



Análisis basado en objetos de imágenes Vexcel UltraCam D para detectar conjuntos residenciales en los municipios de Pereira y Dosquebradas con fines de precenso catastral por parte del IGAC

Object based images Vexcel UltraCam D analysis to detect residential complexes in the municipalities of Pereira and Dosquebradas with the purpose of cadastral pre-census of IGAC

Pedro Emilio Caicedo Ríos¹

Resumen

Esta investigación presenta un análisis basado en objetos para detectar conjuntos residenciales sobre tres áreas de estudio en los municipios de Pereira y Dosquebradas (departamento de Risaralda) que han tenido un desarrollo urbanístico importante durante el periodo 2005-2014, principalmente de conjuntos residenciales. El análisis se abordó desde una perspectiva de conocimiento a priori de las áreas de estudio y bajo una estrategia de procesamiento arriba-abajo a partir de la cual se realizó la segmentación de imágenes tomadas el 29 de enero y el 12 de mayo del 2015 por el sensor aerotransportado Vexcel UltraCam D del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Durante la investigación se identificaron parámetros de condiciones espectrales, geométricas, de textura y contexto, que permitieron diferenciar conjuntos residenciales de los demás objetos presentes en las imágenes. Se procesaron en total 251 imágenes (pares estereoscópicos) a partir de las cuales se derivaron modelos digitales de superficie (MDS) de las zonas de estudio, a los que se aplicaron diferentes filtros de pendiente y remoción de imperfecciones a fin de obtener modelos digitales de terreno (MDT) para conseguir información sobre la altura de los objetos. Se aplicó el algoritmo de modelo empírico lineal para la calibración radiométrica de las imágenes, que requirió coleccionar sobre la zona de estudio firmas espectrales de diferentes coberturas, tales como: suelo desnudo, piscinas, vegetación, césped y elementos antrópicos como vías en asfalto y concreto, tejas (asbesto, barro, española, fibrocemento, zinc, termo acústica) entre otros. Se alcanzó una exactitud en la clasificación de conjuntos residenciales del 82,85%.

Palabras clave: imágenes Vexcel UltraCam D, objetos, espectral, textura, geometría, relaciones contextuales, reflectancia, modelo digital de terreno (MDT), modelo digital de superficie (MDS).

¹ Magíster en Teledetección. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Correo: pecaicedo@igac.gov.co.





Abstract

This research presents an object - based analysis to detect residential complexes on three study areas in the municipalities of Pereira and Dosquebradas (Department of Risaralda) that have had an important urban development during the period 2005-2014, mainly residential complexes. The analysis was approached from an a priori knowledge perspective of the study areas and under a top-down processing strategy from which the segmentation of images taken on January 29 and May 12, 2015 by the sensor

Airborne Vexcel UltraCam D of the Agustín Codazzi Geographic Institute (IGAC). During the investigation parameters of spectral, geometric, texture and context conditions were identified, which allowed to distinguish residential complexes of the other objects present in the images. A total of 251 images (stereoscopic pairs) were processed from which digital surface models (MDS) were derived from the study areas, on which different slope filters and imperfection removal were applied in order to obtain digital models of (MDT), in order to know height information of objects. The algorithm of a linear empirical model was used for radiometric calibration of the images, which required spectral signatures of different coverages such as: bare soil, swimming pools, vegetation, grass and anthropic elements (asbestos, clay, Spanish, fiber cement, zinc, thermo acoustics), among others, achieving an accuracy in the classification of residential complexes of 82.85%.

Keywords: *Vexcel UltraCam D images, objects, spectral, texture, geometry, contextual relationships, reflectance, digital terrain model (DTM), digital surface model (DSM).*



Introducción

El análisis de imágenes basado en objetos busca que los computadores imiten lo más cercanamente posible el acto de interpretación de imágenes realizado por el cerebro humano, asumiendo que un sistema de visión humano, a partir de un conocimiento previo de características, identifica fácilmente objetos, discriminándolos con respecto a su entorno dentro de una imagen digital (Navulur, 2007).

En las imágenes Vexcel UltraCam D de los municipios de Pereira y Dosquebradas pueden observarse aspectos recurrentes en las áreas donde existen los conjuntos residenciales, como vías internas a base de asfalto, concreto y baldosa adoquín que no están demarcadas dentro del vector de nomenclatura vial pública municipal, existencia de piscinas, tejados hechos de materiales predominantemente a base de fibrocemento, arcilla y policarbonato, entre otros, amplias zonas verdes, así como una diferencia de altura constante entre el terreno y el techo de las viviendas (dada la homogeneidad en el diseño arquitectónico de las unidades de construcción), canchas de tenis, sintéticas y de concreto, entre otras muchas características. Por tal razón, los sitios donde todos o algunos de los objetos mencionados coexistan muy cerca espacialmente tendrían una alta posibilidad de conformar un conjunto residencial.

Actualmente, las imágenes del sensor Vexcel UltraCam D tomadas desde el avión del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) son uno de los principales insumos de trabajo en las oficinas territoriales de la entidad para la realización de la gestión catastral. Dependiendo de la escala y el objetivo de la misión, pueden alcanzar resoluciones entre los 7 a 30 centímetros, lo que propicia escenarios ideales para realizar análisis basados en objetos sobre las mismas.

Al procesar digitalmente las imágenes Vexcel UltraCam D en pares estereoscópicos, se obtuvo información como: modelos digitales de elevación a nivel de superficie y terreno que permiten considerar la forma y la altura de los objetos, medidas de textura para conocer patrones de distribución espacial de píxeles (Haralick, Shanmugam & Dinstein, 1973), reflectancia de los objetos y coberturas a partir del cotejamiento con bibliotecas espectrales de referencia.

Desarrollo teórico y metodológico

Desarrollo teórico

Zona de estudio

La zona de estudio está localizada en los municipios de Pereira y Dosquebradas, en el departamento de Risaralda, en la zona centro-occidente de Colombia (figura 1). Su centro de coordenadas está en los 4° 47' 42,88" norte y los 75° 42' 40,072" occidente para el dátum de origen Magna Colombia Oeste, con una altitud promedio de 1.450 metros sobre el nivel del mar que le permite contar con temperaturas que pueden ir desde los 16 a los 26 °C la mayor parte del tiempo.

La extensión total de la zona de estudio es de 111,74 km², de la cual 72,08 km² corresponde al área rural del municipio de Pereira y 21,90 km² a su parte urbana. Para el municipio de Dosquebradas, la proporción es de 8,18 km² para la parte rural y 9,58 km² en la parte urbana.



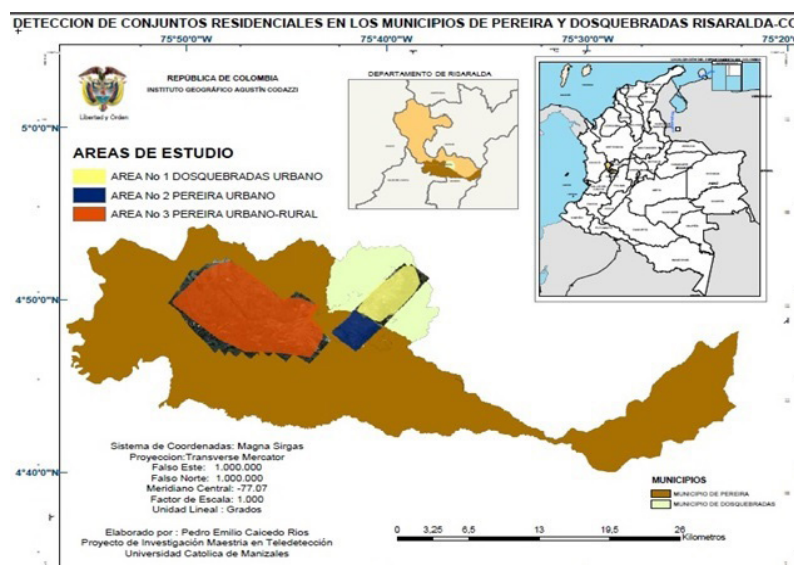


Figura 1. Zona de estudio en los municipios de Pereira y Dosquebradas

Fuente: elaboración propia a partir de información del IGAC, Territorial Risaralda (2016).

Catastro

El inventario o censo, debidamente actualizado y clasificado, de los bienes inmuebles pertenecientes al Estado y a los particulares, con el objeto de lograr su correcta identificación física, jurídica, fiscal y económica es denominado *catastro* (IGAC, 2010).

Precenso catastral

El precenso catastral corresponde a la inspección de todos los predios de una unidad orgánica catastral o parte de esta, para encontrar diferencias entre la información de la base de datos catastral, gráfica y alfanumérica, y la realidad observada (nuevos desarrollos, mayores áreas construidas, cambios de uso o de destino económico, demoliciones, avances de obra, etc.). Inspección que, como se anotó, permitirá validar o desechar adicionalmente marcas de predios que se dieron como consecuencia del diagnóstico de base de datos y análisis de otras fuentes de información.

Imágenes Vexcel UltraCam D

El IGAC cuenta con el sensor Vexcel UltraCam D que es transportado en la aeronave de la entidad (figura 2). Las imágenes obtenidas son utilizadas para labores de restitución fotogramétrica a fin de generar cartografía básica y ortofotografías, que se componen de tres bandas en el rango del visible (azul, verde, rojo) y la banda del infrarrojo cercano NIR que, para el momento, no está siendo utilizada en la Subdirección de Catastro para generar alguna clase de información o producto. Para esta investigación son de vital importancia los datos que se encuentran en dicha banda, puesto que a partir de la definición y el cálculo de índices espectrales sobre esta, entre otras cosas, se puede diferenciar la vegetación de tipo arbórea, que suele confundirse con las construcciones si se evalúa únicamente información sobre la altura de los objetos.





Figura 2. Aeronave con sensor Vexcel UltraCam D

Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF) del IGAC

Desarrollo metodológico

El desarrollo metodológico dentro de la investigación se define como de tipo cuantitativo experimental, se esquematiza por un flujo de procesos (figura 3) que implica la entrada y el procesamiento de datos para, posteriormente, generar información de productos concretos, como imágenes, modelos digitales y listados, entre otros.

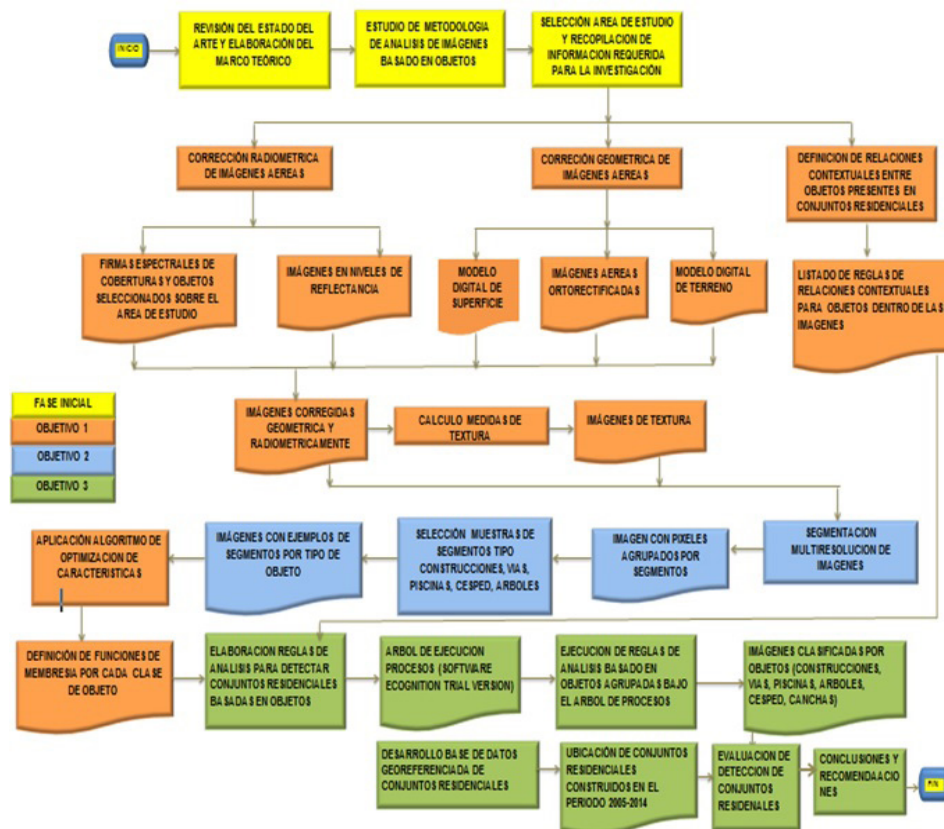


Figura 3. Diagrama de flujo de metodología

Fuente: elaboración propia.





