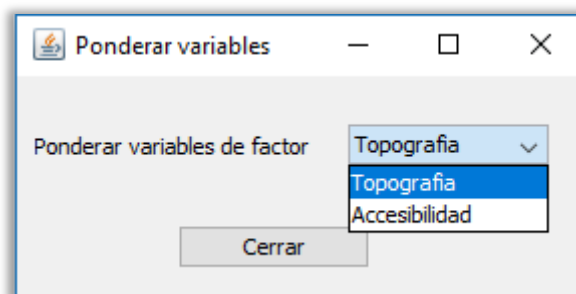


Si la capa se cargó correctamente, aparecerá con una tilde y en la parte interior de la ventana de SACcity indicará que la carga ha finalizado correctamente. De igual manera se repetirá este paso para cada una de las capas de las variables.



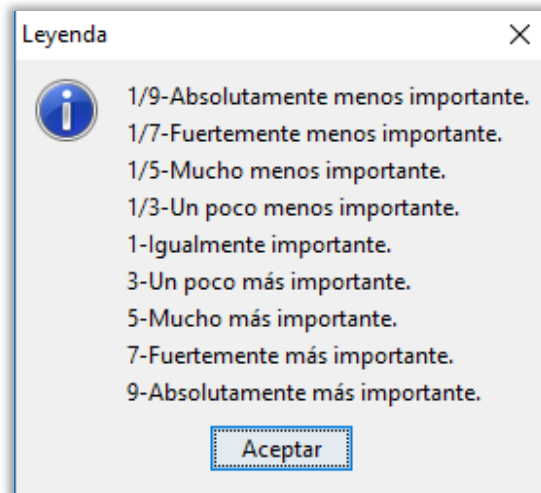
#### 4.2.2.2. Ponderar

Primeramente se ponderan las variables según el factor. Ingresando en 'Ponderar | Ponderar variables', se abre la siguiente ventana, en la que se indica, desde el menú desplegable, a que factor corresponden las variables que se ponderará (*Topografía* en este caso).



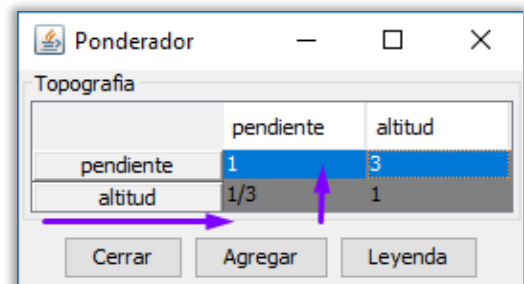
Seguidamente, se indica el grado de importancia de una variable con respecto a otra. Para ello, se aplica la escala de importancia siguiendo la propuesta de Saaty del modelo de decisión multicriterio basado en el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) utilizado para realizar comparaciones pareadas y establecer grados de importancia. De este modo se puede ir reduciendo la complejidad del estudio. El AHP utiliza una escala de 1 a 9 con la que se evalúa la preferencia relativa entre cada par de criterios o variables en este caso.

Basado en ello, en SACcity se propone la siguiente escala de valoración:

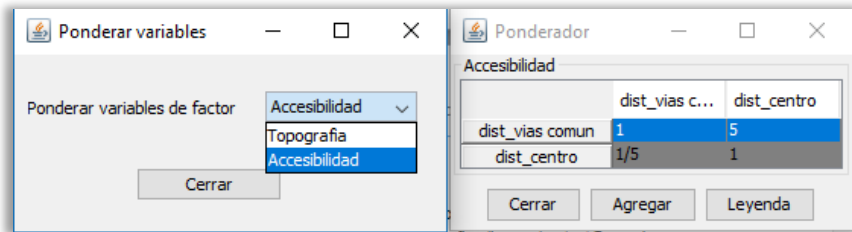


La forma de leerlo, es ingresar por las filas y establecer la relación de importancia con la columna. De este modo se entiende por ejemplo que la

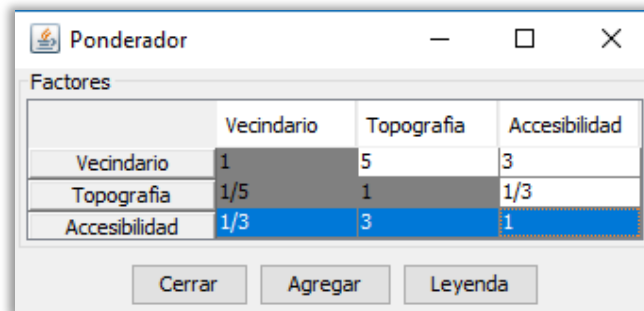
*pendiente* es 3 → 'Un poco más importante' que la *altitud*, y por lo tanto la *altitud* es 1/3 → 'Un poco menos importante' que la *pendiente*. Una vez que se completa uno de los valores (3 por ejemplo), el otro (1/3 en este caso) se autocompleta automáticamente.



Al terminar de ponderar las variables de un factor, se pasa al siguiente desde el menú desplegable. Y una vez que se finaliza se le da 'Cerrar'.



A continuación, ingresando en 'Ponderar | Ponderar factores', y siguiendo el mismo procedimiento y escala de importancia se ponderan los factores entre sí. Allí encontrará los factores ingresados más el factor Vecindario, ya incorporado por el programa (basado en el modelo combinado que se utiliza), lo cual pondrá en valor cuán importante es o no que las celdas vecinas se encuentren urbanizadas con respecto a otros factores.



