

# *Priorización de puntos críticos y de microcuencas con análisis multiobjetivo en la red hídrica de la cuenca de la Quebrada Santa Elena*

*Recibido para evaluación: 15 de Septiembre de 2005  
Aceptación: 24 de Noviembre de 2005  
Recibido versión final: 06 de Diciembre de 2005*

Luis F. Carvajal <sup>1</sup>  
José F. Jiménez <sup>1</sup>  
María V. Vélez <sup>1</sup>  
Guillermo Rendón <sup>1</sup>  
Humberto Caballero <sup>1</sup>  
Julián Zuluaga <sup>2</sup>

## RESUMEN

Se emplea la metodología de Análisis Multiobjetivo (promedios ponderados) para la priorización de 49 puntos críticos y de microcuencas en la red hídrica de la cuenca de la quebrada Santa Elena en Medellín, con tres criterios para la priorización: hidráulico, geológico y antrópico. La metodología de priorización comprende una serie de pasos desde definición de criterios, definición de indicadores para cada criterio, levantamiento de información de campo, matriz de pagos, taller con la comunidad y taller técnico que permite finalmente hacer un análisis de sensibilidad. En general los resultados muestran que el criterio antrópico es el de mayor incidencia por la dinámica urbana de la cuenca y la presión que se ejerce sobre la red hídrica, en cuanto a contaminación, deficiencia hidráulica de las estructuras, acumulación de basuras e invasión del cauce y de las zonas de retiro. La comuna 8 tanto en puntos críticos como en Microcuenca (quebrada La Castro) es la que mayor criticidad presenta y el análisis de sensibilidad muestra que la solución es robusta ante diferentes escenarios.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis Multiobjetivo, Promedios Ponderados, Priorización de Puntos Críticos, Priorización de Microcuencas.

## ABSTRACT

This study shows how Multiobjective Analysis was used to classify in priority order 49 critical sites and small catchments of the Santa Elena creek catchment in Medellín, Colombia, by using the weighted average method. Three criteria elements, namely, hydraulic, geologic and antropic were selected for the analysis. The methodology include several elements of analysis including definition of criterion, indicators, collecting primary information, definition of the trade off matrix, development of community and technical workshops, and sensibility analysis. The study shows that the antropic criterion is of mayor importance due to the urban dynamic of the catchment and the social pressure over catchment network. The main problems detected were the malfunction of several hydraulic structures, the water pollution, the human settlements in the flood plains, the material and garbage disposal in the stream. In this catchment, the zone 8 (La Castro small catchment) has the mayor critical impact and sensibility analysis shows that a robust solution is obtained.

**KEY WORDS:** Multiobjective Analysis, Weighted Averages, Prioritization of Critical Sites, Prioritization of Small Catchments.

*1. Profesores, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

*lfcarvaj@unalmed.edu.co  
jfjimene@unalmed.edu.co*

*2. Estudiante pregrado Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La priorización de puntos críticos en una cuenca es de vital importancia para la gestión de los planes de contingencia y asignación de los recursos para la atención y prevención de desastres. Para la administración pública, la asignación de recursos debe ser objetiva y transparente para la comunidad, es decir, que la priorización obedezca a una metodología técnica, como por ejemplo el Análisis Multicriterio, cuente con la información mínima, un grupo de especialistas que cubra las temáticas principales de la problemática de la cuenca y la logística para el desarrollo de la metodología.



En este caso se aplicó el Análisis Multiobjetivo a los puntos críticos asociados a la red de drenaje en la cuenca de la quebrada Santa Elena. El Análisis Multiobjetivo suministra metodologías, lineamientos y criterios que permiten hacer una integración de las diferentes dimensiones de la realidad en un solo marco de análisis (Smith et al, 2000; Munda, 1994; Goicochea, 1982). El Análisis Multiobjetivo incluye entre sus características la posibilidad de trabajar con criterios que pueden estar valorados en múltiples formas. Esta priorización fue un ejercicio de campo y técnico multidisciplinario (Hidráulica, Geología y Socio – Economía) en el cual se evaluaron 14 indicadores del estado de cada punto crítico. Es importante tener en cuenta que este tipo de metodologías exige gran compromiso técnico por parte del grupo de expertos en la evaluación de los puntos críticos. El objetivo de la priorización es asignar una importancia en orden descendente de todos los puntos identificados.

En los proyectos de gestión ambiental, para la valoración de los criterios, es posible tener acceso a información de diversa índole, tal como la proveniente de monitoreos, análisis de riesgos, análisis de costo-beneficio e información que exprese las preferencias de las personas involucradas en la toma de decisiones. Sin embargo, debido a la naturaleza de la información, no es posible integrar o juzgar la importancia relativa de ésta de acuerdo con cada fuente. En general los resultados de monitoreos son presentados como estimativos cuantitativos y la evaluación de los riesgos y el análisis de las relaciones costo-beneficio traen incorporado un alto grado de juicios cualitativos.

Existen modelos que realizan análisis diferenciados con respecto a la forma cómo se valoran los criterios; éstos permiten realizar dos tipos de evaluaciones (Munda, 1994). Por una parte la valoración asignada a cada criterio para cada alternativa da lugar a una matriz (llamada matriz de pagos), que corresponde al análisis multiobjetivo, y, por otra, la valoración cualitativa de cada alternativa por parte de los actores implicados en el proceso de evaluación da lugar a otra matriz (llamada matriz de equidad) y a la formación de posibles coaliciones (agrupaciones de actores que defienden determinadas actuaciones).

Es posible también utilizar métodos que involucren en el análisis valoraciones cuantitativas y cualitativas simultáneamente. Por esta razón con el fin de poder realizar comparaciones entre las evaluaciones de los diferentes criterios, es necesario homogenizar la información mediante el uso de una escala común. Para esto es necesario tener en cuenta la estructura de preferencias del decisor, quien con su conocimiento, experiencia y criterio determina la importancia relativa entre criterios. A partir de esta valoración y de la aplicación del Análisis Multiobjetivo, es posible llegar a resolver el problema de priorización.

