

REVISTA VIENTOS DEL NORTE

ISSN 2591-3247

Año 5 Vol. 2 Diciembre 2017

ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

ELABORATION OF LAND USE THEMATIC CARTOGRAPHY WITH GEOGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGIES

Luis Humacata

Universidad Nacional de Luján/Becario Doctoral CIC

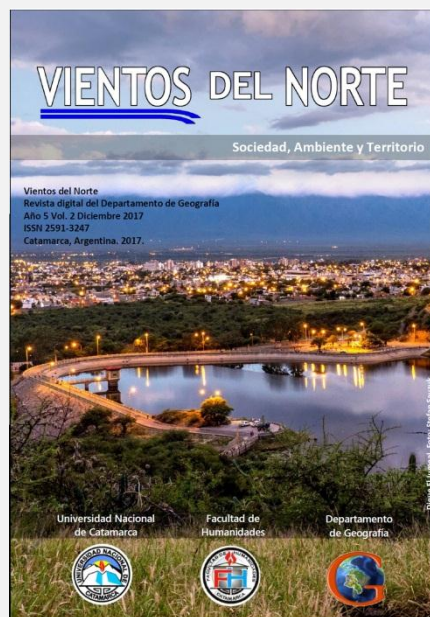
Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO)

E-mail: luishumacata@hotmail.com

Web: www.prodisig.unlu.edu.ar

Fecha de recepción: 31 Octubre 2017

Fecha de aceptación: 15 Noviembre 2017



Págs. 18 a 37

Resumen

En el presente trabajo se desarrollan los lineamientos técnico-metodológicos para la elaboración de cartografía temática de usos del suelo, los cuales han sido aplicados con la finalidad de caracterizar la dinámica de cambio de usos del suelo en partidos del sector de crecimiento oeste de la Región Metropolitana de Buenos Aires. Los procedimientos metodológicos se enmarcan dentro del análisis espacial y combinan las técnicas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. En esta línea se integraron las técnicas de análisis visual y clasificación digital de imágenes satelitales para llegar a definir una tipología de coberturas y usos del suelo en dos cortes temporales, años 2000 y 2010. Los resultados fueron integrados a un Sistema de Información Geográfica a partir del cual se elaboró cartografía temática homogénea como insumo básico para la aplicación metodológica de detección de cambios de usos del suelo. La sistematización de estos procedimientos se orienta a generar una base de datos geográfica como herramienta útil para el ordenamiento territorial a nivel urbano-regional.

Palabras clave: Cartografía temática, Usos del suelo, Tecnologías de la Información Geográfica.

Abstract

The present work develops the technical-methodological guidelines for the elaboration of thematic cartography of land uses, which have been applied with the purpose of characterizing the dynamics of change of land uses in parties of the western growth sector of the Region Metropolitan of Buenos Aires. The methodological procedures are framed within the spatial analysis and combine the techniques of Remote Sensing and Geographic Information Systems. In this line, the techniques of visual analysis and digital classification of satellite images

ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

were integrated to define a typology of land coverages and uses in two temporal sections, years 2000 and 2010. The results were integrated into a Geographic Information System from of which homogeneous thematic cartography was elaborated as basic input for the methodological application of detection of changes of land uses. The systematization of these procedures aims to generate a geographic database as a useful tool for spatial planning at the urban-regional level.

Keywords: Thematic cartography, Land use, Geographic Information Technologies.

1. Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo establecer los lineamientos técnico-metodológicos para la elaboración de cartografía temática de usos del suelo, con la finalidad de caracterizar la dinámica de cambio de usos del suelo en partidos del sector de crecimiento oeste de la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA).

De este modo, los procedimientos se enmarcan dentro del análisis espacial y combinan las técnicas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), que integran las denominadas Tecnologías de la Información Geográfica. La teledetección espacial hace referencia a la obtención de información de la superficie terrestre desde plataformas espaciales (Chuvieco, 2007; Adam & Gillespie, 2006). Los sistemas sensores captan la energía reflejada por las cubiertas terrestres, y en base a una serie de características espaciales, espectrales, radiométricas y temporales de los distintos sensores, obtienen imágenes satelitales a partir de las cuales se logra la extracción de información temática de interés. En nuestro caso, la finalidad fue identificar y caracterizar las coberturas y usos del suelo del área de estudio. Por su parte, los SIG tienen como funcionalidad la obtención, el almacenamiento, tratamiento y reporte de la información geográfica. Las estructuras básicas de representación espacial consisten en el modelo *raster* y vectorial, permitiendo la realización de cartografía temática y análisis espacial con datos georreferenciados (Buzai & Baxendale, 2006).

En base al uso de estas Geotecnologías se aplicaron diversos procedimientos para la obtención de dicha cartografía, entre los cuales podemos mencionar: en la fase de pre-procesamiento de imágenes satelitales, se aplicaron modelos de corrección radiométrica; luego se avanzó en la aplicación de criterios de interpretación visual de imágenes con el objetivo de lograr una caracterización y definición de las coberturas y usos del suelo como categorías de análisis; la fase de procesamiento de imágenes consistió en lograr la clasificación digital como primer producto cartográfico; finalmente en la fase de pos-procesamiento se obtuvo la cartografía temática de coberturas y usos del suelo en dos cortes temporales, años 2000 y 2010. El objetivo de estos procedimientos fue lograr cartografía temática homogénea, que se constituye como insumo básico para una posterior aplicación metodológica de detección de cambios de usos del suelo. Ésta se basa en la tabulación cruzada de los dos mapas generando como resultado información estadística, a partir del cálculo de los indicadores de cambios, y cartografía dinámica, cuya finalidad será la de identificar las persistencias, las ganancias, las pérdidas, el cambio neto y total, y los intercambios entre las diferentes categorías de usos del suelo.

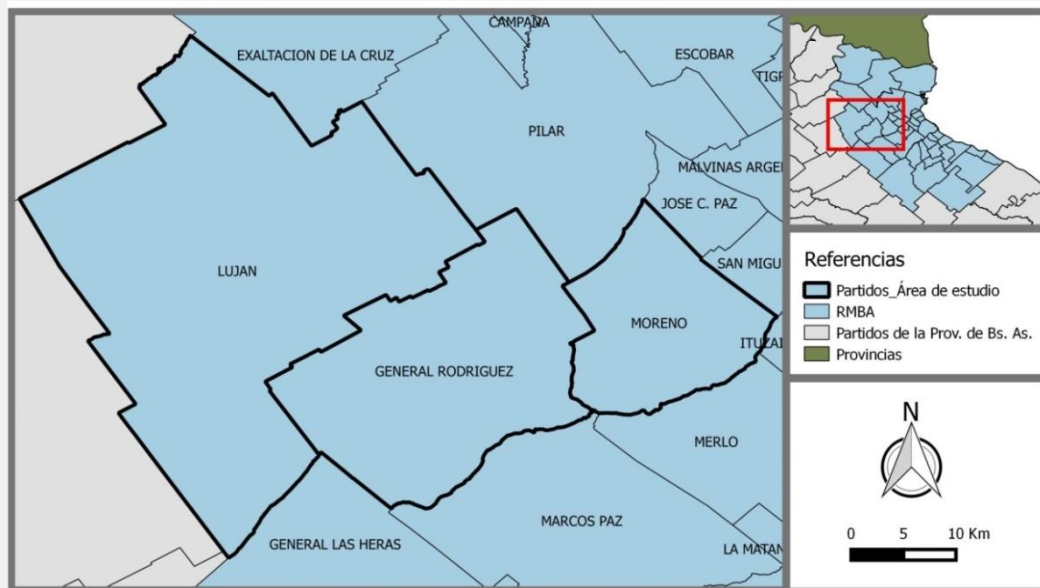
La relevancia de la temática que guía el presente trabajo, está dada por el impacto negativo que genera el cambio en los usos del suelo a través de la expansión urbana en espacios naturales de conservación y en sitios de producción rural tradicional, generándose conflictos de

competencia espacial entre los mismos y la modificación de la topografía que conlleva problemas ambientales severos, como el caso de las inundaciones en zonas urbanas y rurales. En esta instancia se presenta la elaboración de cartografía de usos del suelo del área de estudio, con la finalidad de sentar las bases para una posterior aplicación metodológica.