Selección del área de estudio y recopilación de información requerida para la investigación

Para la investigación se procesaron 251 imágenes Vexcel UltraCam D correspondientes a tres áreas de estudio ubicadas en los municipios de Pereira y Dosquebradas, en el departamento de Risaralda, Colombia, tomadas el 29 de enero y el 12 de mayo de 2015 en nueve líneas de vuelo, en el horario comprendido entre las 11.00 a. m. y las 2.00 p. m. Las imágenes no se encontraban corregidas ni geométrica ni radiométricamente; la corrección geométrica se realizó colectando puntos de control de terreno a partir de dos imágenes de referencia ortorrectificadas de los municipios de Pereira (2007) y Dosquebradas (2009). Esta labor se realizó acatando lo definido por la guía técnica de corrección geométrica del software PCI Geomatics (PCI Geomatics Enterprises, 2016), donde se señala se deben coleccionar como mínimo tres puntos de control de terreno por cada cinco modelos estereoscópicos, e igual o mayor número de puntos de amarre en aquellas zonas donde se presente el solapamiento entre imágenes.

Corrección geométrica de imágenes Vexcel UltraCam D

La corrección geométrica de las imágenes Vexcel UltraCam D se hizo conforme el flujo de trabajo propuesto por la guía de entrenamiento de la solución geoprocesamiento GXL (PCI Geomatics Enterprises, 2016) utilizada para tal labor (figura 4).

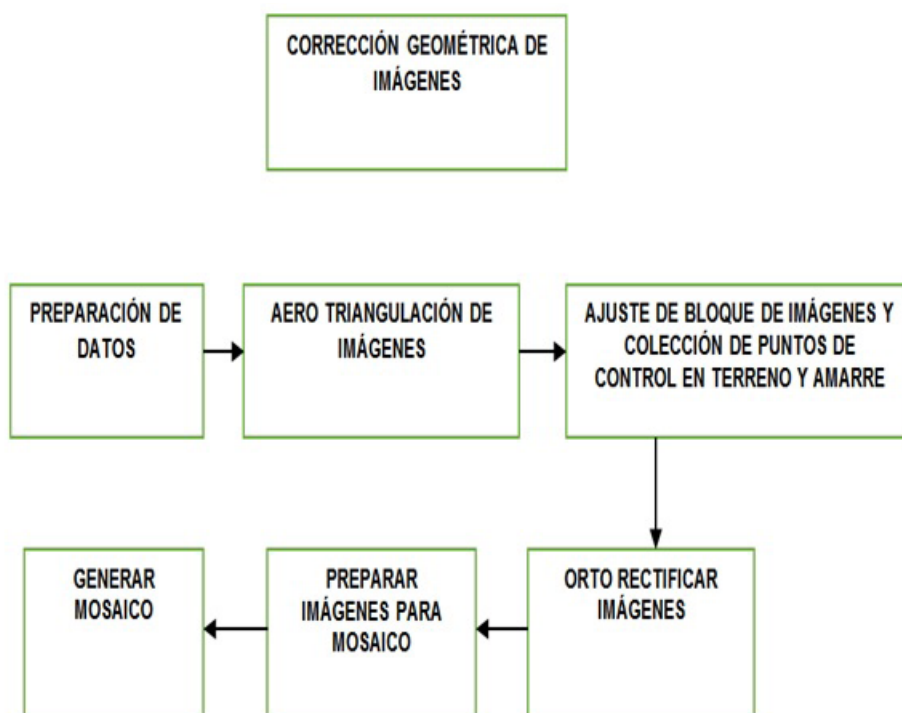


Figura 4. Flujo de trabajo

Fuente: elaboración propia a partir de PCI Geomatics Enterprises, 2016.

De donde se derivaron los modelos de elevación a nivel de superficie (figuras 5 y 6) y terreno (figuras 7 y 8) además de las ortofotos (figuras 9 y 10) por cada área de estudio.

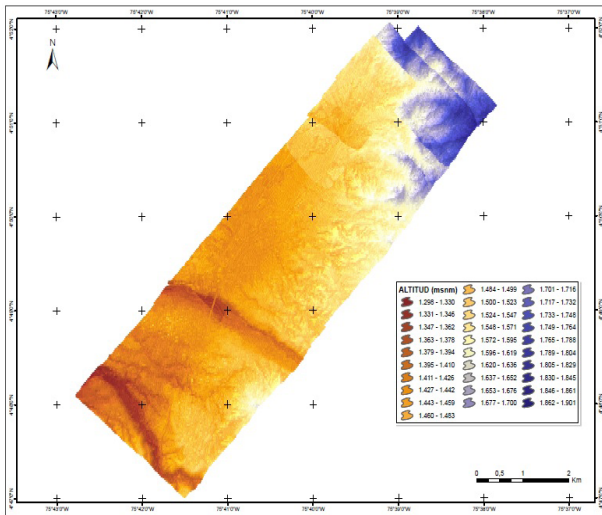


Figura 5. Modelo digital a nivel de superficie área de estudio N° 1 y 2 MDS, tamaño pixel = 60

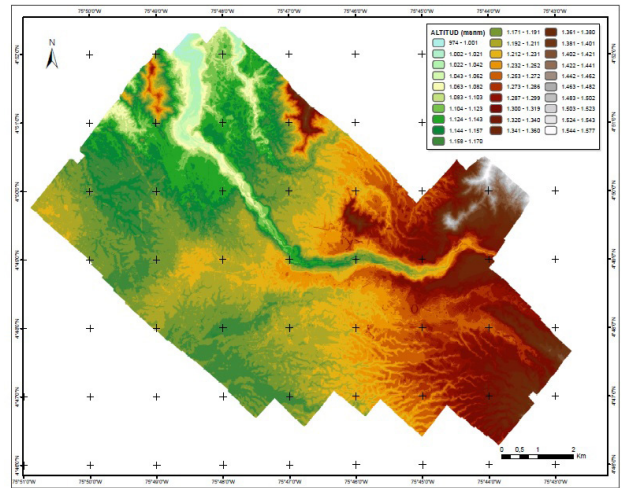


Figura 6. Modelo digital a nivel de superficie área de estudio N° 3 MDS, pixel = 60 cm

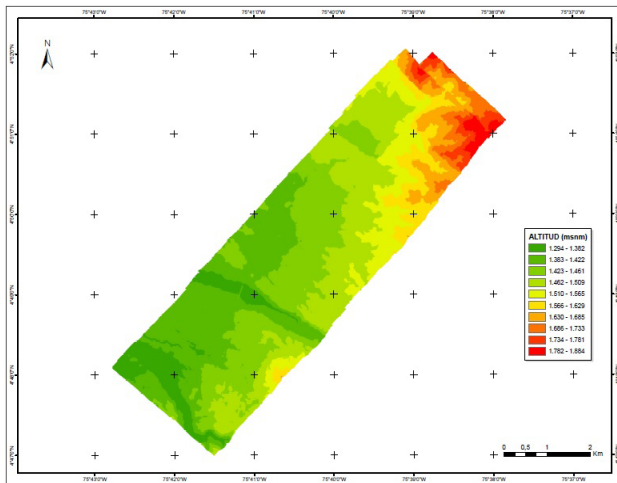


Figura 7. Modelo digital a nivel de terreno del área de estudio N° 1 y 2 MDT, pixel = 60 cm

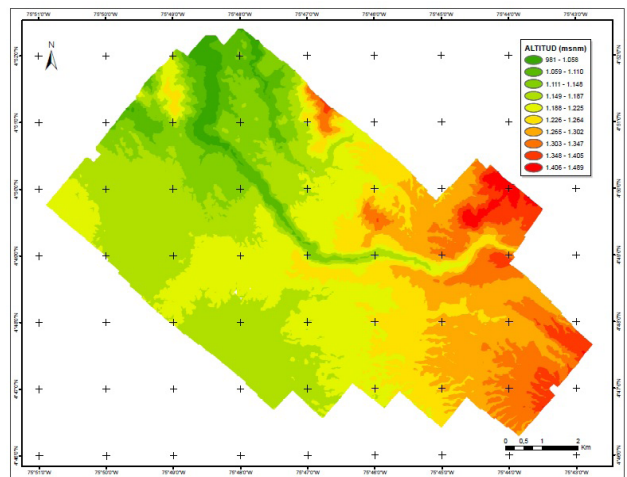


Figura 8. Modelo digital a nivel de terreno del área de estudio N° 1 y 2 MDT, pixel = 60 cm

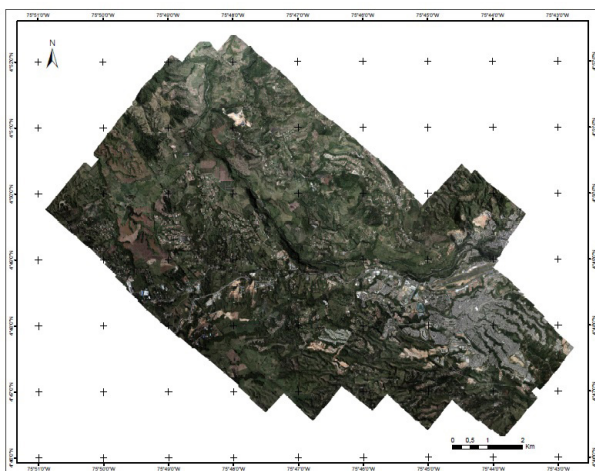


Figura 9. Ortofoto área de estudio N° 1 y 2

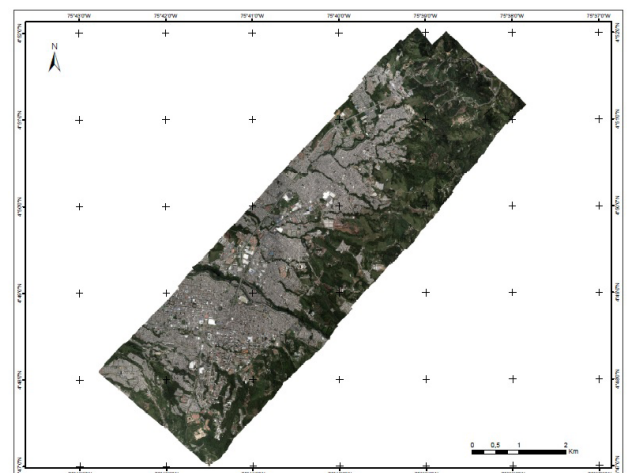


Figura 10. Ortofoto área de estudio N° 3, pixel = 30 cm

Fuente: elaboración propia.





Para las áreas de estudio 1 y 2 (figura 9) se establecieron 28 puntos de control en terreno tomados a partir del mosaico de imágenes ortorrectificadas de los municipios de Pereira (2007) y Dosquebradas (2010) (figura 34) respectivamente con un error medio cuadrático en $X = 0,302$ m, $Y = 0,281$ m. A su vez, se establecieron 10 puntos de amarre manualmente y a partir de estos se colectaron automática de 300 puntos² con un error medio cuadrático en $X = 0,010$, $Y = 0,009$, $Z = 0,026$. Exactitud aceptable si se considera que la resolución de la imagen es de 30 cm por pixel de conformidad con lo especificado en el *Instructivo de aerotriangulación digital* del IGAC (2014).

En el caso del área de estudio N° 3 se establecieron 32 puntos de control en terreno a partir de la imagen ortorrectificada del municipio de Pereira tomada en el 2007, con un error medio cuadrático en $X = 0,377$ m, $Y = 0,375$ m. Al tiempo, se establecieron 20 puntos de amarre manual a partir de los cuales se colectaron automática 7.594 puntos de amarre con un error medio cuadrático en $X = 0,135$ m, $Y = 0,144$ m, $Z = 0,293$ m.