Existen varios métodos para la agregación de los criterios (Goicochea, 1982 y Smith et al 200) como: Programación Lineal Multiobjetivo, Programación por metas, Utilidad Multi – atributo, Métodos de superación (Outranking) y Procesos analíticos jerárquicos. En este caso se empleó el método de los promedios ponderados. En este método, aparte de la evaluación de cada uno de los criterios, se asignan pesos ( $w_i$ ) a cada criterio, es decir, valores que representen su importancia relativa. ( $w_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ). La suma ponderada de la evaluación de los criterios respecto a cada alternativa será una medida del grado de aceptación de dicha alternativa.

En general los criterios empleados para la priorización de puntos críticos y de cuencas comprenden aspectos físicos, económicos, socio-culturales, tecnológicos, políticos, institucionales y ambientales (Botero, 1994; Osorio y Pineda, 1999, IDEAM Resolución N°104 de 7 de Julio de 2003, UNAL-Secretaría del Medio Ambiente, 2004).

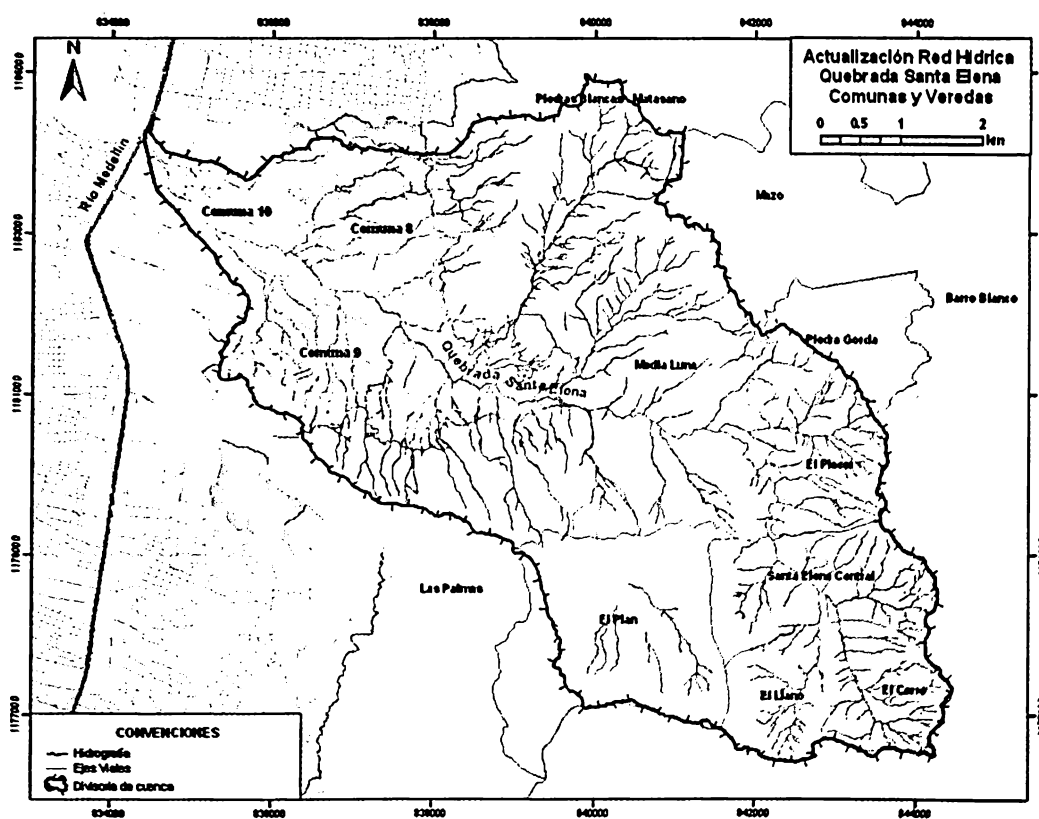
Este trabajo presenta en su orden una descripción de la cuenca, la metodología de Análisis Multiobjetivo aplicada, los resultados de la metodología y la sensibilidad de la solución y por último los análisis de resultados y conclusiones.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SANTA ELENA

La cuenca de la quebrada Santa Elena tiene un área de 44.66 Km<sup>2</sup>, de los cuales el 75% es zona rural y el otro 25% es zona urbana. La cuenca está localizada en la zona centro oriental de la ciudad de Medellín y descarga sus aguas al Río Medellín. El mapa de la Figura 1 muestra la red hídrica de la cuenca y la distribución espacial de las comunas 8, 9 y 10. La cuenca tiene un clima ecuatorial típico de montaña, con una precipitación promedio de 1802 mm/año y una temperatura media en la zona urbana de 20.5 °C/año y en la rural de 14.5 °C/año.

La cuenca está conformada por rocas de diversos orígenes y edades, representadas por rocas metamórficas, ígneas y depósitos recientes. La configuración litológica y la cercanía del Valle de Aburrá con el sistema de fallas Cauca-Romeral han contribuido a la configuración del paisaje, que principalmente está conformado por una topografía abrupta de pendientes muy fuertes.

La cuenca de la Quebrada Santa Elena tiene un perímetro de 35.8 Km, una altura promedio de 2169.1 msnm, una pendiente promedio de 35.52 % y una pendiente del cauce de 30.95%. Estas condiciones de cuenca torrencial se deben en mayor parte a la zona media de la cuenca, ya que la zona alta es plana y la zona urbana se puede considerar de torrencialidad media. La red de drenaje total de la quebrada Santa Elena está conformada por 146.07 Km de canal natural, 12.28 Km de canal artificial y 26.06 Km de coberturas.