2. Área de estudio

El área de estudio (Figura 1) corresponde a tres partidos del sector de crecimiento oeste de la Región Metropolitana de Buenos Aires: General Rodríguez (87.185 hab.), Luján (106.273 hab.) y Moreno (452.505 hab.), con una población total de 645.963 (INDEC, 2010). Estos partidos presentan diferencias graduales en cuanto al impacto generado por la dinámica metropolitana, por lo que el abordaje corresponde a un nivel sub-regional, a partir de considerar la dinámica de ocupación del suelo de uno de los sectores de crecimiento metropolitano asociado a la red de autopistas. El área se caracteriza por presentar procesos de diferenciación espacial ligados al ámbito urbano, periurbano y rural. Es así como el partido de Moreno, presenta los rasgos de ocupación residencial del territorio, formando parte del segundo anillo metropolitano, y del aglomerado del Gran Buenos Aires junto al partido de General Rodríguez. Este último y el partido de Luján, integran el tercer y cuarto anillo respectivamente, presentando una mayor diversidad de usos del suelo, donde la actividad agropecuaria es la de mayor proporción, especialmente en el partido de Luján.

Figura 1: Ubicación de los Partidos del sector de crecimiento oeste metropolitano.



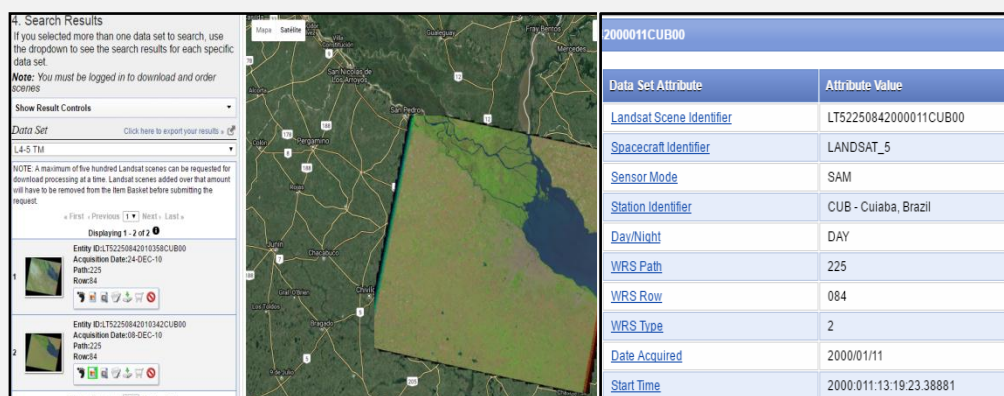
Fuente: Elaboración del autor.

3. Materiales y Métodos

Para la realización de la cartografía de usos del suelo se han utilizado dos imágenes satelitales provenientes del satélite Landsat 5 (sensor TM). Estas imágenes se obtuvieron del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, se pueden descargar del sitio: www.earthexplorer.usgs.gov)

Figura 2: Localización (Path/Row) y parámetros de la imagen.

ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA



Fuente: www.earthexplorer.usgs.gov

La fecha de adquisición de las imágenes corresponde a los meses de verano (diciembre-enero), con la finalidad de obtener un mayor rango dinámico de la respuesta espectral de las diferentes coberturas de modo que sea posible establecer una correcta separabilidad espectral de las mismas. A continuación se presenta una tabla con información específica de las imágenes utilizadas.

Tabla 1: Información de las imágenes Landsat 5 (sensor TM) utilizadas.

Escena (Path/Row)	Fecha de adquisición	Fuente
225-84	11-01-2000	USGS
225-84	08-12-2010	USGS

La selección de imágenes de diferentes años (2000 y 2010), pretende abarcar un amplio período de tiempo para cuantificar los cambios en los usos del suelo. De este modo, la elección de una escala temporal de 10 años resulta adecuada para la detección de cambios en la configuración espacial de usos del suelo.

Los procedimientos metodológicos se pueden sintetizar a partir de los siguientes puntos:

- a. *Pre-procesamiento de imágenes*: se aplicaron los modelos de corrección atmosférica para reducir los efectos de la atmósfera en las imágenes. Esta tarea implicó el manejo de *software* específico para el cálculo de parámetros de calibración.
- b. *Análisis de Interpretación Visual*: se realizó la interpretación visual de las distintas imágenes para obtener una caracterización cualitativa de las distintas coberturas de usos del suelo en el área de estudio. El objetivo fue discriminar las coberturas y usos del suelo para definir las categorías de análisis.
- c. *Procesamiento Digital de Imágenes*: se realizó la clasificación digital de las imágenes para la elaboración de cartografía temática de usos del suelo de los años 2000 y 2010. Esta tarea se

apoya en el punto anterior, e implicó la identificación de regiones de interés a través de las cuales se procedió a clasificar las imágenes.

d. *Pos-procesamiento de imágenes*: consiste en evaluar la clasificación digital realizada en la fase de asignación. Además se incluyen los pasos de combinación de resultados parciales, producto del análisis visual y digital, para lograr la cartografía temática final.

4. Aplicación y Resultados

4.1. Pre-procesamiento de imágenes

Con el objetivo de comparar imágenes satelitales de diferentes años, se procedió a la conversión de los valores de ND (*Digital Number*) de cada imagen a valores de reflectividad. Este tipo de tratamientos se realizan con la finalidad de generar imágenes cuyos valores de ND se convierten en magnitudes físicas, a partir del cálculo de reflectividades o de temperaturas, lo cual permite comparar imágenes de distintos años provenientes de un mismo sensor, de diferentes sensores e integrar información de otras fuentes de percepción remota (Chuvienco, 2007). Se corrigieron los efectos producidos por la interacción con la atmósfera, conocida como corrección atmosférica. Otros factores a tener en cuenta en la corrección radiométrica corresponden a los efectos producidos por la morfología del terreno (relieve), que genera el sombreado topográfico, y el efecto bidireccional de la reflectividad, generado por los ángulos de observación y de inclinación del sensor.

Como primer procedimiento se generan los valores de radiancia a partir de los valores digitales (ND) de la imagen inicial. Se obtendrá así una medida de la cantidad de energía que capta el sensor. Luego se procede al cálculo de la reflectancia al tope de la atmósfera, utilizando los valores de radiancia. Como es sabido, los efectos atmosféricos son más frecuentes en las bandas del visible (B1, B2, B3) e infrarrojo cercano (B4). De tal modo, que resulta conveniente considerar los efectos atmosféricos de dispersión en las correspondientes bandas. Estos efectos son insignificantes en las bandas correspondientes al Infrarrojo Medio (B5 y B7), por lo que se considera que en estas bandas la reflectancia TOA es similar a la reflectancia de superficie.

