

DETECCION DEL CRECIMIENTO URBANO EN LA CIUDAD DE MARACAIBO (VENEZUELA) MEDIANTE ANALISIS MULTITEMPORAL DE IMAGENES MSS Y TM.

G.Z. Molina Mora

Centro de Procesamiento Digital de Imágenes(CPDI).Instituto de Ingeniería. Apartado postal 40200, Caracas 1040-A, Venezuela. Actualmente en (2).

E. Chuvieco Salinero

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, C/Colegios 2, E-28801, Alcalá de Henares. (Madrid)

RESUMEN.- En este trabajo se presenta la aplicación de diferentes técnicas de detección de cambios, usando imágenes Landsat MSS y TM para un período de trece años (1973-1986) en la ciudad de Maracaibo (Venezuela). La identificación conjunta de categorías urbanas y no urbanas para cada fecha fue difícil dada la similitud espectral de algunas categorías. Por su parte, el nivel de precisión en la identificación de los cambios ocurridos varió en cada técnica utilizada. El mayor nivel alcanzado se obtuvo con la comparación de imágenes clasificadas por estratos (82,45%), seguido por la clasificación multitemporal con máscara urbana (69,54%) y la técnica de componentes principales (63,53%).

ABSTRACT.- This paper presents the application of different change detection techniques to Landsat-TM and MSS images in the city of Maracaibo (Venezuela) between 1973 and 1986. The discrimination of urban-no urban classes in each date was difficult due to the spectral similarity of some categories. The accuracy obtained with the different techniques was variable. Comparison between classified images by strata performed the best results (82,45%), following by the multitemporal classification using an urban mask (69,54%), and the Principal Components Analysis (63,53%).

1.- INTRODUCCION

La información obtenida a partir de los sensores remotos es considerada como una herramienta muy eficaz para el seguimiento y evaluación de cambios en diferentes ecosistemas, lo que permite a los planificadores fijar estrategias para el manejo y control de los recursos.

El análisis de áreas urbanas a partir de sensores remotos es mucho más complejo que el de otras coberturas del suelo, ya que las zonas urbanas se caracterizan por una diversidad de usos y una multitud de elementos de diferente naturaleza y dimensión. En consecuencia, la definición espectral de áreas urbanas presenta frecuentemente firmas espectrales mixtas al estar formada por cubiertas que tienen propiedades físicas específicas (Henderson, 1983; Charbonneau y Royer, 1993).

A pesar de estas dificultades, han sido numerosos los trabajos abordados con esta técnica en espacios urbanos. Una aplicación concreta de estos trabajos se centra en delimitar exactamente el área ocupada por la ciudad, tanto para actualizar los límites censales (Dietrich y Lachosky, 1978), como para estudiar el crecimiento urbano (Carter y Stow, 1979; Jensen

y Toll, 1982). Dada la dificultad para precisar los límites urbanos, algunos investigadores han optado por utilizar sensores auxiliares, como es el caso de imágenes SPOT, RADAR o fotografías aéreas (Bruijn, 1978; Ormsby, 1982; Henderson, 1983; Jensen, 1983).

Recientemente otras aplicaciones que han cobrado fuerza se dirigen hacia el cálculo de población urbana (Iisaka y Hegedus, 1982), desarrollo de índices de calidad de vida, y los estudios de morfología y planificación urbana. Para esto se integra la información proveniente de los sensores remotos con información tratada a través de Sistemas de Información Geográfica (Ehlers, 1990; Treitz et al, 1992; Westmoreland y Stow, 1992; Weber y Hirsch, 1992; Charbonneau y Royer, 1993; Gomasasca et al, 1993).

En Maracaibo (Figura 1), ciudad petrolera por excelencia y segunda en importancia económica y demográfica en el país, los cambios urbanos más drásticos se han producido entre las décadas de los 70 y 80, a consecuencia de la caída del precio del petróleo y de la fuerza que toman los sectores agrícola e industrial. El crecimiento urbano no ha sido planificado, razón por la cual las nuevas áreas incorporadas se caracterizan por la desorganización espacial, saturación de servicios y proliferación de áreas marginales, con los consecuentes problemas sociales que esto conlleva.