**Figura 1.** Mapa de la red hídrica de la cuenca de la quebrada Santa Elena con la distribución espacial de las comunas 8, 9 y 10 (Tomado de UNAL-Secretaría del Medio Ambiente, 2005)

### 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MULTIOBJETIVO

La metodología empleada para la priorización de puntos críticos es la siguiente:

#### 3.1. Definición de los criterios

Los criterios deben permitir considerar la problemática de la cuenca asociada a la red hídrica. Estos criterios deben ser exhaustivos para hacer un análisis integral de la problemática. Por lo tanto los criterios definidos son: hidráulico, geológico y antrópico.

#### 3.2. Definición de los Indicadores de evaluación de la problemática

Se definieron 6 indicadores para el criterio hidráulico, 4 indicadores para el geológico y 6 indicadores para el antrópico. La lista de los criterios e indicadores asociados se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.**  
Criterios de evaluación de puntos críticos y sus características asociadas

CRITERIOS DE EVALUACIÓN: INDICADORES		
GEOLÓGICO	HIDRÁULICO	ANTRÓPICO
Inestabilidad Geológica. (ING)	Represamiento de la estructura hidráulica. (REP)	Acumulación de basuras en el cauce. (BAS)
Afloramiento de aguas naturales. (AAN)	Incapacidad de la estructura hidráulica. (IHI)	Acumulación de escombros en el cauce. (ESC)
Filtración de aguas (FIL)	Socavación de la estructura hidráulica. (SEH)	Contaminación por descarga de material particulado al cauce. (MPF)
Hundimiento del terreno por aguas subterráneas. (HAS)	Colmatación de la estructura hidráulica. (COL)	Contaminación hídrica por descarga de aguas residuales (ARS)
	Fallas en la estructura hidráulica. (FES)	Invasión de zona de retiro. (IZR)
	Cobertura obstruida por rocas. (COR)	Presencia de banquetes o excavaciones inadecuadas. (BAN).

#### 3.3. Definición de la escala de evaluación de los indicadores

La escala de evaluación es cualitativa y se definió de la siguiente forma: 0 el problema no existe, o si existe es leve; 1 el problema existe, pero no reviste peligro y 2 el problema existe, reviste peligro y requiere un acción inmediata.

#### 3.4. Recorridos de campo y evaluación de los puntos críticos

Se diseñaron los recorridos para el inventario de los puntos críticos y la evaluación de los indicadores. Estas visitas empezaron en la zona rural (zona del altiplano y zona del escarpe) y se terminó en la zona urbana.

#### 3.5. Matriz de pagos inicial

Se elaboró la matriz de pagos inicial y se hizo un ejercicio de prepriorización. Para la matriz de pagos se suman los valores de los indicadores asociados a cada criterio  $A_{pj}$  (p indica el punto crítico y j el criterio de evaluación) y se normalizan de dos formas para hacer un análisis de sensibilidad. En la primera se obtiene al valor de  $A_{pj}$  a partir de la suma de los indicadores correspondientes al criterio j, dividido por el valor máximo real que toma el criterio entre todos los

puntos críticos existentes. En la segunda se obtiene el valor de  $A_{pj}$  a partir de la suma de los indicadores correspondiente al criterio  $j$ , dividido por el valor máximo teórico que toma el criterio entre todos los puntos críticos. Los valores  $A_{pj}$  para cada caso se calculan a partir de las expresiones 1 y 2.

$$A_{pj} = \frac{\sum_{k=1}^r I_{p,k}}{C_{\max,j}} \quad (1) \quad A_{pj} = \frac{\sum_{k=1}^r I_{p,k}}{2r_j} \quad (2)$$

Siendo  $C_{\max,j}$  el valor máximo real del criterio  $j$  evaluado, y  $r_j$  el número total de indicadores por criterio.

### 3.6. Ejercicio de prepriorización y taller con la comunidad

En este taller los participantes (31) señalaron nuevas problemáticas que se presentan en época de invierno. Para realizar el taller con la comunidad se presentó una prepriorización de los puntos críticos levantados por las comisiones de campo. Para una mejor presentación y comprensión por parte de los asistentes al taller, se clasificaron los puntos en niveles de criticidad: alto, medio y bajo. El criterio de clasificación es el siguiente: nivel alto para una calificación del punto mayor a 0.7, nivel medio entre 0.4 y 0.7 y nivel bajo menor de 0.4. Estos umbrales se seleccionaron con un criterio técnico, basados en los resultados de la prepriorización y de las problemáticas presentes en la cuenca. El taller tuvo las siguientes etapas metodológicas: presentación de los objetivos, taller por comunas, socialización de los resultados y conclusiones.

### 3.7. Recorridos de campo y actualización de la matriz de pagos

Con la información adicional de nuevos puntos obtenida en el taller se hicieron las vistas de campo para evaluar la pertinencia de éstos y asignar la evaluación respectiva. Con la información total obtenida se hizo la nueva matriz de pagos.

### 3.8. Taller técnico

La aplicación de la metodología de Análisis Multicriterio (Método de los promedios ponderados) requiere la definición de unos pesos de ponderación que reflejan la importancia relativa de cada uno de los criterios considerados: hidráulico, geológico y antrópico. Después de la etapa anterior, se obtuvo una visión global de las características de las problemáticas que se desarrollan en la cuenca por parte del grupo de especialistas. Con el fin de obtener los pesos de ponderación necesarios para la aplicación de la metodología, se realizó un taller técnico en donde se discutió la importancia relativa que tiene cada uno de los criterios en el valor o grado de criticidad de un punto y en la cuenca como unidad integral. Los pesos de ponderación para cada criterio fueron asignados por cada experto que asistió al taller. Los valores asignados para los tres criterios por cada experto deben sumar 1: ver Tabla 2.

EXPERTO	CRITERIO		
	Geológico	Hidráulico	Antrópico
1	0.15	0.35	0.50
2	0.35	0.25	0.40
3	0.25	0.35	0.40
4	0.30	0.30	0.40
5	0.15	0.35	0.50
PROMEDIO	0.24	0.32	0.44

**Tabla 2.**  
Pesos de ponderación de los  
criterios (Taller técnico)

### 3.9. Análisis de sensibilidad

Con el fin de realizar un análisis de sensibilidad de la solución obtenida, se definieron cuatro escenarios posibles: ver Tabla 5:

- Escenario 1: pesos iguales para los tres criterios.
- Escenario 2: pesos promedios para cada criterio.
- Escenario 3: pesos mínimos para cada criterio.
- Escenario 4: pesos máximos para cada criterio.

