UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
Facultad de Ingeniería
Especialización en Geomática

Trabajo de Grado

EVALUACIÓN DE ALGORITMOS PARA LA DELIMITACIÓN DE CUENCAS EN EL CESAR

Oriana Carolina Jurado Fuentes

Código: 3101249

carojurado10@gmail.com

Bogotá D. C.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 3
ABSTRACT 3
INTRODUCCION 4
Algoritmos empleados..... 6
Algoritmo D8 6
Algoritmo “Burn in” 6
Método AGREE 6
1. OBJETIVOS..... 7
1.1 Objetivo General 7
1.2 Objetivos específicos 7
2. DATOS Y MÉTODOS 7
2.1 Zona de estudio 7
2.2 Datos..... 8
2.3 Metodología 8
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 10
CONCLUSIONES..... 16
REFERENCIAS CITADAS 17
ANEXO..... 19

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del departamento del Cesar. 7
Figura 3. Metodología propuesta..... 8
Figura 3. Flujo de trabajo para el Algoritmo D8 9
Figura 4. Comparación espacial de los drenajes por cada uno de los algoritmos. 12
Figura 5. Resultados obtenidos por cada algoritmo. 13
Figura 6. Similaridad espacial para las cuencas delimitadas por cada algoritmo.. 15

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estadísticos de similaridad difusa por algoritmo..... 11
Tabla 2. Estadísticos de similaridad para las cuencas generadas por cada uno de los algoritmos. 14
Tabla 3. Ventajas y desventajas de cada uno de los algoritmos 16

RESUMEN

De acuerdo a las líneas de ordenamiento territorial, la identificación de las unidades hidrológicas es una de las herramientas más eficaces con miras a la conservación del recurso hídrico, con el fin de mitigar los efectos de cambio climático. El creciente uso de insumos provenientes de sensores remotos y la masificación de técnicas de análisis espacial soportada en sistemas de información geográfica, ha determinado una nueva concepción en la gestión de las cuencas hidrográficas. Es por ello, que se debe determinar qué tan ajustados son los modelos propuestos a la realidad geográfica.

El propósito de este estudio es determinar qué tan ajustados son tres algoritmos de delimitación de cuencas (D8, Burn In, y AGREE) basados en modelos digitales de elevación en el departamento del Cesar. Para ello se implementaron cada uno de ellos con base en el modelo SRTM de 30 metros, la red de drenajes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:100000 y la capa de subcuencas de la Corporación Autónoma Regional Del Cesar "Corpocesar". Luego de una homologación se desarrolló una evaluación por medio de la comparación de las capas oficiales y las capas resultado por cada algoritmo por medio de la similaridad espacial desde dos enfoques: pixel a pixel y lógica difusa.

Palabras Claves: Delimitación de cuencas, similaridad espacial, modelo digital de elevación.

ABSTRACT

According to the land use policies, the identification of the hydrological units is one of the most effective tools for the conservation of the water resources, in order to mitigate the climate change effects. The growing use of the remote sensing inputs and the mass of spatial analysis techniques, supported in geographical information systems, has given a new concept for the management of watersheds. For this reason, you should determine how adjusted are the models proposed to the geographical reality.

The purpose of this study is to determine how adjusted are three watershed delimitation algorithms (D8, Burn In, and AGREE) based on digital elevation models in Cesar Department. For this, they were implemented each ones, related on the model SRTM with 30 meters of spatial resolution, the drainage network of Agustin Codazzi Geographic Institute at 1: 100,000 scale, and the sub-basin layer of Cesar Regional Autonomous Corporation “CORPOCESAR”. After the homologation, the evaluation was developed by comparing the official layers and coverages for each algorithm using the spatial similarity from two approaches: pixel-by-pixel and fuzzy logic.

Keywords: Watershed delimitation, spatial similarity, digital elevation model

INTRODUCCION

La conservación del recurso hídrico es uno de los temas que más ha cobrado importancia en los últimos años, debido a fenómenos cómo calentamiento global e inundaciones. La identificación y censo de las cuencas hidrográficas se ha convertido en una de las herramientas de planeación más potentes al momento de ordenar el territorio para el desarrollo sostenible y bienestar social (IDEAM, 2010). Sin embargo, el tratar de establecer la complejidad de las variables que intervienen en un proceso de tal magnitud, la inversión de tiempo y recursos es generalmente alta. (FAO, 2007).

Una de las alternativas para capturar de manera global los fenómenos presentes en la cuenca, es la consecución de datos a partir de sensores remotos y su posterior análisis y procesamiento a través de funciones de análisis y modelamiento espacial. En este sentido los sistemas de información Geográfica (SIG) constituyen una de los mecanismos de mayor uso, ya que permiten la integración de la información y la extracción automática o semiautomatizada de datos de importancia en la modelación hidrológica (Pusineri, Pedraza, & Lozeco, 2011).

El objetivo de este estudio es evaluar la implementación de diferentes algoritmos de delimitación de cuencas, con el fin de analizar su comportamiento y precisión en el departamento del Cesar, que presenta una variabilidad topográfica considerable. En este contexto el trabajo a desarrollar permitirá resolver la inquietud de cuál es el modelo que presenta mayor ajuste a la condiciones hidrológicas y de relieve en el departamento, siendo una herramienta potencial en el manejo del recurso hídrico y su ordenamiento.

Para el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2003) una Cuenca Hidrográfica se define como una “unidad de territorio donde las aguas fluyen naturalmente, en un sistema interconectado y en el cual interactúan uno o varios elementos biofísicos, socioeconómicos y culturales”. Para el manejo integrado de cuencas es necesario hacer el análisis de unidades de manejo de menor grado, cómo lo son subcuencas y microcuencas.

Los primeros modelos jerárquicos de cuencas han sido desarrollados por Gravelius (1914), y Horton (1932), quienes consideraron que el río de mayor importancia, es de orden 1, y sus afluentes constituyen el orden dos y así sucesivamente. A su vez, el IDEAM define las subcuencas cómo aquellas subdivisiones principales de las cuencas, donde las aguas superficiales y subterráneas alimentan a las mismas, por lo general las componen aquellas subregiones de segundo orden en adelante, según la clasificación de Gravelius (IDEAM, 2010).