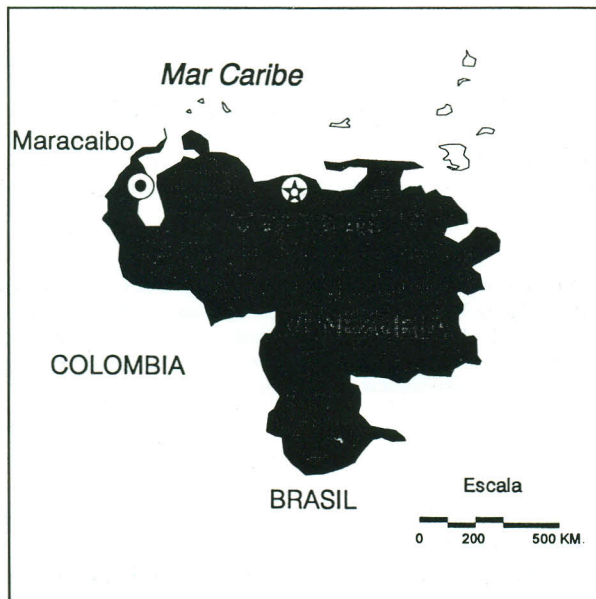


Figura 1.- Maracaibo. Localización a nivel nacional.

El proyecto aquí planteado pretende, evaluar las zonas de cambio y la dirección de dichos cambios, de manera que éstos nos permitan elaborar propuestas de planificación que permitan resolver los problemas actuales y evitar otros futuros.

La puesta en marcha de este proyecto requirió seleccionar dos imágenes de diferente fecha que permitieran evaluar los cambios ocurridos en la zona. Se trata de, dos imágenes adquiridas por el satélite Landsat, la primera registrada en 1973 por del sensor MSS y, la segunda por el sensor TM en 1986.

Las técnicas seleccionadas para llevar a cabo la detección de los cambios ocurridos fueron:

sustracción y regresión entre índices de vegetación, análisis de componentes principales, comparación de imágenes clasificadas independientemente, comparación de imágenes clasificadas por estratos y clasificación multitemporal.

2.- OBJETIVOS

- Determinar los cambios ocurridos en la cobertura del suelo en la ciudad de Maracaibo y sus alrededores inmediatos en el período 1973-1986, usando diferentes técnicas de detección de cambios.
- Realizar una revisión bibliográfica de las técnicas más frecuentemente usadas para detección de cambios en áreas urbanas usando imágenes de satélite.
- Jerarquizar las técnicas aplicadas, según el grado de precisión alcanzado en la detección de cambios en el crecimiento urbano y en la evaluación conjunta de espacios urbanos y no urbanos.
- Resolver los problemas que conlleva el uso integrado de imágenes adquiridas por dos sensores (MSS-TM) con características diferentes en cuanto a coeficientes de calibración, resolución espacial y resolución espectral.

3.- METODOLOGIA

Siguiendo el esquema metodológico en primer lugar se aplicaron algunos tratamientos previos a las imágenes, que se muestran en la figura 2. Tal y como se observa, el primer paso fue la corrección geométrica de las imágenes utilizadas. La imagen TM se corrigió tomando puntos de control homólogos entre ella y las hojas de la Cartografía Nacional venezolana números: 5847 y 5848, a escala 1:100.000. A partir de los puntos de control seleccionados se calcularon los coeficientes de transformación mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La calidad de la corrección se valoró comparando, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las reales, usando para ello el Error Medio cuadrático. El error medio estimado fue de 0,98938, que equivale a 29,68 metros. Igual procedimiento fue aplicado para la imagen MSS, con la salvedad de que la cartografía de referencia usada para la toma de los puntos de control, fue la imagen TM ya corregida. El error medio estimado fue de 0,96760, lo que equivale a 76,44 metros. En el momento de transferir los ND a su nueva posición, el tamaño del píxel de la imagen MSS fue reescalado de 79 metros a 30 metros. La validación de la corrección señaló un buen ajuste entre las imágenes corregidas y la cartografía de referencia.