La ponderación se realizó con base en la fórmula que expresa la función de criticidad definida para la priorización: ecuación 3.

$$U_p = \sum_{j=1}^n w_j A_{pj} \quad ; p = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Donde: m es el número total de puntos críticos y j el número de criterios a considerar.

### 3.10. Definición de niveles de criticidad

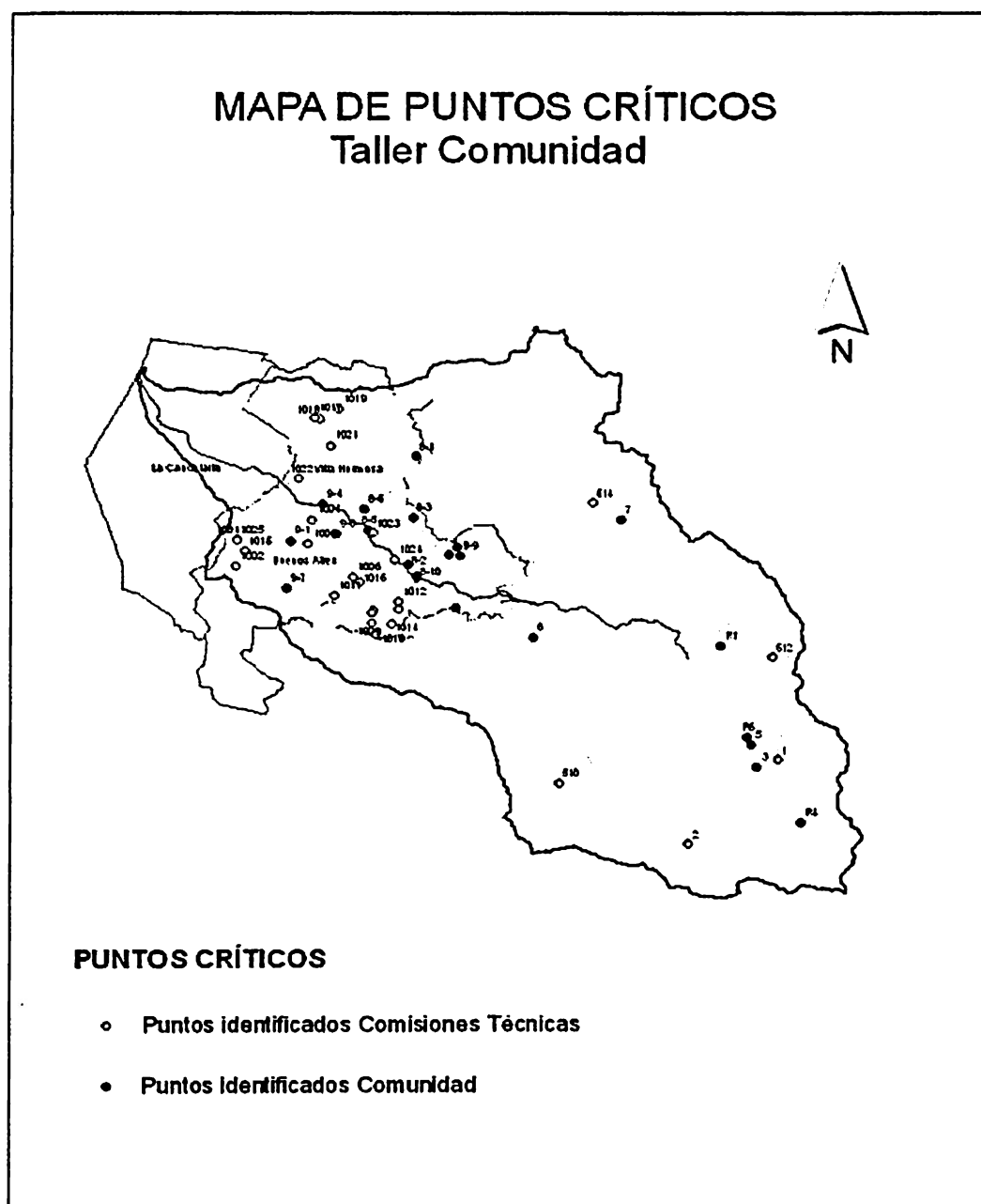
Para la priorización se definieron niveles de criticidad baja, media y alta. Se ordenó en forma descendente el resultado de la priorización y se definieron puntos de cambio para los tres niveles en los siguientes intervalos: criticidadbaja menor de 0.14, media entre 0.15 -0.39 y alta mayor de 0.4.

## 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LOS PUNTOS CRÍTICOS Y MICROCUENCAS DE LA RED HÍDRICA DE LA QUEBRADA SANTA ELENA

### 4.1 Priorización de puntos críticos

En los pasos 1, 2 y 3 de la metodología expuesta se definieron los criterios, los indicadores asociados a cada criterio y la escala de valoración empleada. En la etapa 4, los recorridos de campo iniciales permitieron identificar 33 puntos críticos, distribuidos así: 8 puntos en la comuna 8, 16 puntos en la comuna 9 y 9 puntos en la zona rural. Posteriormente en el taller con la comunidad y después de visitar los puntos, se evaluaron 17 nuevos puntos: 8 puntos en la comuna 8, 5 puntos en la comuna 9 y 4 puntos en la zona rural. El mapa de la Figura 2 presenta la ubicación y distribución de los puntos levantados, para un total de 50. La matriz de pagos de los puntos críticos normalizada con los dos criterios se presenta en la Tabla 3.

