

## DISEÑO DE REDES DE MONITOREO APOYADAS POR HERRAMIENTAS SIG Y MODELACIÓN GEOESPACIAL

### MONITORING NETWORK DESIGN SUPPORTED BY GIS TOOLS AND GEOSPATIAL MODELING

Cano Casas, Lina<sup>1</sup> y Escobar Martínez, John Fernando<sup>2</sup>

#### Resumen

En el desarrollo de este trabajo se presenta la implementación de una metodología para la identificación de sitios potenciales de monitoreo de calidad de aguas superficiales en la cuenca del Río Grande (Colombia), a partir del uso de herramientas SIG y análisis multicriterio con el Método de las Jerarquías Analíticas (MJA). En la valoración de pesos en el análisis multicriterio se consideraron tres factores generales. Se realizó la ejecución del modelo de cuenca, integrado por los pesos de los criterios evaluados y por las fuentes de información cartográficas, utilizando herramientas de análisis espacial de ArcGIS. Los sitios potenciales se compararon con una red de monitoreo propuesta basada en el criterio de expertos. Aunque los resultados muestran concordancia en muchos casos, en otros, el método descarta los sitios propuestos, sugiriendo que el método puede servir como complemento en la selección de puntos de monitoreo basado en el criterio de expertos.

**Palabras claves:** Análisis multicriterio, red de monitoreo, calidad del agua, SIG.

#### Abstract

This work presents a methodology to identify potential sites for water quality monitoring in the Rio Grande catchment (Colombia), using GIS tools and a multi-criteria analysis based on the Analytical Hierarchy Process Method (AHP). Three general factors were considered in the multi-criteria valuation analysis. A layered model of the catchment, consisting of the weighed criteria and cartographical information sources, was run to locate the monitoring sites using spatial analysis tools from ArcGIS. The potential sites were compared to a previously proposed monitoring network based on expert's criteria. Although the results show good agreements in most cases, in others the method discarded the proposed sites, suggesting that the method may serve as a complement to expert-based site selection.

**Keywords:** Multicriteria analysis, monitoring network, water quality, GIS.

#### INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para el soporte de la vida en la tierra. A pesar de ser una sustancia indispensable para todos los seres vivos, las actividades humanas han degradado su calidad hasta tal punto que ponen en peligro la supervivencia en el planeta. Por ello deben tomarse medidas que contribuyan a dar un uso sostenible y de esta manera se pueda garantizar el acceso futuro a este recurso invaluable.

Para evaluar el estado del recurso hídrico, las autoridades ambientales requieren determinar las tendencias en la calidad de los cuerpos acuáticos y la manera en la cual los ecosistemas son afectados por la descarga de contaminantes. Teniendo en cuenta que la información disponible para este propósito es limitada en la mayor parte de los casos, se requiere del diseño de programas y redes de monitoreo, que permitan recopilar la información necesaria y de esta manera determinar el cumplimiento de los objetivos de calidad establecidos para cada cuerpo de agua, según sus usos y los impactos ejercidos. Dadas las

limitaciones presupuestales para la implementación de medidas preventivas y correctivas tendientes a mejorar la calidad del recurso hídrico, se hace necesario efectuar un diagnóstico previo que permita identificar las zonas críticas y sobre estas realizar los mayores esfuerzos, así como realizar seguimiento y control.

Teniendo en cuenta la variabilidad en las condiciones de cada zona específica y la escasez de la información disponible para realizar el diseño, es necesario sistematizar la metodología con que se efectúa la localización de los sitios de monitoreo a fin de que sea general e independizarla de preferencias para cada caso en cuestión, teniendo en cuenta los objetivos para la ordenación del recurso hídrico.

En este artículo se presenta la implementación de una metodología enfocada en la identificación de los sitios potenciales para realizar vigilancia de la calidad de las aguas superficiales, a partir del uso de herramientas SIG y la modelación geoespacial en la cuenca del Río Grande (Colombia).

1 Msc. Ingeniería Civil. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental GIGA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Tel: (+574) 2105591, e-mail: lcano@udea.edu.co

2 Msc. en Medio Ambiente y Desarrollo. Candidato a PhD. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental GIGA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia, e-mail: jfescob@yahoo.com

*Artículo enviado el 20 de enero de 2011  
Artículo aceptado el 9 de marzo de 2011*

**DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La cuenca del Río Grande se localiza en la subregión del norte de Antioquia, entre los 6° y 7° de latitud norte y 75° y 76° de longitud oeste. En la cuenca la temperatura oscila entre los 12°C y 17°C, con una temperatura promedio anual de 14°C. La precipitación anual varía entre los 2.000 mm y 2.500 mm (Corantioquia - Ecosistemas. 2005). El área total de la cuenca es de 1159 km<sup>2</sup>, la longitud del cauce principal es de 75 km y el caudal promedio del Río Grande es de 35 m<sup>3</sup>/s.