El factor Vecindario considera una vecindad Moore de radio 4, lo que significa que el valor del efecto del vecindario de una celda depende de las 80 celdas circundantes a la misma, con un efecto de decaimiento paulatino desde las celdas más cercanas hasta las más alejadas, planteado en otros modelos basados en AC (White *et al.*, 1997<sup>5</sup>; White y Engelen, 2000<sup>6</sup>; Barredo *et al.*, 2003<sup>7</sup>).

0.11	0.22	0.45	0.93	1.25	0.93	0.45	0.22	0.11
0.22	0.45	0.93	1.87	2.5	1.87	0.93	0.45	0.22
0.45	0.93	1.87	3.75	5	3.75	1.87	0.93	0.45
0.93	1.87	3.75	7.5	10	7.5	3.75	1.87	0.93
1.25	2.5	5	10	0	10	5	2.5	1.25
0.93	1.87	3.75	7.5	10	7.5	3.75	1.87	0.93
0.45	0.93	1.87	3.75	5	3.75	1.87	0.93	0.45
0.22	0.45	0.93	1.87	2.5	1.87	0.93	0.45	0.22
0.11	0.22	0.45	0.93	1.25	0.93	0.45	0.22	0.11

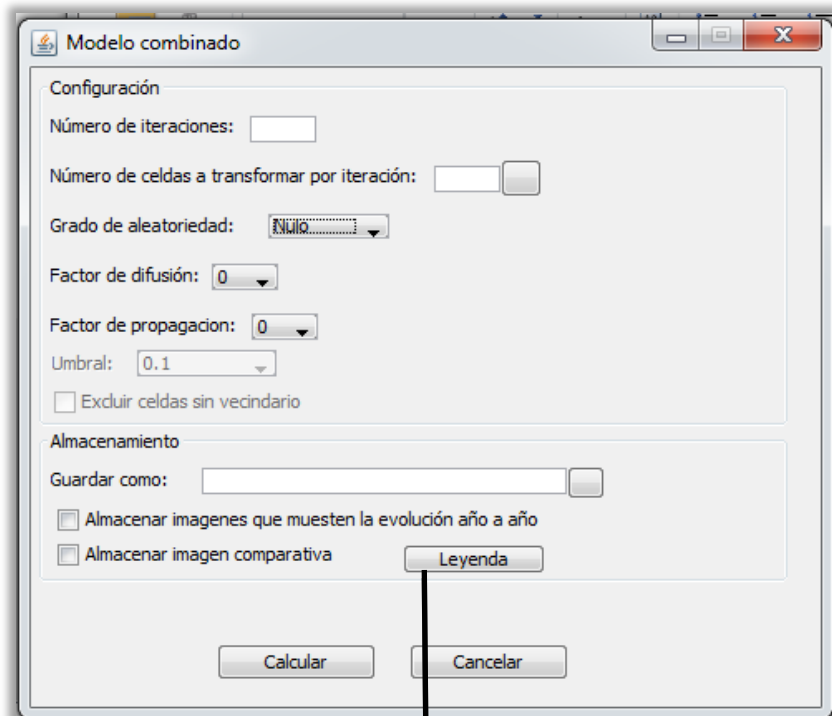
<sup>5</sup> White, Roger; Engelen, Guy y Uljeelnge. "The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land-use dynamics". *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 24, N° 3, 1997, pp. 323-343.

<sup>6</sup> White, Roger y Engelen, Guy. "High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems". *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 24, N°5, 2000, pp. 383-400.

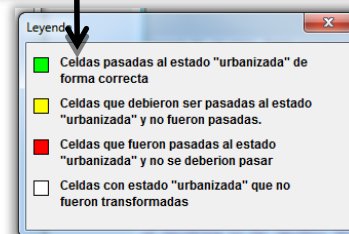
<sup>7</sup>Barredo, Jose; Kasanko, Marjo; McCormick, Niall y Lavalle, Carlo. "Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata". *Landscape and UrbanPlanning*, Vol. 64, 2003, pp. 145-160.

### 4.2.2.3. Ejecutar

En esta etapa de ejecuta el modelo combinado, ingresando en 'Ejecutar | Modelo combinado' (o bien apretando la tecla F8). Este paso se divide en 'Configuración' y en 'Almacenamiento'.



La leyenda indica lo que representa cada color en la imagen compartiva resultante.



En la parte de configuración se deben completar los 6 campos siguientes:

**A. 'Número de iteraciones':** se estima cada cuánto tiempo se transforman celdas al estado urbanizado.

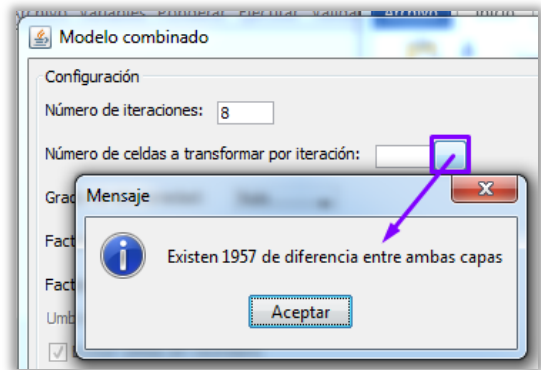
En este caso como comparamos el año 2003 con el 2011, indicaremos 8 iteraciones, una por año.