Corrección radiométrica de imágenes Vexcel UltraCam D

A partir de los datos de radiancia en el rango espectral comprendido entre los 380 y 980 nanómetros consignados en el reporte de calibración del año 2013 para el sensor Vexcel UltraCam D del IGAC (Vexcel Imaging Company, 2013), se procedió a calcular el ancho a media altura espectral (FWHM) mediante el enfoque de determinación instrumental.

Donde X_A y X_B representan los valores de longitud de onda más cercanos, tanto por izquierda como derecha, al valor de radiancia media calculada para cada banda del sensor. Para el enfoque de determinación instrumental, el comportamiento de la radiancia en un rango espectral es asimilado a una distribución normal (figura 11). Aplicadas las ecuaciones 1 y 2, se obtienen los valores para determinar el ancho a media altura espectral FWHM o centro para cada banda. Se programó y ejecuto una campaña de campo para recolectar firmas espectrales de coberturas y objetos cuya presencia era recurrente en los lugares donde existían conjuntos residenciales. Algunas de las firmas obtenidas se muestran a continuación (figuras 12, 13 y 14), donde:

$Y_{\max}$ = Valor de radiancia máximo para la banda respectiva del sensor en su reporte de calibración.

$Y_{\min}$ = Valor de radiancia mínima para la banda respectiva del sensor en su reporte de calibración.

Y_{media} = Valor medio de radiancia obtenido partir de la radiancia máxima y mínima para la banda respectiva del sensor en su reporte de calibración.

X_{media} = Valor de longitud de onda para la respectiva banda del sensor al que corresponde la radiancia Y_{media} .

X_1 = Primer valor de longitud de onda más cercano por la parte derecha al X_{media} para la respectiva banda del sensor.

X_0 = Segundo valor de longitud de onda más cercano por la parte derecha al X_{media} para la respectiva banda del sensor.

² Punto cuyas coordenadas terrestres no son conocidas, pero puede ser reconocido visualmente en el área de traslapo entre dos imágenes (punto homólogo).





X_1' = Primer valor de longitud de onda más cercano por la parte izquierda al X_{media} para la respectiva banda del sensor.

X_0' = Segundo valor de longitud de onda más cercano por la parte izquierda al X_{media} para la respectiva banda del sensor.

Resolución espectral = Valor correspondiente al ancho espectral para la respectiva banda del sensor.

FWHM = Centro de banda calculado para la respectiva banda del sensor.

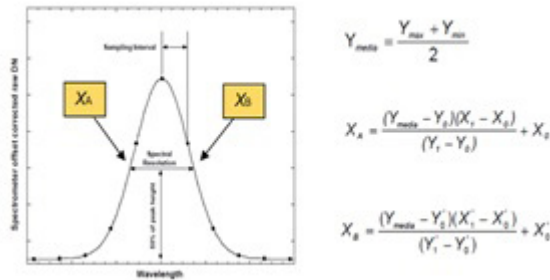


Figura 11. Determinación instrumental del ancho a media altura espectral
Fuente: Ariza, 2015.

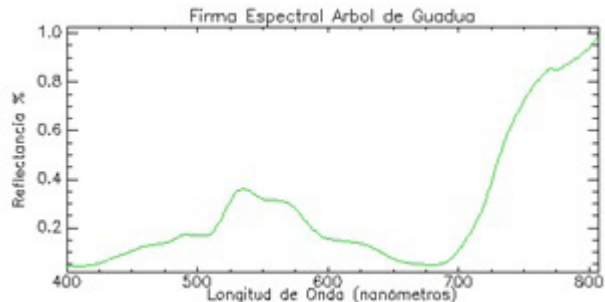


Figura 12. Firma espectral de árbol de guadua representada en niveles de reflectancia y longitud de onda en nanómetros
Fuente: elaboración propia.



Figura 13. Firma espectral de asfalto representada en niveles de reflectancia y longitud de onda en nanómetros
Fuente: elaboración propia.

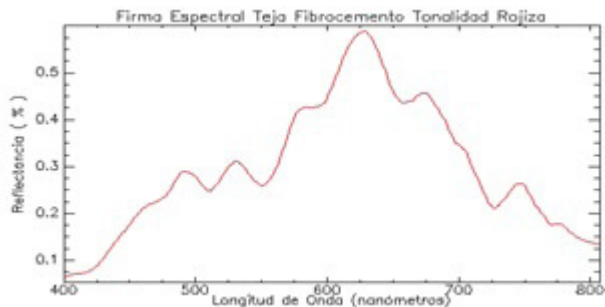


Figura 14. Firma espectral de teja de fibrocemento de tonalidad rojiza
Fuente: elaboración propia.

$$\text{Resolucion espectral} = X_B - X_A \quad (1)$$

$$\text{FWHM} = X_A + \left(\frac{\text{resolución_espectral}}{2} \right) \quad (2)$$

La corrección radiométrica se realizó aplicando un modelo empírico lineal que, para las áreas urbanas de la zona de estudio, requirió las siguientes firmas: a) blanco de referencia, b) sombra de construcción, c) piscina, d) teja de barro, e) asfalto, f) suelo desnudo, g) cancha de tenis, h) teja fibrocemento rojiza e i) césped sintético.

En el caso de la zona rural, la calibración se realizó con las siguientes firmas espectrales: a) blanco de referencia, b) sombra de construcción, c) piscina teja de barro, d) asfalto, e) suelo desnudo y f) árbol de guadua.





Condiciones espectrales, te-xtura, geométricas y contextuales evaluadas

Medidas espectrales

Índice de áreas construídas:

$$BAI = \frac{(bandaazul - bandainfrarrojocercano)}{(bandaazul + bandainfrarrojocercano)} \quad (3)$$

Ratio banda infrarrojo cercano/banda azul (Vijjapu, 2013):

Índice de agua de diferencia normalizada (Navulur, 2007):

$$Rationir_{az} = \frac{(bandainfrarrojocercano)}{(bandaazul)} \quad (8)$$

$$GNDVI = \frac{bdinfrarrojocercano - bdverde}{bdinfrarrojocercano + bdverde} \quad (4)$$

Ratio banda roja / banda verde (Vijjapu, 2013):

Índice de vegetación de diferencia normalizada (Tucker, 1979):

$$Ratiorojo - verde = \frac{(bandaraja)}{(bandaverde)} \quad (9)$$

$$NVDI = \frac{(bdinfrarrojocercano - bdroja)}{(bdinfrarrojocercano + bdroja)} \quad (5)$$

Intensidad (Vijjapu, 2013):

$$Intensidad = \frac{(bdas(azul + verde + rojo + infrar))}{4} \quad (10)$$

$$GRNVDI = \frac{(infrarrojocercano - (verde + rojo))}{(infrarrojocercano + (verde + rojo))} \quad (6)$$

Intensidad 2 (Vijjapu, 2013):

Ratio banda roja/banda azul (Vijjapu, 2013):

$$Intensidad2 = \frac{(bandas(verde + rojo + infrarrojo))}{4} \quad (11)$$

Índice de ratio de agua (Navulur, 2007):

$$Ratiorojo - azul = \frac{(bandaraja)}{(bandaazul)} \quad (7)$$

$$WRI = \frac{(bandas(Azul + verde + rojo + nir))}{4} \quad (12)$$

Medidas de textura

Se calcularon las siguientes medidas de textura para cada una de las imágenes de la zona de estudio (figuras 9 y 10) propuestas por Haralick et al. (1973), denotando i (la fila) y j (la columna) para cada pixel.

$$Media = \sum_{i,j=0}^{N-1} ip(i,j) \quad (13)$$

$$Varianza = \sum_{i,j=0}^{N-1} ip(i,j)(i - media)^2 \quad (15)$$

$$Contraste = \sum_{i,j=0}^{N-1} ip(i,j)(i - j)^2 \quad (14)$$

$$Segundomomentoangular = \sum_{i,j=0}^{N-1} i[p(i,j)]^2 \quad (16)$$

$$Correlacion = \sum_{i,j=0}^{N-1} ip(i,j) \left[\frac{(i - media)(j - media)}{\sqrt{varianza_i * varianza_j}} \right] \quad (17)$$





Medidas geométricas

Elongación: medida de la forma que indica la relación del eje mayor del objeto de la imagen al eje menor del mismo. Los ejes mayor y menor se derivan de un cuadro delimitador orientado que contiene el polígono. El valor de alargamiento de un cuadrado es 1,0, y el valor para un rectángulo es mayor que 1,0.

Elongación = Longitud mayor / Longitud menor.

Encaje rectangular: medida de forma que indica qué tan bien es descrito por un rectángulo el objeto de imagen. Este atributo compara el área del polígono con el área del cuadro delimitador orientado que encierra el polígono. El valor de ajuste rectangular para un rectángulo es 1,0, y el valor de una forma no rectangular es menor que 1,0.

Encaje rectangular = Area_objeto imagen / (Longitud mayor * Longitud menor).

$$MDSNORMALIZADO = MDS - MDT \quad (18)$$

Multirresolución por segmentación

Se inicializó aplicando a cada imagen una segmentación multirresolución usando los parámetros de escala, compacidad y forma propuestos por Benarchid et al. (2013) y Vijjapu (2013). Posteriormente se experimentó con diferentes valores de parámetros para la escala compacidad y forma hasta alcanzar segmentos de tejados en conjuntos residenciales lo más homogéneos posible a nivel de color y con forma preferiblemente rectangular.

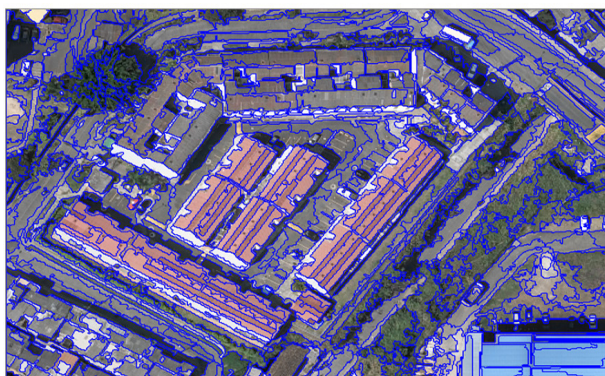


Figura 15. Segmentación multirresolución
escala = 30, forma = 0,1 y compacidad = 0,5
Fuente: elaboración propia.

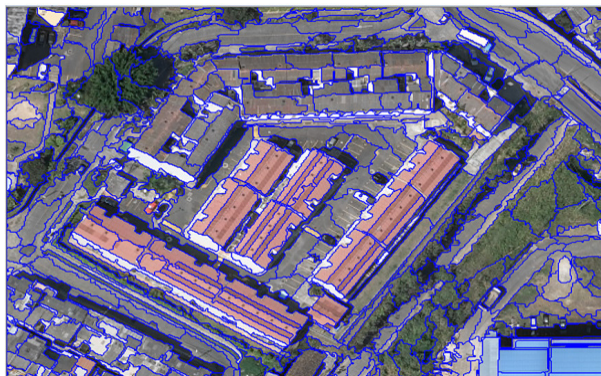


Figura 16. Segmentación multirresolución
escala = 30, forma = 0,5 y compacidad = 0,5
Fuente: elaboración propia.

Selección de muestras de objetos tipo tejados, vías, piscina, asfalto y concreto

Una vez las imágenes fueron segmentadas por el algoritmo de multirresolución usando los parámetros obtenidos a partir de la experimentación en la fase anterior, se procedió a seleccionar muestras de segmentos, diferenciando aquellos que pertenecen objetos que están a nivel del suelo de los que están por encima, así:





Tabla 1. Cantidad de muestras por clase

CLASE	TOTAL MUESTRAS
<i>Nivel del suelo</i>	
ASFALTO_CONCRETO_ZONAS_DURA	1.482
SUELO DESNUDO	479
CANCHA_TENIS	233
CÉSPED SINTÉTICO	201
SOMBRAS_CONSTRUCCIÓN	299
PISCINA	348
VEGETACIÓN	689
SOMBRAS_VEGETACIÓN	356
<i>Sobre el suelo</i>	
TEJADO GRIS	2.044
TEJADO ROJO_ROSADO	1.703
TEJADO BLANCO	1.211

Fuente: elaboración propia.

