Xihmai

Universidad La Salle Pachuca
xihmai@lasallep.edu.mx
Teléfono: 01(771) 717 02 13 ext. 1406
Fax: 01(771) 717 03 09
ISSN (versión impresa):1870-6703 México
https://doi.org/10.37646/xihmai.v9i18.243

2014

Fernando López Aguilar y Pedro López García

IDENTIFICACIÓN DE REDES DE CAMINOS UTILIZANDO IMÁGENES DIGITALES MULTI-ESPECTRALES Y PANCROMÁTICAS. EL CASO DE LOS RAMALES DEL CAMINO REAL DE TIERRA ADENTRO EN SAN JUAN DEL RÍO

IDENTIFYING ROAD NETWORK WITH MULTISPECTRAL AND PANCHROMATIC DIGITAL IMAGES. SECONDARY ROUTES OF THE CAMINO REAL DE TIERRA ADENTRO IN SAN JUAN DEL RÍO

Xihmai, año 2014/vol. IX, número 18
Universidad La Salle Pachuca
pp. 127-146

Copyright (c) 2014. Fernando López Aguilar y Pedro López García. Este texto está protegido por una licencia *CreativeCommons 4.0*.

Revista *Xihmai* IX (18), 127-146, julio-diciembre 2014

IDENTIFICACIÓN DE REDES DE CAMINOS UTILIZANDO IMÁGENES DIGITALES MULTI-ESPECTRALES Y PANCROMÁTICAS. EL CASO DE LOS RAMALES DEL CAMINO REAL DE TIERRA ADENTRO EN SAN JUAN DEL RÍO

IDENTIFYING ROAD NETWORK WITH MULTISPECTRAL AND PANCHROMATIC DIGITAL IMAGES. SECONDARY ROUTES OF THE CAMINO REAL DE TIERRA ADENTRO IN SAN JUAN DEL RÍO

Fernando López Aguilar
Doctor en Historia. Posgrado en Arqueología, Escuela Nacional de Antropología e Historia, Instituto Nacional de Antropología e Historia.
fernando.lopez.aguilar@gmail.com

Pedro López García
Doctor en Ciencias de la Tierra. Posgrado en Arqueología, Escuela Nacional de Antropología e Historia, Instituto Nacional de Antropología e Historia.
dplopez@prodigy.net.mx

Resumen

Los métodos de clasificación para la identificación de caminos usando imágenes de satélite de alta resolución se basan en las características espectrales de estas; sin embargo, en la actualidad, el procesamiento digital permite integrar las características espectrales con las características espaciales al fusionar imágenes pancromáticas de alta resolución con imágenes multiespectrales de resolución media. Este procesamiento toma el nombre de *Pansharpening*. Posteriormente, la imagen producto de la fusión es procesada utilizando algoritmos de

clasificación para discriminar los caminos o trazos lineales de otros objetos como pueden ser ciudades, parcelas, cuerpos de agua, etc. Los caminos clasificados pueden ser subsecuentemente re-clasificados utilizando la información de los bordes para eliminar objetos que no corresponden a caminos.

Palabras clave: Mapas, redes de caminos, imágenes digitales multiespectrales, pancromáticas

Abstract

Classification methods for road extraction are based in the spectral characteristics of the images. However, actually, the digital processing allows the integration of the spectral characteristics with the spatial features when combining high resolution panchromatic images with medium resolution multispectral images. This processing is known as *Pansharpening*. The resulting image is classified to discriminate between roads and other objects, like cities, water bodies and crops, between others. The identified roads are then segmented and re-classified using the edge information to eliminate the features that do not correspond to roads.

Keywords: Maps, Road network, Multispectral and Panchromatic Digital Images

Antecedentes

Después de la conquista española, los caminos ancestrales fueron adaptados para los nuevos medios de transporte: carretas, recuas, caballos y carrozas que movían las mercancías, las personas y la información. El primero y más importante, al que la Corona española dedicó un gran esfuerzo, fue el llamado Camino Real de Tierra Adentro, que en primer lugar buscó unir las zonas de extracción de la plata con

