

# Análisis espaciotemporal de la incidencia antrópica en la cuenca del río Cauca, en el departamento del Valle, Colombia



## SPACE-TIME ANALYSIS OF THE ANTHROPIC INCIDENCE IN THE CAUCA RIVER BASIN, DEPARTMENT OF VALLE, COLOMBIA

ANALISE ESPAÇOTEMPORAL DA INCIDÊNCIA ANTRÓPICA NA BACIA DO RIO CAUCA, NO ESTADO DEL VALLE, COLÔMBIA

Claudia Alexandra Forero Bernal<sup>1</sup>  
Paola Andrea Zabala Parra<sup>2</sup>  
Alberto Boada Rodríguez<sup>3</sup>

Para citar este artículo: Forero Bernal, C. A., Zabala Parra, P. A. y Boada Rodríguez, A. (2017). Análisis espaciotemporal de la incidencia antrópica en la cuenca del río Cauca, en el departamento del Valle, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 22(1), 127-146. doi: 10.19053/01233769.5861.



### Recepción:

12 de junio de 2016

### Evaluación:

2 de agosto de 2016

### Aprobación:

19 de diciembre de 2016

## Resumen

En el presente trabajo se propone, a través de la teledetección (usando imágenes Landsat y Radarsat 2), la obtención de un índice de incidencia antrópica a partir del cálculo de tres indicadores (vegetación, demográfico y modificación del cauce) que reflejan el cambio del drenaje en la cuenca hidrográfica del río Cauca. Lo anterior permitió evaluar espacial y temporalmente grandes áreas afectadas por la actividad antrópica. Dicha cuenca tiene mayor incidencia antrópica en los sectores donde se ubican los asentamientos urbanos e industriales, por ello la importancia de contar con

- 1 Ingeniera forestal de la Universidad del Tolima, especialista en Gerencia Educativa con conocimiento, magíster en Teledetección, Universidad Católica de Manizales. Coordinadora de la Corporación Sol y Luna, Cortolima. [ing.claudiaaforero@gmail.com](mailto:ing.claudiaaforero@gmail.com).
- 2 Ingeniera catastral y geodesta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista en Gestión de Proyectos de Inversión Pública y Privada de la Universidad Libre de Colombia. Magíster en Teledetección de la Universidad Católica de Manizales. Profesional especializado en la Unidad de Restitución de Tierras, Territorial Valle. [pzabalaparra@yahoo.es](mailto:pzabalaparra@yahoo.es).
- 3 Ingeniero industrial, estadístico. Especialista en Teledetección. Magíster en Geoinformation Systems for Urban Applications, doctorando en Investigación y Docencia, Centro Panamericano de Estudios Superiores, México. [aboadar@gmail.com](mailto:aboadar@gmail.com).

la planificación del territorio en esta zona para disminuir los niveles de incidencia antrópica.

**Palabras clave:** *asentamientos urbanos, cuenca hidrográfica, datos espaciales, impacto antrópico, índice e indicadores ambientales, río Cauca.*

## Abstract

This current research, through remote sensing (using Landsat and Radarsat 2), looks for obtaining an anthropic incidence rate from the calculation of three indicators: vegetation, demographic and modification of the channel that reflect the change in the drainage basin of the Cauca river. The above-stated allowed assessing, spatially and temporarily, large areas affected by human activity. The basin has increased anthropogenic impact on sectors where urban and industrial settlements are located, so it is important to count on land use planning in this area to reduce levels of anthropogenic impact.

**Keywords:** *urban settlements, watershed, spatial data, human impact, index and environmental indicators, Cauca river.*

## Resumo

No presente trabalho se propõem, através de sensoriamento remoto (usando imagens dos satélites Landsat e Radarsat 2), a obtenção de um índice de incidência antrópica a partir do cálculo de três indicadores (vegetação, demográfico e modificação do canal) que reflitam a mudança da drenagem na bacia hidrográfica do rio Cauca. O anterior permitiu avaliar espacial e temporalmente grandes áreas afetadas pela atividade antrópica. Esta bacia é a mais afetada nos setores onde se localiza os assentamentos urbanos e industriais, por isso a importância de contar com uma planificação do território nesta zona para diminuir os níveis de incidência antrópica.

**Palavra-chave:** *assentamentos urbanos, bacia hidrográfica, dados espaciais, impacto antrópico, índice e indicadores ambientais, rio Cauca.*

## 1. Introducción

En el contexto mundial, los cambios socioeconómicos ocurridos durante las últimas décadas del siglo XX y la primera del siglo XXI han producido numerosas alteraciones ambientales a diferentes escalas sociotemporales, que han modificado la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas y afectan negativamente la biodiversidad a un ritmo sin precedentes (Bevilacqua, Cárdenas y Medina, 2006, pp. 50-58). Es así como la percepción remota satelital ha ido adquiriendo una mayor importancia en el estudio del medio ambiente a nivel local, regional y global. La actual constelación de satélites que orbitan alrededor de la Tierra y que son utilizados para el estudio de la superficie y de la atmósfera terrestres demuestra el creciente interés que se le está dando, a nivel mundial, al estudio del medio ambiente (Metz, Davidson, Swart y Pan, 2001).

Ortega y Rodríguez (1997) identifican la evaluación ambiental como el procedimiento técnico jurídico-administrativo empleado para la toma de decisiones relacionadas con actividades con repercusión sobre el medio ambiente, regulado por la legislación vigente. La evaluación de impacto ambiental es un análisis integral, amplio y formal que considera los aspectos ambientales positivos y negativos generados tras la intervención del hombre, y se convierte en un proceso preventivo y en una herramienta de apoyo al desarrollo sostenible.

A escala nacional e internacional, se han adelantado múltiples estudios de índole ambiental en las cuencas hidrográficas, así como el cálculo de índices a partir de la teledetección, como el que realizaron Muñoz Guerrero, Rodríguez Montenegro y Romero Hernández (2009), en el cual analizan los cambios del uso del suelo y las coberturas en la microcuenca Las Minas, corregimiento de La Laguna, municipio de Pasto, en el departamento de Nariño, a partir de un análisis multitemporal; el periodo analizado fue de 19 años, entre 1989 y 2008. En este estudio se implementaron diferentes herramientas y procesos cartográficos, como la fotointerpretación, el tratamiento y el análisis de imágenes satelitales. Dicho análisis mostró una

pérdida del recurso natural *bosque secundario*, equivalente a 58,51 ha, con una deforestación por año de 3,08 ha. Cruz Bello (2011), en un análisis multitemporal de la degradación ambiental de la cuenca del río Necaxa, ubicado en México, concluyó que el incremento de las zonas agrícolas y, principalmente, de los poblados en el área de estudio han provocado, en doce años, una reducción de aproximadamente 2.000 ha en las zonas de bosque (5% del área de estudio). Quaini (2011), por su parte, realiza un análisis espaciotemporal del índice de incidencia antrópica en la cuenca la Matanza Riachuelo (CMR), en la provincia de Buenos Aires, Córdoba, Argentina. Dentro de las conclusiones principales, se obtuvo que el sector bajo de la CMR es el que se encontró más alejado del estado natural del ecosistema fluvial. Santana, Escobar y Capote (2010), en el estudio titulado *Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite*, derivan la estimación de cinco indicadores temáticos (TS, NDVI, LWCI, NSI y SAVI) a partir de una imagen satelital Landsat ETM+.