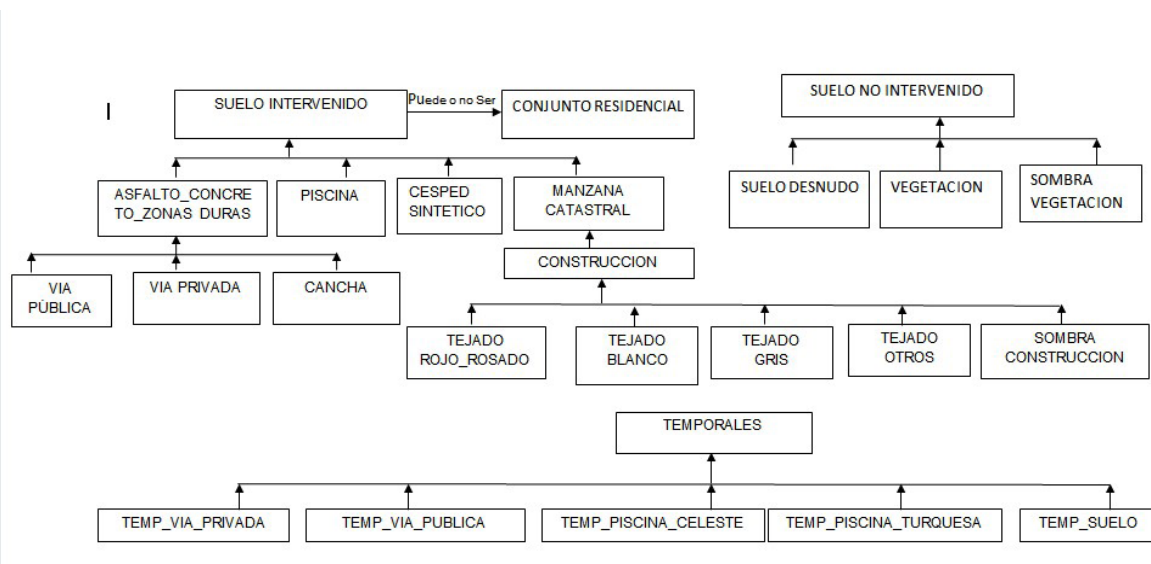


Figura 17. Diagrama jerárquico de clases para el análisis basado en objetos de la investigación
Fuente: elaboración propia.

Aplicación del algoritmo de optimización de características

Las medidas espectrales y de textura que ofrecieron mejor separación entre las diferentes parejas de clases de los segmentos tomados como muestra al aplicarse el algoritmo de optimización de espacio de características (columna derecha, tabla 2), al finalizar la etapa de experimentación, se registraron bajo la estructura descrita en la tabla 2.

Tabla 2. Mejores características para separación entre parejas de clases

CLASE	ASFALTO_CONCRETO_ZONAS_DURAS	SUELO DESNUDO	CANCHA TENIS	CESPED SINTETICO	SOMBRA CONSTRUCCION	PISCINA
ASFALTO_CONCRETO_ZONAS_DURAS	MEJORES CARACTERISTICAS PARA SEPARACIÓN ENTRE PAREJAS DE CLASES					
SUELO DESNUDO						
CANCHA TENIS						
CESPED SINTETICO						
SOMBRA CONSTRUCCION						
PISCINA						

Aplicación de algoritmos de optimización de espacio de características entre clases sombra de construcción y piscina



Fuente: elaboración propia.

Definición de funciones de membresía y valores umbrales por cada clase de objeto

Las funciones de mebresia describen el comportamiento de una medida (espectral, textural, geométrica) en terminos de la pareja (valor, % probabilidad de pertenecer a una clase). En este trabajo de investigación se determinaron las mejores medidas para clasificar cada una de las clases. Adicionalmente, se elaboró un tabla de frecuencias por cada una de las muestras y su correspondiente medida para determinar probabilidad de ocurrencia y, con base en esto, definir las respectivas funciones de membresía, tal como se ilustra a continuación para la clase *piscina* y el indice de areas construidas BAI (3).



Tabla 3. Ocurrencia de valores para las muestras de segmentos de la clase *piscina* para el índice de áreas construidas BAI

Valor	Probabilidad	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Frecuencia
0,36	0	0		0	0	0,000	0,00	0	0
0,37	0,57142857	0		1	1	0,000	1,00	1	4
0,38	0,57142857	0		1	1	0,000	1,00	1	4
0,39	0,57142857	0		1	1	0,000	1,00	1	4
0,4	0,57142857	0		1	0	1,000	1,00	1	4
0,41	0,57142857	0		1	0	1,000	1,00	1	4
0,42	0,57142857	0		1	0	1,000	1,00	1	4
0,43	0,71428571	1		1	0	1,000	1,00	1	5
0,44	0,85714286	1		1	1	1,000	1,00	1	6
0,45	0,85714286	1		1	1	1,000	1,00	1	6
0,46	0,85714286	1		1	1	1,000	1,00	1	6

Fuente: elaboración propia.

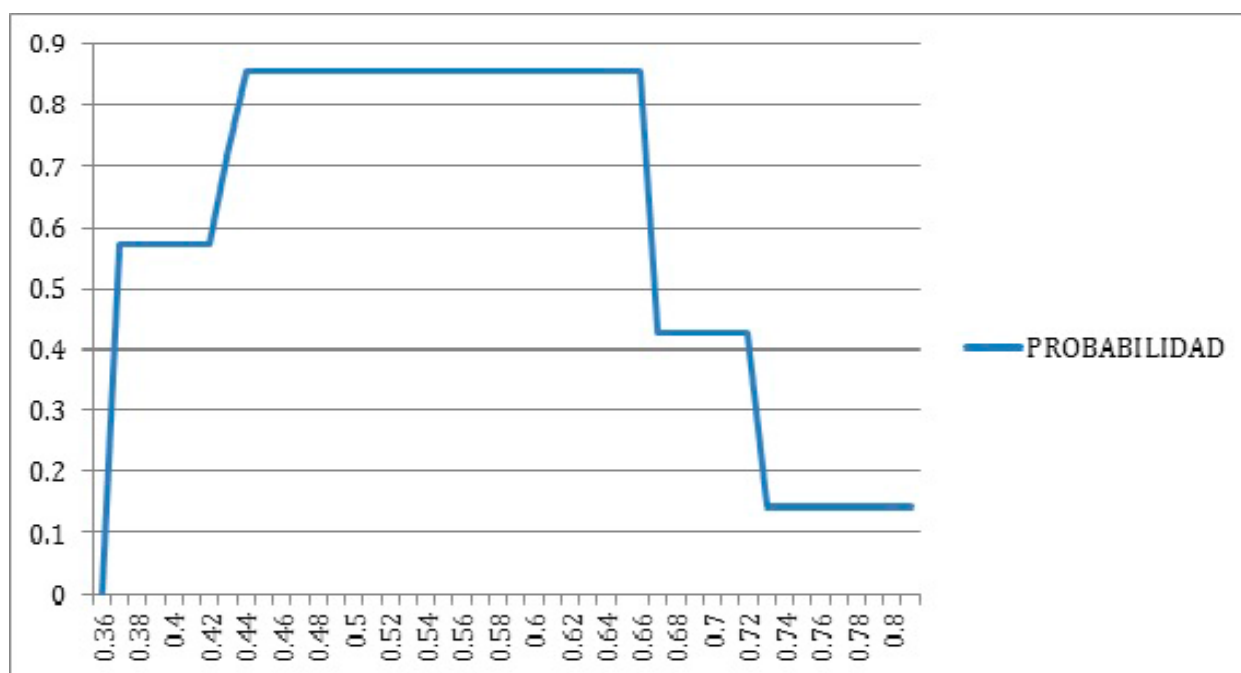


Figura 18. Función de membresía del índice de áreas construidas BAI (3) para la clase piscina

Fuente: elaboración propia.





Elaboración de reglas de análisis para detectar conjuntos residenciales en el software eCognition Trial 9.1.

Algoritmo de asignación de clases

El algoritmo de asignación de clases se utilizó principalmente para aquellos segmentos que podían clasificarse a partir de máximo dos medidas y su correspondiente umbral, como fue el caso de aquellos pertenecientes a la clase *vegetación*, que podían ser clasificados a partir de la evaluación del índice normalizado de vegetación (figuras 19 y 20).

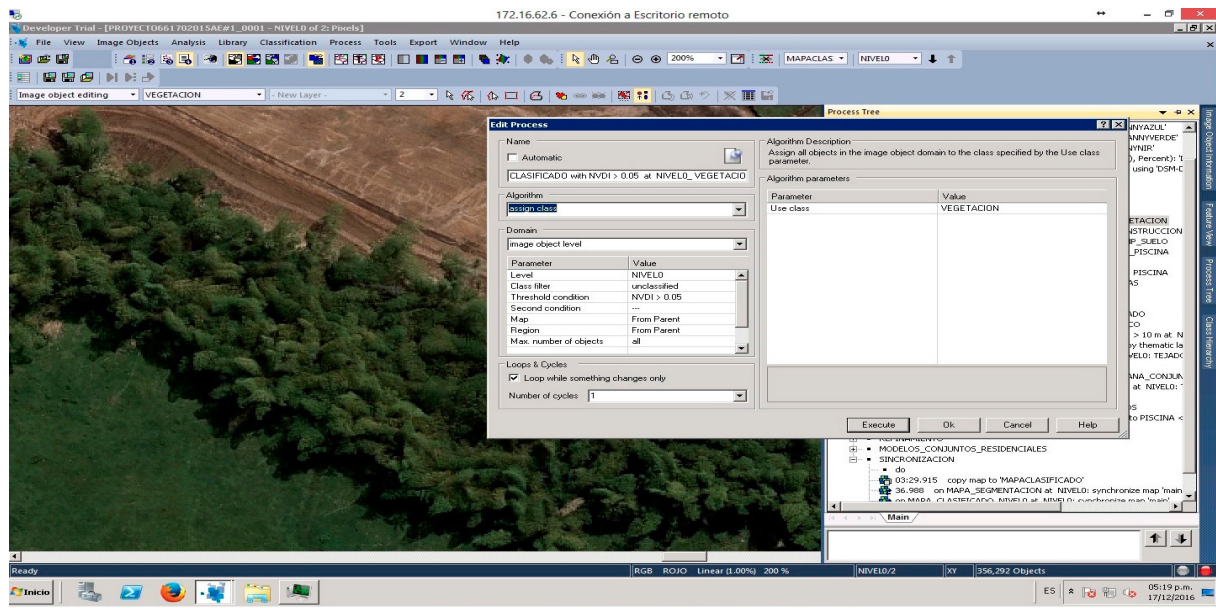


Figura 19. Imagen antes de aplicar regla de análisis para clasificar vegetación

Fuente: elaboración propia.

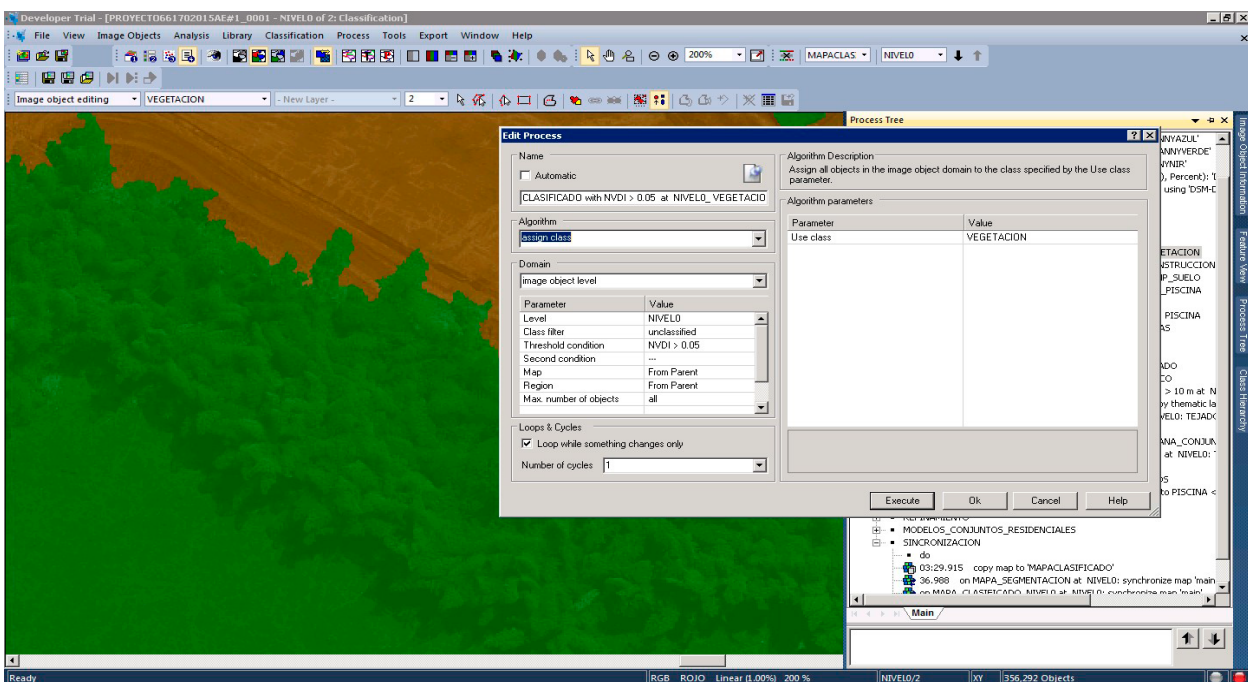


Figura 20. Imagen después de aplicar regla de análisis para clasificar vegetación

Fuente: elaboración propia.