la capital novohispana. Así, en un primer tramo, vinculó la capital tolteca, las "tierras de Moctezuma", y la importante encomienda de Jilotepec que estuvo en manos de la Malinche y del hermano del virrey Velasco, a través de una ruta que salía por Tlacopan y Azcapotzalco, se dirigía a Cuauhtitlán y Tepozotlán, Tepeji y Jilotepec. Un segundo tramo se relacionó con la expansión hacia el Bajío hasta Guanajuato, introduciéndose ganado vacuno, abriendo zonas de cultivo y explorando en la búsqueda de plata. Un tercer momento fue la vinculación de Guanajuato con Zacatecas a través de San Luis Potosí, con un camino que unió los centros plateros. De esta manera, la región económica más importante del virreinato, el Bajío y el Norte Centro, la región de Tierra Adentro, quedó vinculada a la Ciudad de México desde la primera mitad del siglo XVI (González, en prensa).

Alrededor de los años cincuenta del siglo XVI, los empresarios españoles de la plata de Ixmiquilpan, encabezados por Alonso de Villaseca, el Creso, junto con los principales dueños de estancias de ganado de Alfajayucan y Huichapan, que eran además, poseedores de estancias en el Bajío y dueños de minas en Guanajuato, se unieron para iniciar el trazo del Camino Real que uniría las minas de Ixmiquilpan, Cardonal y Zimapán con el Camino Real de Tierra Adentro y así establecer una ruta alterna a la salida de la plata desde de Zacatecas-Guanajuato. Este camino uniría Ixmiquilpan con Huichapan y llegaría al Camino de Tierra Adentro una legua al sur del Cazadero, en las inmediaciones del pueblo (hoy desaparecido) de San Jerónimo Acahualzingo. No resultaría extraño que, además, otro camino Real fuera trazado para unir la región de los lagos de Michoacán (Cuitzeo y Yuriria) con Acámbaro y San Juan del Río (González, en prensa, López Aguilar 2005, Powell 1977).

La invasión del espacio indígena por medio de la ganadería, la minería y la red caminera, fue un modelo expansionista que generó una nueva situación de conflicto y un nuevo tipo de guerra, esta vez entre los

españoles y sus aliados otomíes en contra de los Chichimecas. Los caminos y los pueblos se fortificaron: San Juan del Río, Tecozautla, Zimapán y San Miguel Caltepantla estuvieron amurallados para protegerse de las oleadas chichimecas. De igual forma, en algunos puntos clave de los caminos se construyeron fortificaciones específicas y, en lo general, la estrategia de transporte de mercancías y animales solía hacerse a manera de caravanas e incluía una escolta militar española e indígena que protegía a las carretas tiradas por bueyes (Powell 1977).

Por las observaciones hechas en campo, se puede afirmar que la red caminera novohispana fue grande e importante pues unió a los pueblos por el camino más corto. Los patrones de distancia suelen ser de 17 kilómetros entre pueblo y pueblo y el camino real los unía siguiendo el trazo más recto posible. A distancias menores, cerca de 4 kilómetros, existían ventas u hostales con lugares para cambio de cabalgadura, hospedaje y descanso para conductores o viajeros. Entre esos patrones de distancia, la función de hospedaje y cambio de animales podía realizarse en las haciendas cuyo casco solía ubicarse muy próxima a la red caminera. En el teatro de la guerra chichimeca, se solía ubicar una misión, que en realidad era una combinación de una iglesia con un fuerte, un lugar donde se buscaba congregar a la población indígena para que, a la postre fuera el asiento de un nuevo pueblo.

El camino era nivelado y rellenado y, en ocasiones podía estar un poco elevado en relación con el terreno circundante. La superficie de rodamiento era empedrada y solía tener entre ocho y diez metros de ancho, aunque en ocasiones podría convertirse en un callejón de unos tres metros de ancho, que sólo abriría unos cuantos espacios para dar lugar a la circulación a contraflujo; sus costados eran protegidos por tecorrales que podían alcanzar hasta dos metros de altura y en sus márgenes se plantaban árboles, de forma tal que en grandes tramos el

trayecto se realizaba en la sombra. Los ríos y cañadas eran librados mediante puentes, ya fueran de vigas o de mampostería.