Ahora bien, entre los insumos más utilizados para obtener una delimitación de área de acción de determinado cauce, se encuentran los modelos digitales de elevación (DEM por sus siglas en inglés), que suministran información sobre la topografía del terreno, permitiendo el modelado de los procesos de transporte de agua y sedimentos (Ramírez, 2002). De acuerdo a Luo et al. (2011) la delimitación de cuencas en zonas de relieve pronunciado es una tarea relativamente sencilla. Sin embargo en zonas planas, donde la variación de la altura no es significativa, se presentan tres problemas:

1. La delimitación automatizada no coincide con la realidad del fenómeno hidrológico.
2. Los modelos no identifican la variabilidad de las corrientes.
3. Los métodos fallan al modelar el flujo promedio y representación unidimensional.

Adicional a los anteriores, Jones (2002) identifica que de acuerdo a la calidad de la información suministrada al modelo, se podrán omitir varios aspectos fundamentales en la delimitación de las cuencas, lo que conlleva a errores gruesos. De igual manera la resolución espacial del DEM y precisión vertical y horizontal, puede omitir la mayoría de subcuencas en especial en zonas en las que la exactitud del DEM es menor que el gradiente topográfico.

Dentro de la modelación hidrológica, la delimitación de las cuencas basadas en los modelos digitales de elevación tiene una gran importancia, ya que de su precisión dependen otras funciones de la simulación de procesos hidrológicos cómo el establecimiento de tendencias y patrones de sedimentación y calidad de agua (Luo X. , Su, Yuan, Li, & Zhan, 2011).

Trabajos cómo los desarrollados por O'Callaghan and Mark (1984), Band (1986) y Jenson and Domingue (1988) (Citados por Ramírez, 2002), han propuesto diversos algoritmos en la delimitación automática de cuencas y sus redes de drenajes a partir de la manipulación de los datos contenidos en los DEM. Ramírez (2002) expone que si bien se han generado diversas propuestas metodológicas para la delimitación, la estrategia, en general, se mantiene enmarcada en los siguientes pasos:

- Se asigna una dirección de drenaje en cada una de las celdas del DEM, de acuerdo a los gradientes de elevación, determinando las posibles direcciones hacia la cual fluye el agua.
- De acuerdo a esta dirección, se estiman parámetros de los flujos superficiales cómo son el área de drenaje y la pendiente.
- De acuerdo a los flujos, se delimita la red drenaje, donde se establecen los cauces y las áreas de laderas.

- Con en base en los anteriores pasos, se estiman variables geomorfológicas asociadas a la distribución geométrica de las corrientes.

De acuerdo a las metodologías y algoritmos diseñados, para la delimitación de cuencas hidrográficas, y teniendo presente el área de trabajo, este trabajo pretende establecer ¿Cuál de los diferentes algoritmos presenta mejor desempeño para la delimitación de cuencas en el Departamento del Cesar? La variabilidad del terreno en el departamento hace que la aplicación de los algoritmos de modelación hidrológica, y su coherencia con la realidad, sea una tarea de investigación, cuyos resultados permitirán la toma de decisiones acertadas en cuanto al manejo y ordenamiento del recurso ambiental.

Algoritmos empleados.

Algoritmo D8

Propuesto por O'Callaghan and Mark en 1984 (Citado por Ramírez, 2002), se basa en dos supuestos básicos: El primero es que el flujo de agua en un punto dado del terreno, sigue la dirección del gradiente de energía potencial, es decir pasa de un altura mayor a una celda de menor altura. El segundo es que el gradiente es igual a la pendiente del terreno (Turcotte et al. 2001).

Algoritmo “Burn in”

Este algoritmo fue desarrollado en la Universidad de Texas, en el que se tiene disponible un conjunto de datos vectorial de la red de drenajes, que permite la intervención del DEM. La red de drenaje es sobrepuesta al DEM; las celdas coincidentes son modificadas reduciendo el valor de elevación para aumentar así los gradientes y aumentar la efectividad al momento de estimar las direcciones de flujo (Luo et al. 2011).

Método AGREE

El método AGREE es una modificación al algoritmo “Burn In”, en el que el usuario establece un área de influencia horizontal y de profundidad, en los flujos forzados, para reacondicionar el DEM crudo. Este método implica la modificación de los valores de elevación en los trayectos de la red de drenaje en las proximidades, proporcionando un trayecto lineal para el gradiente de pendiente, permitiendo mejora sustancial en la delimitación de drenajes (Hellweger & Maidment, 1997). Este método funciona muy bien en las zonas donde se tiene variabilidad topográfica considerable, es decir se presenten zonas de relieve pronunciado y zonas planas (Zhao et al. 2009, Davies et al. 2007).

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de diferentes algoritmos de delimitación de cuencas en el departamento del Cesar.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la generación de la red de drenajes a través de la modelación en zonas planas y de relieve pronunciado.
- Definir las ventajas y desventajas de la implementación de cada uno de los algoritmos en el departamento del Cesar.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

La Figura 1 muestra la localización de departamento dentro del territorio colombiano, y sus límites geográficos. La variabilidad del terreno hace que la aplicación de los algoritmos de modelación hidrológica, y su coherencia con la realidad, sea una tarea importante, cuyos resultados permitirán la toma de decisiones acertadas en cuanto al manejo y ordenamiento del recurso ambiental.

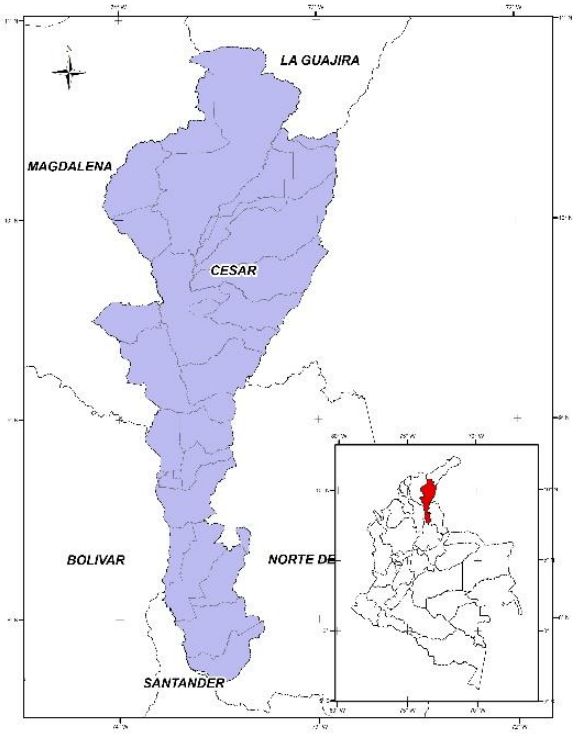


Figura 1. Mapa del departamento del Cesar.