A la imagen MSS fue necesario aplicarle una corrección del bandeo o *Stripping*; para ello fue utilizado un procedimiento de ajuste entre histogramas parciales que reduce las diferencias de calibración contenidas en los detectores de cada banda.

La presencia de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera dispersa, de forma selectiva, la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor. Esta dispersión es mayor en las longitudes de onda corta y disminuye paulatinamente hacia el infrarrojo (Chuvieco, 1990). En nuestro caso, el método seguido para corregir atmosféricamente las imágenes TM-1986 y MSS-1973 fue el de Chaves, denominado corrección del histograma por sus valores mínimos (Chaves, 1989). Se asume que el nivel digital (ND) mínimo de cada banda es aportado por la dispersión atmosférica. En consecuencia, basta restar ese ND mínimo para eliminar el efecto dispersor atmosférico.

Por otra parte, las imágenes a ser tratadas poseen parte de un cuerpo de agua de gran superficie, que está sometido a fuertes procesos de eutrofización, siendo los niveles digitales que lo representan altos y heterogéneos. Por esta razón, se hizo necesario aplicar una

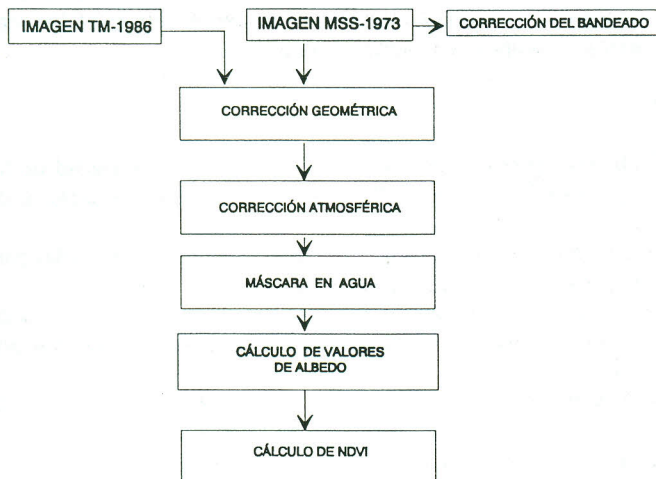


Figura 2.- Esquema metodológico - Tratamientos previos a las imágenes.

máscara sobre la información de agua a fin de llevar el valor de todos estos ND a cero, evitándose así la confusión con algunos elementos de tierra.

Para el cálculo de los índices de vegetación, transformamos las imágenes a valores de albedo a través de la fórmula:

$$Ak = [a_{o,k} + a_{1,k} (ND_k)] / E_{o,k}$$

donde $a_{o,k}$ y $a_{1,k}$ son los coeficientes de calibración para esa banda; el ND_k corresponde al nivel digital de la imagen en la misma banda y $E_{o,k}$ es la irradiancia solar extraterrestre.

Se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), dada su más fácil interpretabilidad, ya que, sus valores están acotados entre +1 y -1, con un umbral crítico para cubiertas vegetales en torno a 0,2. Con objeto de evitar los valores negativos se escalaron los resultados añadiendo a la ecuación dos términos constantes. La ecuación utilizada quedó expresada de la siguiente manera:

$$NDVI = ((A4-A3)/(A4+A3)+1)*125.$$

Se aplicaron las siguientes técnicas de detección de cambios:

a) La sustracción entre índices de vegetación consistió en restar a la imagen del NDVI de 1973, de la imagen de NDVI de 1986. Para evitar los valores negativos se aplicó una constante, de esta manera, la operación aplicada fue:

$$NDVIcam=(NDV73- NDVI86)+100$$

Este procedimiento nos da una distribución aproximadamente gaussiana donde los píxeles de no cambio se distribuyen alrededor de la media y los píxeles de cambio, están localizados en la cola de la distribución.

b) Para el caso de la regresión entre índices de vegetación, los píxeles de la imagen del