La etapa 8, correspondiente al taller técnico arrojó los pesos que se presentan en la Tabla 3 y que permiten aplicar la metodología de promedios ponderados. Los pesos de los escenarios para el análisis de sensibilidad se presentan en la Tabla 4.



**Figura 2.**  
Mapa de la cuenca de la quebrada Santa Elena con los puntos críticos reportados por las comisiones de campo y por la comunidad después de verificados y evaluados.



**Tabla 3.**  
Matriz de pago actualizada

CÓDIGO	NORMALIZACIÓN SUMA REAL			NORMALIZACIÓN SUMA TEÓRICA		
	GEOLÓGICO	HIDRÁULICO	ANTRÓPICO	GEOLÓGICO	HIDRÁULICO	ANTRÓPICO
R-1.	0	0	0.22	0	0	0.17
R-2.	0	0	0.22	0	0	0.17
R-3.	0.25	0	0	0.125	0	0
R-4.	0.25	0	0	0.125	0	0
R-5.	0.25	0	0	0.125	0	0
R-6.	0.5	0	0	0.25	0	0
R-7.	0	0	0.22	0	0	0.17
R-8.	0	0	0.22	0	0	0.17
R-9.	0.5	0	0	0.25	0	0
R-10	0	0	0.11	0	0	0.08
R-11	0	0.625	0.22	0	0.42	0.17
R-12	0	0.5	0.33	0	0.33	0.25
9-1.	0	0.25	0	0	0.17	0
9-2.	0	0	0.22	0	0	0.17
9-3.	0	0.25	0	0	0.17	0
9-4.	0	1	0.78	0	0.67	0.58
9-5.	0	0.25	0	0	0.17	0
9-6.	0	0	0.22	0	0	0.17
9-7.	0	0	0.22	0	0	0.17
9-8.	0	0.25	0	0	0.17	0
9-9.	0	0	0.22	0	0	0.17
9-10.	0	0	0.22	0	0	0.17
9-11.	0	0	0.22	0	0	0.17
9-12.	0	0	0.22	0	0	0.17
9-13.	0	0	0.44	0	0	0.33
9-14.	0	0.5	0	0	0.33	0
9-15.	1	0	0	0.5	0	0
9-16.	0	0.75	0.44	0	0.5	0.33
9-17.	0	0.25	0.22	0	0.17	0.17
9-18.	0.5	0.375	0.78	0.25	0.25	0.58
9-19.	0	0.125	0.33	0	0.08	0.25
9-20.	0.25	0	0.44	0.125	0	0.33
9-21.	0	0	0.33	0	0	0.25
8-1.	0	0.75	0.78	0	0.5	0.58
8-2.	0	0	0.22	0	0	0.17
8-3.	0	0.25	0.22	0	0.17	0.17
8-4.	0	0	0.22	0	0	0.17
8-5.	0	0	0.22	0	0	0.17
8-6.	0	0.5	0	0	0.33	0
8-7.	0	0.5	0	0	0.33	0
8-8.	0	0	0.22	0	0	0.17
8-9.	0.5	0	0.78	0.25	0	0.58
8-10.	0.25	0.5	0.56	0.125	0.33	0.42
8-11.	0.5	0.125	1	0.25	0.08	0.75
8-12.	0	0.5	0.56	0	0.33	0.42
8-13.	0	0	0.11	0	0	0.08
8-14.	0.5	0.25	0.89	0.25	0.17	0.67
8-15.	0	0.875	0.89	0	0.58	0.67
8-16.	0	0.625	0.56	0	0.42	0.42

**Tabla 4.**  
Pesos de ponderación para los  
escenarios considerados

Pesos	Geológico	Hidráulico	Antrópico
Escenario 1	1/3	1/3	1/3
Escenario 2	0.24	0.32	0.44
Escenario 3	0.19	0.31	0.50
Escenario 4	0.29	0.29	0.42



Los resultados de la priorización para el escenario 2 se presentan en la Tabla 5. El mapa de la Figuras 3 muestra los resultados de la priorización para el escenario 2 y en una escala muy baja, media, alta y muy alta (diámetro del círculo) el rango de la sensibilidad del punto, es decir, máximo valor de  $U_p$  menos mínimo valor de  $U_p$ .

Posición	Código	Suma (U) Máx. real	Código	Suma (U) Máx. teórico
1	8-15.	0.67	8-15.	0.48
2	9-4.	0.66	9-4.	0.47
3	8-11.	0.6	8-11.	0.42
4	8-14.	0.59	8-1.	0.42
5	8-1.	0.58	8-14.	0.41
6	9-18.	0.58	9-18.	0.4
7	8-10.	0.46	8-10.	0.32
8	8-9.	0.46	8-9.	0.32
9	8-16.	0.44	8-16.	0.32
10	9-16.	0.44	9-16.	0.31
11	8-12.	0.4	8-12.	0.29
12	R-12	0.31	R-12	0.22
13	R-11	0.3	R-11	0.21
14	9-20.	0.26	9-20.	0.18
15	9-15.	0.24	9-13.	0.15
16	9-13.	0.2	9-19.	0.14
17	9-19.	0.19	8-3.	0.13
18	8-3.	0.18	9-17.	0.13
19	9-17.	0.18	9-15.	0.12
20	9-14.	0.16	9-21.	0.11
21	8-6.	0.16	9-14.	0.11
22	8-7.	0.16	8-6.	0.11
23	9-21.	0.15	8-7.	0.11
24	R-6.	0.12	R-1.	0.07
25	R-9.	0.12	R-2.	0.07
26	R-1.	0.1	R-7.	0.07
27	R-2.	0.1	R-8.	0.07
28	R-7.	0.1	9-2.	0.07
29	R-8.	0.1	9-6.	0.07
30	9-2.	0.1	9-7.	0.07
31	9-6.	0.1	9-9.	0.07
32	9-7.	0.1	9-10.	0.07
33	9-9.	0.1	9-11.	0.07
34	9-10.	0.1	9-12.	0.07
35	9-11.	0.1	8-2.	0.07
36	9-12.	0.1	8-4.	0.07
37	8-2.	0.1	8-5.	0.07
38	8-4.	0.1	8-8.	0.07
39	8-5.	0.1	R-6.	0.06
40	8-8.	0.1	R-9.	0.06
41	9-1.	0.08	9-1.	0.05
42	9-3.	0.08	9-3.	0.05
43	9-5.	0.08	9-5.	0.05
44	9-8.	0.08	9-8.	0.05
45	R-3.	0.06	R-10	0.04
46	R-4.	0.06	8-13.	0.04
47	R-5.	0.06	R-3.	0.03
48	R-10	0.05	R-4.	0.03
49	8-13.	0.05	R-5.	0.03