2.2 Datos

- Modelo Digital de Elevación SRTM a 30 metros. (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/)
- Red de drenajes Sencillos y Dobles. Fuente IGAC Escala 1:100000
- Capa de Microcuencas. Fuente: CORPOCESAR. Escala 1:100000

2.3 Metodología

La Figura 2 contiene los diferentes pasos a desarrollar dentro del trabajo propuesto, en los que se tienen tres grupos: Preprocesamiento, Modelación Hidrológica en SIG y la Evaluación y validación de los resultados.

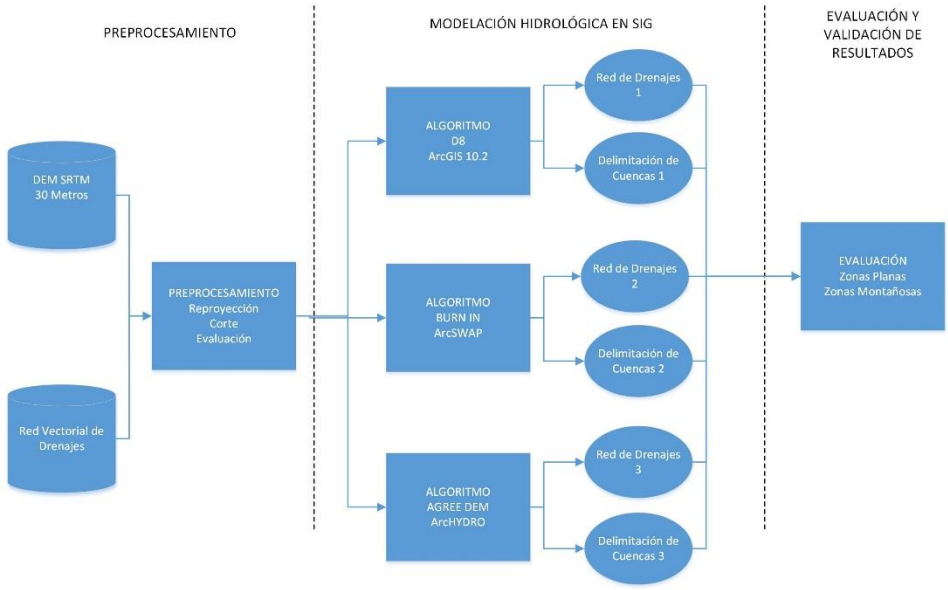


Figura 2. Metodología propuesta

El primer paso de la metodología a emplear es el preprocesamiento de los datos, que consiste en la unificación en un solo sistema de referencia espacial y el posterior corte de la información de acuerdo al límite de la zona de estudio. El siguiente paso es la modelación hidrológica. Inicialmente se tiene la evaluación del modelo DEM. Para ello se evalúa aquellas zonas donde las celdas adyacentes tienen una misma altura, lo que ocasiona que el algoritmo de dirección de flujo no encuentre un gradiente. Adicional a ello se modifican las depresiones donde las celdas cercanas son suavizadas eliminado valores atípicos.

De acuerdo al anterior paso se procede con el cálculo de las direcciones de Flujo donde se identifica el patrón de movimiento de las corrientes superficiales de agua, con base en las pendientes. Cómo unidad de evaluación se tiene un kernel de dimensiones 3×3 que tiene cómo foco el comportamiento de la elevación en el

píxel central, con respecto a los vecinos cercanos, determinando aquellas regiones que presentan menor potencial determinando el camino de menor resistencia que recorrerá el agua drenando por gravedad, de un punto de mayor a menor elevación.

En este apartado en especial, se implementarán los diferentes algoritmos de modelación, disponibles en el módulo Hydrology de ArcGIS (Figura 3) que contiene una serie de herramientas que permiten modelar el flujo de agua sobre la superficie. Este módulo utiliza el algoritmo D8 (ESRI, 2014). Adicional a ellos se encuentran dos aplicaciones específicas para el desarrollo del trabajo propuesto: ArcSWAT (Soil & Water Assessment Tool), que contiene un módulo específico para la delimitación de cuencas por el método “Burn-In” (Neitsch et al. 2009); la otra aplicación se denomina ArcHydro, que es un conjunto de herramientas y modelos de datos que permiten la delimitación y caracterización de cuencas hidrográficas, que implementa el algoritmo AGREE para forzar las direcciones de flujo de acuerdo a una red vectorial de drenajes (ESRI, 2014).

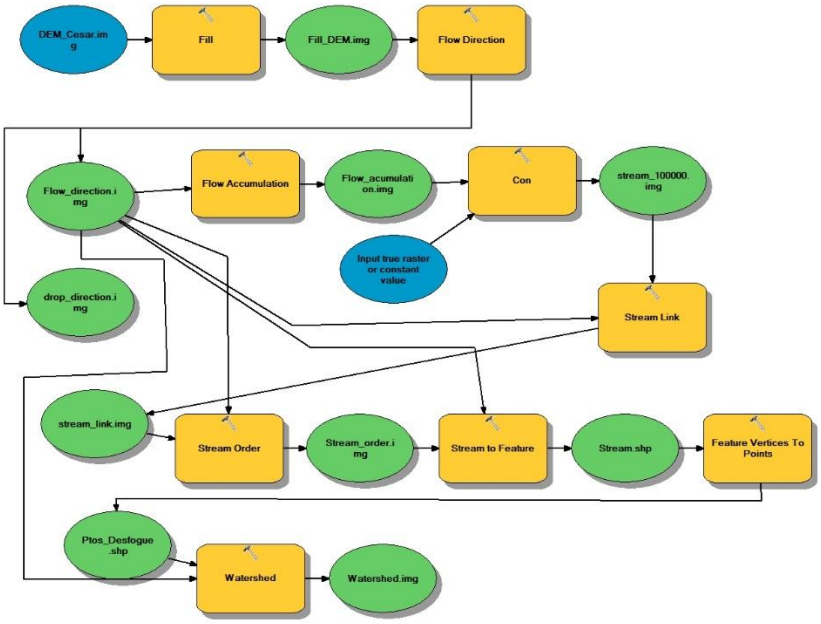


Figura 3. Flujo de trabajo para el Algoritmo D8

Posteriormente se tiene la determinación de las celdas que drenan con un patrón lineal similar, evaluando el recorrido del flujo. De esta manera las celdas que tengan una mayor acumulación de flujo, conformaran las redes de drenaje. Para la delimitación de las cuencas, se determinan las divisorias de aguas a partir del cálculo de parámetros morfológicos derivados de las trayectorias de flujo que están definidas por las direcciones de drenaje y la distribución del relieve determinado por el DEM. Entre las principales se tienen el área de drenaje, la pendiente, longitud de la red de drenaje, el orden de Horton (1932), índice topográfico entre otros.

