

# PRIORIZACIÓN RÁPIDA DE CUENCAS ANDINAS CON FINES DE PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

USANDO SIG Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN  
MULTICRITERIO, ESTADO MÉRIDA, VENEZUELA

*Fast Prioritisation of Andean basins in order  
to protect water resources using  
a Geographic Information System (GIS)  
and a Multi-criteria Evaluation technique (ME),  
State of Mérida, Venezuela*

POR

Julián **GUTIÉRREZ**

Universidad de Los Andes.

Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales.

Mérida, Venezuela.

[jgutie@ula.ve](mailto:jgutie@ula.ve)

pp. 64–79

RECIBIDO 07/06/2016

ACEPTADO 04/02/2017

ISSN 1856-9552

La problemática del agua es un asunto que toma cada vez más importancia, debido a que el recurso hídrico viéndose sometido a intensos usos en el transcurso del tiempo, se hace cada vez más escaso y apreciado, por lo que dicha problemática, a la par del crecimiento poblacional, genera una demanda mayor del mismo. Esto hace prioritario la necesidad de desarrollar y aplicar técnicas y métodos que garanticen de alguna forma su protección y fomento. Este trabajo propone un método de priorización rápida de cuencas andinas, específicamente en el estado Mérida, Venezuela, utilizando una Evaluación Multicriterio (EMC) y la generación de pesos para los factores, mediante encuestas a expertos, que influyen en la priorización. Los factores seleccionados fueron: Porcentaje de Cobertura Densa, con un peso de 0,3089; Caudales, peso 0,1416; Población servida, peso 0,2407; y, Pertenencia a Área Protegida, peso 0,3089. La metodología aplicada permitió conocer de forma rápida cuales cuencas requieren de atención prioritaria. Los resultados fueron los siguientes: *Prioridad muy baja* (0.2407) las cuencas de los Ríos Mucujún, Albarregas, La Pedregosa, Tucaní, Limones, La Fría; *Prioridad baja* (0.3823), la Quebrada Mucumbás; *Prioridad media* (0.4505), las quebradas del Pueblo y Capellanía; *Prioridad alta* (0.5496), las cuencas de los ríos Las González, Nuestra Señora, y Cacique; *Prioridad muy alta* (0.6912), las quebradas Mucunantú, Carvajal, Quebrada El Quebradón, La Sucia, y La Blanca; *Prioridad extremadamente alta* (1.0), las cuencas de los ríos el Molino y Caña Brava. El método propuesto aporta una ayuda a los gestores de cuencas productoras de agua para priorizarlas de forma rápida, con información que generalmente es escasa, igualmente, la flexibilidad del método permite mejorar el modelo una vez que el problema de la falta de información sea solventado.

## PALABRAS CLAVE

Priorización rápida, cuencas andinas, protección recurso hídrico, SIG, técnicas de evaluación multicriterio.

## KEY WORDS

Fast prioritisation, andean basins, hydric resource preservation, GIS, multicriteria evaluation.

## SUMMARY

Currently, water issues around the world are more prominent than ever. Over time, water has become a scarcer and more precious resource, while population growth demands more availability of water. We must then urgently develop and implement techniques and methods that guarantee water's protection and promotion. We propose a method of fast prioritisation of Andean watersheds, specifically in the Mérida State, Venezuelan Andes. Four factors allowed the prioritisation of the analysed basins. They are: percentage of forest or dense vegetation cover, water flow rates, population served and protected natural area status. The Normalized Difference Vegetation Index was used to know the percentage of dense forest cover. We used the multicriteria evaluation (ME) to generate the weights of the factors, through surveys with experts and for the GIS modelling. The weights obtained were: percentage of dense coverage 0.3089, water flow rates 0.1416, population served 0.2407, and protected natural area status 0.3089. The results were as follows: very low priority (0.2407): basins of the Mucujún, Albarregas, La Pedregosa, Tucaní, Limones, La Fría. Low priority (0.3823): basin of Mucumbás. Medium priority (0.4505): basins of Del Pueblo and Capellania. High priority (0.5496): basins of Las González, Nuestra Señora and Cacique. Very high priority (0.6912): basins of Mucunantu, Carvajal, Quebradón, La Sucia and La Blanca. Extremely high priority (1.0): basins of El Molino and Caña Brava. The methodology applied allowed the quick identification of basins that require urgent attention. At the same time, this model allows the further inclusion of other variables given the more detailed information about the basins studied.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen muchas acepciones sobre el concepto de manejo de cuencas, para ser breves, incluimos la que se definió en el II Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas, realizado en Mérida, Venezuela en 1994, el concepto se definió como “*el proceso participativo de la población y los usuarios de una cuenca que formulan, gestionan y ejecutan un conjunto integrado de acciones sobre el medio natural y la estructura social, económica, institucional y legal de la cuenca, para alcanzar los objetivos específicos requeridos por la sociedad*” (Fallas y Valverde, 2008). Es evidente entonces la necesidad de la integración de acciones tanto de la población, como de las instituciones encargadas de su manejo, para una exitosa gestión de las cuencas.

El estado Mérida, en Venezuela, además de tierras llanas, está integrado en buena parte por montañas con un sistema de cuencas grandes y pequeñas, las cuales se puede caracterizar como un territorio “*productor de agua*” debido a que en sus tierras altas tienen en su génesis gran cantidad de ríos y quebradas, cuyas nacientes y buena parte de sus trayectos están protegidos bajo la figura denominada Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE), entre las que destacan dos grandes parques nacionales: Parque Nacional Sierra de la Culata y Parque Nacional Sierra Nevada. Estas figuras de protección garantizan, en alguna proporción, agua en cantidad y calidad tanto para las poblaciones de montaña como para las ubicadas aguas abajo, e igualmente para otras dependencias adyacentes.

Las instituciones que gestionan el recurso hídrico deben implementar métodos, técnicas y acciones que garanticen el uso sostenible del recurso, y no se busca solamente gestionar eficientemente la distribución del preciado líquido, sino también generar actividades que conlleven a su protección, por supuesto que en coordinación con los organismos encargados de manejo de las áreas protegidas, así como otros que estén bajo administración de entes públicos y privados, y por supuesto, las comunidades.

Para lograr una gestión integral, que incluya las instituciones y la comunidad, se deben incluir programas y actividades de divulgación sobre estudios que desarrollen los técnicos, igualmente, es importante implementar talleres de intercambio de conocimientos, necesidades y propuestas de la población, así como programas de concientización en cuanto a la protección del valioso recurso.