De esta manera, por medio de fotografías aéreas y reconocimientos de campo, se ha podido determinar que el camino real proveniente de Ixmiquilpan, se bifurcaba en Huichapan y desde ahí se podía acceder a San Juan del Río por la ruta Zothé -Tlaxcalilla, o bien por San José Atlán, San Sebastián Tenochtitlan y Cazadero. La alternativa bien pudo elegirse en función del tipo de carga y del medio de transporte utilizado o bien, las alcabalas e impuestos que tendrían que ser pagados.

Muchos tramos de los caminos y de la infraestructura que los rodeaba han sido destruidos por invasión, por nivelación o por otros factores culturales recientes. El reconocimiento del trazo específico supone el uso de medios digitales que permitan una observación diferente a la que se realiza por los procedimientos tradicionales. En este caso, exploramos las imágenes multiespectrales y pancromáticas para los ramales alrededor de San Juan del Rio del Camino Real de Tierra Adentro.

Imágenes digitales

La extracción de caminos con base a la geometría se ha realizado utilizando fotografías aéreas en escala de grises o en imágenes pancromáticas usando la información geométrica y radiométrica de los rasgos de una escena. Debido a la complejidad de los rasgos en una escena y sobre todo con las redes de caminos surgen problemas cuando existen objetos con características espectrales similares, como en el caso de autopistas, techos de edificios, estacionamientos, etc. En estos casos, es necesario utilizar un procedimiento complementario que involucra imágenes de satélite de alta resolución haciendo uso de las características espaciales y espectrales.

Los satélites Spot 5 [1](Sistema Probatorio De Observación de la Tierra) pueden adquirir imágenes pancromáticas de 2.5 metros de resolución (0,48 – 0,71 µm) junto con imágenes multiespectrales de 10 m, de cuatro bandas. La banda 1: Verde (0,50 - 0,59 µm), Banda 2: Rojo (0,61 - 0,68 µm), Banda 3: Infrarrojo cercano (0,78 - 0,89 µm), Banda 4: Infrarrojo medio (IRM) (1,58 - 1,75 µm). Las dimensiones de estas imágenes son de 60 x 60 kilómetros. Las cuales pueden ser utilizadas para realizar el mapeo o extracción automática de caminos en aéreas rurales o aéreas densamente pobladas, y en donde los caminos tienden a cambiar constantemente en los diferentes periodos de tiempo.

Metodología

El procedimiento involucra el uso de imágenes multiespectrales de 4 bandas que incluyen los canales del visible e infrarrojo y una imagen pancromática en escala de grises, estas imágenes son fusionadas en una imagen pansharpening que contiene información espacial de la imagen pancromática e información multiespectral de la imagen a color. Una clasificación no supervisada es aplicada a la imagen fusionada para producir una imagen de las diferentes clases que componen la escena. Después se editan las clases para combinar aquellas que pertenecen a rasgos que no corresponden a caminos, como es el caso de parcelas con diferentes cultivos y o características de casas y edificios en ciudades, por ultimo un filtro direccional es empleado para eliminar objetos que no corresponden a caminos.

Las imágenes utilizadas en este trabajo corresponden a un cuadrante que incluye a las ciudades de Querétaro, así como la de San Juan del Río (tabla 1), se eligió esta área ya que está documentado que la ruta

[1] La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y la Secretaría de Marina (SEMAR) son quienes proporcionaron las imágenes de satélite gracias a la Estación de Recepción México de la constelación Spot (ERMEXS.

del Antiguo camino incluía los estados de Hidalgo y de Querétaro y de allí continuaba hacía el norte. El objetivo principal se centró en desarrollar la metodología para poder aislar todos aquellos rasgos cuyas características pudieran corresponder a caminos, ya sean actuales o antiguos.

Tabla 1. Coordenadas de las imágenes multiespectrales y pancromáticas que incluyen a la ciudad de Querétaro y de San Juan del Río (coordenadas en los sentidos de las manecillas del reloj).

1	20º 35´33.12´´ N	-100º 29´55.70´´ O
2	20º 35´47.95´´ N	-99º 53´43.24´´ O
3	20º 17´35.78´´ N	-99º 53´46.10´´ O
4	20º 17´52.56´´ N	-100º 23´52.78´´ O

Pansharpening

Es una técnica que produce imágenes multiespectrales de alta resolución al combinar una imagen multiespectral de baja resolución con una imagen pancromática de alta resolución. La técnica de fusión requiere que las imágenes estén georreferenciadas. Al obtener la fusión de imágenes se produce una imagen con resolución de 2.5 m a color de cuatro bandas.