**B. 'Número de celdas a transformar por iteración':** haciendo clic en el recuadro de la derecha, se abrirá una ventana que le indicará la diferencia de cantidad de celdas urbanizadas entre la figura de origen (Zona



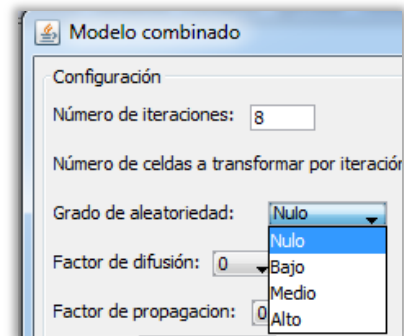
urbanizada (Origen)) y la de destino (Zona urbanizada (Destino)).

Como en el ejemplo son 1957 las celdas de diferencia, esa cantidad se la divide por la cantidad de iteraciones (8), resultando 244,625, o sea, que podemos colocar el valor de 245 –se debe introducir un valor entero sin decimales-.



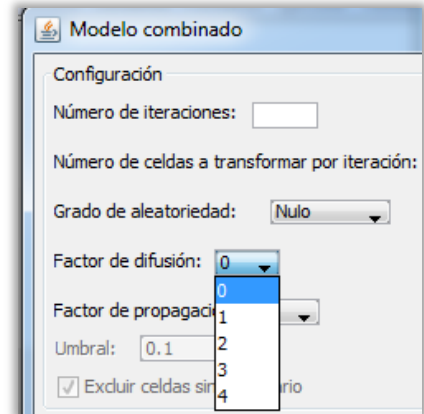
**C. Grado de aleatoriedad'**: este parámetro permite introducir un término de perturbación aleatoria, para introducir de cierto modo en el cálculo aquel conjunto de causas explicativas de las variables que resultan desconocidas o incontrolables. En SACcity es posible elegir entre 4 grados de aleatoriedad NULO, BAJO, MEDIO y ALTO.

NULO: no se introduce ninguna perturbación; BAJO: para valores que oscilan entre 0 y 0.1; MEDIO: para valores en el rango de 0 a 0.3; ALTO: para valores entre 0 y 0.6.



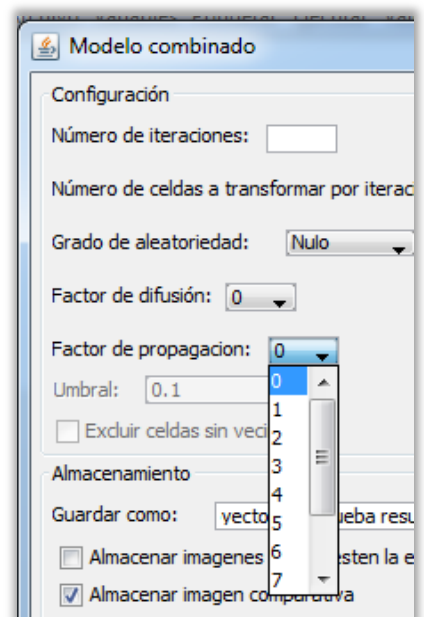
Los factores de difusión y propagación, colaboran en evitar que, luego de una cierta cantidad de iteraciones, las celdas que van a pasar al estado "urbanizada", respondan a un patrón exclusivamente de difusión contigua, introduciendo diferentes grados de fragmentación y dispersión, aumentando de esta manera el grado de similitud con los procesos que acontecen en la realidad.

**D. 'Factor de difusión':** este factor, que puede tomar los valores 0, 1, 2, 3 y 4, es utilizado en el momento que el estado de una celda está por ser transformado. El valor indica el radio de las celdas vecinas en el que se identificará si ya hay una celda convertida; si ya la hay, la celda no será transformada, y si en ese radio ninguna celda fue transformada entonces una de ellas pasará al estado "urbanizada". Por ejemplo, si se elige un factor con valor 2, cuando se busquen las posibles celdas a ser transformadas, se revisará si en las celdas de radio 2 alguna celda ya fue convertida, y si esto no ocurrió una de ellas será pasada al estado "urbanizado".