En Colombia se ha incrementado el uso de imágenes de satélite, no solamente para estudios temáticos individuales, sino también para realizar evaluaciones de impactos ambientales y sus consecuencias sobre los ecosistemas tropicales. Instituciones como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto Alexander von Humboldt (IAvH), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y el Instituto de Investigaciones Marinas (Invemar), entre otras, además de varias universidades del país, desarrollan proyectos de investigación y aplicación basados en la utilización de imágenes digitales de satélite, orientados principalmente al conocimiento del medio ambiente y las variaciones producidas por causas naturales y antropogénicas (Gónima y Durango-Vertel, 2005).

A nivel internacional, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y varios dirigentes del mundo vienen promoviendo políticas de conservación a través de la promoción de los compromisos contenidos en los acuerdos suscritos en las Cumbres de La Tierra que se han desarro-

llado hasta la fecha; la más reciente se celebró la de París, en diciembre del 2015. Colombia, tras la implementación de la Ley 99 de 1993, sus decretos reglamentarios y la adopción de legislación internacional para la protección del medio ambiente, le asigna gran relevancia a los recursos naturales con los que cuenta el país.

Por lo anterior, el presente proyecto de investigación planteó el cálculo de un índice antrópico en la cuenca del río Cauca, ubicado en el departamento del Valle, a través de la aplicación de técnicas de teledetección sobre imágenes ópticas y de radar de los años 1998, 2008, 2011 y 2014. La generación de este índice permitió identificar la baja incidencia antrópica en la zona y comprobar que la cuenca del río Cauca no se ha visto afectada considerablemente y de manera negativa tras el incremento de la población, la variación en su longitud y el cambio de uso del suelo.

Finalmente, con la aplicación de la propuesta metodológica, se demostró que el cálculo de la importancia en función de la calidad ambiental resulta muy pertinente para la evaluación del impacto ambiental, debido a que al utilizar un enfoque más objetivo, clasifica un mayor número de impactos en las categorías de *severo* y *crítico*, que podrían ser

subestimados con el uso de otros métodos cualitativos, pero que, al evidenciarse, exigen del equipo evaluador un análisis minucioso y sustentado en la selección de las medidas de manejo que se deben implementar para recuperar el factor afectado.

## 2. Metodología

### 2.1 Área de estudio

El área de estudio es la extensión de la cuenca tributaria del Valle del Cauca, que se encuentra en jurisdicción del departamento del Valle, el cual comprende un área de 19.349 m<sup>2</sup> (Figura 1). De acuerdo con la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad del Valle (2009), en el recorrido del río Cauca por el departamento se identifican los afluentes más importantes: sobre la margen derecha son los ríos Ovejas, Palo, Amaime, Guadalajara, Tuluá, Bugalagrande y La Vieja; sobre la margen izquierda, los tributarios más destacados son los ríos Timba, Jamundí, Riofrío, Cañaveral y Risaralda. Para el trabajo de investigación, el área de estudio fue dividida en zonas de trabajo: zona sur, zona centro y zona norte, tal como lo muestra la Figura 2.





Figura 2. Zonas de trabajo de la cuenca del río Cauca.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Materiales y equipos

Para la consecución del objetivo del estudio, se emplearon las imágenes digitales referidas en la Tabla 1 de la constelación de satélites de Landsat y Radarsat 2.

La búsqueda y la descarga de las imágenes Landsat se realizaron en el sistema de archivo digital del U. S. Geological Survey (USGS, 2016), el Servicio Geológico de Estados Unidos. El nivel de procesamiento de dichas imágenes es denominado *producto Level 1L*, que corresponde a imágenes

geográficamente referenciadas. El formato de archivos en que fueron recibidas las imágenes GeoTIFF (archivos TIFF con encabezados que indican posición geográfica). Las imágenes están georeferenciadas con el datum WGS84 y el sistema de proyección UTM en la zona 18 (norte).

Así mismo, las imágenes de Radarsat 2 se solicitaron al Banco Nacional de Imágenes administrado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, las cuales fueron entregadas ortorrectificadas y georeferenciadas con el datum WGS84 y el sistema de proyección UTM en la zona 18 (norte).

**TABLA 1. IMÁGENES UTILIZADAS EN EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Tipo de sensor	ID imagen	Path-Row	Fecha de toma
Landsat 5	LT50090571999191XXX06	Path = 009 Row = 057	1999-07-10
Landsat 5	LT50090581999191CPE07	Path = 009 Row = 058	1999-07-10
Landsat 7	LE70090572008256EDC00	Path = 009 Row = 057	2008-09-12
Landsat 7	LE70090582008256ASN00	Path = 009 Row = 058	2008-09-12
Landsat 8	LC80090572014088LGN00	Path = 009 Row = 057	2014-03-29
Landsat 8	LC80090582014088LGN00	Path = 009 Row = 058	2014-03-29
Radarsat 2	RS2_OK26322_PK264311_DK242715_W1_20110923_105615_HH_HV_SGF		2011-09-23
Radarsat 2	RS2_OK26322_PK264312_DK242716_W1_20110923_105636_HH_HV_SGF		2011-09-23

**Fuente:** Elaboración propia.

## 2.3 Metodología de trabajo

Siguiendo los pasos estipulados por Basterra (2011) para el preprocesamiento de las imágenes ópticas, se realizaron los procesos de corrección geométrica, corrección radiométrica, corrección atmosférica y co-

rección de bandeo (eliminación de *gap-fills*) de las imágenes Landsat 2008 a partir del software ENVI 5.0. Una vez preprocesadas las imágenes, se procedió, en el programa Erdas 2011, a elaborar los mosaicos de las imágenes por año de estudio (1999, 2008 y 2014). En la Figura 3 se presenta el marco metodológico seguido.