Debido a que generalmente los recursos financieros destinados a la gestión y conservación del recurso agua son escasos, se debe determinar entonces cuales cuencas requieren atención prioritaria. Tomando en cuenta las afirmaciones de Fallas y Valverde (2008) y FAO (1996), en el sentido de que al momento de decidir cuales grandes factores se usaran en un sistema de priorización en el manejo de cuencas, se debe tener en cuenta que “*la priorización debe realizarse utilizando el menor número posible de variables*” ya que “*incluir demasiados factores y mucho detalle puede implicar la construcción de un sistema muy complicado que sería difícil de interpretar e implementar*”.

De ahí, que en este estudio se propone un método sencillo y de rápida implementación para identificar y priorizar las cuencas que son utilizadas por la empresa estatal para gestión y distribución de agua de consumo humano (los acueductos principales del estado). Lo anterior no impide que cada investigador decida la cantidad y las variables a

utilizar en un método de priorización, al contrario, es recomendable en función de los objetivos y la disponibilidad de información, que a partir de una primera aproximación, se pueden ir añadiendo variables para complementar y mejorar el modelo, pero teniendo en cuenta que a medida que aumentamos la cantidad de elementos del mismo, se irá complicando su interpretación.

Se debe reconocer que existen diferentes metodologías más complejas, algunos autores exponen diferentes experiencias, otros exponen casos de estudio específicos, entre los que están: OEA (1992), Ormsbee y Colten (1997), Martínez y Reyes (2007), Fallas y Valverde (2008), los cuales describen varias experiencias realizadas en Centroamérica entre 1987 y 2007; Benegas y León (2009), Álvarez y Cardona 2011, Ajoy *et al.* (2012), Aher *et al.* (2013), García *et al.* (2014), quienes permiten priorizar las acciones a desarrollar con el fin de hacer un uso sostenible de las cuencas. Aunque también es conocido que en muchas ocasiones, sobre todo en países en desarrollo, no se dispone del tiempo ni de la información detallada que requiere hacer una priorización muy elaborada, de allí la necesidad de un método rápido y efectivo para iniciar acciones.

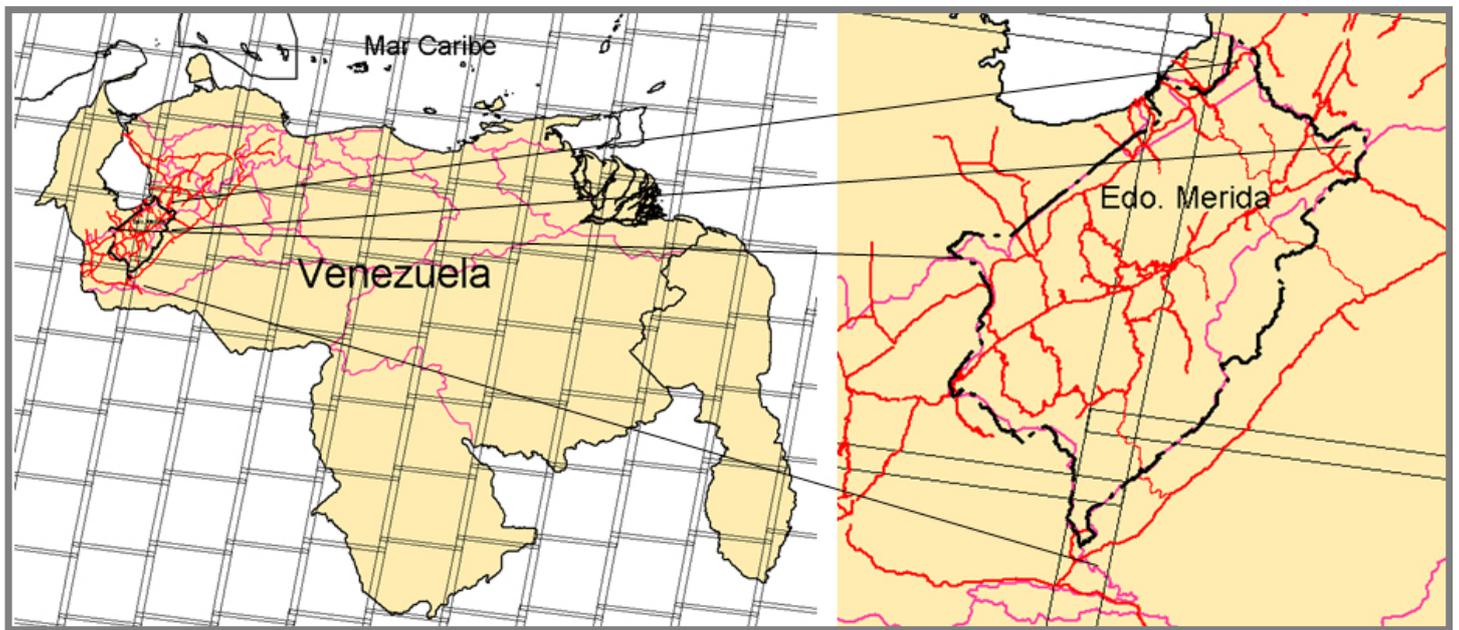
A partir del contexto antes dicho, el objetivo general de este estudio, fue diseñar un modelo de priorización rápida de cuencas andinas, específicamente en el estado Mérida, Venezuela, aprovechando el uso de herramientas geomáticas (SIG, Teledetección) junto a Técnicas de Evaluación Multicriterio, como un aporte de la academia a las instituciones gestoras del recurso hídrico, el cual está dirigido a orientar y garantizar las acciones de su protección y preservación, permitiendo a su vez, un uso y aprovechamiento sostenible en el tiempo del recurso hídrico. Entre las acciones a desarrollar en las cuencas, una vez que se determine su priorización, están la implementación de programas de educación ambiental, reforestación, control de uso de agroquímicos, planificación del uso de la tierra, prácticas de control de la erosión y saneamiento ambiental.

## **2.** **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para alcanzar el objetivo general, se desarrollaron estrategias de acción técnica, expuestas a mayor detalle en puntos sub siguientes, como la definición del área de estudio; selección de los factores a utilizar para la priorización, automatización de las coberturas que representan los factores, diseño y distribución de encuestas a los expertos con el fin de ponderar los factores, y modelaje mediante SIG.