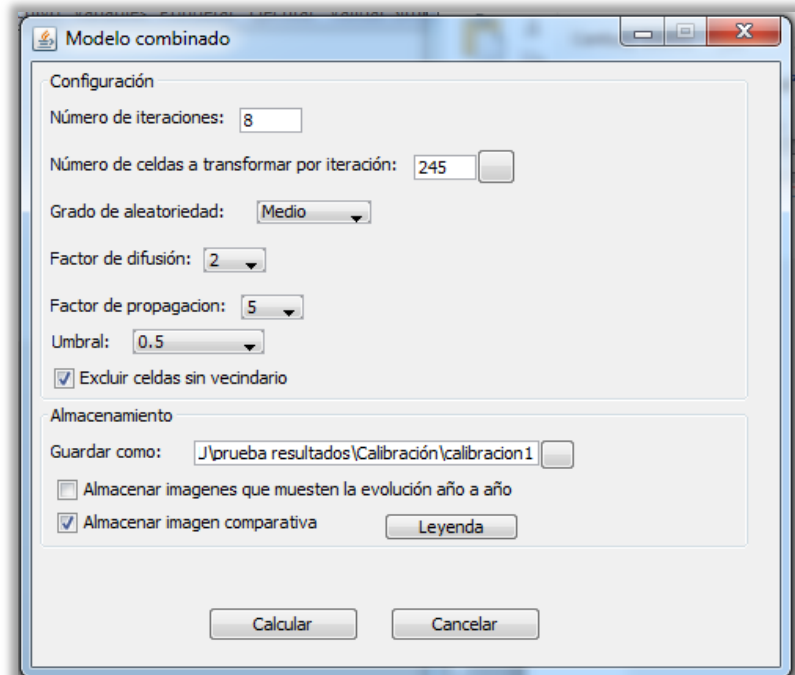


**E. 'Factor de propagación':** El factor de propagación es usado para regular el porcentaje de celdas que son pasadas al estado de urbanizada dentro de la cercanía o lejanía a las celdas urbanas existentes. Los valores van desde 0, donde la totalidad de las celdas a transformar serán escogidas según el valor potencial de transición calculado según la ponderación de las variables y factores, hasta 10, valor que significa que las celdas a transformar son elegidas sobre las que se encuentren cercas a las celdas urbanizadas independientemente de los potenciales de transición.

La cercanía o lejanía será computada en base al vecindario y valores de distancia asignada a las 80 celdas vecinas tal como se muestran en la [pág. 22](#).

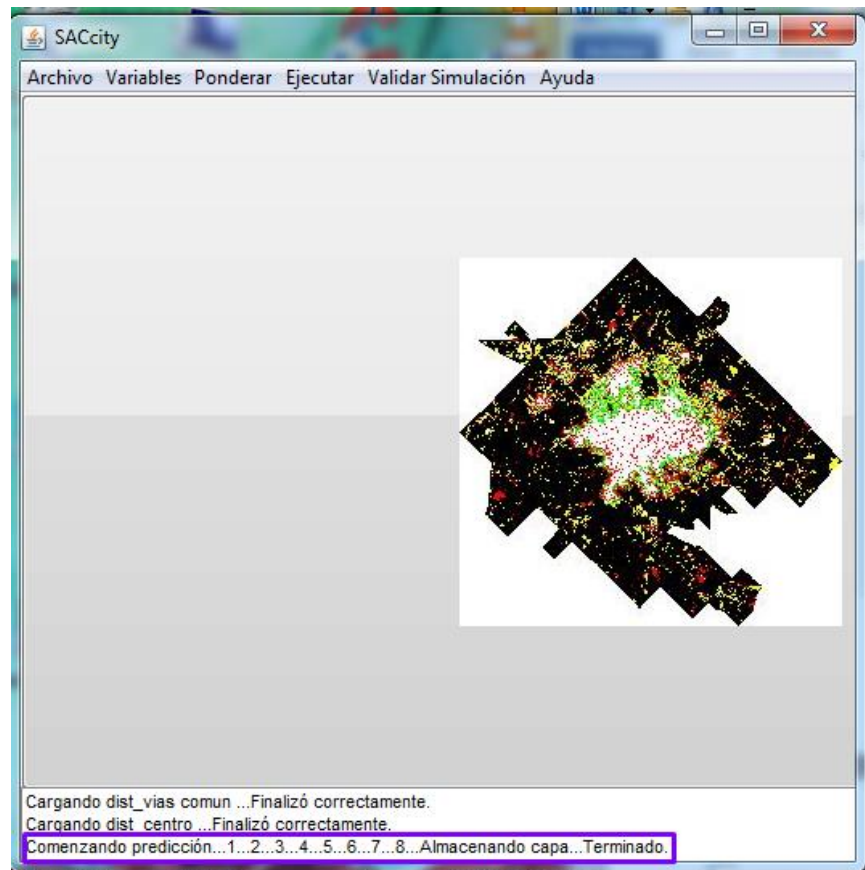


Ejemplo: calibración (y almacenamiento), para el caso de Tandil:



Una vez completada la configuración, se pasa a la parte de Almacenamiento, donde se localiza la carpeta donde se guardarán los resultados, se le otorga un nombre (*calibracion1* para el ejemplo) y dado que se está en la etapa de Calibración del modelo se tilda la opción 'Almacenar imagen comparativa' (la opción 'Almacenar imágenes que muestren la evolución año a año se utilizará en la simulación propiamente dicha'), y se le da 'Calcular'.

En el parte inferior de la venta de SACcity aparece el término 'Calculando predicción' y finalmente dirá 'Terminado' al tiempo que muestra la imagen comparativa.