Cálculo de Reflectancia de Superficie:

$$\rho_{\lambda s} = \frac{\pi(L_{\lambda sat} - L_{\lambda p})}{T_{\lambda v}(E_{\lambda 0} d^{-2} \cos\theta_z T_{\lambda z} + E_{\lambda down})}$$

Donde $\rho_{\lambda s}$ es la reflectancia de superficie considerando una superficie uniforme Lambertiana y sin nubes, $L_{\lambda p}$ es la radiancia registrada como resultado de la radiación EM con los componentes atmosféricos, $T_{\lambda v}$ es la transmisividad atmosférica desde la superficie hacia el sensor, $T_{\lambda z}$ es la transmisividad atmosférica en la dirección de la iluminación solar, $E_{\lambda down}$ es la irradiancia difusa del cielo hacia abajo.

4.2. Interpretación visual de imágenes

ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La interpretación visual de imágenes es una técnica que permite el reconocimiento e identificación de las coberturas y usos de suelo. Esta tarea se realiza a partir de considerar unos criterios de interpretación que, como menciona Chuvieco (2007), han sido clasificados en base a su nivel de complejidad. Existen criterios elementales, como el tono y el color, basados en los valores espectrales, y se avanza hacia criterios de mayor complejidad como los referidos a las características espaciales de las cubiertas (textura, forma, diseño, tamaño y asociación), y su temporalidad a partir de considerar el estado fenológico de las mismas. La siguiente tabla presenta la definición de los criterios de interpretación utilizados en el presente trabajo.

Tabla 2: Criterios de interpretación visual.

Criterios	Características
Tono	Este criterio es un indicador de la intensidad de la energía que reflejan las distintas cubiertas en una determinada longitud de onda del espectro electromagnético. Se representa en distintas tonalidades de grises, donde un tono negro indica una cubierta con nula reflectividad, siendo el tono blanco representativo de cubiertas con una alta respuesta espectral. Esto hace que el tono esté estrechamente ligado a la respuesta espectral de las distintas cubiertas.
Color	Se obtiene a partir de la combinación de distintas bandas. De este modo, se genera una imagen compuesta por tres bandas a las cuales se le asigna un determinado color. En el método aditivo, los colores que se obtienen son un derivado de la suma de los tres colores primarios. Entre las combinaciones color que se pueden obtener, la más difundida es Falso Color Compuesto Standard, que se obtiene a partir de la superposición de las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, rojo y verde (IRC, R, V). Una cubierta aparecerá en color rojo cuanto más intensidad de energía refleje en la banda del infrarrojo cercano.
Textura	La textura hace referencia a la frecuencia en los cambios de las tonalidades de grises de una imagen, indicando la rugosidad o suavidad del conjunto de píxeles, generado por el contraste espacial existente entre cubiertas. Se pueden distinguir tres tipos de textura: rugosa, media y fina. Este criterio es la relación entre el tamaño de los elementos de una cubierta y la resolución espacial del sensor, lo cual permite analizar la variabilidad espacial de las cubiertas.
Diseño	Este criterio da cuenta de la disposición espacial de una cubierta, de modo que sea posible su identificación a partir de su particular patrón o diseño. Se pueden distinguir patrones naturales (relieve, sistema de drenaje), y patrones culturales (geometría del parcelado rural, diseño en damero de las ciudades).
Forma	Los diferentes objetos que aparecen en una imagen pueden ser identificados a partir de su particular forma, pudiéndose diferenciar cuerpos de agua naturales de cursos artificiales o la presencia de determinadas estructuras (parques industriales, aeropuertos). La resolución espacial del sensor resulta determinante en la identificación de objetos individuales.
Tamaño	Hace referencia a las dimensiones físicas de las cubiertas. Este criterio está muy relacionado con el anterior, ya que la tarea de identificación de objetos a partir del tamaño depende de la resolución espacial del sensor y de la escala de trabajo. Sensores con alta resolución espacial (como <i>Ikonos</i> y <i>QuickBird</i>), pueden captar elementos de tamaño pequeño, mientras que las dimensiones aumentan para los sensores de media resolución (<i>Landsat</i>).
	Este criterio hace referencia a la localización espacial de una cubierta de interés y

Asociación	su relación con las cubiertas vecinas. De este modo se apoya en el contexto o entorno espacial para la identificación de determinados elementos en la imagen. Resulta de suma utilidad cuando aparecen cubiertas con la misma respuesta espectral.
Fenología	Es un criterio temporal que hace referencia al estado de las cubiertas en determinado momento de su ciclo fenológico. Resulta de interés a la hora de discriminar distintos cultivos desde un enfoque multi-estacional.

Fuente: Elaboración del autor en base a Chuvieco (2007) y Serafini (2011).

Los criterios de análisis visual han sido aplicados desde una perspectiva integradora, es decir que fueron combinados para obtener una mayor capacidad de interpretación visual. En este sentido, se avanzó en la definición de composiciones en color a partir de la combinación de bandas. Se obtuvieron distintas composiciones con la finalidad de captar las diferencias en la respuesta espectral de las cubiertas a partir de su especificidad temática, aportando cada una a obtener mayor información con respecto a los elementos observados. De este modo permiten el reconocimiento de las cubiertas en base a su característica espectral, por lo que su aplicación estará orientada a la delimitación de áreas espectralmente homogéneas. Esta tarea es apoyada por cartografía analógica y digital, fotografías aéreas y trabajo de campo, lo cual permite una correcta interpretación.

En base a estas consideraciones se emplearon distintas composiciones en color:

Composición Color Natural (Visible): corresponde a la asignación de los colores Azul, Verde y Rojo a las bandas respectivas de longitudes de onda correspondientes al espectro Visible. Su denominación se debe a que representa los colores con los que nuestros ojos perciben los objetos.



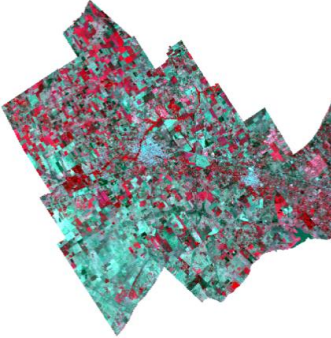
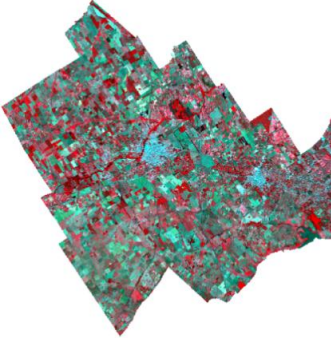
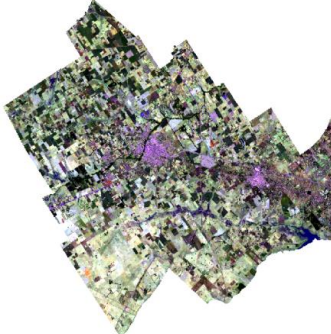
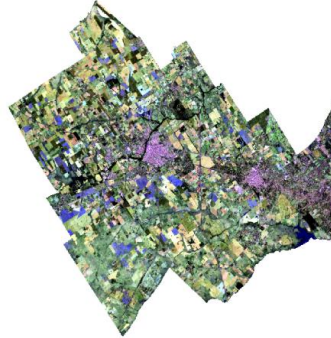
Composición Falso Color Compuesto Estándar (FCCS, por sus siglas en inglés): considera las bandas del espectro Visible (Bandas 2 y 3), e Infrarrojo cercano (Banda 4), asignando los colores Azul, Verde y Rojo respectivamente.