NDVI de 1986 fueron considerados como una función lineal de los píxeles de la imagen de NDVI de 1973. Con la regresión por mínimos cuadrados se obtuvo una ecuación, cuyos coeficientes permitieron obtener una imagen estimada. Esta imagen se restó de la imagen de la primera fecha. Los residuales permitieron obtener las áreas que experimentaron cambios entre los dos periodos. La fórmula utilizada fue:

$$\text{NDVI } 86' = (\text{NDVI } 86 - (10,1574297 + (1,0544175 * \text{NDVI } 73))) + 100$$

c) La técnica de componentes principales fue aplicada sobre una única imagen multitemporal de 8 dimensiones que contenía las bandas TM y MSS: verde, roja, infrarrojo cercano y roja filtrada. A esta imagen se le calculó la matriz de covarianza y a partir de ésta se obtuvieron los *eigenvalues* y *eigenvectors*. El resultado de esta técnica es directo, dado que en un análisis de la matriz de *eigenvectors* (Tabla 1), aquellas áreas que muestran signos iguales son las que se mantienen constantes entre dos fechas, mientras que, los signos diferentes se asocian con áreas de distinta respuesta entre los dos tiempos.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
TM2	0,35	-0,08	-0,13	-0,02	0,03	0,90	-0,04	0,23
TM3	0,65	-0,27	-0,27	-0,62	0,05	-0,31	0,03	-0,01
TM4	0,42	0,89	0,89	0,11	-0,03	-0,04	0,01	-0,03
TM3F	0,45	-0,34	-0,34	0,78	0,01	-0,23	-0,05	0,02
MSS4	0,09	0,03	0,03	0,07	0,79	0,04	0,41	-0,17
MSS5	0,18	0,01	0,01	0,00	-0,01	0,04	-0,72	-0,33
MSS7	-0,04	0,16	0,08	-0,01	0,28	-0,20	-0,31	0,87
MSS5F	0,19	0,64	0,00	0,04	-0,54	-0,03	0,47	0,22

Tabla 1.- Matriz de *eigenvectors*.

d) En la técnica de comparación de imágenes clasificadas, cada imagen fue clasificada independientemente, usando el método supervisado para definir las clases espectrales. Las bandas utilizadas fueron: verde, roja, infrarrojo cercano y roja filtrada. El número final de clases definidas fue de ocho, una vez evaluadas a partir del método gráfico de la elipse y el matemático de Divergencia Transformada. Las imágenes así clasificadas fueron comparadas a partir de una matriz de cambios y definidas las áreas que se mantuvieron constantes, las que experimentaron cambios y la dirección de los mismos.

e) La comparación de imágenes clasificadas por estratos consistió en aislar, a partir de digitalización en pantalla, el área urbana para ambas imágenes. Esta área se clasificó independientemente del área no urbana. Posteriormente las áreas urbanas y no urbanas clasificadas de forma aislada, se fusionaron en una única imagen. Las clasificaciones así obtenidas, se compararon a través de una matriz de cambios. De esta manera, se obtuvieron las áreas estables, las áreas de cambios y la dirección de los cambios ocurridos (color 48, anexo).

f) La clasificación multitemporal se llevó a cabo a partir de un fichero que contenía 8 bandas

originales de dos imágenes, una MSS con las bandas 4,5,7 y 5 filtrada y otra TM, con las bandas 2,3,4 y 3 filtrada. El método utilizado para obtener las clases espectrales fue el no supervisado. El número de clases definidas fue de 30. Un análisis de las estadísticas de cada una de estas clases y su visualización en pantalla permitió agrupar, en un número menor de categorías (15 en total), las áreas de cambio y las estables. En este caso se utilizó una máscara urbana post-clasificación para aislar la información del espacio urbano y el no urbano.

4.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- Cuando se usan simultáneamente imágenes MSS y TM, con fines de detección de cambios, es necesario hacer compatible la información presente en ellas. Para ello, resulta imprescindible abordar una corrección geométrica detallada que, además de permitir un perfecto registro entre ambas imágenes, hace posible redimensionar el tamaño del píxel de la MSS a la TM. Además, es necesario considerar una corrección atmosférica que permita minimizar la perturbación provocada por la presencia de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera, y una corrección radiométrica con el objeto de corregir las diferentes condiciones de iluminación entre las imágenes, así como las deficiencias de calibración entre los sensores, además de permitir establecer relaciones cuantitativas entre los datos proporcionados por la imagen y las características superficiales del suelo.