Para la evaluación de la consistencia de los productos generados, se tomó como parámetro la red oficial de drenajes del IGAC y la capa de microcuencas de CORPOCESAR. El método de comparación es la similaridad espacial que se refiere a que tan parecidos son dos objetos en el espacio geográfico. (Yang, Yan, & Li, 2015). Inicialmente se tiene la evaluación convencional, que busca las relaciones espaciales entre la superposición pixel a pixel. Para ello se genera un mapa de cambio y sus estadísticas asociadas de las regiones que presentan diferencias. Este método se conoce cómo similaridad Pixel a Pixel. Por otro lado se tiene la similaridad Difusa, que puede capturar de mejor manera, que tan parecidos son los patrones y tendencias en una distribución espacial especifica de dos mapas diferentes (Hagen, 2002, Power et al. 2001, Yang et al. 2015) donde la proximidad entre diferentes píxeles puede considerarse en la contribución del grado de pertenencia a una categoría en específico. Para esta evaluación se utilizó el software Map Comparison Kit[1] (MCK) desarrollado por el Instituto de Investigaciones para Sistemas del Conocimiento (RIKS, por sus siglas en inglés) de Holanda (Research Institute for Knowledge Systems, 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

De acuerdo a la metodología empleada, se desarrollaron los procedimientos pertinentes para obtener la delimitación de corrientes y cuencas por cada uno de los algoritmos. Con respecto a los drenajes, se tuvo como parámetro, aquellos que tuvieran el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada píxel de pendiente descendente (acumulación de flujo) mayor a 100000, con el fin de obtener aquellos drenajes de mayor relevancia de acuerdo a la clasificación de Horton (1932).

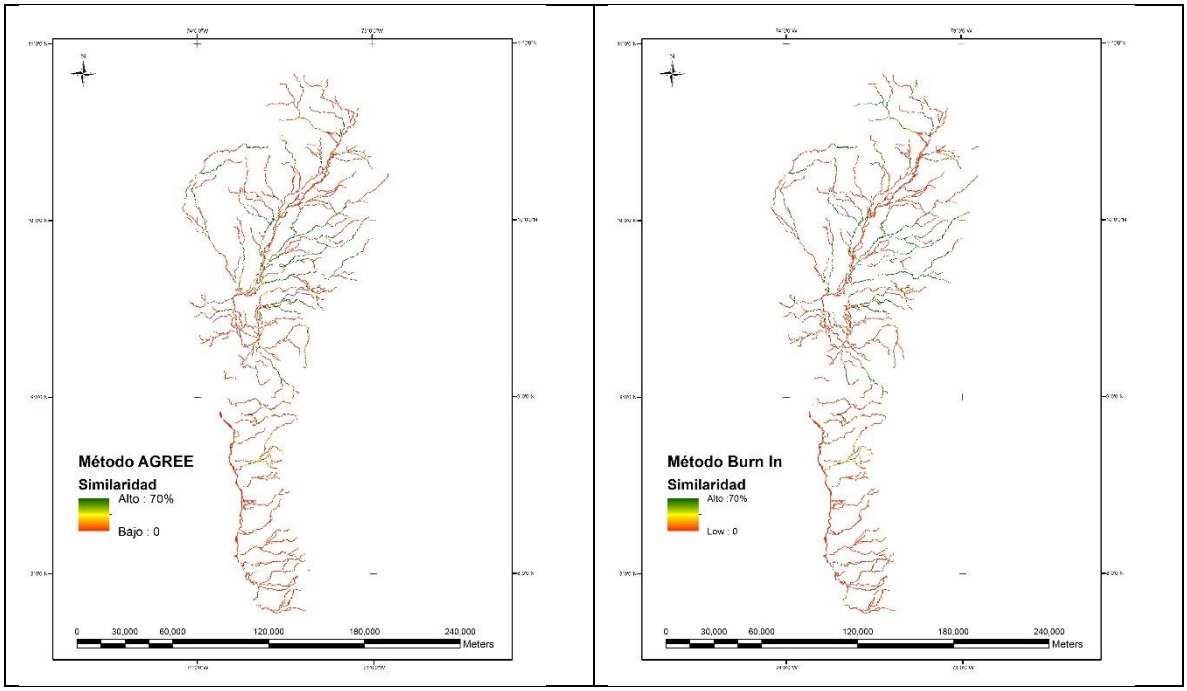
Para el desarrollo de la comparación se realizó la priorización de los drenajes de la capa del IGAC, de acuerdo a la importancia dentro de los modelos empleados obteniendo una capa con 225 segmentos a comparar, contra 147 segmentos del algoritmo D8, 131 del algoritmo Burn In y 145 del algoritmo AGREE. Seguidamente por medio de la técnica Kappa Difuso (Hagen, 2002) se obtuvo un valor que permite evaluar que tan parecida son las capas resultado con la capa oficial. La Tabla 1, muestra que el algoritmo Burn In tiene un índice de similaridad del 30.62% siendo el resultado con mayor ajuste con respecto al parámetro de evaluación.

[1] Disponible en http://mck.riks.nl/

Tabla 1. Estadísticos de similaridad difusa por algoritmo

Algoritmo	Fuzzy Kappa
D8	6.49%
Burn IN	30.62%
AGREE	28.29%

La Figura 4 muestra el grado de concordancia espacial de los drenajes con respecto a la capa oficial. En tonos rojos se muestran aquellos segmentos que presentan similaridad reducida. Los tonos verdes identifican aquellas corrientes que tienen gran concordancia con las corrientes del IGAC. En este sentido el método Burn In presenta mayor número de corrientes coincidentes.