**Tabla 5.**  
Resultados de la priorización de  
puntos críticos, escenario 2.



#### 4.2. Priorización de microcuencas

También se aplicó la metodología a las microcuencas cuya corriente principal desemboca a la quebrada Santa Elena, para un total de 19 afluentes. En este caso se agregaron los indicadores de los puntos críticos pertenecientes a cada microcuenca. En la Tabla 6, se presenta la matriz de pagos y en la Tabla 7, el resultado de la priorización para el escenario 2. Los niveles de criticidad definidos son: bajo, medio, alto y muy alto. El mapa de la Figura 4 muestra los resultados.

**Tabla 6.**  
Matriz de pagos para la  
priorización de microcuencas en  
la cuenca de la quebrada Santa  
Elena.

Microcuenca	Criterio		
	Geológico	Hidráulico	Antrópico
La Castro	0.5	1	1
La Loca	0	0.11	0.22
Chorro Hondo	0	0.44	0.19
La Aguadita	0	0	0.07
El Ñato	1	0	0
La Palencia	0	0.44	0.15
La Planta	0.5	0.11	0.30
La Gallinaza	0.5	0.28	0.37
La Milagrosa	0.25	0.11	0.22
La Cangreja	0	0.56	0.37
La India	1	0.11	0.07
Santa Bárbara	0	0	0.11
La Pastora	0	0.11	0.52
El Chupadero	0.5	0.17	0.26
La Espadera	0.25	0	0.07
Avícola	0.75	0.11	0
El Cartucho	0.25	0	0.07
San Pedro	0	0	0.07
El Cedro 1	0	0.28	0.07

**Tabla 7.**  
Resultados de la priorización de  
microcuencas en la cuenca de la  
quebrada Santa Elena,  
escenario 2.

Posición	Microcuenca	Suma
1	La Castro	0.88
2	La Gallinaza	0.37
3	La Cangreja	0.34
4	La India	0.31
5	El Chupadero	0.29
6	La Planta	0.29
7	La Pastora	0.26
8	El Ñato	0.24
9	Chorro Hondo	0.22
10	Avícola	0.22
11	La Palencia	0.21
12	La Milagrosa	0.19
13	La Loca	0.13
14	El Cedro 1	0.12
15	La Espadera	0.09
16	El Cartucho	0.09
17	Santa Bárbara	0.05
18	La Aguadita	0.03
19	San Pedro	0.03

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los principales análisis acerca de la información, la metodología y los resultados son:

- La comuna 10 no presenta problema de puntos críticos. Esta situación es coherente con el mantenimiento periódico de las coberturas y la dirección transversal de desarrollo de la ciudad, es decir desde el Río Medellín hacia la periferia de la ciudad.
- La zona rural presenta su problemática fundamentalmente en la zona del altiplano de la cuenca de la Quebrada Santa Elena. Las características principales de los puntos son: deslizamiento de las bancas de los cauces, estructuras de descarga de aguas servidas mal diseñadas o socavadas por el flujo de la quebrada y taponamiento de las estructuras por sedimentos. En términos generales la calidad del agua de las quebradas es buena y solo en los alrededores del corregimiento de Santa Elena y de las veredas El Placer y El Llano se presenta contaminación por descargas de aguas servidas. Igualmente por la concentración de pobladores en estas zonas, se presentan problemas de acumulación de basuras.
- En la zona media de la cuenca, es decir en el escarpe, no se presentan puntos críticos. En esta zona la red de drenaje corre por altas pendientes y es una zona de propiedades privadas. En forma indirecta esta situación es un control para evitar el desarrollo de problemáticas en la parte media de la cuenca de la quebrada Santa Elena.
- En la comuna 8 se presentan puntos críticos tanto en la zona central como en la periferia de la ciudad, barrio Villa Liliam, asentamiento Esfuerzos de Paz y Villa Tina. Los puntos de la zona central se caracterizan por incapacidad hidráulica, daños de las estructuras y presencia de basuras y escombros. En la zona alta de la comuna 8 los puntos tienen las mismas características de los anteriores agravados por la contaminación de las quebradas y la invasión de las zonas de retiro por la comunidad.
- En la comuna 9, la mayoría de los puntos presentan problemas de acumulación de basuras y escombros y en menor medida incapacidad hidráulica de las estructuras y contaminación de las quebradas con vertimientos.
- Los resultados del ejercicio de priorización de puntos críticos aplicando el método de promedios ponderados muestra que, considerando los 4 escenarios analizados, la zona rural presenta un nivel de criticidad bajo; solo se tienen en general para todos los escenarios 2 puntos que presentan criticidad intermedia, estos son los puntos R4 y R6, correspondientes al cruce de la de la Quebrada El Cerro con la carretera y en la Escuela Santa Elena Central. Estos puntos tienen como características la insuficiencia hidráulica de la estructura y el movimiento en masa de la ladera del cauce de la quebrada localizada en la parte de atrás de la Escuela.
- La mayor cantidad de puntos con criticidad alta se presentan en la comuna 8, con un total de 8 puntos; 5 de estos puntos están localizados en la zona periurbana con los códigos 8-4, en el asentamiento El Pacífico, 8-3, en el sector de Villa Tina y 8-1, 8-9 y 4, en el barrio Villa Liliam. Se tienen 4 puntos de criticidad intermedia y 4 de nivel de criticidad bajo.
- En la comuna 9, se tienen 3 puntos de criticidad alta, uno de ellos ubicado en la zona límite de la ciudad; el punto 9-2, en Barrios de Jesús, Las Parcelas; 6 puntos con nivel de criticidad intermedia y 10 puntos con criticidad baja. El mayor número de puntos con un nivel de criticidad alto se presenta en la comuna 8, como se muestra en la Tabla 6.
- La priorización de microcuencas muestra que la quebrada La Castro es la de mayor nivel de criticidad, seguida por la Gallinaza, La Palencia, La Cangreja y La Pastora con un nivel de criticidad alto. En términos generales, la zona del altiplano y del escarpe tiene una criticidad baja. Esto muestra que los procesos de urbanización son los grandes generadores de problemas en la red hídrica y que por lo tanto la zona urbana es la más afectada.