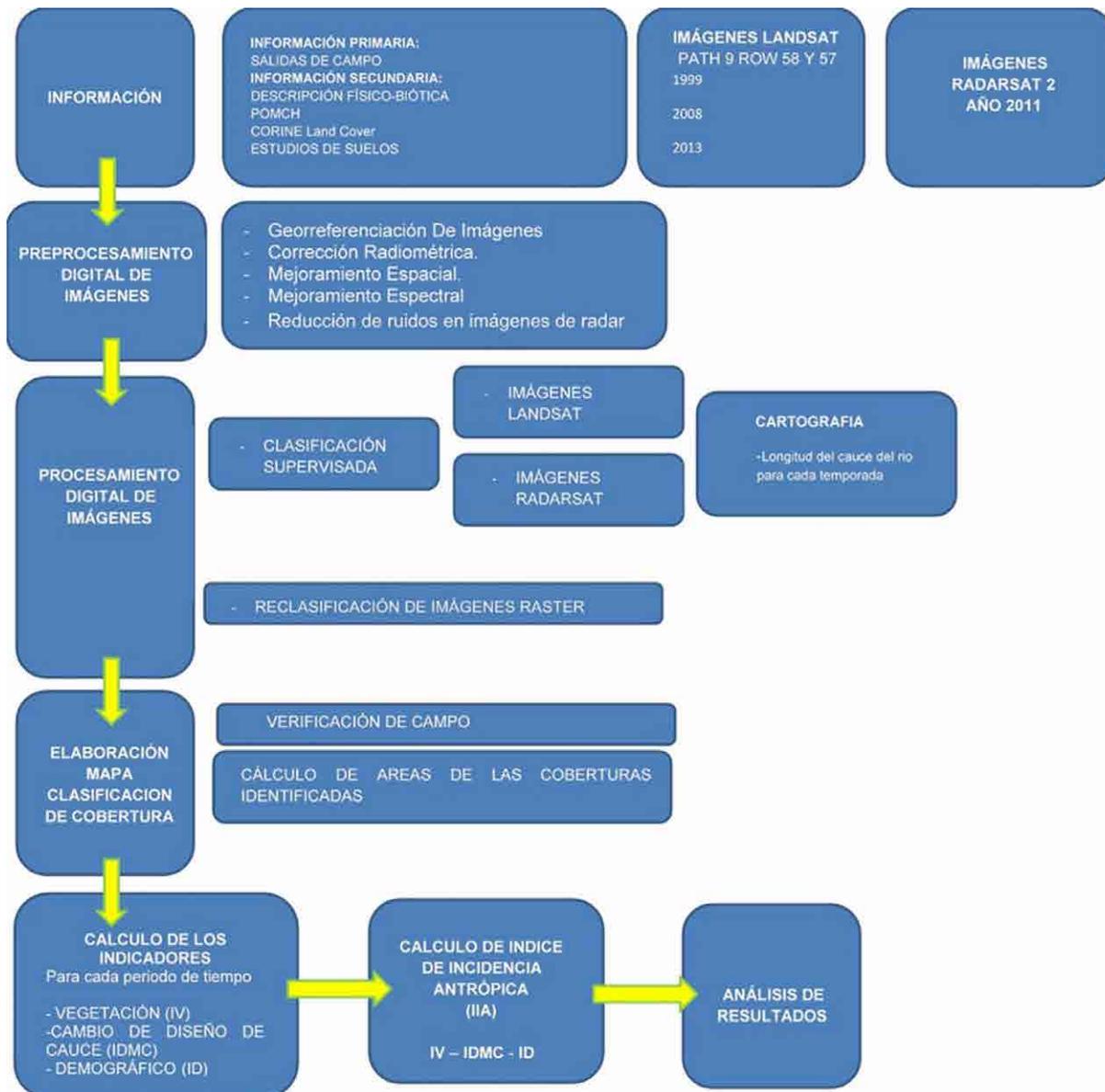


Figura 3. Marco metodológico.

Fuente: Elaboración propia.

Igualmente, con el programa Erdas 2011 se realizó la remoción de ruido *speckle* a las dos imágenes de Radarsat 2 y se elaboró el mosaico de imágenes del año 2011. Para realizar la clasificación de las imágenes, tanto las ópticas como las de radar, se utilizó el programa Envi 5.3, se elaboraron los ROI o muestras de coberturas y se ejecutó la clasificación supervisada por el método de *maximum likelihood*, de acuerdo con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, elaborada

por el Ideam, el IGAC, el IAvH, el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN) y la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena (Cormagdalena) (Ideam, 2010). Esta clasificación fue evaluada utilizando los estudios de uso y cobertura elaborados por el IGAC para los años 1999 y 2012 (Ideam, IGAC, IAvH, SINCHI, UAESPNN, Inveemar y Universidad Pe-

dagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC], en prensa) y con visitas de campo realizadas a la zona de trabajo. Las imágenes producto de la clasificación fueron posteriormente reclasificadas para obtener las coberturas necesarias para la determinación del índice de incidencia antrópica.

Las imágenes Landsat y Radarsat 2 clasificadas se vectorizaron y se obtuvieron los mapas finales, base para el cálculo de los indicadores demográfico, de vegetación y de modificación del cauce. Así mismo, se calculó, por mosaico de imagen, el área de cada una de las coberturas en las zonas de trabajo en las que se dividió el área de estudio. Con la determinación del área de terreno de las coberturas, se prosiguió a calcular los índices demográficos, de vegetación y de modificación de cauce y, por último, el índice de incidencia antrópica, de la siguiente manera:

**Indicador demográfico:** se obtuvieron las proyecciones de población de la página web del Departamento Nacional de Estadística (DANE, 2015), para los municipios del departamento del Valle del Cauca entre 1985 a 2020. Con estos datos, en el programa estadístico Minitab 17, se determinó la ecuación de regresión que describe el crecimiento poblacional.

Para el tratamiento de los datos, se realizó la graficación de los datos de cada población por la opción de gráficas probabilísticas, se realizaron regresiones y, de acuerdo al índice de correlación, se tomó la fórmula que más se ajustaba a la gráfica; hay que tener en cuenta que Minitab utiliza dos métodos: para la regresión lineal utiliza el modelo de mínimos cuadrados, y para esto se debe especificar la forma funcional correcta, con el fin de modelar apropiadamente cualquier curvatura. Para el caso de curvas cuadráticas, como característica, el software eleva la variable al cuadrado para ajustarse al comportamiento de los puntos.

Con base en esta información y en la extensión del área urbana identificada sobre las imágenes clasificadas, se calculó la capacidad de carga (que

corresponde al número máximo de población que puede establecerse en un área de terreno) de cada municipio que conforma la cuenca hidrográfica y se estableció el índice demográfico, a partir de la siguiente fórmula:

$$ID = N / Kp$$

N = tamaño poblacional (cantidad de habitantes).

Kp = capacidad de carga poblacional en el sector estudiado (partido, sector de la cuenca o cuenta entera).