Clasificación de caminos

La clasificación de imágenes trata de identificar todos los caminos presentes en la escena, trátese de caminos rurales, o asfaltados a partir de la imagen fusionada basado en la respuesta espectral de los valores de los pixels. La clasificación no supervisada es utilizada para clasificar clases heterogéneas en imágenes de satélite. El método de agrupamiento de K-Means fue utilizado para clasificar la imagen, el K-Means es un procedimiento de clasificación no supervisada que calcula promedios de clases iniciales distribuidas uniformemente en el espacio de datos formando grupos de pixels, luego iterativamente se agrupan los pixels en la clase más cercana utilizando una técnica de mínima distancia. En cada iteración sé recalculan los centroides de grupo y se reclasifican los pixels con respecto a los nuevos promedios. Todos los pixels son clasificados a una nueva clase a menos que una desviación estándar o un umbral de distancia sean especificados, en cuyo caso algunos pixels pueden permanecer sin clasificar si no encuentran el criterio establecido. El proceso continúa hasta que un número de pixels en cada clase no cambia o hasta que el número de iteraciones es alcanzado.

En este trabajo se seleccionó un agrupamiento inicial de 40 clases, posteriormente, se editaron las clases con firmas espectrales similares con el fin de reducir el número de grupos y con esto poder discriminar mejor los caminos de la imagen (Figuras 1a y 1b).

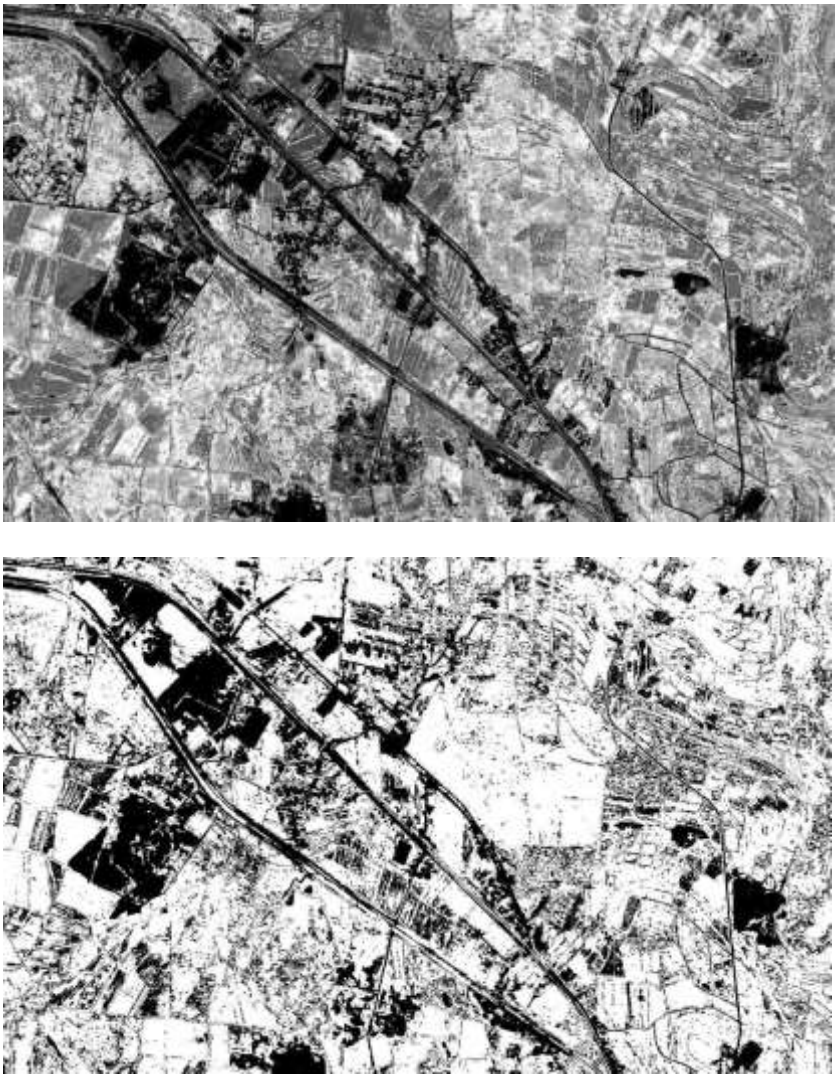

Figura 1. (a) arriba y 1 (b) abajo: (1a) Clasificación de caminos utilizando el algoritmo de agrupamiento K-Means con 40 clases y (1b) binarizacion de la imagen clasificada.