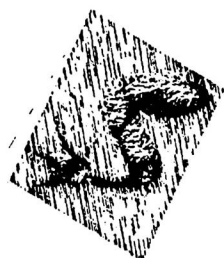
- Los valores de criticidad obtenidos (entre 0 y 1) muestran que la microcuenca de la quebrada La Castro es aproximadamente 2.4 veces el valor de la criticidad de las quebradas en un rango alto. Por lo tanto esta Microcuenca requeriría atención pronta.

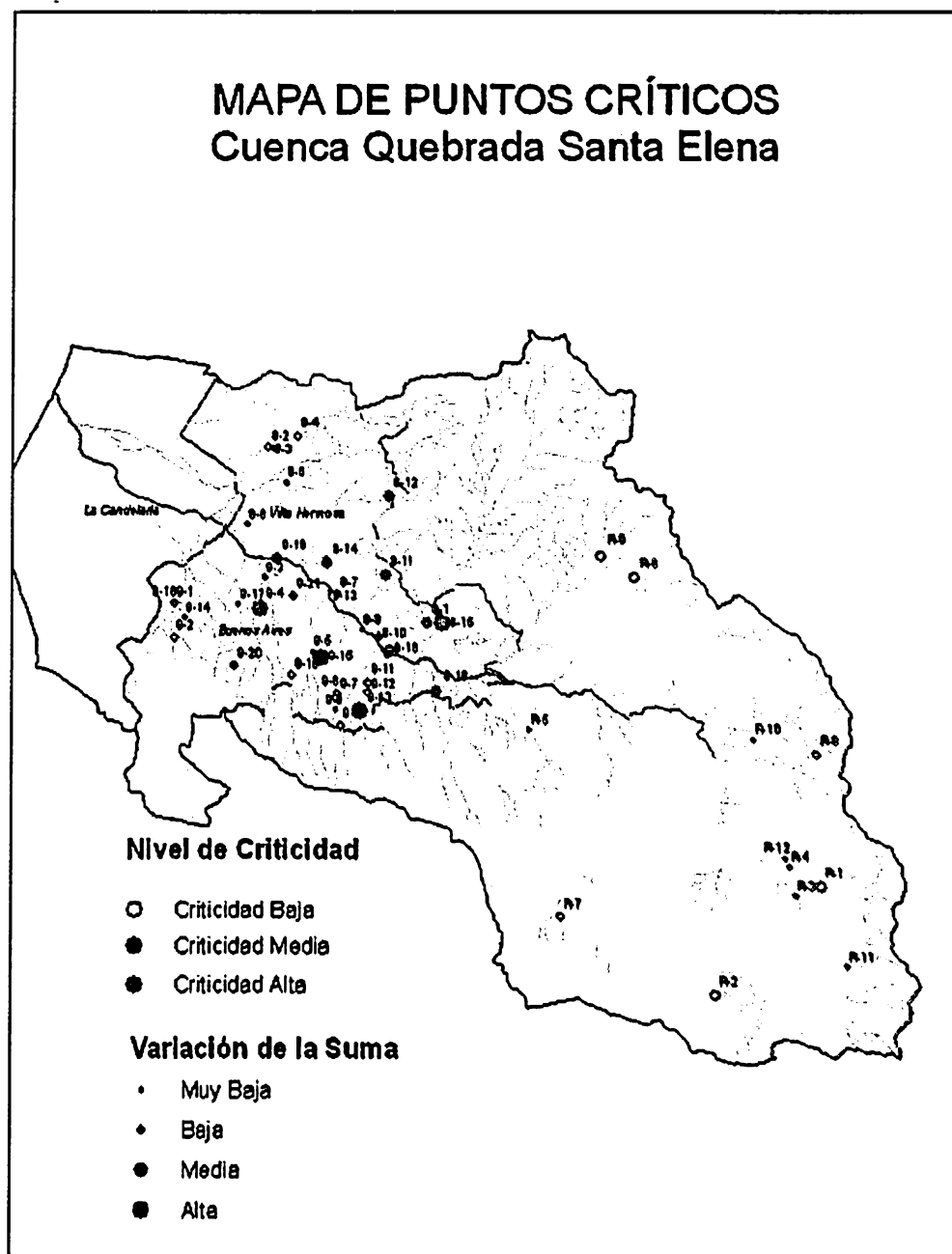
## 6. CONCLUSIONES

Para la metodología empleada es fundamental la coherencia de la metodología de priorización, en cuanto a secuencia de los pasos y obtención de la información de campo adecuada. Este tipo de metodología exige un alto compromiso de los integrantes del grupo. La interacción con la comunidad es fundamental con el objetivo de tener en cuenta la percepción de ésta acerca de la problemática de la cuenca e interiorizarla en el taller técnico por parte de los expertos. El diseño y una buena metodología de trabajo en el taller técnico garantizan la robustez de la solución final, ya que cada experto aporta los pesos relativos de cada criterio y con el conocimiento de la problemática de la cuenca, los juicios de valor son el resultado de las consideraciones técnicas, institucionales y sociales para una evaluación integral de la problemática.