### **2.1.** **ÁREA DE ESTUDIO**

La descripción del territorio del estado Mérida, está basada en Méndez *et al.* (2011): “*El estado Mérida se encuentra situado en la latitud norte, entre los 9° 20' 20", en un punto del Río Pocó como extremo septentrional y los 7° 39' 59", en la unión de los Ríos Caparo y Guaimaral en el sitio más meridional. Su longitud Oeste la enmarca los meridianos 71° 55' 45", en la confluencia del río Escalante y el Caño Amarillo hacia el occidente y los 70° 32' 30", en la cumbre del Páramo El Volcán, al este aguas abajo del pueblo de las Piedras (FIG. 1). Se ubica en las zonas de latitudes bajas, en un medio intertropical de la montaña andina, bajo la influencia de los vientos alisios del noroeste y los vientos ecuatoriales del sur, factores que intervienen en las*



**FIG. 1**

Ubicación relativa nacional del estado Mérida.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

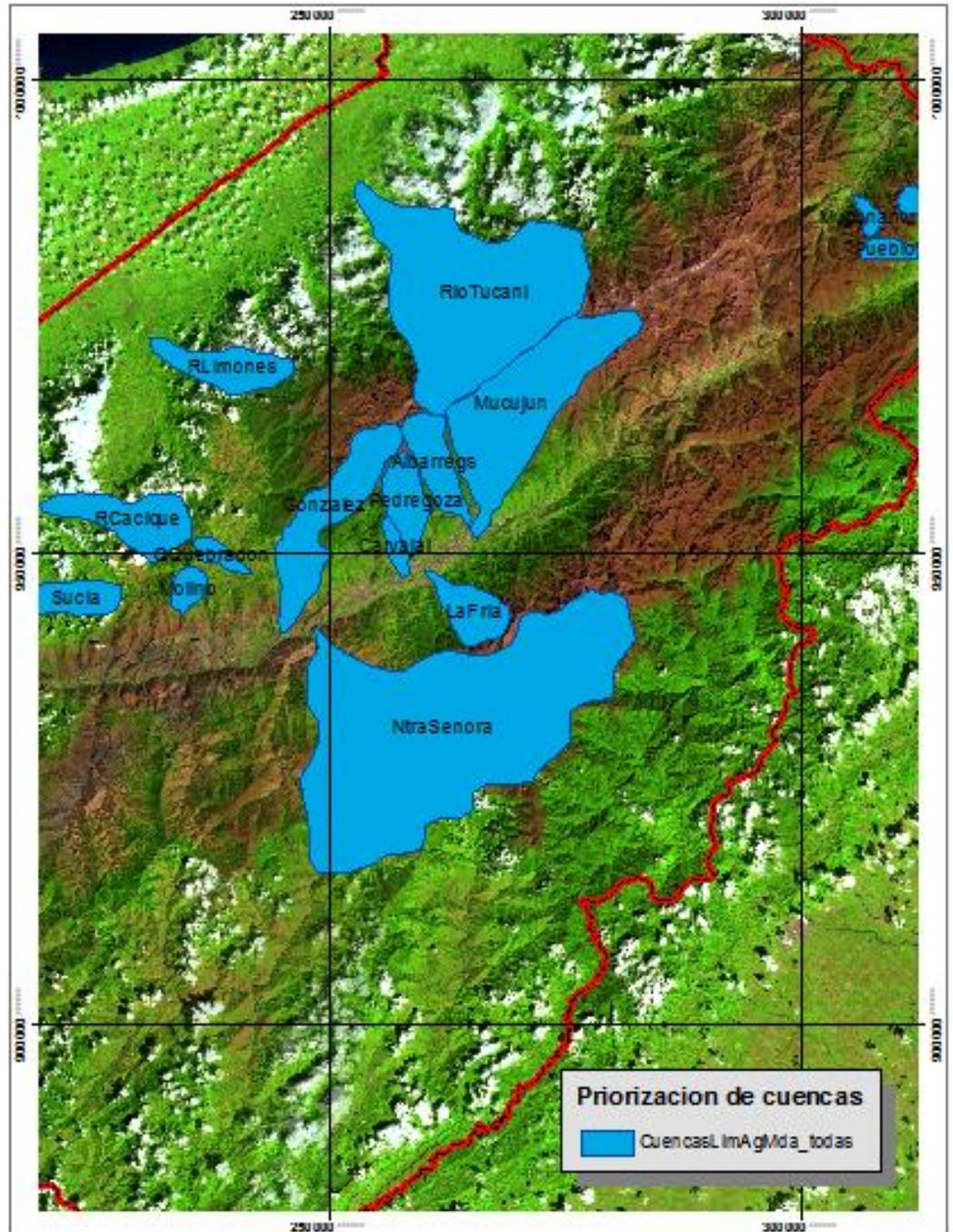
*condiciones bioclimáticas, que al combinarse con sus elevados desniveles orográficos, conforman la mayor variedad de pisos altitudinales, de habitats, de alturas superiores, de puntos más bajos y de máxima amplitud térmica del territorio venezolano”.*

En cuanto a su condición de estado productor de agua, Méndez *et al.* (2011), expone que el estado Mérida tiene “ríos y quebradas, lagunas y caídas de agua, fuentes subterráneas y las aguas del lago de Maracaibo que son abundantes en términos globales en el territorio. El balance hidrológico es muestra de una condición natural positiva hecho que la coloca como entidad productora de agua al norte del río Orinoco y al sur del Lago de Maracaibo, con un volumen de escurrimiento estimado en 790 millones de metros cúbicos. Es un recurso que amplía la potencialidad del desarrollo económico, social y humanístico, así como las reservas ecológicas. El ordenamiento de las cuencas hidrográficas sería una respuesta adecuada de protección y de eficiencia en los volúmenes de suministro de agua, con las ventajas adicionales en cuanto a la diversificación de oportunidades de desarrollo adecuadamente localizadas”.

De la anterior descripción se confirma el carácter montañoso en buena proporción del estado, y por lo tanto territorio de nacientes de agua que se convierten en ríos importantes, como el Río Chama, el Río Motatán, el Río Mocotíes, el Río Nuestra Señora y el Río Santo Domingo, entre otros. Es entonces de interés general ordenar y proteger las cuencas que generan tan valioso recurso. Las cuencas analizadas en este estudio fueron: las cuencas de los ríos Mucujún, Albarregas, La Pedregosa, Tucaní, Limones, Las González, Nuestra Señora, Cacique, El Molino, Quebradón (R. Caña Brava); y las quebradas La Fría, Mucumbás, Capellanía, del Pueblo, Mucunantú, Carvajal, El Quebradón, La Sucia y La Blanca.

## 2.2. HERRAMIENTAS IMPLEMENTADAS

Para la creación de las bases de datos cartográficas se decidió usar dos escalas, una escala menor, 1:250.000, para conocer la topografía y la hidrografía del área a nivel del estado Mérida, se usaron las Hojas de Cartografía Nacional NC-19-13 y NC-19-9; y una escala con mayor detalle, 1:100.000, para digitalizar el perímetro de las cuencas. Igualmente se utilizaron las imágenes satelitales del sensor Landsat ®L8-OLIPaso/Fila 006054 del 06 de Enero del 2015, yL8 Paso/Fila 007054 del 29 Enero 2015 (FIG. 2). Se utilizó el programa IDRISI Kilimanjaro®.