La figura 1a muestra los resultados de la clasificación de la imagen pansharpening Spot 5 en un área que incluye diversos rasgos utilizando el clasificador K-Means. La figura 1b muestra la representación binaria de los caminos identificados. Se puede observar que todos los caminos mayores son incluidos, pero de igual manera muchos objetos que no corresponden a caminos tienen la misma respuesta espectral que los caminos, en este caso el error de clasificación es bastante grande, algunos de los objetos que no corresponden a caminos se presentan como casos aislados a través del área de estudio.

Detección de bordes

El realce de bordes reduce una imagen consiste en identificar puntos en una imagen en donde existen cambios de brillantes o discontinuidades. Un borde se refiere a un lugar en la imagen en donde los valores de brillantez de los pixels tienen un cambio abrupto en la tonalidad de los valores de estos, se caracterizan por tener frecuencias altas. Los bordes aparecen como contornos de objetos dentro de las imágenes. El realce de bordes se implementa en el dominio de la imagen a partir de operaciones que consideran la pendiente de brillantez de un pixel que ocurre dentro de un grupo de pixels, los contornos de bordes son utilizados en muchas operaciones que desean el reconocimiento de objetos. Existe un gran número de operadores de bordes en la literatura, en este trabajo solamente se comparan tres, el de Sobel, Robert y Canny. El operador de Sobel no proporciona un buen resultado, ya que a produce un numero de bordes de manera excesiva, creando falsos positivos, El detector de Roberts produce una clara imagen de bordes, pero pierde algunos detalles en los caminos rurales. El operador de Canny que utiliza un algoritmo de varias etapas para detectar un amplio rango de bordes en la imagen es

el que mejor resultado proporciona, la figura 2 muestra los bordes detectados de la imagen de la figura 1a.

Figura 2. Detector de bordes utilizando el detector de Canny.

Reclasificación

La reclasificación sirve como un medio para refinar la imagen clasificada de caminos al remover objetos que no corresponden a caminos con la ayuda de la imagen de bordes. Este proceso consiste en segmentar y remover objetos cuyas dimensiones no excedan las longitudes de los caminos.

Como se mostró en la figura 2, los objetos que no corresponden a caminos se encuentran conectados o aislados de los caminos. Estos objetos aislados pueden ser eliminados de acuerdo a su tamaño y forma. Aquellos que están conectados a los caminos son más difíciles de remover sin alterar los trazos de los caminos. Bajo esta perspectiva se puede utilizar la imagen de bordes generada a partir de la imagen pansharpened para remover los objetos que no corresponden a los caminos.

Si denotamos a la imagen clasificada con el algoritmo de agrupación k-Means como A, con los pixels negros asignados a los caminos y las demás clases manteniendo sus colores (Figura 1a).

La imagen de bordes (figura 2) es denotada como B, con pixels blancos asignados a los bordes. La suma de estas imágenes denotada como C, con pixels negros para los caminos (ver figura 3). De esta manera el proceso de segmentación de caminos e imagen de bordes utiliza la siguiente operación:

$$C = \begin{cases} \text{camino} & \text{si A es camino y B no es un borde} \\ \text{no - camino} & \text{cualquier otro objeto} \end{cases}$$

Para remover pequeños espacios y huecos, se puede hacer uso de operaciones morfológicas de aperturas y cerraduras, La apertura y cerradura son dos operaciones morfológicas importantes que son derivadas de las operaciones fundamentales de erosión y dilatación. El

efecto básico de la apertura es que tiende a remover frecuencias altas en los objetos de la imagen. La apertura es una operación menos destructiva que la erosión y tiene el efecto preservar los objetos con forma similar al elemento estructural o que puedan contener completamente al elemento estructural, mientras que elimina algunas partes del complemento de la imagen. La cerradura remueve frecuencias altas en el complemento de la imagen suavizando algunos contornos de los objetos de una imagen, elimina hoyos pequeños y rellena espacios entre los contornos.