Composición Falso Color Compuesto (FCC): en esta composición se combinan bandas de diferentes regiones del espectro. Por ejemplo, la que resulta de considerar las bandas 3, 5 y 4 y asignarle respectivamente los colores Azul, Verde y Rojo. Otra posibilidad surge al combinar las bandas 3 (Azul), 5 (Verde) y 7 (Rojo). Estas combinaciones incluyen bandas del espectro Visible, Infrarrojo cercano e Infrarrojo medio.

A partir de las composiciones en color empleadas en la interpretación visual se ha logrado obtener información temática referida a los aspectos naturales visibles, las coberturas de vegetación y áreas urbanas. Se hace notar que los avances en la resolución espectral de los sistemas sensores, a partir de incorporar varias bandas en las diferentes regiones espectrales, ha dado amplias posibilidades para la combinación de bandas. En nuestro caso de investigación, se seleccionaron aquellas que mayor aptitud tenían para la discriminación de cubiertas de interés temático como las referidas a los tipos de vegetación, cursos de agua, suelo descubierto, densidad de áreas urbanas, entre otras.

Figura 3: Composiciones en color.

**ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO
CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

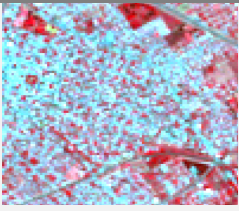




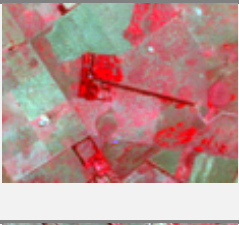


		Años	
Combi- nación entre bandas	2000	2010	
Visible			
FCCS			
FCC			

Fuente: Elaboración del autor.


Estos criterios han sido aplicados para lograr la caracterización de los usos del suelo del área de estudio en los distintos cortes temporales. De este modo, desde el análisis visual se procederá a la definición de las coberturas y usos del suelo como categorías para la clasificación espacial en apoyo a la elaboración de cartografía temática. De este modo, quedan definidas 9 clases en un solo nivel de jerarquización.

Tabla 3: Definición de coberturas y usos del suelo.

Coberturas/Usos del suelo	Definición	Imagen
------------------------------	------------	--------

<p>Urbano Tradicional o Compacto</p>	<p>Las áreas urbanas tradicionales corresponden a las ciudades cabeceras de partidos. Su configuración presenta una aglomeración de manzanas edificadas, cuyo densidad es la más alta. Dentro de esta categoría se incluyen las localidades menores (baja densidad).</p>	
<p>Urbano Disperso</p>	<p>El uso urbano disperso se caracteriza por presentar una baja densidad de edificaciones, con grandes espacios destinados a la actividad deportiva. Presenta un diseño urbano irregular.</p>	
<p>Deportivo-Recreativo</p>	<p>Hace referencia a aquellas superficies destinadas a la práctica deportiva y recreativa del polo y golf. Presenta una forma geométrica regular.</p>	
<p>Agrícola</p>	<p>El uso agrícola, principalmente de secano (sin riego) corresponde a los cultivos de cereales (maíz, trigo) y oleaginosas (soja, girasol).</p>	
<p>Hortícola-Intensivo</p>	<p>Consiste en áreas medianas y pequeñas destinadas a la producción de verduras, frutales, y otras producciones intensivas como viveros. Se encuentran próximos a centros urbanos.</p>	
<p>Ganadero</p>	<p>Son áreas destinadas a la crianza y engorde de ganado, principalmente vacuno. Dentro de esta categoría están los establecimientos productores de carne y aquellos dedicados a la producción tambera.</p>	
<p>Infraestructura de transporte</p>	<p>Corresponde a las vías de transporte terrestres como rutas, autopistas y ferrocarriles. Incluye los terrenos aledaños.</p>	
<p>Forestal-Natural</p>	<p>Corresponde a las áreas ocupadas con vegetación herbácea y arbórea natural. Se incluyen las forestaciones con fines comerciales.</p>	

ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Cursos de agua	Hace referencia a la hidrografía superficial permanente como ríos, arroyos, embalses, etc.	 Un mapa temático que muestra los cursos de agua en un área geográfica. El agua está representada en tonos de rojo y rosa, mientras que el terreno circundante aparece en verde y azul claro. Se pueden observar ríos, arroyos y embalses distribuidos por el territorio.
----------------	--	--

Fuente: Elaboración del autor.

4.3. Procesamiento digital de imágenes

Las tareas correspondientes al procesamiento digital de imágenes consisten en procedimientos orientados al tratamiento cuantitativo (matemático-estadístico) de las imágenes, con la finalidad de obtener información temática a partir de los valores digitales de las mismas.

El análisis digital con fines clasificatorios pretende generar productos cartográficos basados exclusivamente en los valores espectrales de las imágenes, lo cual implica tener un mayor conocimiento de las características y dinámica del área de estudio para una correcta asignación de píxeles a las categorías previamente definidas. Sumado a esto, se deben seleccionar las imágenes que brinden mayor capacidad para la identificación de cubiertas de interés. Estas tareas resultan de suma importancia ya que de ellas depende gran parte de los procedimientos clasificatorios.

El análisis digital se complementa con información auxiliar (ya sean fotografías aéreas, cartas topográficas, etc.), y se combina con las técnicas de análisis visual ya que incorporan algunos criterios complejos de interpretación para la identificación de patrones espaciales. Esta integración de la información brindará los insumos fundamentales para la elaboración de cartografía temática (Chuvienco, 2007).

La clasificación de imágenes puede realizarse a partir de adoptar dos formas metodológicas. La primera se denomina clasificación no supervisada, y hace referencia a la segmentación automática de una imagen satelital a partir de sus valores digitales. Esto quiere decir que el usuario debe informar la cantidad de clases a obtener y luego se procede a denominar las categorías de píxeles homogéneos resultantes. De este modo, esta posibilidad resulta interesante cuando no se tiene conocimiento del área de estudio aunque sus resultados pueden ser difíciles de interpretar ya que se basa exclusivamente en la respuesta espectral. El agrupamiento de píxeles dentro de este tipo de clasificación puede lograrse a partir de los métodos usuales tales como: *K-means* e ISODATA.

Por su parte, la clasificación supervisada requiere un conocimiento previo del área de estudio a clasificar, ya que se basa en la definición de áreas de entrenamiento para luego proceder a la asignación de todos los píxeles de la imagen. Estas áreas de entrenamiento se consideran como muestras de píxeles representativos de las categorías definidas previamente. Los grupos de píxeles, que se definen a partir de la similitud de sus valores digitales, se consideran como referencia para la posterior asignación del resto de píxeles a las categorías de la leyenda cartográfica. Entre los métodos más usuales, para la asignación de los píxeles a las clases temáticas, podemos mencionar: Mínima distancia, Máxima Probabilidad, Distancia *Mahalanobis* y Paralelepípedo.