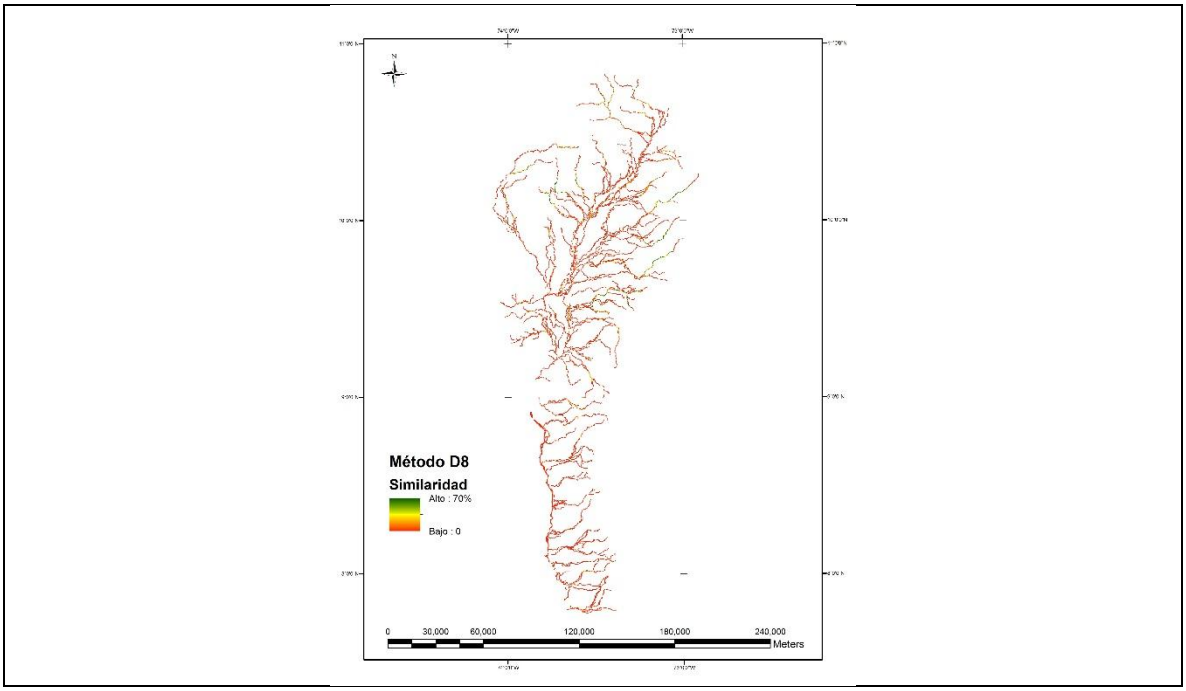


Figura 4. Comparación espacial de los drenajes por cada uno de los algoritmos.

Con respecto a las cuencas, inicialmente, se tiene que el algoritmo D8 delimitó ochenta y uno (81) cuencas, el algoritmo Burn In noventa y dos (92) y el método Agree ochenta (80). La Figura 5 muestra las delimitaciones obtenidas por cada uno de los algoritmos y la capa de cuencas de CORPOCESAR. Visualmente de puede detallar la inconsistencia presentada por el algoritmo D8, ya que tiene vacíos en la parte sur del departamento. En general, los tres algoritmos presentan inconsistencias en la zona de la ciénaga de Zapatosa, confirmando una de las debilidades expuestas en la literatura. Adicionalmente se observa en los límites del departamento, algunas inconsistencias; esto es debido al efecto de frontera ya que algunas cuencas tienen un área de acción por fuera de la Jurisdicción de Cesar.

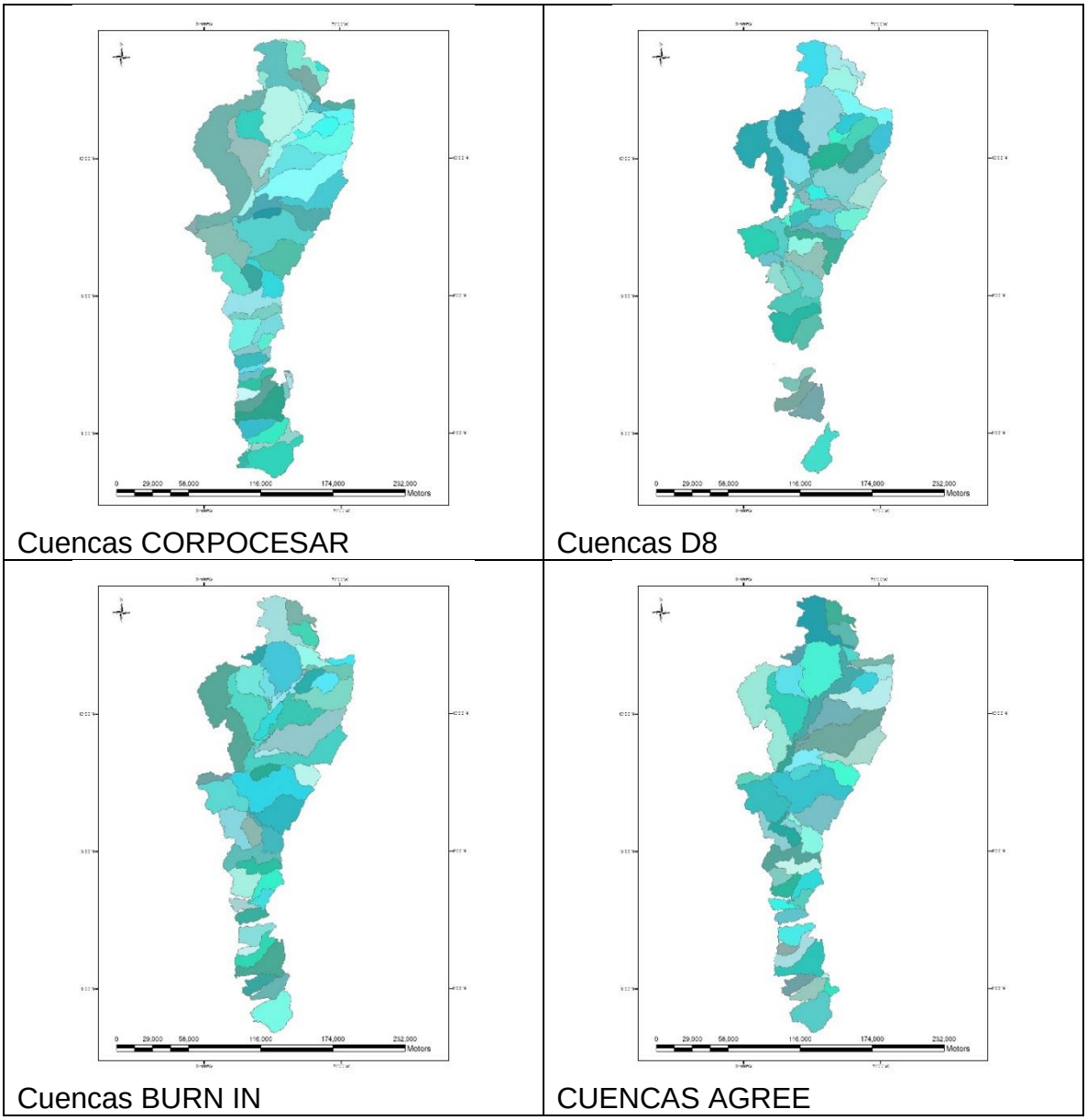


Figura 5. Resultados obtenidos por cada algoritmo.