Algoritmo de clasificación por funciones de membresía

El algoritmo de clasificación por funciones de membresía se utilizó para aquellos segmentos que solo podían categorizarse por la evaluación de las funciones de membresía obtenidas durante la fase de recolección de muestras y aplicación del algoritmo de optimización de características. Este fue el caso de los tejados de tonalidad roja, rosada y café, correspondientes a los materiales de arcilla, fibrocemento y barro respectivamente (figuras 21 y 22), (rosado = tejados rosados, azul = piscina, negro = asfalto, café = objetos a nivel de suelo).

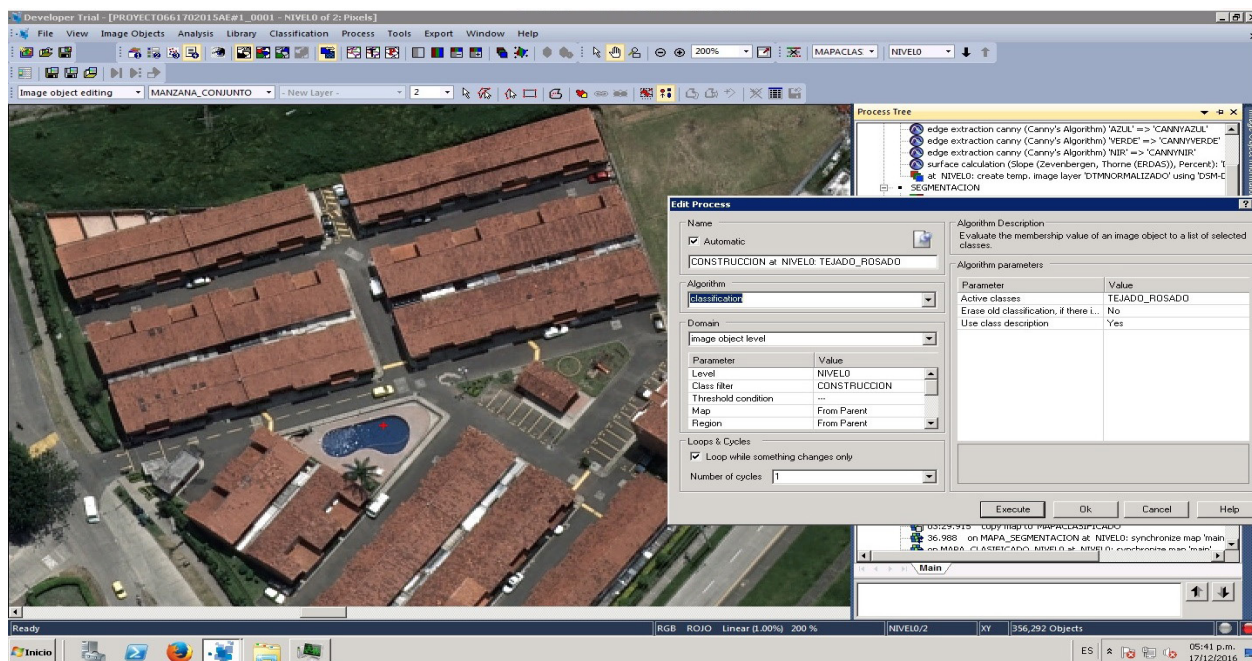


Figura 21. Imagen antes de aplicar algoritmo
Fuente: Elaboración propia

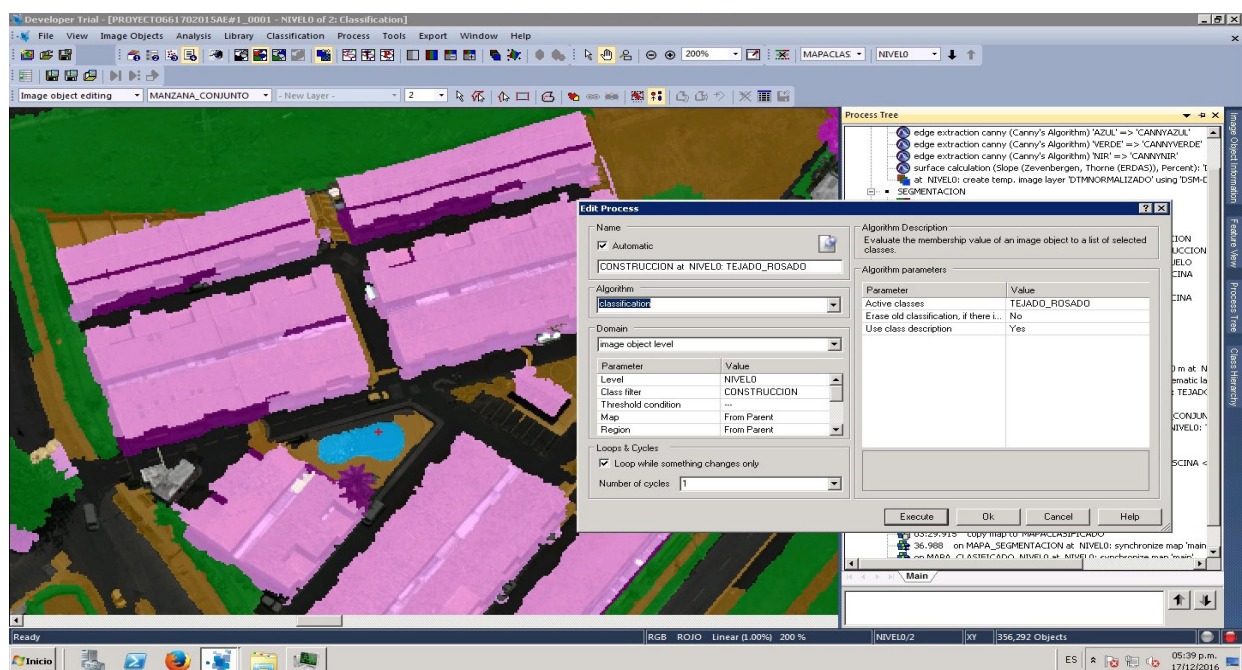


Figura 22. Imagen después de aplicar algoritmo
Fuente: elaboración propia.





Algoritmo de crecimiento por regiones

Este algoritmo se utilizó para agrupar segmentos que previamente hubiesen sido clasificados bajo una misma categoría o clase y que estuviesen contiguos espacialmente, es decir, que compartieran bordes. Este proceso de clasificación se utilizó, por ejemplo, para el caso de conformación de vías y manzanas catastrales (figuras 23 y 24).

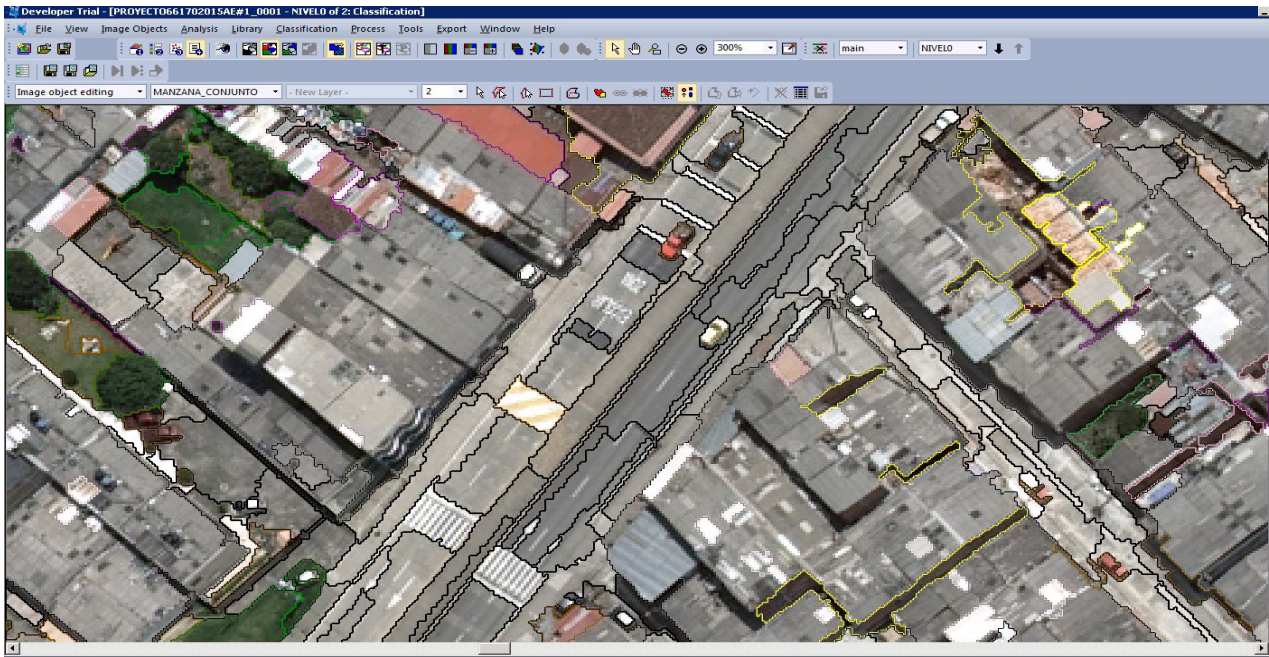


Figura 23. Segmentos clasificados como vías sin aplicar el algoritmo

Fuente: elaboración propia.

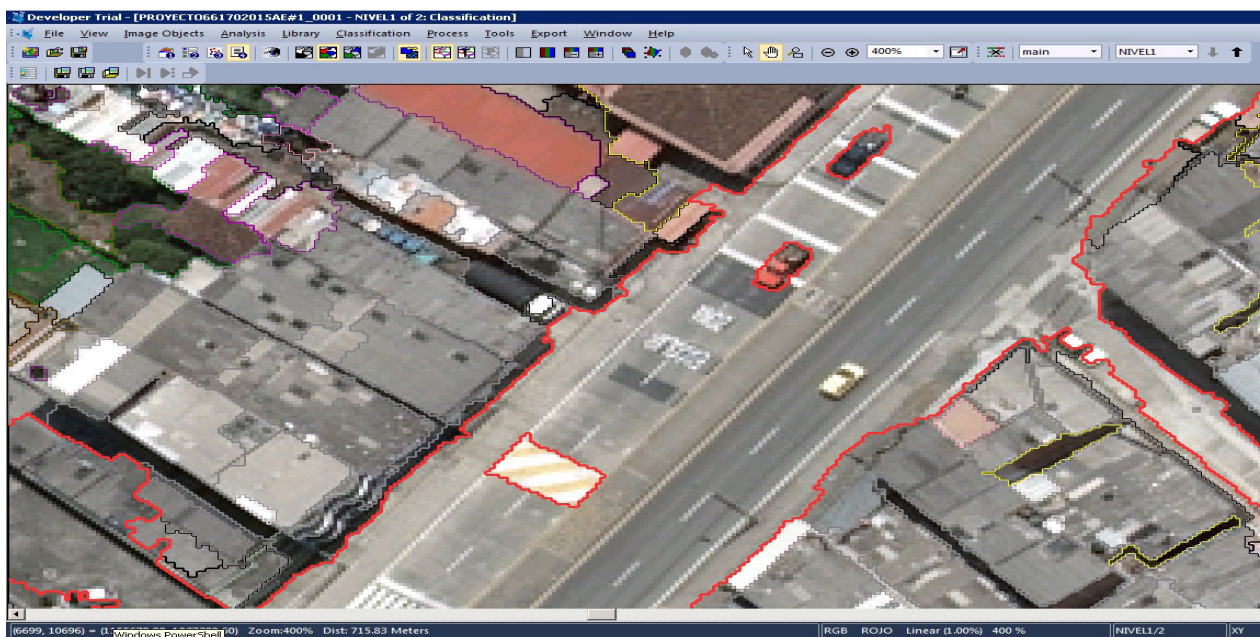


Figura 24. Objeto vía pública conformado por segmentos agrupados por el algoritmo de crecimiento por regiones

Fuente: elaboración propia.