La clasificación supervisada procede a partir de una serie de fases sucesivas que tienen como objetivo culminante la representación cartográfica de las coberturas/ usos del suelo del área de estudio. Para ello es preciso formular las categorías o clases temáticas a partir de las cuales se pretende clasificar el espacio geográfico.

4.3.1. Fase de entrenamiento

En esta instancia se procederá a generar una serie de muestras de píxeles representativas de cada clase temática. La identificación de estas muestras se basa en los criterios de interpretación desarrollados en la Tabla 2 y de datos tomados con GPS (*Global Positioning System*) a partir de trabajo de campo, que han sido utilizados para realizar la definición de coberturas/ usos del suelo (Tabla 3). La selección de Regiones de Interés (ROI) se realizó sobre una imagen combinada 4-3-2 (FFCS), con apoyo de trabajo de campo y de la visualización con el *software Google Earth*. Para la delimitación de las ROI se utilizó el software de procesamiento digital de imágenes ENVI 4.7.

En las siguientes figuras (Figuras 4 y 5) se presentan los registros fotográficos de las coberturas/ usos del suelo.

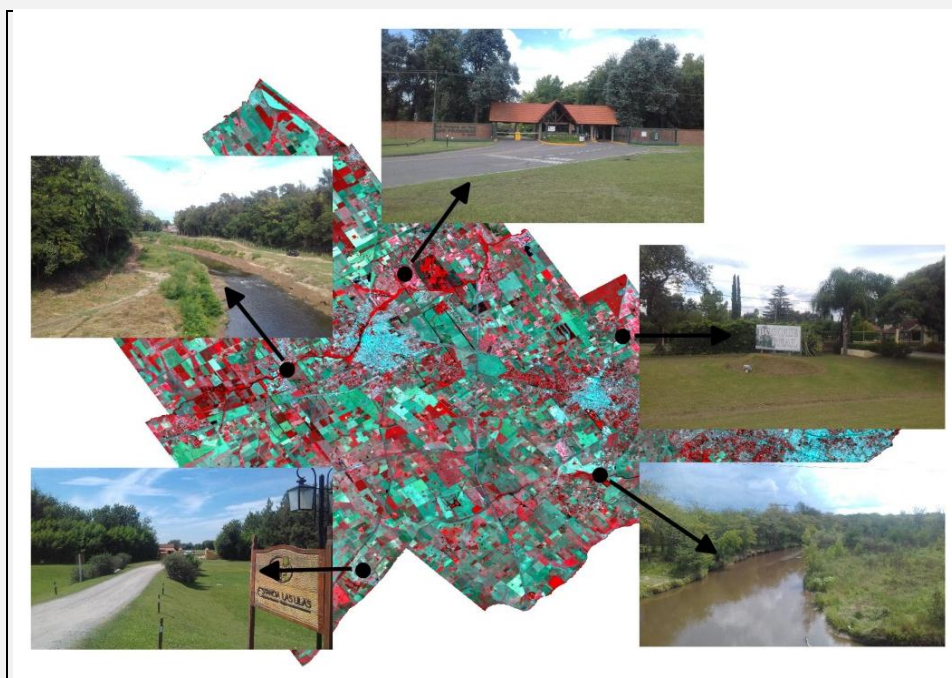
Figura 4: Registro fotográfico del uso Agrícola y Ganadero.



Fuente: Elaboración del autor.

Figura 5: Registro fotográfico del uso Cursos de agua, Forestal-Natural y Urbano disperso.

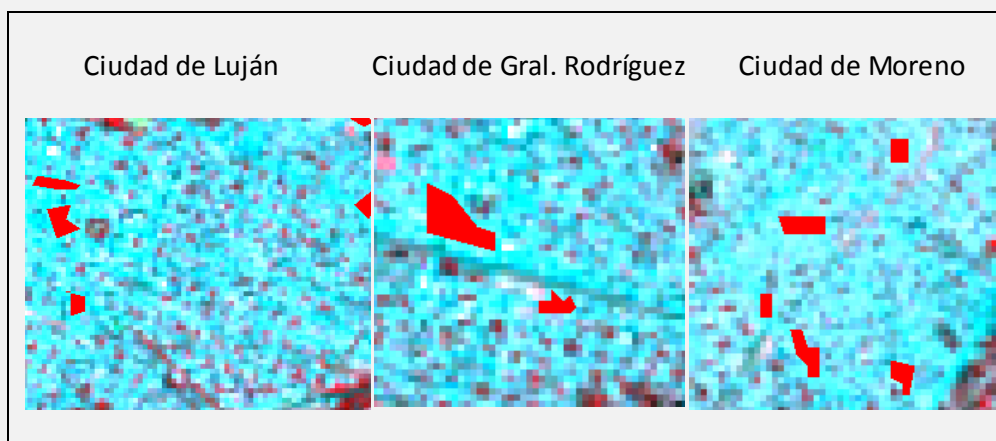
ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA



Fuente: Elaboración del autor.

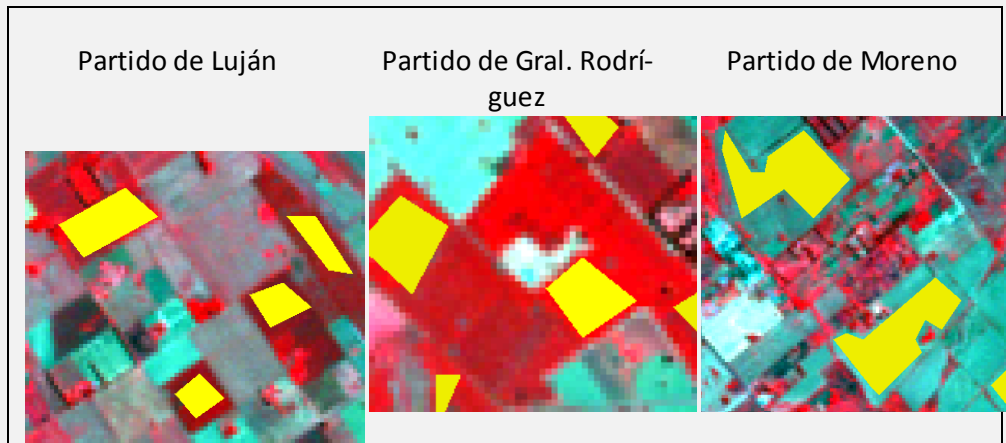
Estos insumos han posibilitado la delimitación de áreas representativas de las categorías de interés. A continuación se presentan algunas de las ROI digitalizadas.

Figura 6: Regiones de Interés: Uso Urbano Tradicional o Compacto.



Fuente: Elaboración del autor (ENVI 4.7).

Figura 7: Regiones de Interés: Uso Agrícola.



Fuente: Elaboración del autor (ENVI 4.7).

Se generó una leyenda con sub-clases para poder abarcar la amplitud espectral de aquellas cubiertas que presentaban mayores heterogeneidades. Esto se debe al estado fenológico de algunos usos como el Agrícola (donde existen campos con cultivos vigorosos y otros en barbecho o rastrojo), a las características propias de algunos usos como el Urbano (donde existen diferentes grados de densidad de edificación), y a la similitud entre cubiertas, lo cual dificulta la discriminación entre categorías. Por lo dicho, a partir de la digitalización de las áreas de entrenamiento se avanzó a evaluar la correcta separabilidad entre las mismas.