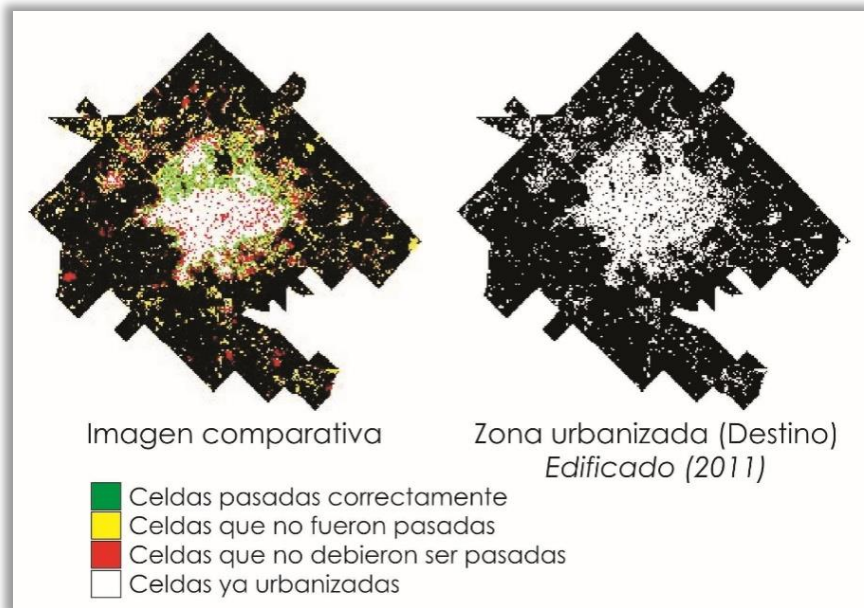


#### 4.2.2.4. Validación

Seguidamente a la ejecución del modelo combinado y la obtención de la imagen comparativa, se debe realizar la evaluación de los resultados, a fin de repetir el proceso de configuración del modelo combinado hasta obtener los valores de los índices más apropiados.

##### 4.2.2.4.1. Comparación Visual

Uno de los métodos que puede emplearse es el de evaluación cualitativa, por comparación visual, examinando visualmente la figura de la Zona urbanizada (Destino) (*Edificado 2011*) con la imagen obtenida por medio de la simulación con SACcity, de esta manera se obtendrá una primera evaluación de los resultados de la simulación, analizando la forma y dirección con la cual se expande la ciudad, y los aciertos y errores, lo que servirá para realizar nuevas calibraciones al modelo.



#### 4.2.2.4.2. Matriz de confusión

El otro método que se propone utilizar es de evaluación cuantitativa mediante una matriz de confusión. Este tipo de matrices permite relacionar dos series de medidas, en este caso las dos imágenes de Zonas urbanizadas (Origen) y (Destino). Cuando se ejecute la Simulación propiamente dicha se relacionará la Zona urbanizada (Origen) con la Zona urbanizada simulada.

Dicha matriz permite deducir cuatro medidas relativas a la exactitud de los resultados: la exactitud global, la exactitud del usuario, la exactitud del productor y el coeficiente Kappa, que SACcity las provee en la ventana 'Validar Simulación'.

Explicaremos en qué consiste esta matriz y pasaremos a obtener los resultados de los índices con SACcity.

Matriz de confusión hipotética

	Urbanizado	No urbanizado	Total	Exactitud del usuario	Error comisión
Urbanizado	250	30	280	89,29%	10,71%
No urbanizado	50	670	720	93,06%	6,94%
Total	300	700	1000		
Exactitud del productor	83,33%	95,71%			
Error omisión	16,67%	4,29%			

Como en estos casos se trabaja con una variable dicotómica, urbanizado/no urbanizado se empleará una matriz de confusión simple, con cuatro cruces posibles (Chuvienco, 2008<sup>8</sup>). En las columnas se colocarán los datos sobre la imagen de referencia, mientras que las filas los relativos a la imagen simulada, es decir, a las asignaciones del clasificador. Los valores en la diagonal (250, 670) indican los píxeles bien clasificados, y los valores fuera de la diagonal indican *errores de omisión* o *de comisión*.

A partir de valores como los expuestos, se pueden obtener los siguiente resultados:

Exactitud global: con este índice se obtiene una medida general de la clasificación, es decir, el porcentaje de píxeles bien clasificados, y se obtiene dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados (urbanizado + no urbanizado) por el número total de píxeles, expresado en porcentaje  $[(250 + 670)/1000]$ .

Exactitud del usuario: permite examinar la exactitud de las asignaciones de categorías individuales "urbanizado" y "no urbanizado" durante la simulación, y se expresa como el porcentaje de cada clase que ha sido correctamente clasificado (en las filas). Se obtiene al dividir el número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría (urbanizado y no urbanizado) por el número total de píxeles que fueron clasificados (total de la fila)  $[(250/280)*100]$ .

Exactitud del productor: permite examinar el porcentaje de las categorías de referencia correctamente detectadas, expresando cuán bien fueron clasificados los píxeles de la imagen de referencia según categorías (en las columnas). Se obtiene al dividir el número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría (urbanizado y no urbanizado) por el número total de píxeles que fueron clasificados (total de la columna)  $[(250/300)*100]$ .

Error de omisión mostrará el porcentaje de píxeles por categoría que deberían haber sido clasificados como "urbanizado" o "no urbanizado" y fueron omitidos por la simulación. Se calcula como  $100\% - \text{la exactitud del productor}$ .

Error de comisión indica el porcentaje de píxeles que fueron erróneamente clasificados para cada categoría. Se calcula como  $100\% - \text{la exactitud del usuario}$ .

---

<sup>8</sup>Chuvienco, Emilio. *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Editorial Ariel S. A. 3ª Edición. 2008.