Algoritmo para buscar objetos rodeados por clases

Este algoritmo fue utilizado principalmente para refinar la forma de tejados que por razones de diseño o diferencia de alturas presentan discontinuidades, como en el caso de los efectos por sombras (figuras 25 y 26), clases (amarillo = tejado a base de barro; púrpura = otros tejados, negros = sombras de construcción).

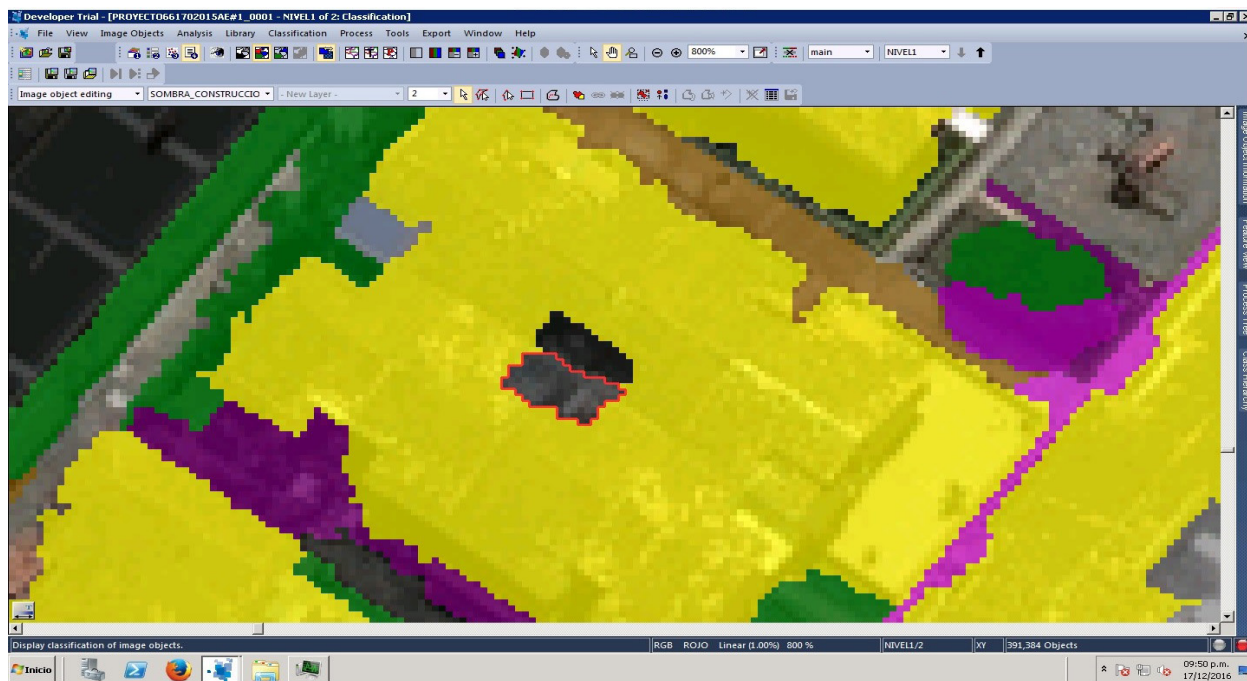


Figura 25. Imagen clasificada antes de aplicar el algoritmo para buscar objetos rodeados por clases
Fuente: elaboración propia.

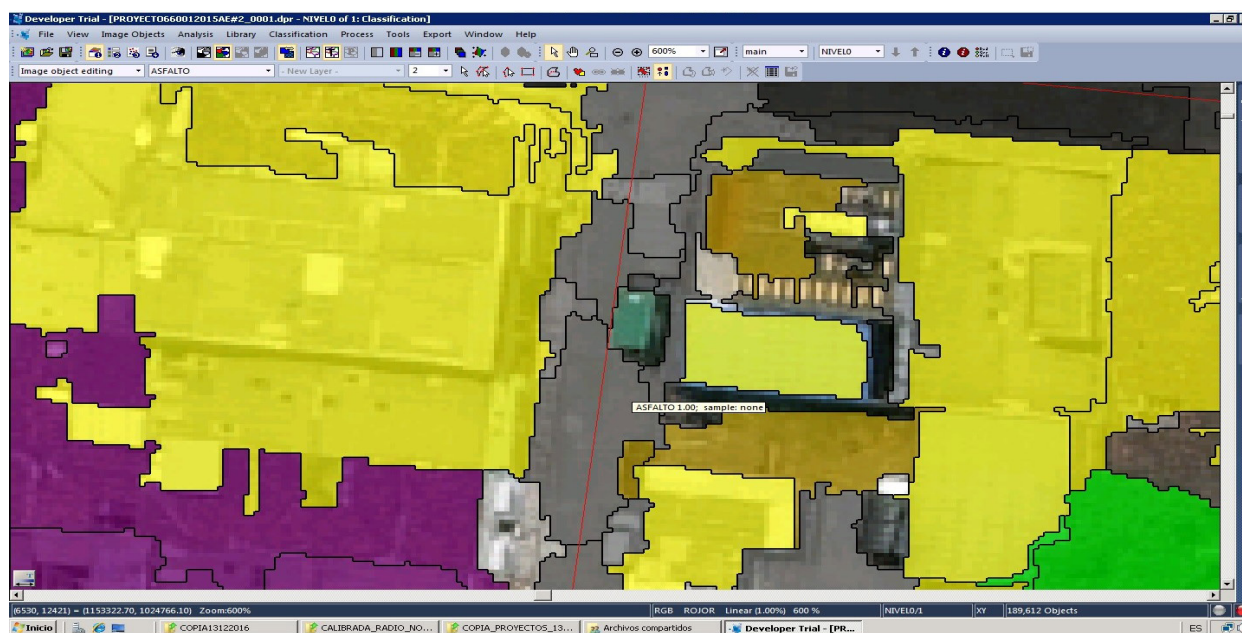


Figura 26. Imagen después de aplicar el algoritmo
Fuente: elaboración propia.





Asignación de clase por capa temática

Este algoritmo fue usado para reclasificar objetos de la clase *asfalto* o *zonas duras*, como los objetos *vías públicas*, verificando si se interceptaban con el vector de nomenclatura vial pública para los municipios de Pereira y Dosquebradas.

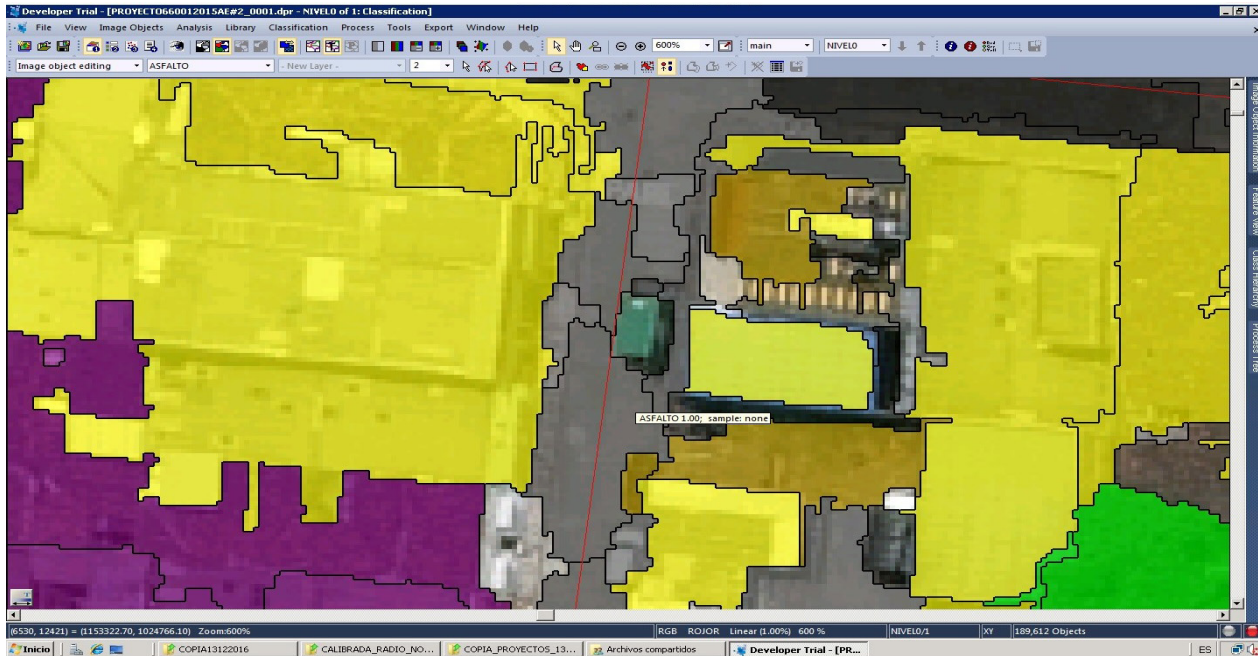


Figura 27. Imagen antes de aplicar el algoritmo de asignación de clases por capa temática en un segmento clasificado como asfalto (gris claro)
Fuente: elaboración propia.

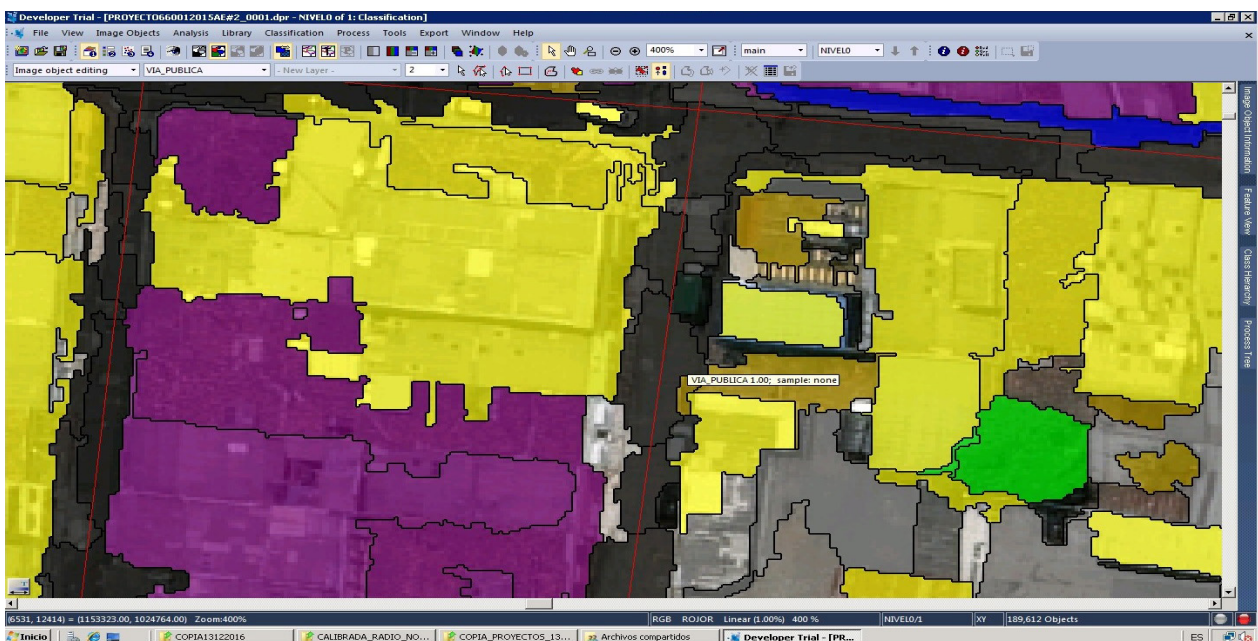


Figura 28. Imagen reclasificada con objetos de clase vía pública (color gris oscuro) después de aplicar el algoritmo de asignación de clases por capa temática
Fuente: elaboración propia.