El análisis de separabilidad se realizó a partir del cálculo de la distancia entre las ROI, considerando las fórmulas matemáticas de: Distancia de *Jeffries-Matusita* y Distancia de Divergencia Transformada (Beltrán González, 2013). Ambas fórmulas se encuentran en el software ENVI 4.7 y arrojan parámetros que van de 0 a 2. Cuanto más se acerque al valor máximo, mayor será la separabilidad entre las dos coberturas. Las mayores confusiones se dieron entre los usos urbanos (tanto tradicional como disperso) y las áreas agrícolas (principalmente aquellas que corresponden a campos en barbecho o rastrojo), la infraestructura de transporte (rutas y autopistas), y el uso ganadero (principalmente con el uso urbano con baja densidad de ocupación y el urbano disperso).

Tabla 4: Reporte de la separabilidad de ROI/Usos Urbano disperso.

Categorías	Jeffries-Matusita	Divergencia Transformada
Urbano tradicional_1	1.96500828	1.99708560
Urbano tradicional_2	1.10102800	1.24420542
Agrícola_1	1.95610335	1.99998139
Agrícola_2	1.78822375	1.99887711
Agrícola_3	1.49778832	1.79683517
Cursos de agua	1.99969860	2.00000000
Ganadero	1.55619751	1.87271474
Forestal-Natural_1	1.99814895	2.00000000
Forestal-Natural_2	1.99906518	2.00000000
Transporte	1.70559956	1.95701744

ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

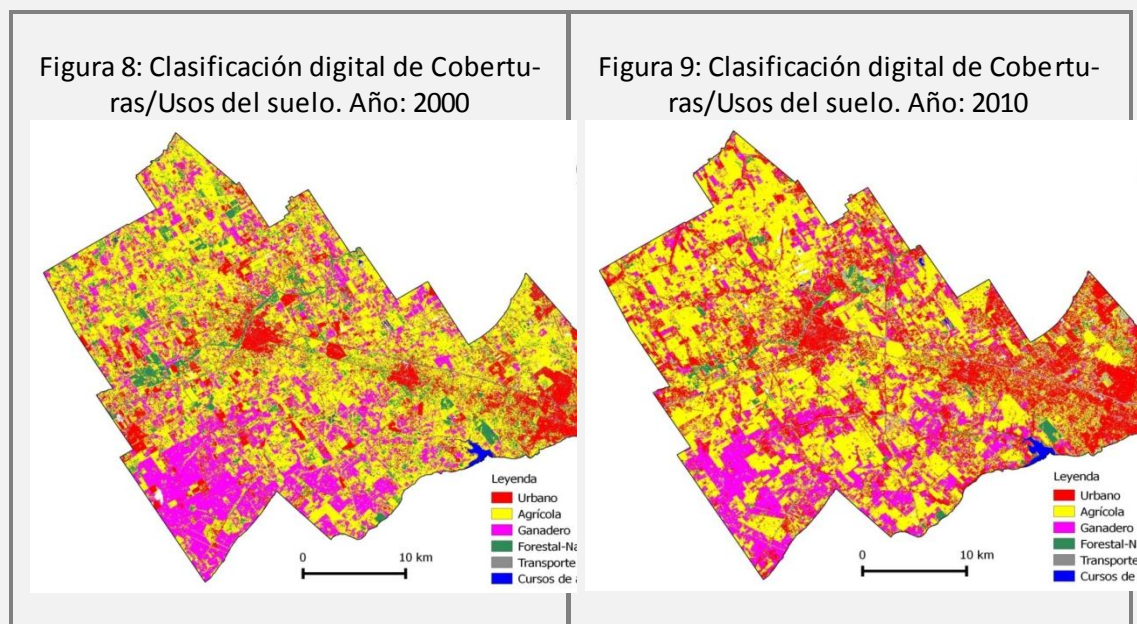
Fuente: Elaboración del autor (ENVI 4.7)

El reporte del análisis de separabilidad centrado en el uso Urbano disperso (Tabla 4) con respecto a las otras categorías, indica que existe una débil separabilidad con el uso Agrícola_3 (1.50-1.80), Ganadero (1.55-1.87), y Transporte (1.70-1.95). El resto de pares de categorías presentan valores superiores.

4.3.2. Fase de asignación

En esta fase se logrará la asignación de todos los píxeles de la imagen a partir de las áreas de entrenamiento definidas en el apartado anterior. De modo que se generará la imagen clasificada de usos del suelo, la cual hace referencia al agrupamiento de la totalidad de píxeles a las clases temáticas definidas basándose en la respuesta espectral de cada banda considerada. Este procedimiento se basó en el método de Máxima Probabilidad. Como ya se señaló, este método considera una distribución normal de los valores de los píxeles y los asigna a una categoría según la mayor probabilidad de ocurrencia en la similitud de los valores digitales. De modo que todos los píxeles serán asignados a una clase según su probabilidad de pertenencia.

El resultado cartográfico será una nueva imagen de similar extensión aunque los píxeles ya no disponen de valores espectrales sino de información temática correspondiente a las categorías de la leyenda cartográfica. A continuación, se presentan los mapas de usos del suelo para cada año realizados a partir de la clasificación digital (Figura 8 y Figura 9).



Fuente: Elaboración del autor.

4.4. Pos-procesamiento de imágenes

La fase de verificación pretende obtener un valor cuantitativo de la exactitud de la clasificación digital con la finalidad de lograr un producto cartográfico que represente con la mayor fiabilidad las características de interés del área de estudio. Estos procedimientos se basan en la comparación entre la cartografía obtenida y aquella información de referencia (fotografías aéreas, muestreo espacial, etc.) utilizada para la estimación del error de los resultados (Primeira & Gandini, 2014; Chuvieco, 2007). Esto se realiza a partir de la matriz de confusión, con la finalidad de lograr un análisis de la exactitud de la clasificación y determinar las confusiones producidas entre categorías. La diagonal principal de la matriz (de $n \times n$ = número de categorías), recoge los acuerdos entre filas y columnas, existiendo correspondencia entre el mapa y la realidad. Los valores que se encuentran fuera de la diagonal indican los errores de asignación (Chuvieco, 2007), tanto de omisión como de comisión.

La confiabilidad global de la clasificación se obtiene a partir de relacionar los valores contenidos en la diagonal principal y los valores marginales de filas y columnas. Otra de las medidas estadísticas es el coeficiente Kappa, que consiste en una medida global de la exactitud de la relación entre la clasificación digital y la información de referencia comparada con aquella que se podría generar al azar (Congalton, 1991). Los valores que arroja van de 0 a 1. Cuanto más cercano a 1 sea el resultado mayor será la fiabilidad de la clasificación, es decir que las categorías han sido discriminadas correctamente y se alejan de ser producto de un proceso aleatorio. A continuación se presenta la matriz de confusión para el año 2000 y 2010.