Para establecer el cálculo de la capacidad de carga poblacional se utilizó el método exponencial o logarítmico, el cual tiene como base conocer al menos tres censos poblacionales de la zona de influencia a lo largo del tiempo; con esto se halla la tasa promedio de crecimiento de la población, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = KP \text{ Siendo } K \text{ constante, con lo cual se halla}$$

la ecuación logarítmica siguiente  $\ln P_2 - \ln P_1$

$=K(t_2 - t_1)$  y se despeja la variable, convirtiéndola en una pendiente de una recta.

De esta manera, y con los datos de población, además del tiempo, se tiene despejada la ecuación con la cual se obtuvo la población máxima posible en un área determinada. En este caso, los resultados indican que no se ha llegado a la población máxima posible en la totalidad de poblaciones, lo que demuestra que todavía está en una fase de crecimiento exponencial.

**Indicador de vegetación:** a partir de la información extraída de las imágenes clasificadas, se determinó el área de vegetación nativa o bosques en estadios naturales y la vegetación plantada o artificial en los años 1999, 2008 y 2014 por cada zona de trabajo del área de estudio. Con esta información, se aplica la fórmula para el cálculo del índice de vegetación.

$$IV = ((a*N) + A)/a$$

Donde  $a$  es una constante,  $N$  es la proporción del área con vegetación natural y  $A$  la del área con vegetación artificial.

Para calcular el indicador de vegetación se estableció un mayor peso para la vegetación natural, que indica una equivalencia del doble de la vegetación artificial; de esta manera se le da un enfoque conservacionista al indicador.

**Indicador de modificación de cauce:** se calculó la longitud de cauce del río Cauca (cauce principal) sobre las imágenes clasificadas de los años 1999, 2008, 2011 y 2014 teniendo como punto de referencia la longitud del cauce del río de 1977, proporcionada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2014), y se determinó el índice de modificación de cauce por cada año y cada zona de trabajo del área de estudio, conforme a la fórmula:

$$\text{IMDC} = 1 - (\text{long-río } x / \text{long} - \text{MAX})$$

IMDC: de 0 a 1

Long-río  $x$ : longitud del río para cada año de estudio

Long-río MAX: longitud del río para el año de referencia 1977

Es importante tener en cuenta la escala de las fuentes de información; para el caso de la imagen de 1977 y para todo el estudio es 1:100.000.

**Índice de incidencia antrópica (IIA):** después de calcular los indicadores demográficos, de vegetación y de modificación de cauce, se determinó el índice de incidencia aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{IIA} = \text{ID} * (1 - \text{IV}) * \text{IMDC}$$

Donde:

ID: indicador demográfico

IV: indicador de vegetación

IMDC: indicador de modificación del diseño del cauce

Al igual que para los indicadores, el rango del índice IIA es entre 0 y 1. Cuando el IIA es igual a 0, significa que el sistema está en su estado natural (desde el punto de vista demográfico, de cobertura de vegetación y del diseño del cauce), mientras que el IIA igual a 1 representa el estado de máxima transformación antrópica de la cuenca, donde el sistema pierde todas sus características naturales.

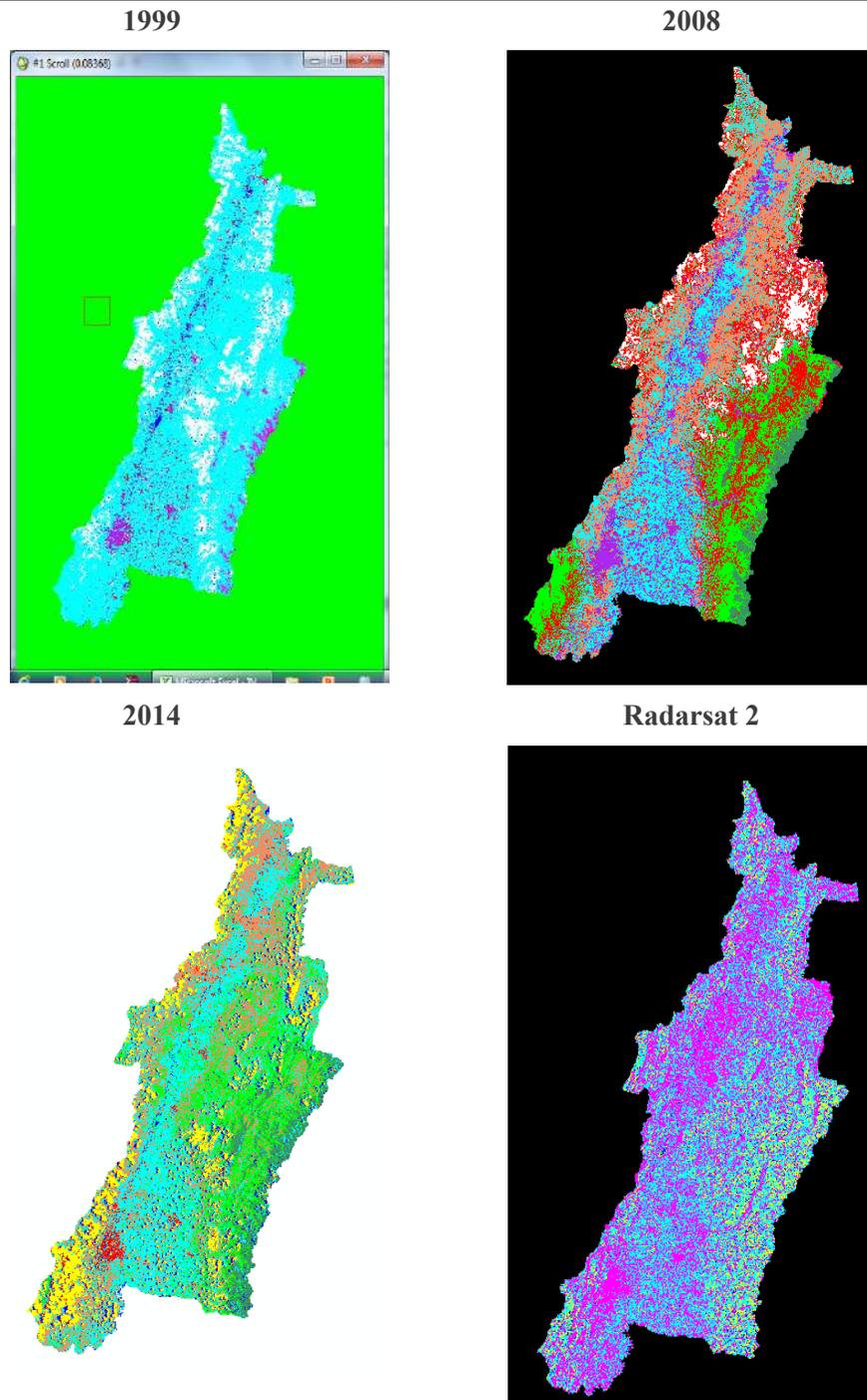
### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Clasificación supervisada

Se realizó la clasificación supervisada utilizando el método de *maximum likelihood* para las tres imágenes Landsat (Figura 4) y Radarsat 2.