Los operadores morfológicos permiten extraer estructuras relevantes de la imagen al explorarla empleando un conjunto llamado elemento estructural. La forma del elemento estructural se elige de acuerdo con algún conocimiento acerca de la geometría de las estructuras relevantes e irrelevantes de la imagen. Por estructuras irrelevantes se entiende el ruido u objetos que se desean suprimir de la imagen. El elemento estructural es un conjunto que puede verse como una sonda que prueba la imagen bajo estudio con el objeto de dilucidar formas geométricas (Pastrana, 1989).

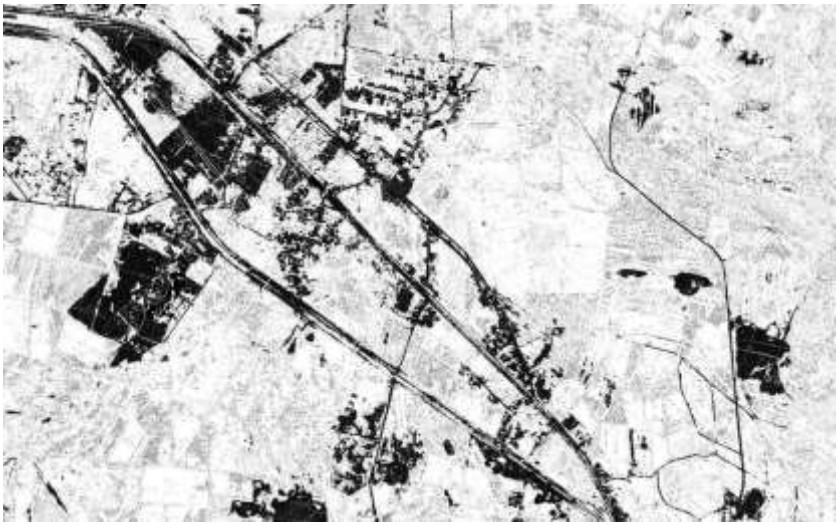

Figura 3. Proceso de reclasificación: (a) proceso de clasificación usando la imagen de bordes.

Segmentación con base al tamaño y forma de los objetos

Para esta etapa, la clasificación y segmentación de la imagen de caminos se proceso utilizando la ventaja del tamaño y forma de los objetos (número de pixels), Los componentes conectados cuyas dimensiones se encuentran por debajo de un umbral son considerados como objetos pertenecientes a otra categoría diferente a los caminos (no-caminos). Esto se debe a que las redes de caminos por lo regular están conectadas por un gran número de pixels en una cierta extensión. De esta forma el tamaño es un criterio adecuado para remover la mayoría de las parcelas y casas cercanas a los caminos.

Siguiendo esta metodología de segmentación con base a tamaño y forma fue posible procesar toda la imagen la cual incluye a las ciudades de San Juan del Rió y de Querétaro, siguiendo documentos históricos

el antiguo camino de la Plata pasaba por estos dos puntos. La imagen procesada no se presenta por razones de tamaño, y si se reduce no es posible apreciar muchos detalles de esta, razón por la cual solo se presenta un recorte como ejemplo (ver figura 4).

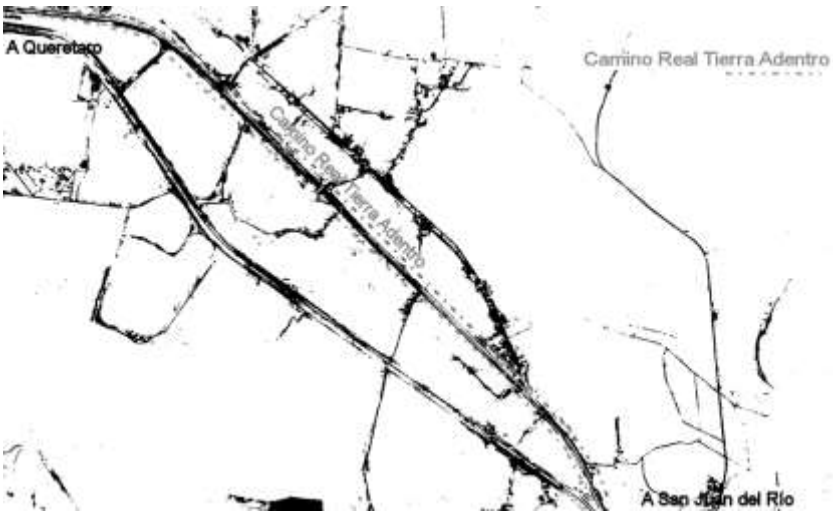

Figura 4. Imagen segmentada con base al tamaño y forma de los objetos, en esta imagen se presenta la ruta que seguía el Antiguo Camino de la Plata, por desgracia su trazo corresponde a la actual autopista de cuota México-Queretaro.