Tabla 5. Matriz de confusión. Año: 2000 y 2010

Clases	URB	TRANS	FORES	AGU	AGR	GA	Total	Precisión del usuario (%)	
Urbano (URB)	428	11	0	0	75	3	517	82.79	
Transporte (TRANS)	46	51	0	0	5	0	102	50.00	
Forestal (FORES)	3	0	45	6	18	0	72	62.50	
Cursos de agua (AGU)	0	0	0	80	0	0	80	100.00	
Agrícola (AGR)	40	2	1	0	787	7	837	94.03	
Ganadero (GA)	1	2	0	0	118	316	437	72.31	
Total	524	66	46	86	1014	326	2062		
Precisión del productor (%)	81.68	77.27	97.83	93.02	77.61	96.93			
Error de omisión (%)	18.32	22.73	2.17	6.98	22.39	3.07			
Exactitud de la clasificación	82.80%								
Coefficiente Kappa	0.7538								

Clases	URB	TRANS	FORES	AGU	AGR	GA	Total	Precisión del usuario (%)	
Urbano (URB)	818	4	17	0	28	42	909	89.99	
Transporte (TRANS)	36	74	0	0	1	0	111	66.67	
Forestal (FORES)	0	0	201	3	38	0	242	83.06	
Cursos de agua (AGU)	0	0	0	230	0	0	230	100.00	
Agrícola (AGR)	139	0	2	0	566	10	717	78.94	
Ganadero (GA)	75	0	0	0	1	452	528	85.61	
Total	1103	78	220	233	636	304	2774		
Precisión del productor (%)	74.16	94.87	91.36	83.06	88.99	89.68			
Error de omisión (%)	25.84	5.13	8.64	1.29	11.01	10.32			
Exactitud de la clasificación	84.40%								
Coefficiente Kappa	0.7948								

Fuente: Elaboración del autor a partir de los valores calculados en ENVI 4.7

En términos generales podemos señalar que la matriz correspondiente tanto al año 2000 como 2010 indican que la exactitud global de la clasificación fue del 82.80 % y del 84.40 % respectivamente, siendo el coeficiente Kappa de 0.7538 y de 0.7948, lo cual corresponde a una muy buena precisión para ambas clasificaciones.

Entre los procedimientos realizados en este apartado se encuentra la generalización cartográfica orientada a definir la unidad mínima cartografiable, la eliminación de píxeles aislados a partir de la aplicación de filtros espaciales y la combinación de los resultados obtenidos a partir del procesamiento digital y la interpretación visual para la obtención de cartografía temática final. A continuación se presentan las capas temáticas obtenidas a partir de la digitalización en pantalla (Figura 10 y 11) utilizando el Sistema de Información Geográfica QGIS (Versión Wien 2.8). La creación de las capas temáticas se ha realizado teniendo en cuenta la informa-

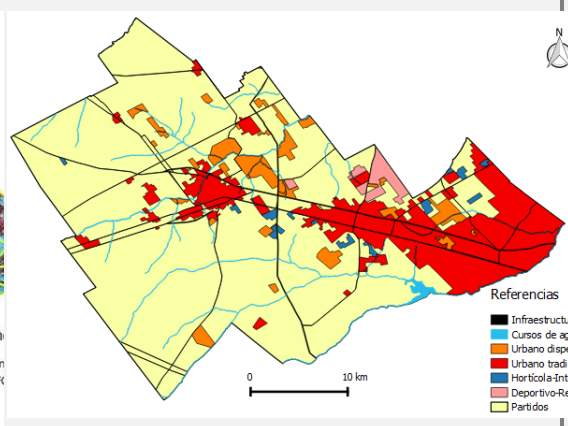
ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

ción contenida en las bases de datos geográficas provenientes del Instituto Geográfico Nacional (IGN), desde su proyecto SIG-IGN 250; y del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Las mismas pueden de scargarse de los sitios web del IGN: www.ign.gob.ar, y del GESIG: www.prodisig.wixsite.com/. Además, se utilizó el software *Google Earth* a partir de la visualización de imágenes históricas de mayor resolución.

Figura 10: Digitalización del uso Urbano
2010



Figura 11: Capas temáticas digitalizadas
(2010).



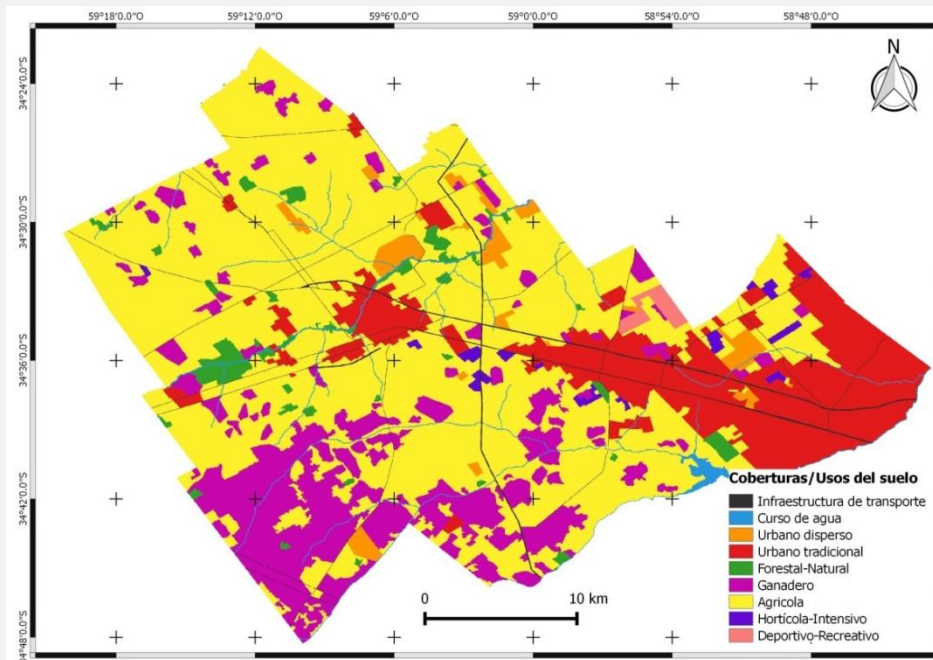
Fuente: Elaboración del autor.

De este modo, se procedió a combinar estas capas temáticas con aquellas generadas a partir de la clasificación digital, con la finalidad de lograr un producto cartográfico que represente con el mayor nivel de detalle la configuración espacial de las categorías de interés.

Finalmente se ha llegado a la fase culminante de la aplicación de técnicas basadas en Teledetección y SIG, destinadas al tratamiento cuali-cuantitativo de imágenes satelitales para elaborar cartografía temática de coberturas y usos del suelo de los partidos que integran el sector de crecimiento oeste metropolitano. Se procedió a integrar la información generada en un SIG con el objetivo de elaborar cartografía temática homogénea en formato *raster*, con un tamaño de píxel de 20x20 metros. A continuación se presentan los dos mapas elaborados para el año 2000 y 2010 (Figuras 12 y 13):