**FIG. 2**  
Mosaico de imágenes satelitales Landsat-8 (006-054 y 007-054) en Falso color 654, con límite del Estado Mérida y las cuencas analizadas.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

### 2.3. MÉTODOS

Antes de pasar a describir las actividades desarrolladas, es oportuno exponer algunos conceptos y métodos que permitieron alcanzar el resultado deseado. En relación a la priorización de cuencas Fallas y Valverde (2008) afirman que *“la priorización de cuencas es una herramienta que orienta las intervenciones; sin embargo la decisión final corresponde al equipo que gestiona la cuenca. No siempre lo prioritario o deseable es compatible con las condiciones existentes en la cuenca. Por esta razón para modelar mejor la realidad de la cuenca el proceso de priorización debe considerar las interacciones y sinergias existentes entre los subsistemas económico, social, político, legal, institucional y ambiental”*. Los anteriores autores exponen, además, que *“la priorización de acciones en la cuenca hidrográfica tiene como objetivo comparar diferentes acciones o escenarios de manejo, con el fin de elegir aquel o aquellas que optimicen el logro de los objetivos hidrológicos, económicos, sociales e institucionales. Dada la complejidad del manejo de cuencas no es posible intervenir simultáneamente todas las cuencas de un territorio, y por lo tanto deben priorizarse las intervenciones en el tiempo y espacio”*.

Existen diversas técnicas y métodos de priorización, por ejemplo: la Programación Lineal y el Análisis de Criterios Múltiples, los cuales en las últimas dos décadas se han combinado con los Sistemas de Información Geográfica, no solamente para saber qué hacer, sino también donde hacerlo.

Por ello, en el presente estudio se propone un procedimiento que aprovecha las Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), bajo Sistemas de Información Geográfica. Según Eastman *et al.* (1993), en Gutiérrez y Jegat (2011), *“la EMC y los Modelos de Decisión Multiobjetivo se fundamentan en la evaluación de un conjunto de alternativas basándose en una serie de criterios. Un método de EMC puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente una serie de alternativas a partir de criterios que hayamos considerado pertinentes en una evaluación, donde la EMC, se fundamenta en la evaluación de una serie de alternativas basándose en una serie de criterios”*.

De acuerdo a Gómez y Barredo (2005) y Barredo (1996) *“la mejor organización para representar la relación de criterios y alternativas que define la EMC es una matriz, en la cual los criterios (j) pueden ocupar la columna principal, y las alternativas (i) la fila principal. Una vez asignados los pesos a los criterios, éstos se pueden incluir en una nueva Matriz de Prioridades. Hechas las matrices de evaluación y prioridades, se puede acceder a alguno de los procedimientos de EMC. La Matriz de Prioridades está formada por la importancia relativa de cada criterio frente al tipo de evaluación que se pretende realizar, donde se requiere asignar un valor específico a cada criterio, esto se refiere al Peso o Ponderación ( $W_j$ ), donde logramos esto diseñando encuestas para conocer la opinión de expertos. Por último, la Matriz de Valoración es construida mediante cualquiera de los métodos de EMC, que nos permiten obtener los resultados finales de selección y priorización de las cuencas en función de los criterios y sus valores asignados”*. Puede revisarse una aplicación en el campo forestal en Gutiérrez (2001), Pozzobón y Gutiérrez (2003), donde los anteriores autores desarrollaron una aplicación de EMC utilizando SIG para hacer una selección y priorización de áreas a reforestar, en el estado Mérida, Venezuela.

A continuación se describen las actividades y técnicas desarrolladas para lograr el objetivo del estudio. La actividad inicial fue la búsqueda de información secundaria como: teoría, modelos y aplicaciones de priorización de cuencas, que permitiera identificar los

factores a ser utilizados en la metodología planteada. Para lo anterior se revisaron los siguientes trabajos: Álvarez y Cardona (2011) y García *et al.* (2014). En estos trabajos se pudieron identificar los enfoques para organizar los componentes que incluyen los factores y los criterios a utilizar en las priorizaciones de cuencas.

Entre los conceptos importantes que es apropiado tener claros en una metodología de priorización, están: Componentes, Factores, Criterios y Parámetros. De acuerdo a Álvarez y Cardona (2011), “*un Componente, se refiere a categoría general que agrupa las condiciones a evaluar para la priorización de cuencas; un Factor, es un elemento que compone una categoría de análisis; el Parámetro, es una medida que involucra una variable, su función y sus rangos de diferenciación; la Variable, es de naturaleza medible y permite configurar un criterio para priorizar la ordenación (indicadores); y el Criterio, es una norma, condición o juicio que orienta la toma de decisión*”. Veamos un par de ejemplos, de forma resumida e integrada, de la forma de organizar los componentes, factores y parámetros en un sistema de priorización según Álvarez y Cardona (2011) los organizan tal como se exponen en el **TABLA 1**; mientras que García *et al.* (2014), utilizan un esquema similar al anterior, identificándose algunas diferencias, por ejemplo, la deforestación la incluyen en el componente riesgo, y los componentes fortalecimiento institucional y gobernabilidad, lo fusionan en uno solo.

**TABLA 1**

Organización de Componentes Factores y parámetros en un sistema de priorización de cuencas.

Fuente: modificado de Álvarez y Cardona (2011).

COMPONENTES	FACTORES	PARÁMETRO
Oferta	Ecosistemas estratégicos Oferta hídrica	Cantidad de áreas protegidas. Índice de uso del agua
Demanda	Deforestación. Uso del recurso hídrico. Densidad poblacional	% de cambios en cobertura de bosques. Índice de aridez. Densidad poblacional
Calidad	Calidad del agua. Saneamiento básico	Índice de calidad del agua. % de cobertura alcantarillado
Riesgo	A fenómenos naturales. A degradación del suelo. Al cambio climático	Áreas susceptibles a inundación. Áreas susceptibles a desertificación. Áreas con aumento promedio de temperaturas
Fortalecimiento institucional	Existencia de planes de manejo de cuencas	% de avance de los planes de manejo
Gobernabilidad	Pobreza	Necesidades básicas insatisfechas

En cuanto a la selección de los criterios, parámetros e indicadores, Fallas y Valverde (2008), recomiendan lo siguiente: “*el producto de la priorización está fuertemente influenciada por los criterios, parámetros e indicadores seleccionados para el análisis; así como por la ponderación o valoración asignada a cada criterio y variable. Cuando se seleccionen variables deben considerarse los siguientes aspectos:*

- *Los parámetros y las variables deben ser independientes. Este principio evita repetir información y a la vez no sobrevalorar uno o más elementos de la cuenca.*