Para evaluar la precisión del producto de la clasificación y validar que las clases incluyan realmente el área correspondiente, se realizó una *matriz de confusión* para los años 1999, 2008, 2011 y 2014. Este método consiste, básicamente, en conocer la exactitud de la clasificación comparando muestras de píxeles en la imagen original (imagen realidad)<sup>4</sup> con los correspondientes de la imagen clasificada y cuantificar la exactitud en porcentaje de píxeles clasificados correctamente dentro de esa clase, los faltantes (por error de omisión, es decir, aquellos píxeles que el método de clasificación no incluyó correctamente en la clase a la que pertenecen) y los sobrantes (por error de comisión, es decir, aquellos píxeles que pertenecen a otra clase).

4 Las imágenes Landsat de 1999 y de 2008 se comprobaron con los estudios de uso y cobertura realizados por el IGAC en 1999 y 2012.



**Figura 4.** Imágenes producto de la clasificación supervisada.

**Fuente:** Elaboración propia con base en imágenes Landsat y Radarsat.

TABLA 2. COEFICIENTE KAPPA Y PROMEDIO DE EXACTITUD

Año	Promedio de exactitud	Coefficiente kappa
1999	95,89 %	0,95
2008	93,57 %	0,80
2014	97,88 %	0,97

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se pueden ver los porcentajes de exactitud global obtenidos de la matriz de confusión de cada clasificación. Se obtuvieron porcentajes por encima del 70 % de exactitud global, un desempeño relativamente bueno de la clasificación, y valores kappa entre 0,80 y 0,97. De acuerdo con Chuvieco (2010), el coeficiente kappa intenta delimitar el grado de ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios; sus valores varían entre -1 y 1; si el valor es 1, significa un acuerdo pleno entre la realidad y la imagen clasificada; cuando es 0, indica que el acuerdo observado es puramente debido al azar. Como se observa en la Tabla 2, el valor de kappa fue relativamente alto ( $>0,80$ ) para las imágenes.

### 3.2 Determinación de las coberturas para el cálculo de índices necesarios para definir el índice de incidencia antrópica

Para el cálculo de los indicadores de vegetación, demográfico y cambio de cauce, se hizo necesario reclasificar las imágenes ráster producto de las clasificaciones supervisadas y obtener las clases equivalentes a las categorías 3 de Corine Land Cover: agua, vegetación natural o autóctona, vegetación artificial, plantada o alóctona, área urbana y no clasificada. Se tuvo en cuenta esta categorización en relación con los requerimientos de información de los algoritmos aplicados.

Al obtener estos mapas finales se estableció que, al realizar la clasificación supervisada sobre la imagen Radarsat 2, las coberturas de zona urbana, vegetación natural y vegetación artificial no son claramente discriminadas; el caso contrario ocurrió con los cuerpos de agua. Por tal razón, la imagen de radar es tenida en cuenta solamente para la validación de la longitud del cauce del río Cauca (Figura 5).

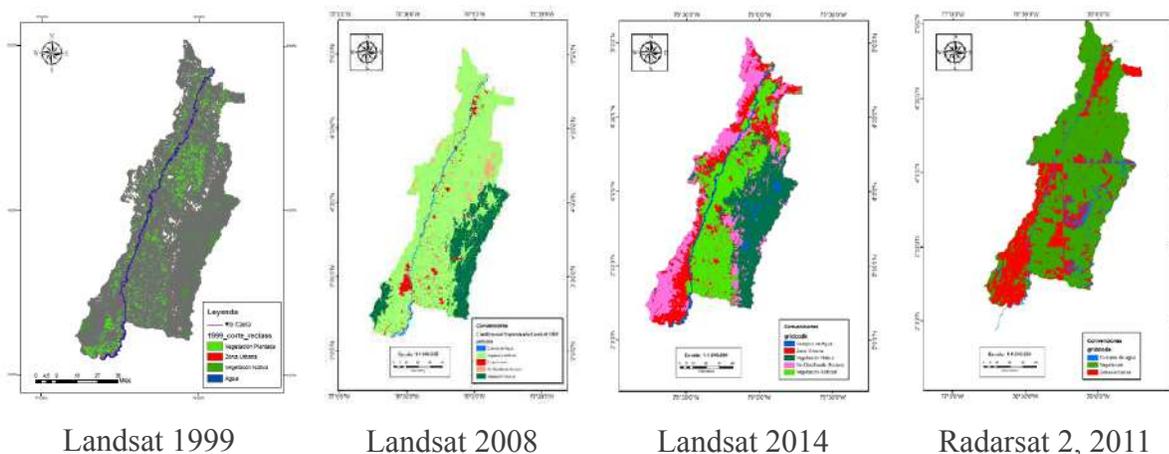


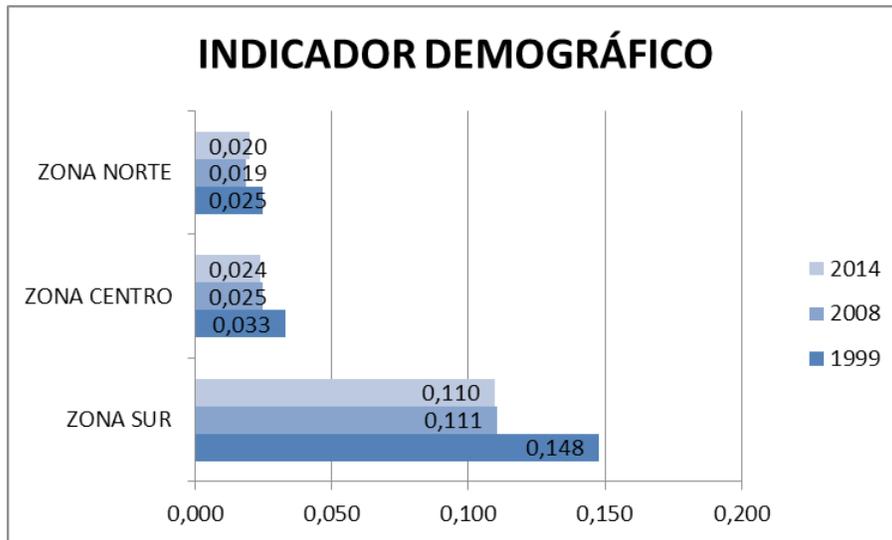
Figura 5. Clasificación supervisada de las imágenes de satélite.

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Landsat y Radarsat 2.