- Las técnicas de diferencias y regresión entre los índices de vegetación normalizados (NDVI) resultaron idóneos para detectar cambios en la vegetación natural y los cultivos. En la detección de cambios para el área urbana no resulta conveniente, ya que, aunque es posible identificar los cambios ocurridos en las zonas residenciales ajardinadas, resulta más complicado diferenciar distintas áreas edificadas. Con esta técnica sólo es posible determinar las áreas de cambio y no cambio

- Con la aplicación de la técnica de componentes principales, es el análisis de la matriz de *eigenvectors* y *eigenvalues*, lo que permite identificar las áreas que se han mantenido constantes y las que experimentan cambios entre dos fechas analizadas. Los *eigenvalues* proporcionan el porcentaje de la varianza original asociada a cada componente, lo que permite establecer cuáles son los componentes con posibilidad de mostrar áreas de cambio. En este caso, el componente 1 quedó descartado, pues la varianza asociada es muy alta (55,56%). Por su parte, los componentes 5, 6, 7 y 8, al poseer una varianza despreciable (1,08%, 0,37%, 0,32% y 0,11%, respectivamente), tampoco justificaron su análisis, fueron en consecuencia, los componentes 2, 3 y 4, con varianzas asociadas de 30,27%, 9,7% y 2,72% los que señalaron áreas de cambio. Un análisis de la matriz de *eigenvectors*, permitió obtener el grado de asociación entre cada componente y la información original. Tal y como se observa en la tabla 1 los componentes 2, 3 y 4 muestran un claro contraste entre las bandas de cada sensor. Los valores de la matriz de *eigenvectors* para el componente 2 son negativos bajos para las bandas del TM y positivos altos para las bandas del MSS, lo que evidencia una clara situación de cambios entre las dos fechas. El componente 3, muestra una situación similar con la salvedad de que la banda infrarroja posee un valor positivo alto en el TM y positivo bajo en el MSS, lo que señala fuertes cambios en este componente a nivel de cubiertas vegetales. Por su parte, en el componente 4 se observa una alta variabilidad entre los signos y valores en las diferentes bandas. Sin embargo, destaca el valor de cero mostrado en la banda roja de la imagen MSS y de -0,62 en la imagen TM.

La técnica de componentes principales permitió, de una forma general, determinar las áreas que experimentan cambios y las que se mantienen estables, permitiendo incluso para cada componente, discriminar diferentes categorías de cambios. Sin embargo, no resulta muy claro

la delimitación del perímetro urbano.

- El método de comparación post-clasificación dió resultados incorrectos, al no distinguir adecuadamente las categorías preestablecidas en las clasificaciones individuales. Esto se debe a la dificultad para obtener clases o categorías similares en ambas imágenes, debido a las diferencias en las coberturas presentes y a la dificultad de aislar las diferentes categorías urbanas, principalmente las dos clases que incluían cobertura vegetal en su estructura.

- La técnica de clasificación por estratos, resultó la más eficaz de las analizadas, ya que permitió aislar el componente urbano del no urbano para cada imagen estudiada. La clasificación individual de espacios urbanos y no urbanos hace imposible que exista confusión entre las categorías que definen a uno y otro espacio. Por otra parte, la aplicación de una matriz de cambios sobre imágenes correctamente clasificadas, permitió conocer la dirección y proporción de los cambios ocurridos, así como la expansión del perímetro urbano.

- La técnica de clasificación multitemporal reveló resultados aceptables, pues sus estadísticas permiten identificar las diferentes categorías incluidas en cada clase, lo cual hace menos subjetivo su análisis y más precisa la identificación de las cubiertas presentes, así como la determinación de zonas estables y dinámicas. Aquí no fue posible delimitar el área urbana ni las clases que la definían, puesto que, no resultó factible separar las zonas de jardines localizadas dentro del espacio urbano de algunas áreas de cultivos u otras coberturas naturales presentes en el espacio no urbano.

- En general, para las diferentes técnicas, la dificultad de la evaluación conjunta de un espacio urbano y otro no urbano, radicó principalmente en la confusión o mezcla existente entre ciertas categorías vegetales localizadas en ambos espacios.