Para la comparación, se tuvo que hacer una homologación de cada una de las unidades con las cuencas de CORPOCESAR, integrando algunas subcuencas y asignando un identificador único, obteniendo para el algoritmo D8 un total 29 cuencas; para el algoritmo Burn in 37 y AGREE con 39. La comparación se desarrolló con dos métodos; el primero se tuvo en cuenta la similaridad píxel a píxel, que tiene una evaluación muy estricta y el estadístico de resumen es el KLocation. El otro método es la similaridad difusa. La Tabla 2 muestra la concordancia general de las capas generadas, donde se evidencia que el método que presenta mayor ajuste es el Burn In, con un Kappa de localización de 96.60% presentando una diferencia muy pequeña con respecto al método Agree (96.44%). Sin embargo el estadístico basado en lógica difusa si determina una diferencia significativa a favor del método Burn In.

Una de las ventajas del algoritmo de evaluación empleado, es la posibilidad de obtener el grado de similaridad por cada cuenca presente de la zona de estudio. El Anexo 1 tiene los valores del Kappa de localización para cada una de las unidades de la capa de CORPOCESAR.

Tabla 2. Estadísticos de similaridad para las cuencas generadas por cada uno de los algoritmos.

Algoritmo	KLocation	Fuzzy Global Matching
D8	91.90%	51.39%
BURN IN	96.60%	76.81%
AGREE	96.44%	59.81%

La Figura 6 muestra el grado de concordancia espacial, por cada algoritmo. Los tonos verdes muestran aquellas cuencas delimitadas que presentan mayor similaridad con respecto a las cuencas proporcionadas por CORPOCESAR. En general, la mayor consistencia se presenta hacia la zona alta del Río Cesar y las zonas que tienen un relieve pronunciado. Los tonos rojos, identifican aquellas cuencas que tienen menor grado de similaridad. En este sentido la zona alrededor de la ciénaga de Zapatosa, presenta las mayores diferencias. Los tonos amarillos discriminan aquellas cuencas que tienen un grado de similaridad medio.

De acuerdo a lo anterior, el algoritmo D8 tiene un resultado muy bajo, donde la parte sur del departamento es la zona crítica en cuanto a concordancia. El método AGREE y Burn In tienen resultados espaciales similares, donde los mayores errores se presentan hacia las zonas de frontera.

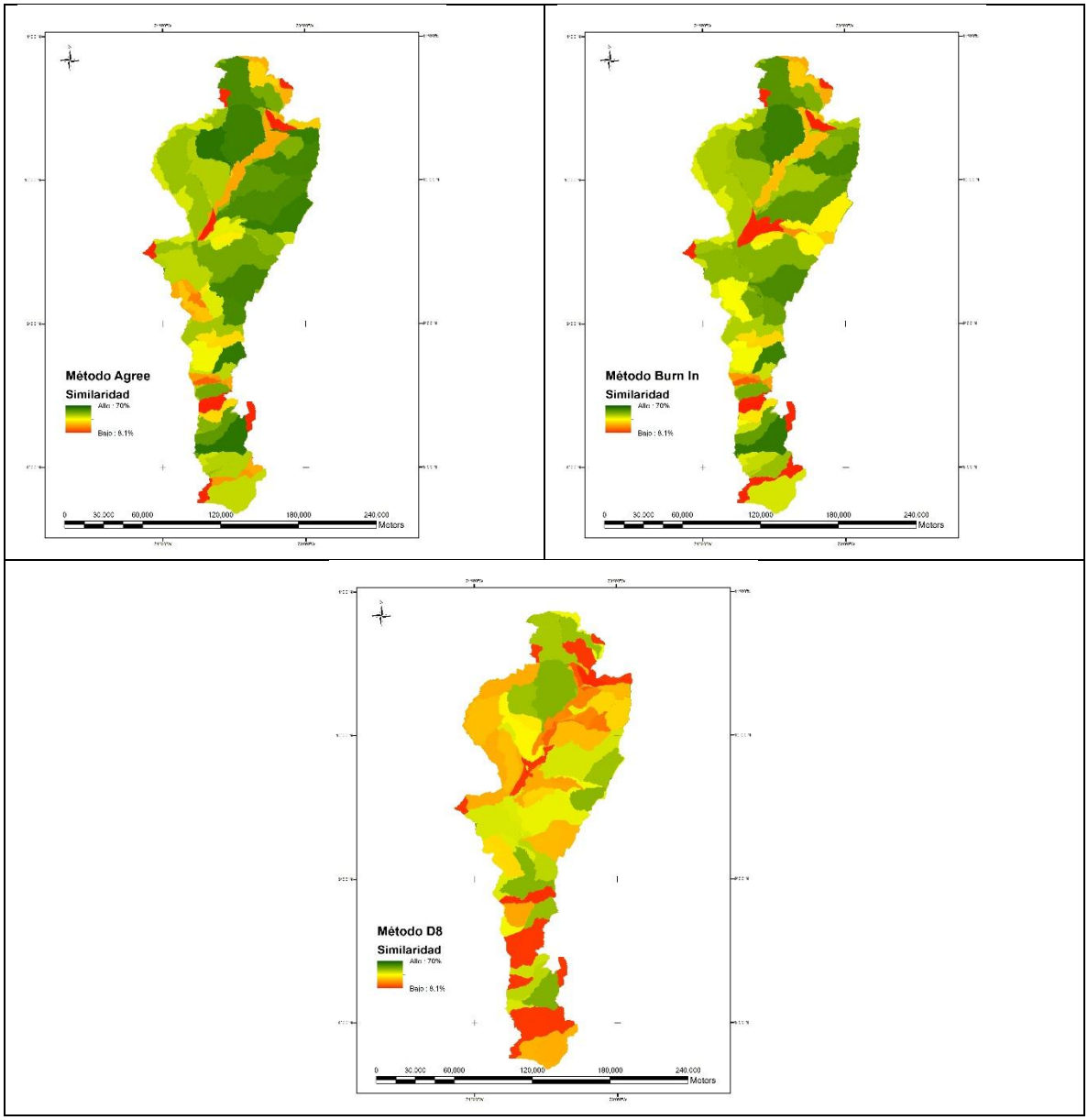


Figura 6. Similaridad espacial para las cuencas delimitadas por cada algoritmo.