Cabe mencionar que el procedimiento desarrollado en este trabajo será aplicado en regiones en donde se preservan algunos tramos del Antiguo Camino sobre todo contemplando regiones del estado de Hidalgo y algunas otras zonas más al norte del país como son: Zacatecas, Durango y Chihuahua.
Con los avances en la tecnología satelital, y con imágenes de mayor resolución será posible refinar este procedimiento, ya que se espera

contar con imágenes de mayor resolución del satélite Spot 6 que adquiere imágenes pancromáticas de 1.5 m y multiespectrales de 5 m, las cuales prometen ser una mejor herramienta en el procedimiento de identificación de caminos. Se contempla aplicar esta metodología en regiones en donde no se tenga el problema de una urbanización excesiva como en el caso de la imagen utilizada en esta aplicación. Se espera que el procesamiento digital junto con la información de documentos históricos pueda hacer posible la detección del Antiguo Camino junto con algunos ramales de este.

FUENTES DE CONSULTA

- BRAMBILA, R. (1997). “Los estudios de territorio. El caso de la frontera mexica-tarasca”, en *Revista de Arqueología Americana,* 13, 115-149.
- CABRERO, María T. y López C. (2002). *Civilización en el Norte de México. Vol. II.* México: UNAM.
- CISNEROS, Guerrero, G. (1998) Cambios en la frontera chichimeca en la región centro-norte de la Nueva España durante el siglo XVI, *Investigaciones Geográficas* [Recuperado el 9 de diciembre de 2013 de: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=5690360] https://doi.org/10.14350/rig.59062
- DAVIES, Nigel (1968). *Los señoríos independientes del Imperio Azteca*. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.

- GONZÁLEZ Dávila, Fernando (en prensa). Huichapan. En el camino. En F. López Aguilar y H. López Hernández. *Huichapan. Tres momentos de su historia.* Pachuca, México: Consejo Estatal para la Cultura y las Artes de Hidalgo.
- LILLESAND, Thomas. M. and Kiefer, Ralph. W. (1987). *Remote sensing and image interpretation*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- LIRA, J.. y Frulla, L. (1998). "An automated region growing algorithm for segmentation of texture regions in SAR images" en *International Journal of Remote Sensing,* 19, 18, 3595-3606. https://doi.org/10.1080/014311698213830
- LÓPEZ Aguilar, F. (2005) *Símbolos del tiempo. Inestabilidad y bifurcaciones en los pueblos de indios del Valle del Mezquital*. Pachuca, México: Consejo Estatal para la Cultura y las Artes de Hidalgo.
- _____ y Fournier, P. (2012). "Peregrinaciones otomíes. Vínculos locales y regionales en el Valle del Mezquital" en P. Fournier, C. Mondragón y W. Wiesheu (eds.) *Peregrinaciones Ayer y Hoy. Arqueología y Antropología de las Religiones*, pp. 81-118. México: El Colegio de México.
- MELVILLE, Elinor G. K. (1997). *A plague of sheep. Environmental consequences of the conquest of Mexico*, Cambridge: Cambridge University Press.

- PASTRANA, Vidal R. (1996) Restauración de imágenes digitales: eliminación de ruido por medio de un filtro geométrico. *Tesis Licenciatura en Electrónica*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- POWELL, Phillip W. (1977). *La Guerra chichimeca.: 1550-1600.* México: Fondo de Cultura Económica.
- SOILLE, Pierre. (1999). *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*. Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03939-7

Copyright (c) 2014 Fernando López Aguilar y Pedro López García

Este texto está protegido por una licencia *CreativeCommons 4.0*.

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Resumen de licencia - *Texto completo de la licencia*