### 3.3 Indicador demográfico

A continuación, se presenta la estimación del indicador demográfico, de vegetación y de diseño de cauce para la cuenca del río Cauca, en el Valle del Cauca. El objetivo del indicador demográfico (ID)

es establecer la incidencia de la población: cuando el ID es igual a 1, se asume que la incidencia antrópica es máxima, y cuando se aproxima a 0 se considera un bajo impacto de la población sobre el territorio.



**Figura 6.** Indicador demográfico.  
**Fuente:** Elaboración propia.

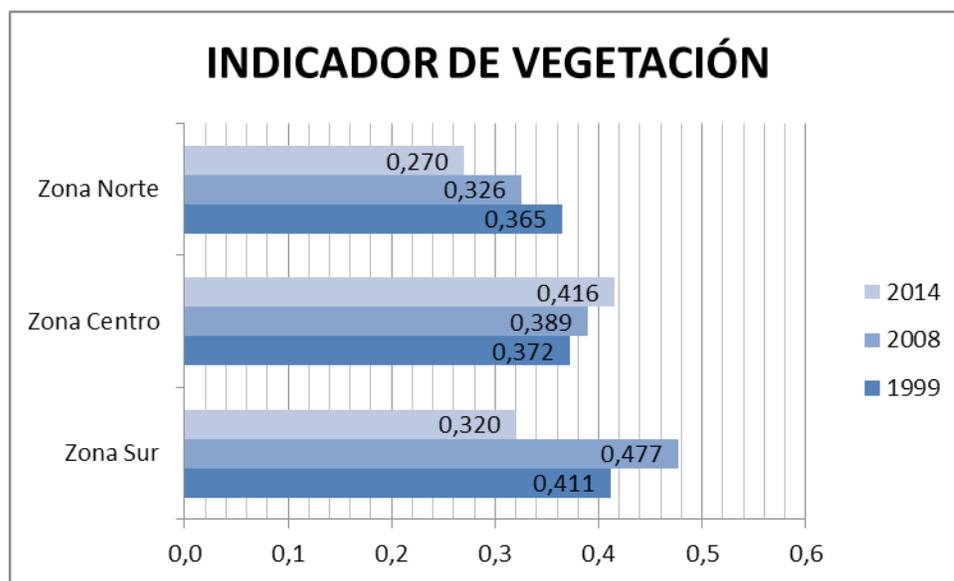
En la Figura 6 se evidencian los valores obtenidos mediante el cálculo del índice demográfico, donde se observan valores más altos en la zona sur del área de estudio debido a que las principales ciudades del departamento, como Cali, Yumbo, Palmira y Jamundí, se encuentran en este sector y son, a su vez, las de mayor densidad poblacional. El crecimiento y el tamaño de la población en las zonas norte y centro son mucho menores y el departamento se caracteriza por presentar la menor cantidad de población en el noroccidente (Torres, 2013).

### 3.4 Indicador de vegetación

El indicador de vegetación (IV) está diseñado de manera que represente la proporción de zonas ver-

des en la cuenca, teniendo en cuenta la proporción de vegetación natural y artificial como medida de la incidencia antrópica sobre el ecosistema fluvial original.

Se considera que si el IV es igual 1, el área estará completamente cubierta por vegetación natural (autóctona). El indicador de vegetación disminuye a medida que se reduce la cobertura vegetal con respecto a otras coberturas, o a medida que disminuye el área natural con respecto a la cobertura artificial. Cuando el indicador de vegetación equivale a 0, se asume que la vegetación es nula, es decir que no hay presencia de vegetación en la zona de estudio.



**Figura 7.** Indicador de vegetación.  
**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo a los valores obtenidos en la Figura 7, el comportamiento del indicador de vegetación en los tres sectores es muy similar, con valores menores a 0,5. Esto se explica porque la producción agropecuaria del departamento se concentra principalmente en los márgenes del río Cauca, mientras que en el sector norte y parte del centro la economía agropecuaria se centra en el cultivo del café, consolidándose así como la zona más agrícola del departamento.

En el 2009, Madero y Núñez realizaron un estudio donde identificaron los cambios de cobertura del área y el uso del suelo en las zonas de los humedales La Bolsa, Charco de Oro y El Pital, localizados en la parte plana del municipio de Andalucía, corregimiento de Campoalegre, y El Salto, en el Valle del Cauca, con información cartográfica y satelital de los años 1950, 1998 y 2002. Estos autores lograron identificar los cambios que ha sufrido la cobertura del suelo en la zona, por ejemplo, una alta variación en el paisaje, que pasó de un hábitat en un alto estado natural de conservación a un hábitat en condiciones precarias y fragmentadas por la implementación de agricultura de altos insumos

y pasturas. Esto se ve claramente reflejado en el resultado del indicador de vegetación donde, si bien es cierto que los bajos valores identifican un bajo impacto en el cambio de la cobertura natural a la artificial, sí es evidente el deterioro progresivo del paisaje a partir del establecimiento de coberturas como cultivos de caña de azúcar, café y pasturas a lo largo de la cuenca.

#### 4. Indicador de modificación del diseño del cauce

Para el presente proyecto de investigación se tomó como línea base información del río Cauca, en formato shapefile, del Environmental Systems Research Institute (ESRI) para el año 1977 a una escala 1:100.000. Esta información fue suministrada y recolectada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2014) para el trabajo de modelación matemática del río Cauca (Tabla 3).

Tras la clasificación supervisada de las imágenes Landsat y Radarsat 2, se calculó la longitud del cauce para los años del estudio.

TABLA 3. LONGITUD DEL RÍO CAUCA EN EL VALLE DEL CAUCA, 1977

Zona sur (km)	Zona centro (km)	Zona norte (km)	Total (km)
199,1047901	136,4759537	122,6988544	458,2795982

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 4. CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL RÍO CAUCA EN EL VALLE DEL CAUCA

Años	Longitud del río - zona de estudio (km)			Total long. (km)
	Zona sur	Zona centro	Zona norte	
1999	198,78	135,45	121,62	455,85
2008	193,88	132,56	120,97	447,41
2011 (radar)	169,542524	132,6456593	112,4108763	414,59
2014	173,49	134,1081105	112,3159024	419,91

Fuente: Elaboración propia.

El rango del índice de modificación de diseño del cauce (IMDC) va de 0 a 1, el valor será 1 cuando la longitud del cauce sea la máxima, mientras que el IMDC

valdrá 0 en el caso hipotético de que la longitud sea cero. Si se sobrepasara ese valor, significaría que se ha alargado el cauce más allá del valor original.