Conclusiones

Se partió del conocimiento a priori de los esquema de composición prototipo superobjeto - subobjeto de un conjunto residencial rural (figura 29) y urbano (figura 30), donde se plantea que este debe estar formado por viviendas o torres de apartamentos contiguas con las mismas características de cubierta, vías internas hechas de un material como asfalto, concreto, baldosa en adoquín y espacios comunes para la recreación, como piscinas, canchas, etc. El esquema de composición superobjeto - subobjeto en la parte rural está dado básicamente por una secuencia de lotes intervenidos con una vivienda que, en la mayoría de los casos, usa teja de barro como cubierta, según datos consignados en el estudio de acabados del Departamento de estudios económicos y urbanos Camacol Risaralda (2016), y presenta una alta posibilidad de existencia de una piscina por cada unidad de loteo, con sus respectivas vías internas, rodeadas predominantemente de vegetación.

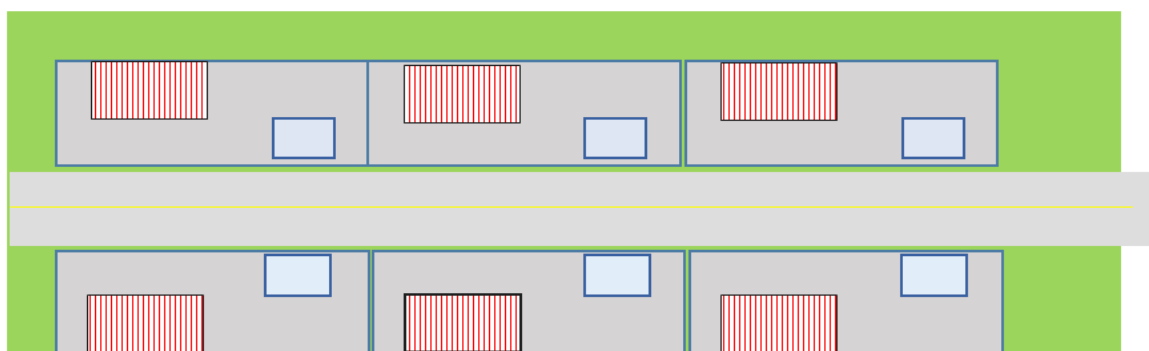


Figura 29. Esquema de composición de un conjunto residencial rural

Fuente: elaboración propia.

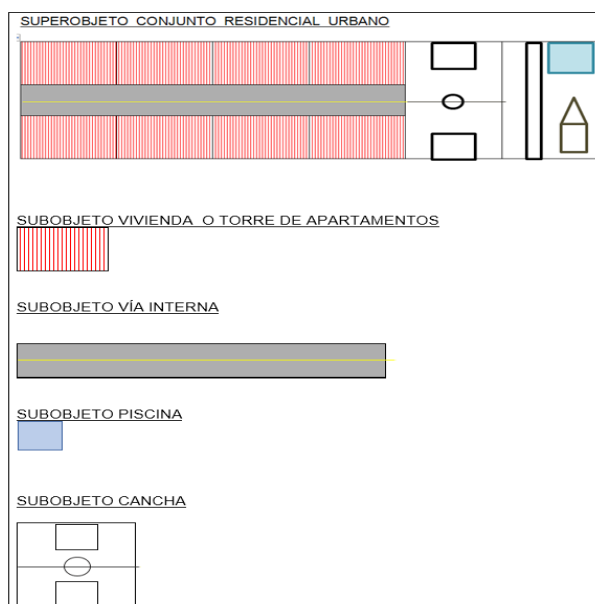


Figura 30. Esquema de composición de un conjunto residencial urbano

Fuente: elaboración propia.



Se segmentaron las imágenes siguiendo una estrategia de procesamiento arriba - abajo para separar vegetación, construcciones y suelo. Los segmentos correspondientes a objetos primitivos (Benz, Hofmann, Willhauck, Lingenfelder & Heynen, 2004) se obtuvieron al ejecutar el algoritmo de segmentación por multirresolución (Trimble Germany, 2014). Los parámetros para la imagen del área de estudio N° 3, para la parte rural, fueron: forma = 0,5, compacidad = 0,5, escala = 80. Para el caso de las imágenes de las áreas de estudio N° 1, 2 y 3, parte urbana, fueron: forma = 0,5, compacidad = 0,5, escala = 30. Inicialmente se clasificaron los segmentos cuyo NVDI (4) fuese mayor al evaluar los niveles de reflectancia como vegetación. Para el caso de los valores mayores a 0,2 en niveles digitales (figura 32) y que estuviesen contenidos por segmentos de vegetación, se clasificaron como *sombras de vegetación*.



Figura 31. Imagen original del área de estudio N° 3, parte urbana

Fuente: elaboración propia.

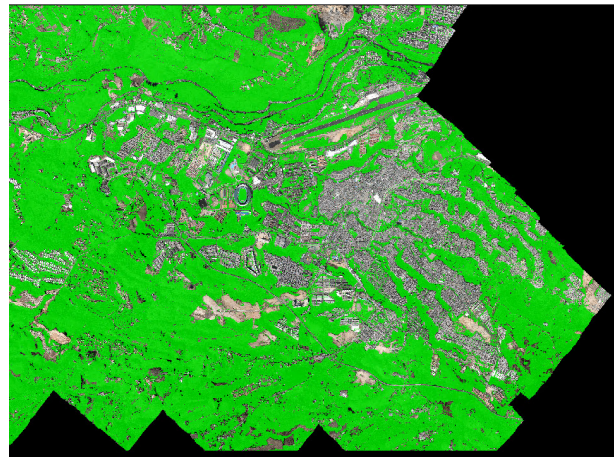


Figura 32. Imagen original del área de estudio N° 3, parte urbana

Fuente: elaboración propia.

Se determinó que los segmentos con valores MDS normalizado (18) mayores a 2,5 fueran clasificados como *construcción*; los valores entre 1,5 y 2,5 se evaluaron conjuntamente con relaciones contextuales para confirmar su clasificación como construcción, y los valores menores a 1,5 se clasificaron como “temp_suelo”.

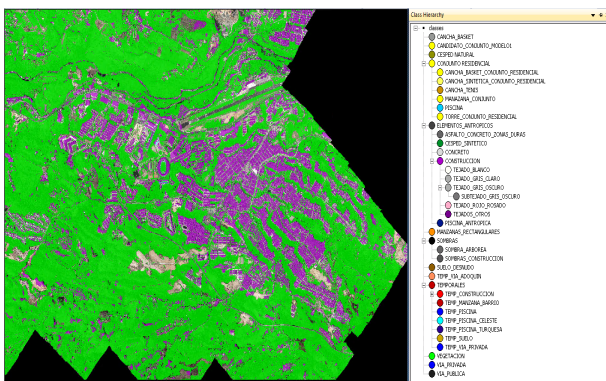


Figura 33. Imagen segmentada por nivel con vegetación y construcciones clasificadas

Fuente: elaboración propia.

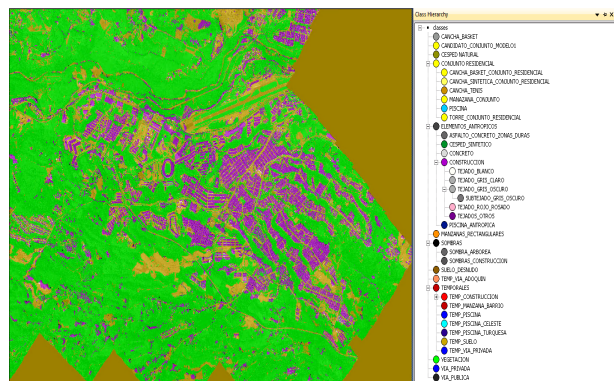


Figura 34. Imagen clasificada con vegetación (verde), construcciones (púrpura) y suelo (café)

Fuente: elaboración propia.





Se clasifica sucesivamente hacia subniveles de objetos como, por ejemplo, las construcciones que se separan por clases de tejados (blancos, rojizos, grises u otros tejados) y los objetos a nivel de suelo, diferenciando aquellos hechos a base de concreto o asfalto, césped sintético, suelo desnudo y piscinas, y se ejecutan las reglas de análisis basado en objetos con las siguientes medidas por clase: se aplicaron sucesivamente algoritmos de asignación y clasificación por funciones de membresía 2.2.9.1 y 2.2.9.2 de objetos sobre el suelo, tejados rosados, rojos, cafés, blancos, otros tejados y objetos a nivel del suelo como vías en asfalto, concreto, piscinas, canchas de tenis y césped sintético. Los tejados de tonalidad rosada, rojiza y blanca son muy característicos en los conjuntos residenciales ubicados en el área de estudio (un 46% cuenta con ellos), por lo que era indispensable diferenciarlos del resto de los tejados, dada su notoriedad frente a otros conjuntos residenciales.

Al finalizar la ejecución de las reglas de análisis sobre cada una de las imágenes se obtuvo la matriz de confusión para las clases de más alto nivel del esquema (figura 17).

Tabla 4. Matriz de confusión resultado de la clasificación basada en objetos

Polígonos (objetos)	Conjunto residencial	Construcciones	Vías públicas	Vegetación	Zonas duras	Total objetos clasificados
Conjunto residencial	116	7	0	0	2	125
Construcciones	20	41	0	0	1	62
Vías públicas	0	0	50	0	0	50
Vegetación	0	0	0	50	0	50
Zonas duras	4	2	0	0	47	53
Total objetos campo	140	50	50	50	50	340

Fuente: elaboración propia.

El índice de exactitud global calculado para la clasificación fue de 89,4% ($116 + 41 + 50 + 50 + 47 / 340$) y las exactitudes de productor y usuario con sus respectivos porcentajes de omisión y comisión para cada clase se detallan en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la evaluación de exactitud de la clasificación basada en objetos

Clase	Exactitud productor	Exactitud usuario	Error omisión	Error comisión
Conjunto residencial	82,85%	92,80%	17,14%	7,20%
Construcciones	82%	66,13%	18%	33,87%
Vías públicas	100%	100%	0,0000	0,0000
Vegetación	100%	100%	0,0000	0,0000
Zonas duras	94%	88,68%	6%	11,32%

Fuente: elaboración propia.



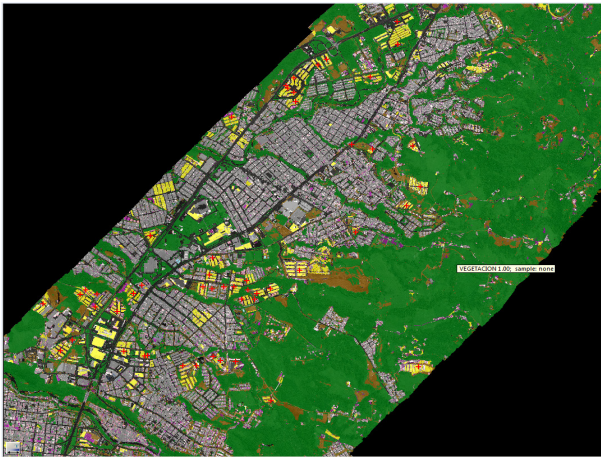


Figura 35. Resultados de clasificación basada en objetos para el área de estudio N° 1 (color amarillo = conjuntos residenciales detectados; cruz roja = ubicación de conjuntos residenciales base datos geográfica), 17.780 x 18.637 pixeles

Fuente: elaboración propia.