- *Los indicadores deben estar en estrecha relación con los objetivos de la priorización.*
- *La priorización debe realizarse utilizando el menor número posible de variables.*
- *Evitar criterios fuertemente relacionados con el grado de desarrollo general de la cuenca, ya que se favorecen las cuencas con una mayor infraestructura y servicios, esto no permite valorar y ponderar los recursos potenciales de la cuenca.*
- *Especial énfasis debe brindarse en la selección y ponderación de los parámetros y sus indicadores. La técnica de -opinión de experto- o de autoridades gubernamentales o locales, es un mecanismo válido para lograr una amplia participación en el proceso y una ponderación fidedigna de los criterios, parámetros e indicadores utilizados en la priorización”.*

En función del aporte que cada factor ofrece al momento de priorizar las cuencas, y de la facilidad de construcción de las bases de datos respectivas, y con el fin específico de generar una priorización rápida, se escogieron los siguientes factores: *Porcentaje de Cobertura de caudales y población servida*. Una vez definido lo anterior, se procedió a la búsqueda de la información sobre el área de estudio, descrita arriba, y a la creación de las bases de datos de los factores que permiten crear el modelo de priorización, digitalización del límite de las cuencas, áreas protegidas, así como el procesamiento de las imágenes satelitales correspondientes (Falsos colores, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Mosaico satelital, etcétera).

Para implementar el modelo de priorización de las cuencas se deben construir las coberturas SIG que permitirán generar el modelo. Se definió, entonces, como convertir los factores en coberturas SIG, comenzando con el factor *“Porcentaje de cobertura densa/forestal”* que poseen las cuencas en estudio, basado en el criterio de que a menor cobertura densa/forestal se debe proteger más la cuenca, es decir, tomar acciones para incrementar tal tipo de cobertura. Para generar la anterior cobertura SIG, se generó un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN).

De acuerdo a Chuvieco (2008), el IVDN consiste en un cociente o ratio que implica efectuar una división, píxel a píxel, entre los Niveles Digitales (ND) almacenados en dos o más bandas de la misma imagen satelital; su empleo se justifica en dos situaciones: para mejorar la discriminación entre suelos y vegetación, y para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas. Continúa el mismo autor afirmando que cuanto mayor sea el contraste entre los ND de las bandas infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada, bajos valores de contraste indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño.

También se calculó la *proporción de tierras forestales/vegetal densa*, para definir el umbral ND que identifique vegetación densa, la cual se despliega en la imagen en verdadero color y se contrasta el píxel del producto IVDN con la cobertura real, y si es bosque, se considera vegetación densa. Se estableció que si la cuenca está cubierta en menos de un 50 % de vegetación densa se consideraría como “No densa”.

Se creó, entonces, una capa denominada *“Cobertura”*, y se procedió a su reclasificación, en la que se asigna “1” a las cuencas con valores menores al 50 % de Cobertura Forestal/Vegetal densa, y “0” al resto de las cuencas (mayores al 50 %), es decir, se incluyeron en el modelo de priorizar las cuencas con valor “1”.

A continuación se procedió a crear la cobertura SIG “Caudales”. Con los datos de caudales promedios se determinó que el mayor promedio de caudal anual en el periodo 1995-2012 corresponde al Río Tucaní, con 3.102 l/s, y el menor corresponde a la Quebrada La Sucia con 7.55 l/s, con un promedio de 1.554,77 l/s.

Basados en el criterio de que las cuencas con caudales menores deben ser protegidas con acciones que fomenten el mantenimiento o incremento de sus caudales, se definió un umbral que permitió considerar cuencas con “caudales menores”, el cual fue establecido en 500 l/s. A los polígonos que representan esas cuencas se les asignó la categoría “Caudales menores”, y a los otros “Caudales mayores”. Entonces, se creó una cobertura denominada “Caudales” en la que se reclasifican “1” a las cuencas con valores menores a 500 l/s y “0” al resto de las cuencas (mayores a 500 l/s), es decir, se priorizaran las cuencas con valor “1”.

Seguidamente, con la información del Instituto Nacional de Estadística (INE), sobre las poblaciones servidas por los sistemas de acueductos alimentados por las cuencas en estudio, se creó la cobertura “Población”. Se debe aclarar que existen casos en que varios ríos y quebradas sirven a un centro poblado, como los son el Área Metropolitana de Mérida y de la ciudad de El El Vigía. El Área Metropolitana de Mérida resultó el centro poblado con mayor cantidad de habitantes (330.000 hab.), y la población del páramo merideño Santo Domingo (10.400 hab.), resultó con la menor cantidad de habitantes.

Basados en el criterio de que se deben proteger las cuencas que abastezcan centros poblados con mayor cantidad de habitantes, se decidió establecer el umbral en 20.000 habitantes (hab.), es decir, se creó una cobertura denominada “Población”, mediante reclasificación, en la que se asigna “1” a las cuencas con valores mayores a 20.000 habitantes servidos, y “0” al resto de las cuencas (menores a 20.000 habitantes servidos), entonces, se priorizaran las cuencas con valor “1”.

Por último, para crear la cobertura Pertenencia o no a área protegida (ABRAE), se digitalizaron los límites de los parques nacionales Sierra Nevada y Sierra de la Culata, contrastándolos con los límites de las cuencas en estudio, basados en el criterio de que si una cuenca no posee territorio en más de un 50 % dentro de área protegida se considera desprotegida. Se verificó si el polígono de los parques nacionales abarcaba en más del 50 % los territorios de las cuencas, y si la cuenca no está más del 50% dentro de los linderos de las áreas protegidas, se considera “no protegida”, las otras se consideran protegidas. Se creó, entonces, mediante reclasificación, una cobertura denominada “Pertenencia”, en la que se asigna “1” a las cuencas cuyo territorio no pertenece en más de un 50 % a una ABRAE, y “0” al resto de las cuencas, es decir, se priorizaran las cuencas con valor “1”.

Para conocer la opinión de expertos sobre qué grado de importancia tiene cada factor usado en el modelo de priorización jerárquica (Método de las Jerarquías Analíticas, utilizando comparación por pares de Saaty, 1980 y 2008), metodológicamente se diseñó una encuesta para tal fin, se seleccionó un grupo de expertos en la temática, seguidamente les fueron entregadas las encuestas para conocer su opinión.