La Tabla 3 describe las ventajas y desventajas de cada uno de los algoritmos de acuerdo a cuatro (4) tópicos; Con respecto a los drenajes, no se evidenció un patrón en la no coincidencia que se debiera a la topografía. En este sentido se presentaron diferencias dispersas espacialmente entre el parámetro de evaluación y las corrientes generadas. De igual manera la similaridad mayor es apenas de un 30% para el algoritmo Burn In, siendo evidencia de que los modelos presentan deficiencias a la hora de replicar los segmentos de ríos.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de cada uno de los algoritmos

Características	D8	Burn In	AGREE
Delimitación de Drenajes	Mala	Aceptable	Regular
Delimitación de cuencas en zonas altas	Mala	Buena	Buena
Delimitación de cuencas en zonas bajas	Mala	Regular	Regular
Tiempo de procesamiento	Bajo	Alto	Medio

En cuanto a la delimitación de cuencas se tiene que los modelos se comportan bien hacia las zonas altas, pero en las zonas bajas y de ciénaga presentan inconsistencias. El único aspecto positivo del algoritmo D8 es la rapidez de procesamiento, en comparación a los otros métodos.

CONCLUSIONES

A través de este ejercicio, se implementaron tres (3) algoritmos para la delimitación automática de cuencas hidrográficas. En este sentido, dadas las condiciones físicas del departamento del Cesar, el algoritmo con mayor ajuste con respecto a la delimitación oficial de cuencas de CORPOCESAR, es el algoritmo Burn In. De igual manera, el algoritmo AGREE presenta resultados significativamente menores, teniendo un ajuste aceptable. Por el contrario, el algoritmo D8 presenta los menores valores de concordancia.

No obstante, los errores producidos en las zonas de ciénagas, es una debilidad en los tres algoritmos, donde la delimitación de algunas subcuencas fueron omitidas. En este sentido, la delimitación debe pasar por un proceso de edición manual con el fin de subsanar este tipo de faltas. Adicional a ello, en este estudio no se tuvo en cuenta el grado de confiabilidad de los parámetros de evaluación, dada la imposibilidad de establecer la consistencia espacial y temática de cada una de las capas, ya que no fue posible acceder a los metadatos.

De igual manera, las corrientes fueron evaluadas teniendo como parámetro la red oficial de drenajes del IGAC a escala 1:100000, encontrando mayor similaridad con las corrientes calculadas por el método Burn In. Sin embargo la similaridad es baja (<31%) demostrando las dificultades de cada algoritmo en esta temática.

Dentro de la evaluación, la similaridad difusa, brinda un estadístico que tiene en cuenta los patrones y tendencias espaciales; en especial, en la comparación de drenajes permite obtener un valor más representativo y no estricto cómo la comparación píxel a píxel. En el caso de las cuencas, la comparación píxel a píxel permite obtener un estadístico de similaridad para cada una de las unidades, permitiendo identificar aquellas que presentan menor ajuste. Esta evaluación es reforzada por medio de lógica difusa para establecer un valor general de toda la capa y visualizar en un rango continuo, entre cero (0) y uno (1) aquellas zonas con mayor o menor concordancia espacial.

REFERENCIAS CITADAS

CORPOCESAR. (2009). *PLAN DE ACCION 2007 – 2011.* Valledupar: Corporación Aútonoma Regional del Cesar.

Davies, J., Lagueux, K., Sanderson, B., & Beechie, T. (2007). Modeling stream channel characteristics from Drainage-Enforced DEMs in Puget Sound, Washington USA. *Journal of the American Water Resources Association*.

ESRI. (2014). *Ayuda ArcGIS 10.2*. Retrieved from http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z0000004w000000

FAO. (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas.* ROMA: FAO.

GRAVELIUS, H. (1914). Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde. *Compendium of Hydrology, 1*.

Hagen, A. (2002). Multi method assessment of map similarity. *5th AGILE conference on Geographic Information Science.* Mallorca, Spain.

Hellweger, F., & Maidment, D. (1997). *AGREE-DEM Surface Reconditioning System*. Retrieved from http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html

HORTON, R. (1932). Dreinage-basin characteristics. *Trans Am. Geophys Union*, 350-361.

IDEAM. (2003). *Resolución 104 de junio de 2003.* Bogotá.

IDEAM. (2010). *Zonificacion Hidrografica y codificacion de cuencas Hidrológicas en Colombia.* Bogotá.

Jones, R. (2002). Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences* , 1051-1060.

Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (2005). *Geographical Information Systems and Science.* John Wiley & Sons.

Luo, X., Su, B., Yuan, J., Li, H., & Zhan, Q. (2011). GIS Techniques for Watershed Delineation of SWAT Model in Plain Polders. *Procedia Environmental Sciences*, 2050-2057.

Luo, Y., Su, B., Yuan, J., Li, H., & Zhang, Q. (2011). GIS Techniques for Watershed Delineation of SWAT Model in Plain Polders. *Procedia Environmental Sciences*, 2050-2057.

Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2009). *Soil and Water Assessment tool. Theoretical Documentation.* Texas A&M University. Texas Water Resources Institute.

Power, C., Simms, A., & White, R. (2001). Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of land use maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 77-100.

Pusineri, G., Pedraza, R., & Lozeco, C. (2011). Usos de Modelos Digitales de Elevación y de Sistemas de Información Geográfica en la modelación Hidrológica. *Geográfica Digital. Instituto de Geografía. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Nordeste*. Retrieved from http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/pusineri.pdf

Ramírez, J. (2002). Extracción Automática de Redes de Drenaje a partir de Modelos Digitales de Terreno. *Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellin*.