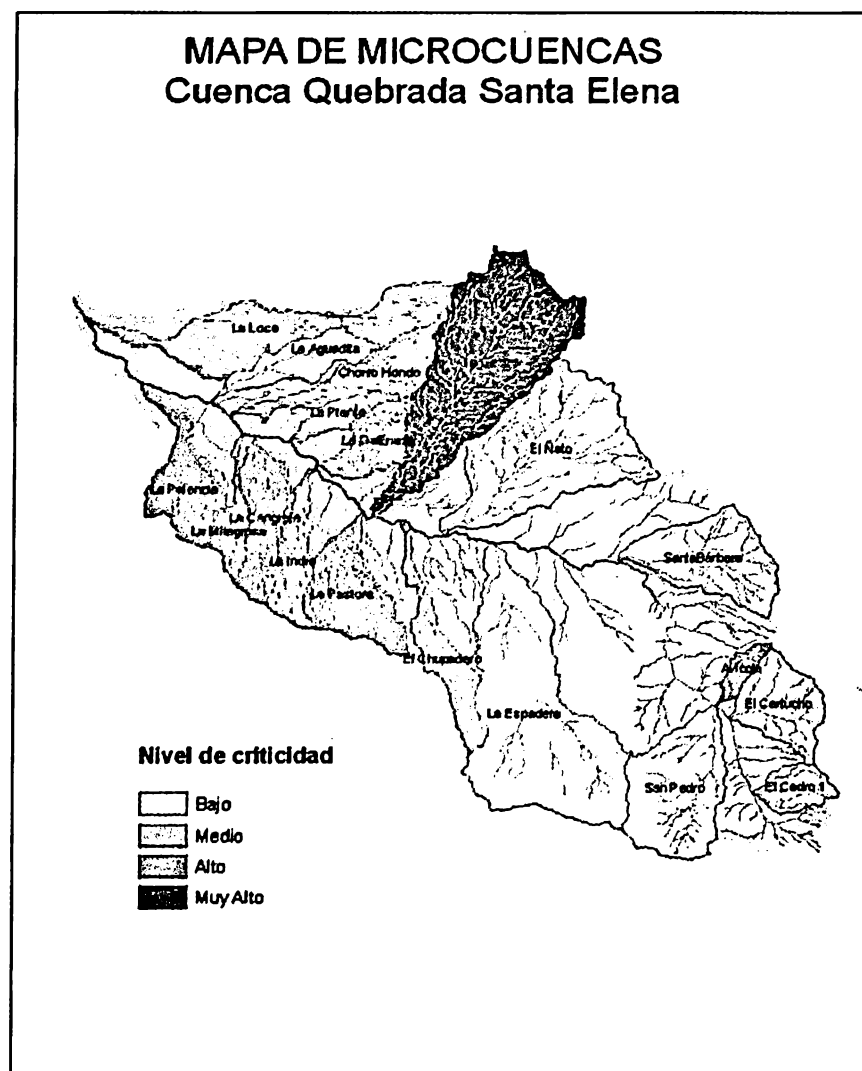
Los resultados generales del estudio muestran que según la importancia de los criterios, primero está el antrópico, luego el hidráulico y por último el geológico. Los puntos se caracterizan en su mayoría por urbanización de las zonas de retiro, contaminación de las corrientes por vertimientos, residuos sólidos en los cauces y colmatación parcial o total de estructuras hidráulicas y en algunos puntos, especialmente en la zona límite de la ciudad, se tiene riesgo geológico. La dinámica de urbanización es un factor fundamental que acelera la aparición de nuevos puntos críticos. El análisis de sensibilidad realizado considerando los 4 escenarios da una solución robusta y muestra que los cambios que se presentan en la priorización son mínimos, haciendo que los puntos no cambien de nivel de criticidad. Dentro de la priorización de microcuencas la de mayor nivel de criticidad es La Castro con un 9.4 % del área total de la cuenca y le siguen con criticidad alta las quebradas La Gallinaza, La Palencia, La Cangreja y La Pastora, con un área aproximada del 7,7 % del área total.

Las recomendaciones para los puntos críticos van desde el monitoreo hasta la reubicación de los habitantes y programas de gestión para la disposición de los residuos sólidos, control de vertimientos y ordenamiento de las zonas de retiro. Es muy importante hacer un seguimiento de la dinámica de crecimiento de la ciudad y prever posibles zonas de nuevos asentamientos o crecimientos de los ya existentes y planificar un desarrollo urbano de acuerdo a las necesidades de las comunidades, políticas de gestión y recursos disponibles del ente administrador.





**Figura 3.**  
Priorización de puntos críticos para la cuenca de la Quebrada Santa Elena, escenario 2 y análisis de sensibilidad, centro oriente de Medellín.



**Figura 4.**  
Priorización de microcuencas para  
la cuenca de la quebrada Santa  
Elena, centro oriente de Medellín

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Botero, A., 1994. Planificación de cuencas usando análisis multiobjetivo y sistemas de información geográficos. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Goicoechea, A., Hansen, D. y Duckstein, I., 1982. Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley and Sons.
- Osori, L. y Pineda, M., 1999. Indicadores para la gestión ambiental en cuencas hidrográficas. Estudio de caso: Cuenca la Quebrada Chachafruto Municipio Rionegro-Antioquia.
- Munda, G., et. al., 1994. Qualitative multicriteria evaluation for environmental management, Ecological economics 10 (2): pp. 97 -112.
- Smith, R. et al., 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Publicación Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional, 2 ed., Sede Medellín, 354 p.
- UNAL-Secretaría del Medio Ambiente, 2004. Metodología para la formulación de planes integrales de ordenamiento y manejo de microcuencas PIOM. Varios volúmenes.
- UNAL-Secretaría del Medio Ambiente, 2005. Actualización de la red hídrica de la Microcuenca de la quebrada Santa Elena – Zona centro oriente de Medellín. Varios volúmenes.