Una vez recopiladas se procesaron estadísticamente, y con el programa SIG-IDRISI® (Modulo “Wheight”) se calcularon los pesos respectivos. El programa genera un Índice de Consistencia (Coeficiente de consistencia de la matriz), este valor indica la probabilidad de que los valores hayan sido asignados aleatoriamente. Valores inferiores a 0,10 indican buena consistencia, cuando los valores exceden de 0,10, la matriz de pesos es evaluada de nuevo y aparecerá una matriz de índices de consistencia. En caso de que el índice de

consistencia resulte mayor a 0.10, refleja que algunos valores extremos ofrecidos por los expertos en las encuestas, en este caso, y de acuerdo a Eastman (1997) citado por Gutiérrez (2007), se debe examinar la matriz elaborada para ver la comparación por pares con mayor desviación, este será el valor de relación menos consistente. Posterior a modificar la matriz, se debe obtener un índice de consistencia menor a 0.10. Al disponer de los pesos asignados a los factores, se aplicó la EMC mediante el Modulo EMC de Idrisi®.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los aspectos importantes al aplicar una metodología de priorización de cuencas o subcuencas es la forma de ponderar o asignar pesos a los factores utilizados en el sistema, ya que tales pesos inciden en el resultado final, de allí que sea clave exponer claramente cómo se asignaron tales pesos. Uno de los métodos de mayor aplicación y de comprobada eficiencia es el de la opinión de expertos, propuesto por Saaty (1980, 2008), ya que permite hacer una ponderación con el menor rango la subjetividad y parcialización hacia una determinada decisión. El método aplicado en este estudio, la Evaluación Multicriterio, permitió generar pesos que reflejan el conocimiento y la experiencia de los expertos en el área temática, y además se genera un Índice de Consistencia que garantiza que los mismos fueron generados aleatoriamente, como se afirma anteriormente.

De los autores revisados, solamente Aher *et al.* (2013) utilizaron la EMC en su estudio de priorización de subcuencas, incluso la combinaron con la lógica difusa en su modelo de decisión, entre sus resultados, encontraron que el 60,85% de las subcuencas (de 5 subcuencas) estaban en zonas susceptibles en un rango medio a alto (en nuestro caso 10 de 19 cuencas, el 52%, estaban entre media a muy alta prioridad), tales subcuencas abarcan potenciales áreas con necesidad del establecimiento intervenciones de conservación para la planificación y desarrollo de un manejo sustentable de la cuenca. Puede revisarse también una aplicación de modelo de decisión ambiental similar (Análisis de Sensibilidad Ambiental), en la que se combina SIG, EMC y números difusos en Gutiérrez (2007) y en Gutiérrez y Jegat (2011).

Otros autores, como la OEA (1992), en un estudio de factibilidad para el manejo de recursos naturales de la Cuenca El Cajón, Honduras, llevaron a cabo una división de la cuenca en 21 subcuencas, para las cuales desarrollaron una metodología cuantitativa (a través de la ponderación de distintos factores), que les permitió determinar las áreas prioritarias donde se deben iniciarse las acciones del Proyecto de Inversión de Manejo de los Recursos Naturales de la Cuenca de El Cajón. A diferencia de este trabajo, los autores no explican cómo ponderaron los factores.

Teniendo en cuenta que los pesos asignados por los expertos a los factores fueron los siguientes: Cobertura x 0,31 (0,3089); Caudales x 0,14 (0,1416); Población x 0,24 (0,2407); Pertenencia x 0,31 (0,3089). Entonces, se le asigna el mayor peso (0,3089) a la Cobertura (Densa o no), y si pertenece un 50% a ABRAE, seguidos de Población (0,2407), y por ultimo Caudales (0,1416). Resultando un Índice de Consistencia (Coeficiente de consistencia de la matriz) de 0,06, indicando la probabilidad de que los valores fueron asignados aleatoriamente. Una vez aplicada la EMC se obtuvieron los resultados expuestos en el **TABLA 2**. Igualmente pueden verse los resultados de la priorización en la **FIG. 3**.

**TABLA 2**

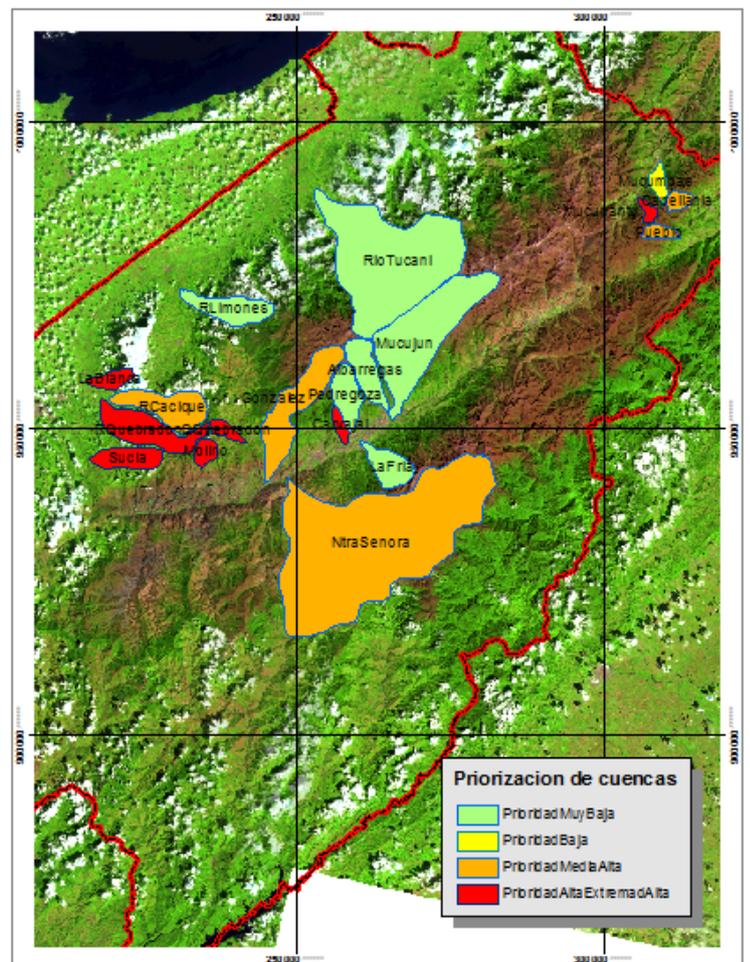
Resultados de la priorización de las cuencas en estudio. Fuente: Elaboración propia.

NIVELES DE PRIORIDAD	CUENCAS	PONDERACIÓN
Extremadamente alta	Rio El Molino.	1,00
	Rio El Quebradón	1,00
Muy alta	Quebrada Mucunantú.	0,6912
	Qda. Carvajal.	0,6912
	Qda. El Quebradón.	0,6912
	Qda. La Sucia.	0,6912
	Qda. La Blanca	0,6912
Alta	Rio Las González.	0,5496
	Rio Nuestra Señora.	0,5496
	Rio Cacique	0,5496
Media	Qda. Capellanía.	0,4505
	Qda. El Pueblo	0,4505
Baja	Qda. Mucumbás	0,3823
Muy baja	Rio Mucujún	0,2407
	Rio Albarregas	0,2407
	Rio La Pedregosa	0,2407
	Rio Tucaní	0,2407
	Rio Limones	0,2407
	Qda. La Fria	0,2407

**FIG. 3**

Resultados de la priorización (leyenda simplificada con reclasificación), en rojo, muy alta a extremadamente alta; anaranjado, media a alta; en amarillo, baja; verde, muy baja.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.