Research Institute for Knowledge Systems. (2013). *Map Comparison Kit. User Manual.* Retrieved from http://www.risk.nl/mck

Saunders, W. (1999). Preparation od DEMs for use in Enviromental Modeling Analysis. *Esri user Conference.* San Diego : ESRI.

Turcotte, R., Fortin, J., Rousseau, A., Massicotte, S., & Villeneuve, J. (2001). Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 225-242.

Wing, M., & Bettinger, P. (2008). *Geographic Information Systems. Application in Natural Resource Management.* Oxford University Press.

Yang, W., Yan, H., & Li, J. (2015). Formula for calculating spatial similarity degrees between point clouds on multi-scale maps taking map scale change as the only independent variable. *Geodesy and Geodynamics*, 113-125.

Zhang, H., & Huang, G. (2009). Building channel networks for flat regions in digital elevation models. *Hydrological Processes*, 2879-2887.

Zhao, G.-J., Gao, J.-F., Tian, P., & Tian, K. (2009). Comparison of two different methods for determining flow direction in catchment hydrological modeling. *Water Science and Engineering*, 1-15.

ANEXO

Estadísticas de similaridad por cada una de las cuencas

Los valores -9999 representan aquellas unidades que el algoritmo no delimitó.

	Método D8			Método Burn IN			Método AGREE		
Nombre de la Cuenca	Kappa	KLoc	KHisto	Kappa	KLoc	KHisto	Kappa	KLoc	KHisto
Rio Guatapuri	0.82	0.95	0.87	0.96	0.98	0.98	0.96	0.97	0.98
Rio Chiriaimo	0.58	0.97	0.60	0.94	0.96	0.97	0.97	0.98	0.99
Rio Mocho	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Rio Seco	0.00	-9999.00	0.00	0.93	0.98	0.95	0.93	0.98	0.95
Rio Magiriaimo	0.65	1.00	0.65	0.96	0.99	0.98	0.96	0.97	0.99
Rio Tocaimo	0.70	0.82	0.86	0.89	0.99	0.90	0.89	0.99	0.90
Rio Fernambuco	0.66	0.80	0.83	0.92	0.93	0.98	0.95	0.96	0.98
Rio Casacara	0.85	0.87	0.98	0.95	0.98	0.97	0.96	0.96	1.00
Rio Cesarito	0.92	0.97	0.95	0.97	0.98	0.99	0.96	0.97	0.99
Río Cesar Directos	0.42	0.49	0.86	0.72	0.89	0.81	0.67	0.85	0.79
Rio Guarupal	0.74	0.85	0.87	0.91	0.95	0.96	0.89	0.93	0.96
Rio Tucuy-Sororia	0.84	0.99	0.84	0.76	1.00	0.76	0.85	0.99	0.86
Quebrada Anime Grande	0.68	0.85	0.80	0.96	0.97	0.99	0.96	0.98	0.98
Quebrada San Antonio	0.75	0.76	0.98	0.93	0.93	1.00	0.93	0.93	1.00
Quebrada Quiebradientes	0.86	0.98	0.88	0.94	0.97	0.97	0.78	0.98	0.79
Quebrada San Pedro	0.86	0.91	0.94	0.95	0.97	0.98	0.96	0.97	0.99
Quebrada Honda	0.85	0.99	0.86	0.86	0.95	0.90	0.86	0.95	0.90
Quebrada Cnga sahaya	0.61	0.69	0.88	0.78	0.83	0.94	0.78	0.83	0.94
Quebrada La Floresta	0.00	-9999.00	0.00	0.68	0.73	0.94	0.69	0.73	0.94
Quebrada Dorada	0.00	-9999.00	0.00	0.94	0.97	0.96	0.94	0.99	0.95
Quebrada Caiman	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Quebrada Norean	0.87	0.88	0.99	0.75	0.97	0.77	0.73	0.94	0.78
Quebrada Guaduas	0.88	0.98	0.89	0.98	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99
Quebrada Tisquirama	0.00	-9999.00	0.00	0.82	0.94	0.88	0.83	0.94	0.88
Quebrada Cerro largo	0.00	-9999.00	0.00	0.92	0.96	0.96	0.90	0.91	1.00
Quebrada Torcoroma	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.58	0.98	0.59
Quebrada Perete	0.80	0.80	0.99	0.87	0.99	0.88	0.90	0.91	0.99
Rio Ariguani	0.62	0.93	0.66	0.82	0.97	0.84	0.82	0.99	0.83
Rio Maracas	0.81	0.99	0.82	0.75	0.96	0.79	0.97	0.98	0.99
Rio Calenturitas	0.58	0.77	0.75	0.00	-9999.00	0.00	0.81	0.84	0.97

	Método D8			Método Burn IN			Método AGREE		
Nombre de la Cuenca	Kappa	KLoc	KHisto	Kappa	KLoc	KHisto	Kappa	KLoc	KHisto
Río Cesar Directos	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Río Cesar Directos	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Arroyo Paraluz	0.72	0.85	0.84	0.75	0.87	0.86	0.75	0.87	0.86
Quebrada Sima±a	0.00	-9999.00	0.00	0.51	0.54	0.94	0.51	0.54	0.94
Quebrada Cristo	0.00	-9999.00	0.00	0.79	0.98	0.81	0.92	0.98	0.94
Quebrada Singarare	0.82	0.98	0.84	0.97	0.98	0.99	0.97	0.98	0.99
Rio Limón	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Rio Cachira del Espiritu Santo	0.62	0.75	0.82	0.83	0.91	0.91	0.84	0.92	0.91
Arroyo Las Palomas	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Rio Diluvio	0.82	0.97	0.85	0.95	0.97	0.99	0.98	0.99	0.99
Río Lebrija Directos	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Rio Lebrija	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Arroyo Los Guamales	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Quebrada El CarmÚn	0.00	-9999.00	0.00	0.82	0.93	0.89	0.83	0.94	0.89
Quebrada Buturana	0.89	0.90	0.99	0.95	0.96	0.98	0.95	0.95	0.99
Quebrada Zapatosa	0.69	0.78	0.89	0.77	0.79	0.98	0.65	0.99	0.65
Quebrada Besotes	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Rio de Oro	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Rio de Oro	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Quebrada Burbuja	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Quebrada Guamal	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00
Rio Badillo	0.81	0.99	0.82	0.72	0.99	0.72	0.72	0.99	0.72
Rio Pereira	0.00	-9999.00	0.00	0.82	0.99	0.83	0.68	0.73	0.93
Rio Fundación	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00	0.00	-9999.00	0.00