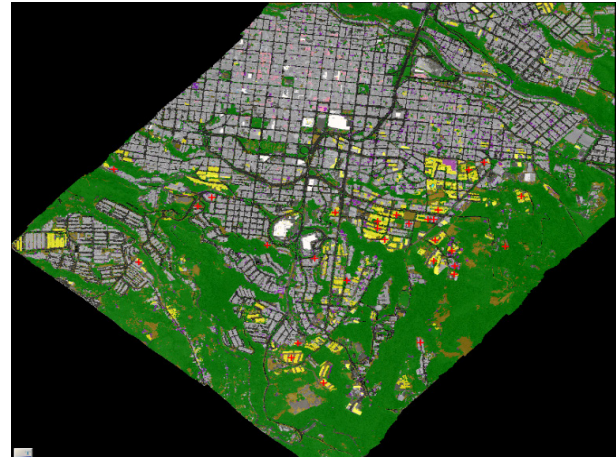


Figura 36. Resultados de clasificación basada en objetos para el área de estudio N° 2 (color amarillo = conjuntos residenciales detectados; cruz roja = ubicación conjuntos residenciales base datos geográfica), 14.876 x 13.013 pixeles

Fuente: Elaboración propia

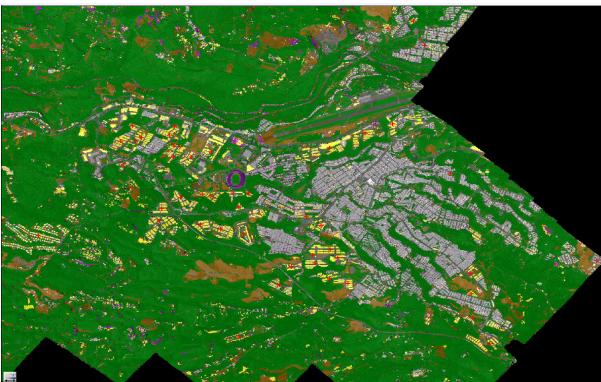


Figura 37. Resultados de clasificación basada en objetos para el área de estudio N° 3 (color amarillo = conjuntos residenciales detectados; cruz roja = ubicación conjuntos residenciales base datos geográfica), 23.957 x 19.465 pixeles

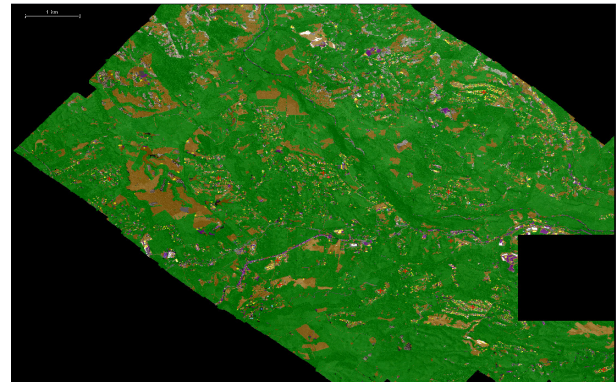


Figura 38. Resultados de clasificación basada en objetos para el área de estudio N° 3, parte rural, 36.577 x 37.219 pixeles

Finalmente, la información de la altura de los objetos obtenida a partir de modelos digitales de elevación es el criterio que permite clasificar más exactamente los conjuntos residenciales y cualquier clase de construcción en imágenes de muy alta resolución. Esto dada la altísima confusión espectral que se presenta en la clasificación de ciertas parejas de objetos como, por ejemplo, una vía asfaltada y una construcción con tejado gris. Consecuentemente con la importancia de esta información para el proceso de actualización catastral, es recomendable que la aeronave del Instituto Geográfico Agustín Codazzi realice la toma de las imágenes del sensor Vexcel UltraCam D con un solapamiento entre pares estereoscópicos de mínimo el 60% y preferiblemente de hasta un 80% para alcanzar un alto nivel de detalle en los modelos de elevación generados a partir del procesamiento de las mismas.





La calibración radiométrica de las imágenes Vexcel UltraCam D con firmas espectrales de la misma área de estudio contribuyeron a obtener una mejor separabilidad entre clases a partir del cálculo y la evaluación de los parámetros de condiciones espectrales identificados en la sección 2.2.4. Aritméticamente, esto se puede comprender a partir del hecho de que los píxeles pasan de tomar valores entre 0 y 255 a tomar valores entre 0 y 1 o máximo 1,6, como en el caso de esta investigación, así que al ser más bajos los valores que puede tomar un píxel o un segmento de píxeles para una determinada medida espectral, será también mucho menor su desviación estándar, por lo que la posibilidad de tener una distribución de datos uniforme es más alta y con ello aumenta la posibilidad de identificar un patrón de reconocimiento de objetos con base en dicha medida espectral.

Para la recolección de firmas espectrales en campo con el equipo Red Tide USB650 es recomendable calibrarlo para cada toma si existe una alta intensidad solar, dado que el equipo es muy susceptible a sobresaturarse por su condición de trabajo bajo único haz. De acuerdo con los datos observados y la experiencia adquirida durante la investigación, la corrección radiométrica de las imágenes Vexcel UltraCam D para zonas urbanas, además de requerir dos firmas espectrales representativas de zonas oscuras y claras, debe incluir firmas espectrales de objetos antrópicos compuestos por diferentes materiales como asfalto, arcilla, ladrillo, metales o cualquier otro material que se pretenda identificar durante el proceso de clasificación de la imagen para que el cálculo y la evaluación de los índices espectrales permita obtener una marcada separabilidad entre las diferentes clases, dada la alta heterogeneidad de las escenas urbanas. Para el caso rural, es imprescindible obtener una firma espectral de la especie de vegetación predominante en la zona a fin de aislar las áreas donde esté presente y aumentar la precisión en la detección de un objetivo en específico, idealmente, contando con su respectiva firma espectral.

La clasificación de piscinas a partir de funciones de membresía usando los índices de áreas construidas BAI (3) y el ratio de agua WRI (12) fue fundamental para la detección de conjuntos residenciales, sobre todo aquellos que no contaban con manzanas catastrales de forma rectangular y tejados de tonalidad rosada, rojiza, café y blanca, como es el caso de aquellos compuestos por vías privadas y solo torres de apartamentos. Los parámetros de condiciones espectrales definidos en el apartado 2.2.4 fueron determinantes en la clasificación de todos los objetos.

El cálculo y la evaluación de medidas de textura sobre imágenes de muy alta resolución demandan considerables recursos de computador a nivel de procesador y memoria, y no se logró identificar una medida de textura que ayudara a diferenciar claramente alguna clase de construcción. A criterio del investigador, esto tiene su razón de ser por la alta variación de texturas presentes en espacios muy pequeños de terreno de una imagen de muy alta resolución, hecho que dificulta enormemente la elaboración de una regla de análisis.

La herramienta GXL de PCI Geomatics para geoprocesamiento de altos volúmenes de datos con la que cuenta el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para la corrección geométrica y los modelos de elevación a partir de imágenes Vexcel UltraCam D permite que las oficinas territoriales de la entidad cuenten con estos productos de forma más oportuna para la realización de procesos de precenso, actualización y conservación catastral. Solo faltaría reglamentar, bajo procedimiento interno, los flujos de proceso y los criterios que garanticen la calidad y la oportunidad de la información.





Bibliografía

- PCI Geomatics Enterprises (5 de abril de 2016). *PCI Geomatics Portal*. Obtenido de <http://www.pcigeomatics.com/>.
- Ariza, A. (Julio de 2015). Parte 1. Conceptos y fundamentos en espectroradiometría. En: *Manual de ejercicios prácticos de teledetección*. Santafé de Bogotá: IGAC.
- Benarchid, O., Raissouni, N., El Adib, S., Abbous, A., Azyat, A., Ben Achhab, N., . . . Chahboun, A. (2013). Building Extraction using Object-Based Classification and Shadow Information in Very High Resolution Multispectral Images, a Case Study: Tetuan, Morocco. *Canadian Journal on Image Processing and Computer Vision*, 4(1), 8.
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I. & Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58(3-4), 239-258. doi:10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002.
- Departamento de estudios económicos y urbanos Camacol Risaralda (2016). *Estudio de acabados en conjuntos residenciales 2003-2016*. Pereira: Camacol.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3(6), 610-621. doi: 10.1109/TSMC.1973.4309314.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2010). *Manual de procedimientos formación y actualización catastral P50100-02/10*. Bogotá: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Instructivo aerotriangulación digital I30300-08/14.V2*. Bogotá: IGAC.
- Navulur, K. (2007). *Multispectral Image Analysis Using the Object-Oriented Paradigm*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Trimble Germany (2014). *Trimble Ecognition Developer Reference Book*. Munich, Germany: Trimble Germany GmbH.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Vexcel Imaging Company (12 de julio de 2013). *Calibration Report UltraCam D, Serial Number UCD-SU-1-0051*. Bogotá: Vexcel Imaging.
- Vijjapu, P. (1 de marzo de 2013). *Classification and building detection using fuzzy sub-object densities and shadow influence* (tesis de maestría). Faculty of Geo-information Science and Earth Observation, University of Twente, Enschede, Netherlands. Recuperado de https://www.itc.nl/library/papers_2013/msc/gfm/vijjapu.pdf.





Bibliografía de referencia

- Arvor, D., Saint-Geours, N., Dupuy, S., Andrés, S., & Durieux, L. (2013). Identifying optimal classification rules for geographic object-based image analysis. *XVI Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto* (p. 9). Iguazu, Brasil: HAL archives-ouvertes.fr.
- Blaschke, S., Lang, S. & Hay, G. (2008). *Object- Based Image Analysis Spatial Concept for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*. Berlín: Springer.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Rialp.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Departamento de estudios económicos y urbanos Caracol (2015). *Comportamiento actividad edificadora en Pereira y Dosquebradas a octubre 2015*. Pereira: Camacol.
- François, L. (2005). *Feature space optimization prior to fuzzy image classification*. Val-Bélair, Qc.: Defence R&D Canada.
- Guyon, I., Weston, J., Barnhill, S., & Vapnik, V. (2002). Gene Selection for Cancer Classification using Support Vector. En: *Machine Learning* (p. 444). Berlín: Springer.
- Harris Geospatial Solutions (20 de sept. de 2016). *Harris Geospatial Product Documentation Center*. Obtenido de <http://www.harrisgeospatial.com/docs/tutorials.html>.
- Heinrich Kux, H. J. & Araújo, E. H. (2010). Object-based Image Analysis using QuickBird satellite images and GIS data, case study Belo Horizonte (Brazil). En: T. Blaschke, S. Lang, & G. J. Hay, *Object-Based Image Analysis* (p. 803). Berlín: Springer-Verlag.
- Heinrich Kux, H. J., Novack, T. & Garcia Fonseca, L. M. (2009). Mapeamento de favelas usando classificação orientada a objeto – estudo de caso em Paraisópolis, São Paulo (SP). *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto, Natal, Brasil, abril 2009* (p. 7). Sao Jose dos Campos - SP, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- IDB Project. (Marzo de 2016). *Index Database. A database for remote sensing indices*. Recuperado de: <http://www.indexdatabase.de/>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (12 de mayo de 2016). *Sistema Nacional Catastral*. Recuperado de <http://snc.igac.gov.co/snc/login.jsf>.
- Kovacs, A. M., & Sziranyi, T. (2013). Multidirectional building detection in aerial images without shape templates. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 6.
- Ley 1450 de 2011 (16 de junio). Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. *Diario Oficial* N° 48.102.





- Lira, J. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mhangara, P., Odindi, J., Kleyn, L., & Remas, H. (2013). *Road extraction using object oriented classification*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/267856733_Road_extraction_using_object_oriented_classification.
- Nussbaum, S., Niemeyer, I., & Canty, M. J. (2006). SEATH - a new tool for automated feature extraction in the context of object-based image analysis. *1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA)*. Salzburg: Research Center Juelich Programme Group Systems Analysis and Technology Development.
- Ouma, Y. O., Tateishi, R., & Sri-Sumantyo, J. T. (2010). Urban features recognition and extraction from very-high resolution multi-spectral satellite imagery: a micro–macro texture determination and integration framework. *IET Digital Library*, 10.
- Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. L. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Redweik, P. (2015). Fotogrametría aérea. *Researchgate*, 38.
- Shackelford, A. K., & Davis, C. H. (2003). A hierarchical fuzzy classification approach for high-resolution multispectral data over urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9), 1920-1932.
- Smith, R. (2004). *Percepción remota del ambiente*. Raymond Nebraska: MicrolImages Inc.
- Vexcel (2004). *Brochure UltraCam D*. Boulder, Colorado: Aerial-Survey-Base.
- Wuest, B. & Zhang, Y. (2009). Region based segmentation of QuickBird imagery through fuzzy integration. XXI Congress, WG VII/4 (p. 6). Fredericton, Canada: Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