Una forma de validar el modelo es verificar las características de cada cuenca con la puntuación (rango) obtenida. De acuerdo a los anteriores resultados, expuestos gráficamente en la **FIG. 3**, podemos verificar que la *Prioridad extremadamente alta* corresponde a las cuencas del Río Molino (1,00), la cual se caracteriza por lo siguiente: está fuera de ABRAE, predomina la cobertura vegetal muy rala (No densa), sirve a poblados mayores a 20.000 habitantes, y tiene caudales promedios menores a 550Ltr/Sg; y a la cuenca del Río Quebradón (1,00) (R. Caña Brava), está fuera de ABRAE, con cobertura vegetal No Densa, sirviendo a poblados mayores a 20.000 habitantes, y tiene caudales promedios menores a 550 l/s.

Continuando, con *Prioridad muy alta* (0.6912): la Quebrada Mucunantú: No densa, menos de 500 l/s de caudal, sirve a más de 20.000 habitantes, pero está en más de un 50 % dentro de ABRAE. La Quebrada Carvajal: tiene más del 50% de cobertura Forestal/Vegetal densa, menos de 500 l/s, sirve a más de 20.000 habitantes, está fuera de ABRAE. La Quebrada El Quebradón: tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, menos de 500 l/s, sirve a más de 20.000 habitantes, y está fuera de ABRAE. La Quebrada La Sucia: tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, menos de 500 l/s, sirve a más de 20.000 habitantes, está fuera de ABRAE. Qda. La Blanca (Caño Blanco): tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, menos de 500 l/s, sirve a más de 20.000 habitantes, está fuera de ABRAE.

Seguidamente los de *Prioridad Alta* (0.5496): Río Las González: No densa, más de 500 l/s, abastece de agua a poblaciones de más de 20.000 habitantes, y está en más de un 50 % dentro de ABRAE. Río Nuestra Señora: No densa, más de 500 l/s, sirve a más de 20.000 hab., y está en más de un 50 % dentro de ABRAE. Río Cacique: No densa, más de 500 l/s, sirve a más de 20.000 habitantes, y si está en más de un 50 % dentro de ABRAE.

A continuación con *Prioridad media* (0.4505): Quebrada Capellanía: No densa, menos de 500 l/s, sirve a menos de 20.000 habitantes, y si está en más de un 50 % dentro de ABRAE. Quebrada El Pueblo: No densa, menos de 500 l/s, sirve a menos de 20.000 habitantes, y si está en más de un 50 % dentro de ABRAE.

Posteriormente con *Prioridad baja* (0.3823): Quebrada Mucumbás: tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, menos de 500 l/s de caudal, sirve a más de 20.000 habitantes, y si está en más de un 50 % dentro de ABRAE.

Y finalmente, en el otro extremo, *Prioridad muy baja* (0.2407), corresponde a las cuencas: Río Mucujún (0.2407), la cual se caracteriza por lo siguiente: tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, tiene caudales mayores a 500 l/s, aunque sirve a poblados mayores a 20.000 habitantes, y está dentro de ABRAE en un porcentaje mayor al 50 %; Río Albarregas (0.2407): tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, tiene caudales mayores a 500 l/s, aunque sirve a poblados mayores a 20.000 habitantes, y está dentro de ABRAE en un porcentaje mayor al 50 %. Quebrada La Pedregosa: tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, tiene caudales mayores a 500 l/s, aunque sirve a poblados mayores a 20.000 hab., y está dentro de ABRAE en un porcentaje mayor al 50 %; Río Tucaní: tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, tiene caudales mayores a 500 l/s, aunque sirve a poblados mayores a 20.000 habitantes, y está dentro de ABRAE en un porcentaje mayor al 50 %; Río Limones: tiene más del 50 % de cobertura Forestal/Vegetal densa, tiene caudales mayores a 500 l/s, aunque sirve a poblados mayores a 20.000 habitantes, y está dentro de ABRAE en un porcentaje mayor al 50 %; y, por último,

Quebrada La Fría: tiene más del 50% de cobertura Forestal/Vegetal densa, tiene caudales mayores a 500 l/s, aunque sirve a poblados mayores a 20.000 habitantes, y está dentro de ABRAE en un porcentaje mayor al 50%.

Es importante resaltar que las cuencas clasificadas con prioridad muy baja, a pesar de que sirven centro poblados mayores (más de 20.00 habitantes), se encuentran protegidas en importante porcentaje por figuras de protección oficiales, tienen una cobertura amplia de vegetación densa/forestal, y proveen de buenos caudales a tales centros poblados, lo anterior refleja que el método propuesto, a pesar de ser construido con pocos factores, genera resultados creíbles y aceptables. Por lo tanto, este método sería de mucha ayuda a los entes encargados de decidir a cuáles cuencas asignar los generalmente pocos recursos financieros destinados para desarrollar acciones de preservación, fomento y protección del recurso hídrico.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En esta investigación se alcanzó el objetivo general de priorizar las cuencas utilizando la EMC apoyados en la opinión de expertos en la temática. En cuanto al objetivo propuesto, es importante tener claro que los factores a seleccionar, para integrar este modelo de decisión de priorización rápida de las cuencas, deben tener la cualidad de facilidad en su conversión en coberturas SIG. Al momento de ponderar los factores utilizados, la utilización de encuestas permitió conocer la opinión de los expertos en el campo del manejo de cuencas y de la priorización, además de que la metodología permite conocer la consistencia de tales opiniones. La validación del modelo permitió conocer las características de las cuencas y su orden o jerarquización, con el fin de iniciar acciones que conlleven a la preservación y fomento del recurso hídrico.

Es importante reiterar que esta propuesta de priorización rápida tiene como fundamento principal su facilidad de implementación, por lo tanto, puede ser aplicada en situaciones de escasez de información y necesidades urgentes de conocer las cuencas que requieren atención inmediata. Una vez que se identifican las cuencas prioritarias, se recomienda pasar a una segunda fase que implicaría la implementación de medidas urgentes de recuperación/restauración/rehabilitación y protección de las mismas, y a la vez la generación de información más completa de las mismas para ir ajustando y complementando el modelo de decisión. De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se recomienda crear las bases de datos necesarias de otros factores que incidan en la decisión de priorizar las cuencas para complementar el modelo, de tal manera que el mismo sea más robusto y que a la vez no pierda su condición esencial de modelo de priorización rápida.