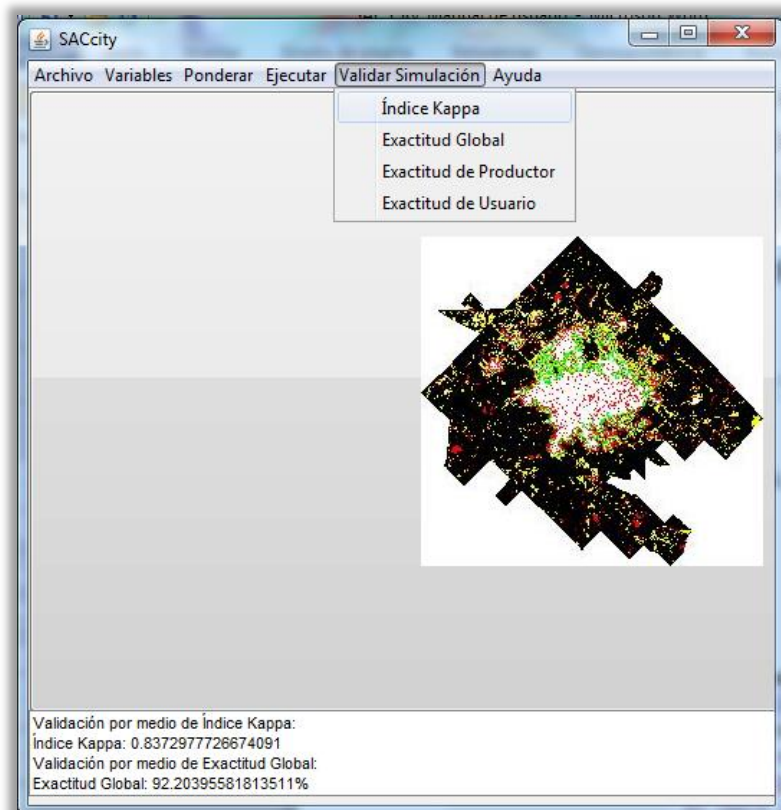
**Índice Kappa:** dado que podría ocurrir que una distribución totalmente aleatoria de los píxeles en las clases conduzca a resultados aparentemente correctos, este índice considera los datos de la matriz en su conjunto y busca superar este inconveniente.

Se define como:  $k = \frac{\text{exactitud observada} - \text{chance de acierto}}{1 - \text{chance de acierto}}$

Y varía entre 0 y 1 (máxima concordancia), pudiéndose lo interpretar a partir de la siguiente tabla:

Valor de k	Fuerza de concordancia
< 0.20	Pobre
0.21 – 0.40	Débil
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Buena
0.81 – 1.00	Muy buena

Entonces, para obtener los resultados de estos índices, se ingresa en 'Validar simulación', y al hacer clic sobre el nombre de cada indicador irán apareciendo los resultados en la parte inferior de la ventana de SACcity.



Para comparar los resultados, a fin de poder evaluar cuál es la combinación de parámetros más adecuada, se recomienda transcribirlos. De todos modos es posible volver a revisarlos si se guarda cada calibración como un proyecto diferente.

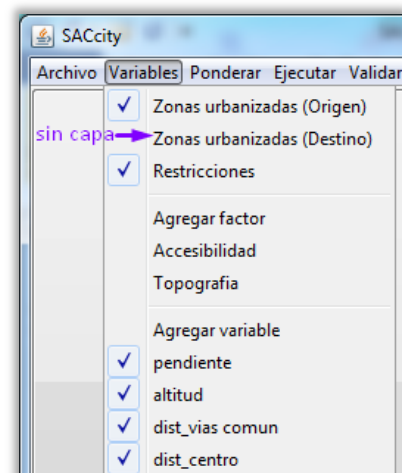
	Evaluación 1	Evaluación 2
<b>Parámetros</b>		
Iteraciones	8	8
Grado de Aleatoriedad	Medio	Alto
Factor de difusión	2	3
Factor de propagación	5	7
<b>Índices de Validación</b>		
Índice Kappa	0.83	0.82
Exactitud Global	92,20%	91,72%
Exactitud Productor urbanizados	93,21%	92,52%
Exactitud Productor no-urbanizados	90,65%	90,51%
Exactitud Usuario urbanizados	93,83%	93,70%
Exactitud Usuario no-urbanizados	89,75%	88,80%

En el caso ejemplo, la combinación 1 resultó ser levemente superior con un coeficiente kappa de 0,83 y la exactitud global 92,20%.

### 4.2.3. Simulación

Una vez que se decida que ponderación de variables y factores, y que combinación de parámetros es la más adecuada, se registrarán sus valores y se procederá a cerrar el programa con la opción 'Archivo | Salir', y se lo volverá a 'Abrir' para iniciar la simulación.

Para la carga de variables se seguirán los pasos indicados en 4.2.2.1. Variables, pero se realizará la siguiente modificación, en 'Variables | Zona urbanizada (Origen)' se cargará la imagen utilizada anteriormente como Zona urbanizada (Destino) (*edificado2011.tif* en este ejemplo), y en Zona