- La validación de los resultados obtenidos en cada una de las técnicas utilizadas reveló que el método que mejor identificó los cambios ocurridos fue el de la comparación de las imágenes clasificadas por estratos, con un nivel de fiabilidad del 82,4%, en segundo lugar la clasificación multitemporal con un 69,54% y en tercer lugar el componente principal 3 con un 63,53% de fiabilidad (color 49, anexo) . Los demás métodos muestran porcentajes de fiabilidad entre el 63% y 49%.

- De la aplicación del método de comparación de imágenes clasificadas por estratos se concluyó que:

a) Se detectó un importante incremento en el área urbana de Maracaibo, que pasa de tener un área aproximada de 10.847 has en 1973 a 17.563 has en 1986. La expansión se realiza en todos los sentidos, es decir, al norte, al oeste y al sur, sin embargo, el crecimiento es más evidente hacia el sur, llegándose a conurbar con los centros poblados de San Francisco, Chiquinquirá y la Concepción.

b) Dentro de las categorías establecidas para el área urbana, las que mayor crecimiento experimentaron fueron la urbana continua (que incluye a la clase industrias) y la urbana discontinua muy ajardinada. La primera, pasa de tener un 3,11% de cobertura para 1973 a un 8,72% en 1986. La segunda, pasa de un 2,83% de cobertura en 1973 a un 8,72% en 1986. Por su parte la categoría urbano medianamente discontinuo y ajardinado mantiene porcentajes de área muy parecidos, aunque ligeramente superiores en 1986.

c) La categoría urbano continuo se incrementa en 1986, a expensas de áreas que poseían en 1973 las siguientes coberturas: urbano medianamente continuo y ajardinado, cultivos cosechados y áreas en construcción.

d) La categoría urbano discontinuo muy ajardinado creció a expensas de las categorías urbano medianamente continuo y ajardinado, cultivos cosechados y pastizales.

5.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bruijn, C.A. (1978): Delineation urban areas from Landsat images using digital processing: A comparison with grid-based Photo-interpretation. Proc. *International Symposium on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment*, Freiburg, pp. 903-916.
- Carter, P y Stow, B. (1979): Clean -up of digital Thematic Maps of Urban growth extracted from Landsat imagery, en Allan Harris (eds): *Remote Sensing and National Mapping*, Reading, pp. 27-40.
- Charbonneau, D. y Royer, A. (1993): Analysis of different methods for monitoring the urbanization process, *Geocarto International* vol 7, 1, pp. 17-25.
- Chaves, P. (1989): Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper Multispectral Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 55, 9, pp. 1285-1294.
- Chuvieco, E. (1990): *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, Rialp.
- Ehlers, M. (1990): Application of Spot for Regional Growth Analysis and Local Planning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 56, 9, pp. 175-180.
- Gomasasca, M; Brivio, P y Pagnoni, F. (1993): One century of land changes in the metropolitan area of Milan (Italy): *International Journal of Remote sensing*, vol 14, 2, pp. 211-223.
- Henderson, R.M (1983): A comparison of SAR brightness levels and urban land cover classes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 48, pp. 629-643.
- Iisaka, J y Hegedus, E (1982): Population estimation from Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. vol 12, pp. 259-272.
- Jensen, J.R; Pace, P.C y Christensen, E.J (1983): Remote sensing temperature mapping: the thermal plume example. *The American Cartographer*. vol 10, pp. 111-127.
- Jensen, J.R y Toll D.L (1982): detecting residencial Land Use development at the urban fringe. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. vol 48, 4, pp. 629-643.
- Treitz, P; Howarth, P y Gong, P. (1992): Application of Satellite and GIS Technologies for Land-Cover and Land-Use Mapping at the Rural-Urban Fringe: A Case Study. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 58, pp. 439-448.
- Weber, C y Hirsch, J (1992): Some urban measurements from SPOT data: urban Life quality indices. *International Journal and Remote Sensing*. vol 13, pp. 3251-3261.
- Westmoreland, S y Stow, D (1992): Category Identification of Changed Land Use Polygons in an integrated image processing Geographic Information System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. vol 58, pp. 1593-1599