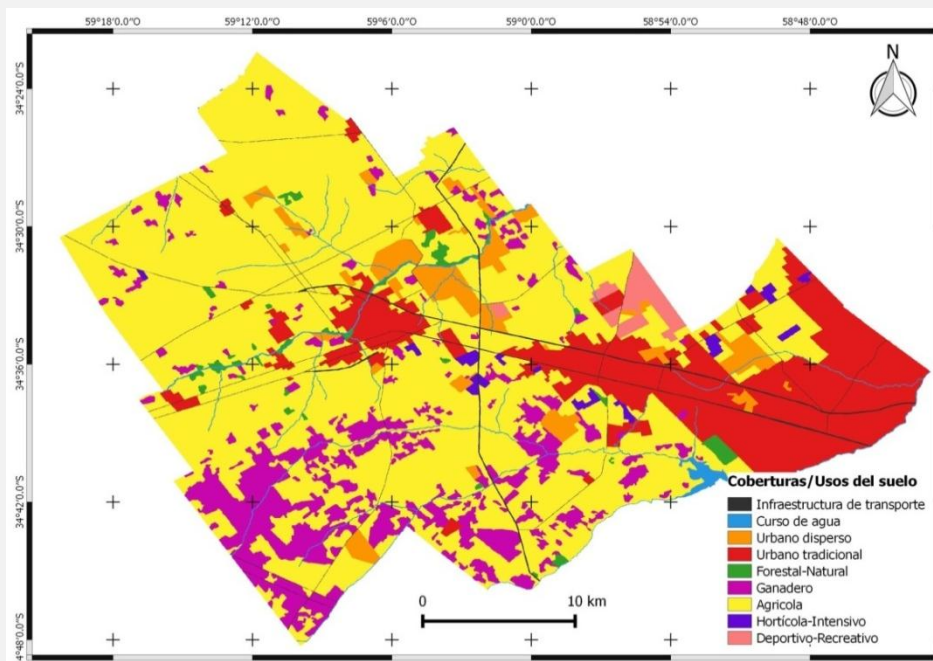
Figura 12: Coberturas/Usos del suelo. Año: 2000.

Luis Humacata



Fuente: Elaboración del autor.

Figura 13: Coberturas/Usos del suelo. Año: 2010.



Fuente: Elaboración del autor.

Se puede observar una amplia zona destinada a la actividad agropecuaria, principalmente en el partido de Luján y General Rodríguez, por su parte el partido de Moreno no presenta una significativa dedicación a esta actividad primaria. Entre las producciones agrícolas y ganade-

ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

ras, las primeras son las de mayor ocupación en el territorio, existiendo zonas mixtas agrícola-ganaderas. Además existen cubiertas correspondientes a campos en barbecho y con rastrojo. Otros usos del suelo se relacionan a la actividad recreativa y deportiva, como aquellas superficies destinadas a la práctica de polo y golf, principalmente en el partido de General Rodríguez. Esta actividad se encuentra ampliamente vinculada a la proliferación de urbanizaciones cerradas como *countries*, clubes de campo y chacras. El uso urbano se encuentra representado por las tres ciudades cabeceras de sus partidos homónimos, que ocupan el área central de los mismos. Este uso está integrado por áreas urbanas de diferente densidad. Las mayores densidades de áreas construidas se encuentran en el partido de Moreno, que presenta una amplia aglomeración urbana. Además existen localidades menores, principalmente en el partido de Luján seguido del partido de Moreno. Estas localidades presentan diferentes niveles de densidad edificada. Aquellas con menor densidad (como la localidad de Carlos Keen en el Partido de Luján) presentan dificultades para su identificación, teniendo que recurrir a información auxiliar. Esto se debe a la mayor proporción de vegetación arbórea en el interior de las localidades.

Los cursos de agua están representados por ríos (como el río Luján y el río Reconquista) y numerosos arroyos, que se distribuyen principalmente por el territorio del partido de Luján, seguido de General Rodríguez y Moreno. Este último se destaca por el embalse Ingeniero Roggero, que se forma a partir de la confluencia de los arroyos Durazno y La Choza, nacientes en el partido de General Rodríguez. La presa Ingeniero Roggero tiene la función de regular las aguas del río Reconquista. Cabe mencionar la vegetación asociada a los principales cursos de agua, como el bosque ribereño del río Luján y los pastizales que se distribuyen próximos a los arroyos.

La infraestructura de transporte está formada por rutas (nacionales y provinciales) y autopistas. Dentro de las primeras podemos mencionar a las rutas nacionales número 7 y 5. Entre las provinciales se encuentran las rutas 24, 25, 28, 34, entre otras. En cuanto a las autopistas se encuentra la del Oeste, que atraviesa los tres partidos en sentido este-oeste; y la autopista 6 que recorre los partidos de Luján y General Rodríguez en sentido norte-sur, con dirección al partido de La Plata.

La caracterización inicial de coberturas y usos del suelo resultó de suma utilidad para los objetivos de la investigación, siendo insumo básico para la aplicación de la metodología de detección de cambios de usos del suelo (Pontius *et al.* 2004), a partir de la cual se llegará a un mayor conocimiento de la evolución del territorio en cuanto a su dinámica de ocupación del suelo.

5. Conclusiones

En este trabajo se han presentado los principales procedimientos técnicos y metodológicos para la elaboración de cartografía temática de usos del suelo en base a imágenes satelitales, técnicas de Teledetección y SIG. Los productos cartográficos elaborados a partir de la combinación de análisis visual y clasificación digital de imágenes posibilitaron obtener cartografía para distintos cortes temporales (años 2000 y 2010), siendo insumos básicos para una posterior aplicación de la metodología de detección de cambios de usos del suelo.

En este sentido, cabe señalar la importancia de avanzar en futuras investigaciones con el objetivo de modelizar la dinámica temporal en partidos que están sujetos a procesos de urbanización de gran dinamismo y aparición de conflictos ante cambios de usos del suelo. De este

modo, la elaboración de cartografía temática con Tecnologías de la Información Geográfica, posibilitará la generación de conocimientos a un nivel espacial, en apoyo a la elaboración de un diagnóstico territorial de la evolución espacial de la ocupación del suelo, constituyéndose en una valiosa herramienta para el ordenamiento territorial a nivel urbano-regional.

Bibliografía

- Adams, J.B. & Gillespie, A.R. (2006). Remote sensing of landscapes with spectral images. A physical modeling approach. Cambridge University Press. New York.
- Beltrán González, J. C. (2013). Elaboración de cartografía de uso y cobertura del suelo para los Municipios de Culiacán y Novato, Sinaloa, mediante clasificación digital de imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM. Tesis. Licenciatura en Ingeniería Geodésica. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2006). Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Lugar Editorial. Buenos Aires.
- Buzai, G. D. & Humacata, L. (2015). El sistema periurbano de la Región Metropolitana de Buenos Aires. Análisis Espacial mediante Tecnologías de la Información Geográfica. Primera parte: Procesamiento digital de imágenes satelitales y clasificación de usos del suelo 2000-2010. Proyecto de Asignatura (PDA). Disposición CDD-CS N° 040/15. Universidad Nacional de Luján.
- Chuvieco, E. (2007). Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. Barcelona.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment 37: 35-46.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). Base de Datos Geográfica. SIG-250. Recuperado de www.ign.gob.ar
- INDEC (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Buenos Aires.
- Pontius, R.G.; Shusas, E. & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. Agriculture, Ecosystems and Environment. 101: 251-268.
- Primera, M. M. & Gandini, M. (2014). Procesamiento II. Guía práctica de Métodos de Clasificación supervisados y no supervisados. Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Azul.
- Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Instituto de Investigaciones Geográficas. Universidad Nacional de Luján. Recuperado de www.prodisig.wixsite.com

**ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE USOS DEL SUELO
CON TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Serafini, M. C. (2011). Interpretación visual de imágenes satelitarias. Programa de Desarrollo e Investigación en Teledetección (PRODITEL). Universidad Nacional de Luján. 23 pp.

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Recuperado de:
www.earthexplorer.usgs.gov

Tapiador, F.J. (2001). El papel del geógrafo en las directrices de ordenación territorial. Boletín de la AGE-Asociación de Geógrafos Españoles. 31:137-147.