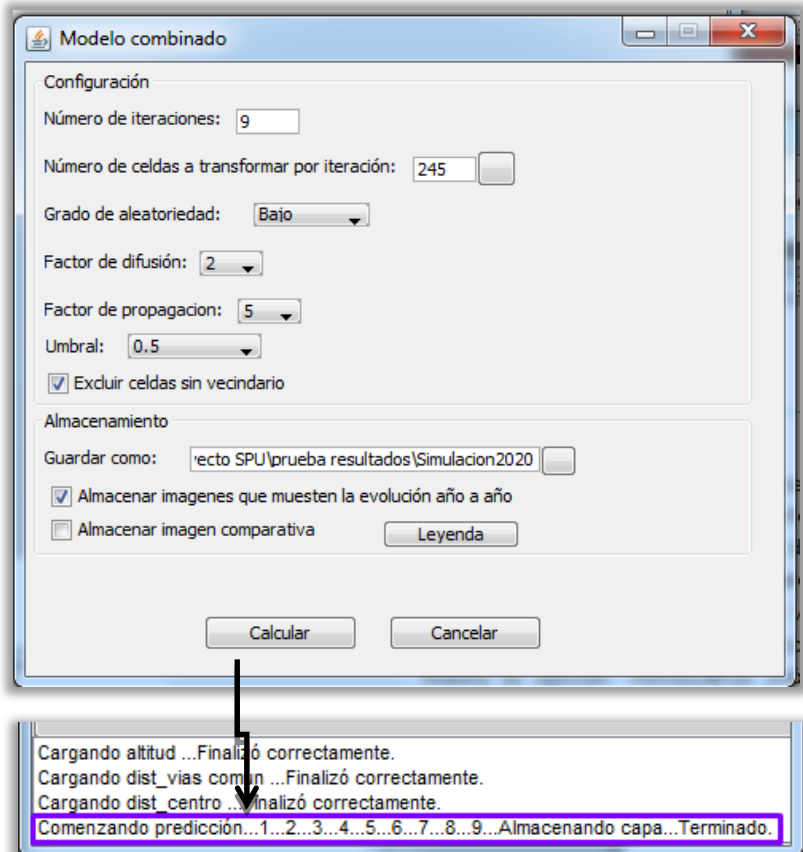


urbanizada (Destino) no se cargará ninguna capa.  
Para agregar la capa de restricciones, las variables y los factores se repiten los pasos ya indicados.

A continuación se repiten paso a paso las indicaciones del punto [4.2.2.2. Ponderar](#).

Y seguidamente se realiza la configuración del modelo combinado como se presentó en [4.2.2.3. Ejecutar](#), donde solo se modificará, si es necesario, la cantidad de iteraciones, en función de la cantidad de años que desea simular desde la nueva imagen de origen. El resto de los parámetros de la configuración serán los que decidió como más adecuados. En la parte de 'Almacenamiento' ya no pedirá 'Almacenar la imagen comparativa', sino que se tildará la opción 'Almacenar imágenes que muestren la evolución año a año'.

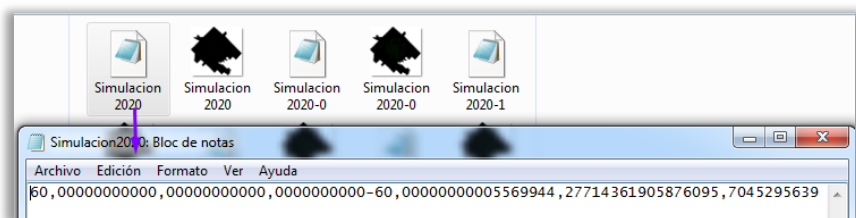
En el ejemplo, se proyecta una simulación a 2020, partiendo de la imagen de origen de 2011 (Zona urbanizada (Origen)→*edificado2011.tif*, por lo tanto, el número de iteraciones será 9, el resto de los parámetros se repiten como ya fueron evaluados.



Al revisar la carpeta en la que se guardó la simulación, encontrará una cantidad de archivos similar a la siguiente:



Cada uno de los archivos .tif corresponde a una iteración, y cada archivo Tiff World File (.tfw) asociado a cada una de las escenas, indica las coordenadas de la primer fila y columna de cada ráster y el tamaño del pixel, este archivo es esencial para la correcta georreferenciación de cada imagen de expansión urbana en un SIG, por lo que no debe ser borrado ni alterado.



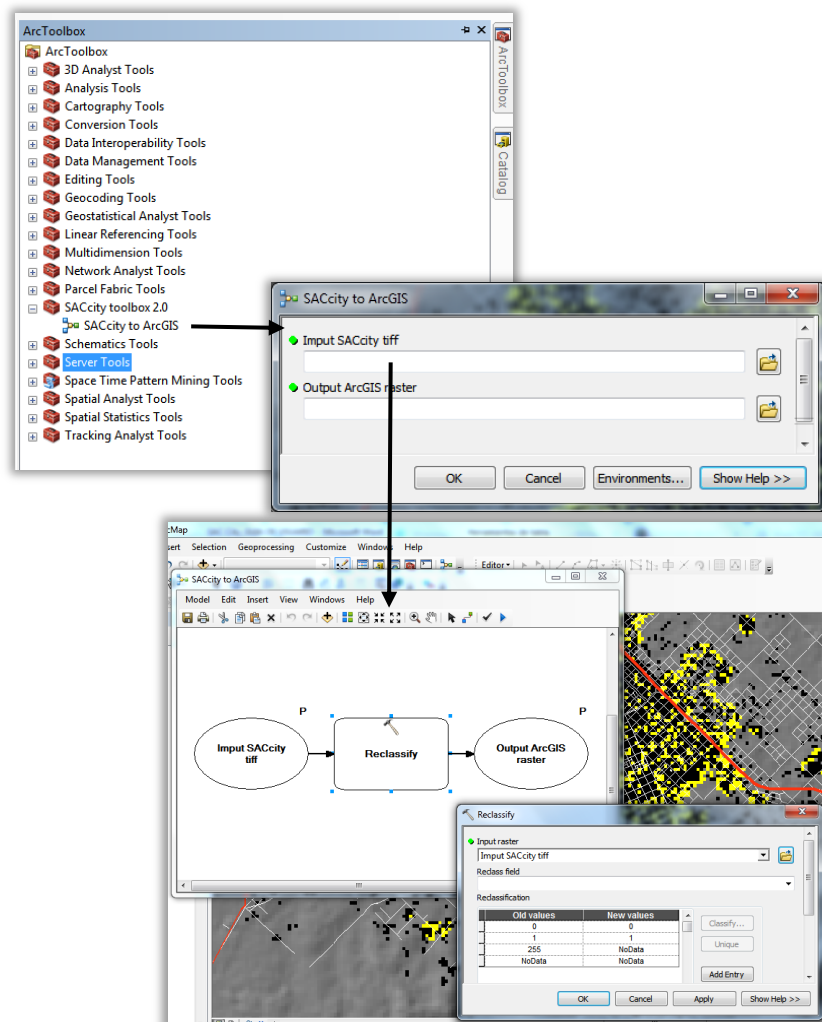
## 4.3.