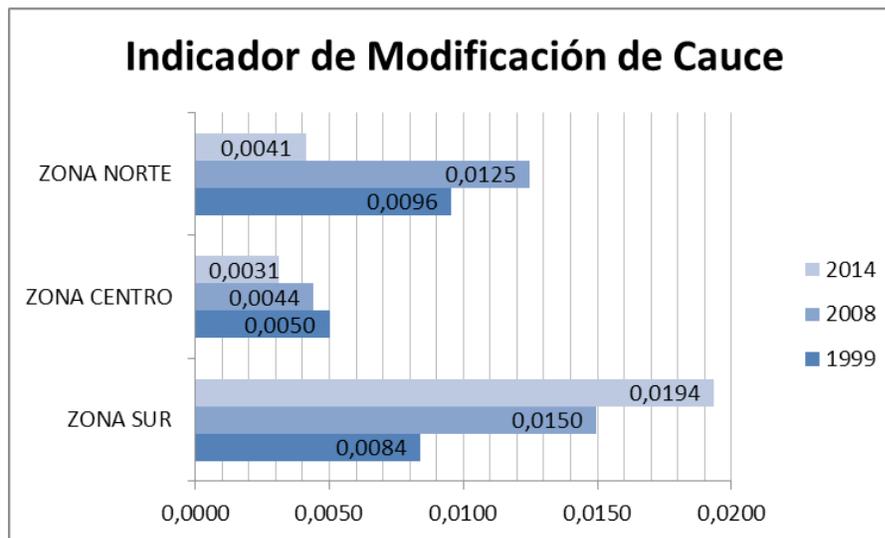


Figura 8. Indicador de modificación de cauce.

Fuente: Elaboración propia.

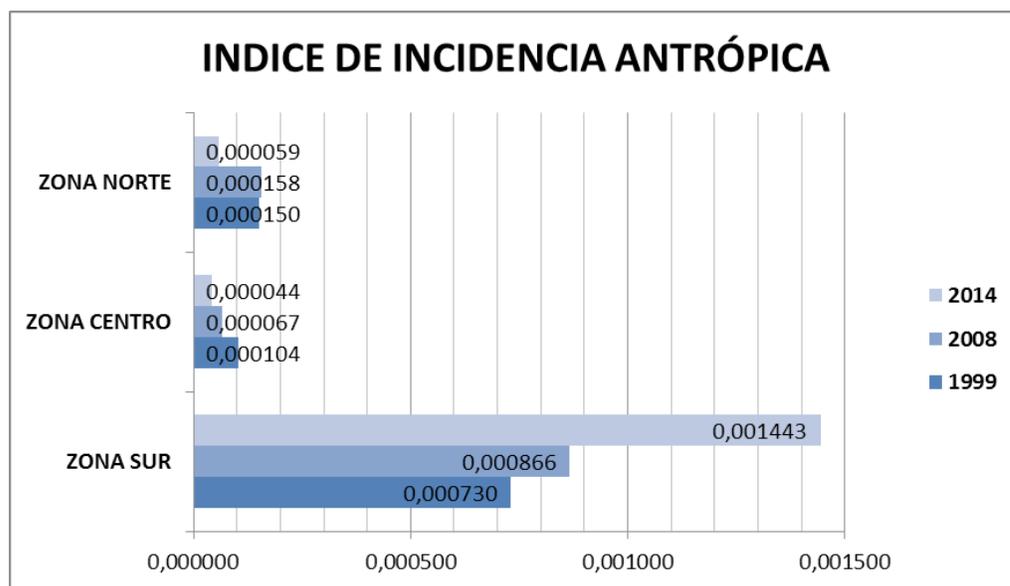
Los resultados obtenidos con el indicador de diseño de cauce, disponibles en la Figura 8, corroboran lo presentado por la CVC en el 2007 en el documento sobre modelación matemática del río Cauca, donde se estableció un análisis morfológico comparativo entre 1977 y 1998 y se encontró que la variación de la relación ancho-profundidad-longitud en el período 1978-1998 es mínima,

aunque el ancho y la profundidad a banca llena, en promedio, se han reducido en 9,1 y 7,3 % respectivamente. El río Cauca desarrolla diferentes grados de sinuosidad a lo largo de todo su cauce. En términos generales, es posible afirmar que el patrón meándrico no ha variado significativamente en el tiempo, y presenta un incremento poco importante en la sinuosidad.

## 5. Estimación del índice antrópico

Una vez obtenidos los indicadores demográficos, de vegetación y de modificación del diseño del

cauce, se procede a obtener un índice que refleje las características de drenaje superficial de la cuenca y que, en el análisis temporal, refleje sus cambios durante casi tres décadas.



**Figura 9.** Índice de incidencia antrópica.

**Fuente:** Elaboración propia.

Al evaluar los resultados obtenidos del índice de incidencia antrópica (Figura 9), todos muy cercanos a cero, es posible identificar que a pesar de que la mayoría de las ciudades se encuentran ubicadas en la zona de influencia de la cuenca y están en un estado de crecimiento poblacional progresivo, el grado de afectación que ha tenido la cuenca no ha sido tan relevante frente a su funcionalidad y el diseño de cauce, es decir que se encuentra en un desarrollo ecosistémico natural donde hay un mínimo impacto antrópico que afecte su funcionalidad, excepto en el sector sur, donde se refleja un mayor impacto, dado que es donde hay mayor concentración de población y desarrollo económico.

Sin embargo, cabe mencionar que a pesar de que en el 2014 (fecha más reciente) las tres zonas de trabajo presentan un índice bajo, la zona sur ha tenido un incremento considerable en la incidencia antrópica, de acuerdo con estudios realizados por la CVC en el sector de la ciudad de Cali especialmente. Son notables los efectos que han causado acciones como las explotaciones mecanizadas y no

controladas de material de arrastre, las escombrecas ilegales, los vertimientos informales de aguas residuales, además de presentar un alto grado de riesgo ante amenazas sísmicas y de inundación de la ciudad, derivado de la posible licuación de suelos y la ruptura del jarillón o dique marginal de protección.

## 6. Conclusiones

Los valores obtenidos con el índice de incidencia antrópica, cuyo valor máximo fue 0,001443, permiten inferir que, a pesar de las acciones antrópicas que se han presentado durante el periodo de estudio, no existe una variación marcada del cauce natural del río Cauca en el Valle del Cauca.

Al estudiar la distribución espacial y temporal del impacto que el hombre ha tenido sobre la cuenca del río Cauca en el departamento del Valle, se puede identificar que en el periodo comprendido entre 2008 y 2014

ha existido una mayor incidencia antrópica, especialmente en el sector sur de la cuenca; esto se debe, posiblemente, a un fenómeno demográfico y social de retornos masivos, producto del cambio en las condiciones de orden público que permitió el acceso a las zonas rurales, como lo evidencia este estudio.

Al analizar los sectores de la cuenca que han sido más afectados, se puede identificar que el sector sur de la cuenca del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca ha sido la zona más afectada, en especial entre el 2008 y el 2014; esto se debe a la aceleración de las prácticas productivas y la expansión de los asentamientos urbanos.