Como se afirma previamente, entre las acciones a desarrollar en las cuencas, una vez que se determine su priorización, están: programas de educación ambiental, de reforestación, de control de uso de agroquímicos, planificación del uso de la tierra, prácticas de control de la erosión, saneamiento ambiental, etcétera.

Lo anterior debe ser fundamentado en un diagnóstico preliminar de cada cuenca, por ejemplo, si una determinada cuenca está muy intervenida de manera que la cobertura forestal se haya visto disminuida, se implementarían reforestaciones, igualmente, si una cuenca presenta cultivos con excesivo uso de agroquímicos, se implementarían programas de control del uso de los elementos tóxicos, si se encuentran áreas degradadas, los

técnicos deberán implementar medidas de control de la erosión. Todo lo anterior debe ir acompañado de programas de educación ambiental de las poblaciones que ocupan las cuencas, de manera tal que sean ellos mismos los promotores de un uso sostenible de los recursos que la Tierra les provee. Por ejemplo, Sotelo *et al.* (2005), en un estudio de la cuenca Lerma-Chapala, en México, encontraron que fenómenos como la pérdida de cobertura vegetal, la reducción y contaminación de diversos cuerpos de agua, y la pérdida de suelos por distintos procesos de degradación, eran algunos de los principales problemas ocasionados por los patrones de desarrollo seguidos a lo largo de la historia, y dado que la complejidad que caracteriza a la cuenca Lerma-Chapala supera el alcance de cualquier acción aislada, e impide la generalización en el diseño de alternativas de solución; recomendaron que sólo pueden ser analizados desde una perspectiva sistémica; es decir analizaron cada subcuenca, y generaron estrategias y acciones para cada una de las mismas, en un todo de acuerdo con lo propuesto en este trabajo.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los funcionarios de Aguas de Mérida C.A., y a los profesores de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes por su colaboración en la ponderación de los factores utilizados en la priorización, mediante las encuestas facilitadas para tal fin.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHER, P. D., ADINARAYANA J. y S. D. GORANTIWAR. 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through fuzzy analytical hierarchy process. *Agric EngInt: CIGR Journal* 15 (1): 11-18.
- AJOY, D., M. MILAN, D. BHASKAR y R. ASIM. 2012. Analysis of drainage morphometry and watershed prioritization in Bandu Watershed, Purulia, West Bengal through Remote Sensing and GIS technology - A case study. *International Journal of Geomatics and Geosciences* 2 (4): 995-1013.
- ÁLVAREZ, C. y D. CARDONA. 2011. *Criterios de priorización de cuencas hidrográficas susceptibles de ordenación*. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, Colombia. 51 p.
- BARREDO, J. 1996. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. RA-MA. Madrid, España. 264 p.
- BENEGAS, L. y J. LEÓN. 2009. *Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas. La experiencia del programa FOCUENCAS II*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. San José de Costa Rica, Costa Rica. 60 p.
- CHUVIECO, E. 2008. *Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Ariel. Madrid, España. 594 p.
- EASTMAN, J. R., P. A. KYEM, J. TOLEDANO, J. y W. JIN. 1993. *GIS and Decision Making. Explorations in Geographic Information Systems Technology*. Vol. 4. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). Switzerland. 112 p.
- FALLAS, J. y C. VALVERDE, C. 2008. *Manejo y Priorización de cuencas hidrográficas, Principios criterios e indicadores*. Ingeniería en Ciencias Ambientales. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. San José de Costa Rica, Costa Rica. 52 p.

- FAO. 1996. *Computer assisted watershed planning and management. Technologies for national planning*. FAO Conservation Guide 28/1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy. 87 p.
- GARCÍA, M., O. VARGAS, D. CARDONA y C. ÁLVAREZ. 2014. *Criterios para la priorización de cuencas hidrográficas objeto de Ordenación y Manejo*. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia. 51 p.
- GÓMEZ, M. y J. BARREDO. 2005. *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. 2da edición. Alfaomega RA - MA. Caracas, Venezuela. 279 p.
- GUTIÉRREZ, J. 2001. *Modelo para la selección y priorización de áreas a reforestar en los alrededores de la ciudad de Mérida, Venezuela, utilizando Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de Evaluación Multicriterio*. Trabajo de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 79 p.
- GUTIERREZ, J. 2007. *Diseño de un modelo de análisis de sensibilidad ambiental bajo Sistemas de Información Geográfica*. Tesis Doctoral. Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 194 p.
- GUTIÉRREZ, J. y H. JEGAT. 2011. Índice de Sensibilidad Ambiental ante Derrame Petrolero aplicando Evaluación Multicriterio, Números Difusos y SIG, Lago de Maracaibo, Venezuela. *Revista Ecodiseño y Sostenibilidad 2(1): 129 - 145*.
- MARTÍNEZ, M. y V. REYES. 2007. *Criterios para la priorización y selección de cuencas*. Programa de Comunicaciones WWF Centroamérica. San José de Costa Rica, Costa Rica. 34 p.
- MÉNDEZ, E., W. CONTRERAS, M. CAMARGO, Y. OVALLES, R. CAMARGO, F. RIPANTI, J. LEÓN, G. RAMÍREZ, M. E. OWEN y A. SOTO. 2011. *El Estado Mérida y sus municipios en la construcción de futuro 2010-2020-20150*. Universidad de Los Andes. Talleres Gráficos universitarios. Mérida, Venezuela. 279 p.
- OEA. 1992. Honduras –*Proyecto de Manejo de los Recursos Naturales Renovables de la Cuenca del Embalse el Cajón– Estudio de Factibilidad*. Secretaria general de la Organización de los Estados Americanos. Secretaria ejecutiva para asuntos económicos y sociales. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Washington DC., USA. 195 p.
- ORMSBEE, L. y COLTEN, L. 1997. *Kentucky Watershed priority Formula: Application Guidelines and Data Requirements*. The Kentucky Division of Water Department for Environmental Protection Natural Resources and Environmental Protection Cabinet. Washington DC., USA. 48 p.
- POZZOBÓN, E. y J. GUTIÉRREZ, J. 2003. Utilización de SIG para la selección y priorización de áreas a reforestar en los alrededores de la Ciudad de Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana 47(2): 61-72*.
- SAATY, T. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences 1 (1): 83-98*.
- SAATY, T. 1980. *The analytical Hierarchy Process*. Mc Graw Hill. New York. Washington DC., USA. 136 p.
- SOTELO, E., N. CARDONA, A. FREGOSO, C. ENRIQUEZ, A. GARRIDO, G. CAIRE y H. COTLER. 2005. *Acciones estratégicas para la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala: Recomendaciones técnicas para las diecinueve Subcuencas*. Dirección de Manejo de Cuencas Hídricas. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología. México DF, México. 113 p.