### Análisis y Visualización

*Esta etapa deberá llevarse a cabo utilizando un SIG*

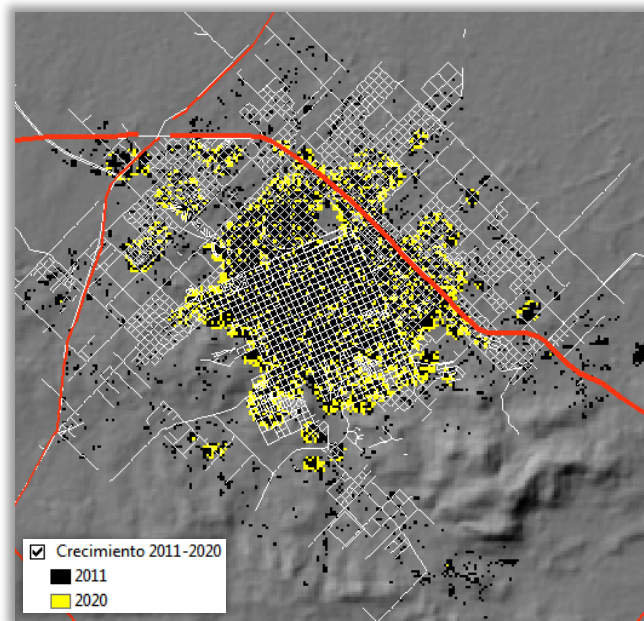
#### 4.3.1 Análisis del patrón de expansión urbana

La posibilidad de disponer de escenas para cada año permite analizar la distribución espacial del crecimiento urbano de una ciudad. Para realizar este análisis es necesario convertir los archivos .tif RGB (255) obtenidos mediante SACcity a coberturas ráster con categorías binarias (0-1). Este procedimiento puede ser realizado mediante herramientas de extracción o reclasificación en Sistemas de Información Geográfica. En nuestro ejemplo, hemos compilado las herramientas empleadas durante el procedimiento de conversión utilizando la herramienta ModelBuilder en ArcGIS como se explicita a continuación:



Una vez extraída cada escena podremos comparar el primer y último momento de la simulación y conocer cuál ha sido el patrón predominante de la expansión. En el ejemplo simulado podemos decir que se observa un patrón

cercano a los procesos acontecidos en la realidad; la mancha urbana muestra un proceso de compactación de zonas contiguas al área central, pero también, nuevos centros de expansión en la periferia de la ciudad. Si complementamos esta información con aquella provista por la ponderación de los factores en la página 22, diríamos que predomina una expansión urbana fuertemente determinada por la preexistencia de áreas edificadas dentro de la vecindad, dando la posibilidad a la dispersión de píxeles provocado por un factor de difusión medio indicado en la página 32.



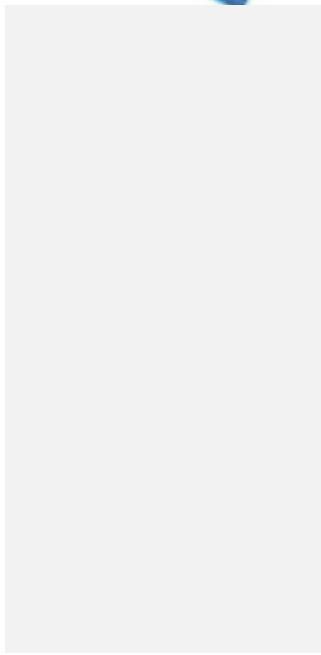
#### 4.3.2 Análisis de la cantidad de cambios

La figura siguiente muestra los cambios esperados en la ciudad de Tandil desde 2011 a 2020 expresados en celdas, el crecimiento relativo sería del 30% durante el periodo considerado, lo que en términos digitales representa unos 1960 píxeles y su equivalente en superficie edificada es de 705.6 hectáreas.

Variación absoluta (celdas)				
	2011	2013	2018	2020
<b>SACcity</b>	6609	7099	8079	8569

Variación relativa (%)				
	2011	2013	2018	2020
<b>SACcity</b>	.0	7	22	30



SACCity