Al estudiar el índice de diseño de cauce se puede afirmar que ha sido mínima la variación del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, y esto se debe principalmente a que, a pesar de que el departamento se ha consolidado en el país como un espacio de producción agrícola e industrial, su crecimiento poblacional con relación al área rural no ha sido relevante, y aún se encuentra en un estado de crecimiento potencial de la población y los asentamientos urbanos.

El diseño del cauce de la cuenca principal del río Cauca, en cuanto a su longitud, no se ha visto afectado pese a las actividades antrópicas que se desarrollan en la cuenca, probablemente ha presentado alta variabilidad en su caudal, pero su cauce no se ha modificado considerablemente.

La vegetación nativa se ha visto disminuida notablemente en la cuenca hidrográfica pese a que la densidad de población en las zonas cercanas a los bosques, en estas tres décadas, ha disminuido tras el desplazamiento originado por el accionar de grupos armados al margen de la ley y la expansión de monocultivos a gran escala.

Contar con datos espaciales y de comportamiento de la cuenca en términos de vegetación, pobla-

ción y su dinámica en el cauce permite establecer indicadores que den a conocer los puntos críticos de las cuencas hidrográficas y contribuir a la formulación de políticas públicas de desarrollo. En este caso, es evidente la necesidad de establecer estrategias de ordenamiento y proyección del departamento orientadas a la reducción en la presión actual existente en el sur de la cuenca, teniendo en cuenta que es la zona donde hay una mayor concentración de la población, la modificación de la cobertura, de manera progresiva, altera el equilibrio del paisaje y es mayor la variación de cauce.

Para contribuir con la planificación del territorio a partir de estudios como este, es necesario articular la información disponible sobre el estado ecosistémico asociado al río Cauca en el Valle, para así priorizar las zonas que requieren manejo e implementación de medidas de conservación. En este caso, es claro que el sector sur de la cuenca del río Cauca en el Valle del Cauca presenta cambios en el paisaje, con una tendencia al predominio de las coberturas artificiales, un crecimiento acelerado de la población y, por ende, refleja un mayor índice de incidencia antrópica.

## 7. Recomendaciones

A pesar de contar con resultados bajos en el cálculo del índice de incidencia antrópica, se evidencia que el área con mayor afectación es la zona sur, teniendo en cuenta que allí se encuentran los asentamientos humanos con mayor desarrollo y la capital del departamento. Así, la evaluación del crecimiento poblacional se constituye en un insumo de gran utilidad para predecir la demanda de recursos naturales, y junto con el procesamiento de información cartográfica, hace posible establecer la demanda de recursos y los medios para garantizar el manejo sostenible de las unidades productivas sin amenazar los recursos naturales.



## Referencias

- Basterra, I. (2011). *Teledetección-imágenes satelitales-procesamiento digital de imágenes*. Chaco, Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería. Recuperado de <http://ing.unne.edu.ar/dep/geociencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/tdi.pdf>.
- Bevilacqua, M., Cárdenas, L y Medina, D. (2006). *Las áreas protegidas de Venezuela: diagnóstico de su condición 1993/2004*. Venezuela: Fundación Empresas Polar (FEP). Chuvieco, E. (2010). *Fundamentos de teledetección*. Madrid, España: Rialp.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2009). *Humedales del Valle geográfico del río Cauca: génesis, biodiversidad y conservación*. Santiago de Cali, Colombia: CVC.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y Universidad del Valle (2007). Modelación matemática del río Cauca. En *El río Cauca en su valle alto* (pp. 270-319). Recuperado de [https://www.cvc.gov.co/images/CVC/Tematicas/Recurso\\_Hidrico/El-rio-Cauca-en-su-valle-alto/8-Modelacion-Matematica.pdf](https://www.cvc.gov.co/images/CVC/Tematicas/Recurso_Hidrico/El-rio-Cauca-en-su-valle-alto/8-Modelacion-Matematica.pdf).
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2014). *Guía explicativa de la temática de cobertura y uso del suelo*. Recuperado de <http://geocvc.co/pdf/GuiaCoberturaUso.pdf>.
- Cruz Bello, G. M. (2011). *Análisis multitemporal de la degradación ambiental de la Cuenca del río Necaxa. Puebla, México*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/298353101\\_Analisis\\_multitemporal\\_de\\_la\\_degradacion\\_ambiental\\_de\\_la\\_Cuenca\\_del\\_Rio\\_Necaxa\\_Puebla\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/298353101_Analisis_multitemporal_de_la_degradacion_ambiental_de_la_Cuenca_del_Rio_Necaxa_Puebla_Mexico).
- Departamento Nacional de Estadística (DANE). (2015). *Series poblacionales de Colombia*. Consultado el 15 de mayo de 2015 en [www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co).
- Gónima, L. y Durango-Vertel, J. (2005). Aplicaciones ambientales de imágenes digitales de satélite. *Geotrópico*, 3(1), 21-30. Recuperado de [http://www.geotropico.org/3\\_1\\_Gonima.pdf](http://www.geotropico.org/3_1_Gonima.pdf)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000*. Bogotá, Colombia: Ideam. Recuperado de [http://siatac.co/c/document\\_library/get\\_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762](http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (IAvH), Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar) y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). *Mapa de coberturas de la tierra Corine Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000*. En prensa.
- Madero E. y Núñez C. (2009). Cambios en coberturas de áreas y usos del suelo en tres humedales en el Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 58(4), 308-315. Recuperado

de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0120-28122009000400012&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-28122009000400012&lng=es&nrm=iso).

Metz, B., Davidson, O., Swart, R. y Pan, J. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001*. Cambridge: Cambridge University Press.

Muñoz Guerrero, D., Rodríguez Montenegro, M. y Romero Hernández, M. (2009). Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y coberturas, en la microcuenca Las Minas, corregimiento de La Laguna, municipio de Pasto, departamento de Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 26(1), 11-24.

Ortega, R. y Rodríguez, I. (1997). *Manual de Gestión del Medio Ambiente*. Madrid: Fundación Mapfre.

Quaíni, K. (2011). *Análisis espacio-temporal de un índice de incidencia antrópica en la cuenca la Matanza Riachuelo, Provincia de Buenos Aires* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Santana Rodríguez, L. M., Escobar Jaramillo, L. A. y Capote Paolo, A. (2010), Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 77-95. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006>.

U. S. Geological Survey (USGS) (2016). Descarga de imágenes de satélite. Recuperado de <https://www.usgs.gov/>

Torres, M. (2013). La geografía económica del Valle del Cauca. *Revista de Economía & Administración*, 10 (1), 48-67. Recuperado de <http://www.uao.edu.co/sites/default/files/Torres.pdf>.

”