De la cuenca del Río Grande se analizaron, como se muestra en la en la figura 1, las microcuencas de la parte alta del río Chico y de las quebradas San José, Amoladora, El Diablo, San Francisco, Quebradona, Piedrahita, Donmatías, La Torura, Don Diego, El Hato, San Juan, Bramadora y Oro Bajo.

Las microcuencas se seleccionaron a partir de los usos en las corrientes que puedan causar alteraciones en el recurso hídrico, y para ello se analizaron los cuerpos de agua que sirven como fuentes abastecedoras de agua potable para los principales centros poblados y cabeceras municipales, receptores de vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales y fuentes abastecedoras de agua para la agricultura y acuicultura (Universidad de Antioquia – Corantioquia. 2009).

En la tabla 1 se presentan las áreas de cada una de las microcuencas, así como el uso principal del recurso. El área analizada representa el 43% del área total de la cuenca. En estas microcuencas se encuentran los municipios de Belmira, Donmatías, Entreríos, San Pedro de los Milagros, cuya población se muestra en la tabla 2.



Figura 1. Microcuencas analizadas pertenecientes a la cuenca de Río Grande.

**Tabla 1. Características de las microcuencas analizadas**

Microcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Uso del agua
San Francisco	6,48	Acuícola
Río Chico	55,87	Receptor de vertimientos Consumo humano
San José	6,50	Acuícola
Amoladora	10,75	Acuícola
Quebradona	71,64	Consumo humano Receptor de vertimientos
El Diablo	14,51	Acuícola
La Piedrahita	10,93	Consumo humano Acuícola
Donmatías	21,67	Receptor de vertimientos
La Torura	82,33	Consumo humano Receptor de vertimientos
Pontezuela	7,09	Consumo humano
Don Diego	55,33	Acuícola
El Hato	55,08	Consumo humano Receptor de vertimientos
San Juan	17,53	Consumo humano
Bramadora	52,97	Receptor de vertimientos
Oro Bajo	25,58	Acuícola
Área total	494,96	

**Tabla 2. Población abastecida en la zona de estudio**

Microcuenca	Población centros poblados	Población cabecera municipal
San Francisco	114	Belmira (1.683 habitantes)
Río Chico	392	
San José	206	
Amoladora	337	
Quebradona	485	
El Diablo	240	Donmatías (11.397 habitantes)
La Piedrahita	241	
Donmatías	1.310	Entreríos (3.943 habitantes)
La Torura	2.293	
Pontezuela	-	San Pedro de los Milagros (10.765 habitantes)
Don Diego	1.488	
El Hato	1.811	
San Juan	1.085	Santa Rosa de Osos (14.703 habitantes)
Bramadora	682	
Oro Bajo	705	

## METODOLOGÍA

Los modelos representan las características esenciales de un sistema y pueden ser herramientas valiosas para la gestión ambiental debido a que aumentan el entendimiento de las complejidades y de las singularidades de una situación dada y su respuesta a las decisiones de gestión u otros cambios (Saloranta, 2006).

Con el fin de identificar los sitios potenciales para realizar monitoreo de calidad de las aguas superficiales, se empleó el análisis multicriterio a través del método de las jerarquías analíticas (MJA), en integración con técnicas de modelación geoespacial. El análisis multicriterio es un enfoque general que se ha aplicado a una amplia gama de situaciones de gestión de los recursos naturales. La evaluación multicriterio es un término general para describir un conjunto de enfoques formales que buscan tener en cuenta criterios múltiples para ayudar a individuos o grupos a explorar las decisiones de importancia (Mendoza & Martins, 2006).

La integración de la tecnología SIG con modelos espaciales se convierten en una herramienta para la descripción, explicación, planificación o predicción, para aquellos procesos de naturaleza espacial, lo cual favorece la toma de decisiones (Gómez & Barredo, 2006).

A continuación se describe la implementación de la metodología seleccionada para la zona de estudio.

### Identificación de los aspectos y criterios utilizados en el modelo

Esta primera fase incluye la identificación de los aspectos que permitieron analizar la zona de estudio y evaluar los posibles sitios para localizar las estaciones de monitoreo.

Una de las limitaciones encontradas para introducir algunos criterios de priorización considerados relevantes como: localización de vertimientos puntuales, sitios de captación de acueductos y concesiones de agua, fue la ausencia de información georeferenciada y la falta de actualización de esa información, por lo tanto no pudo ser tomada en cuenta dentro del modelo.

Para el desarrollo de este trabajo fue necesario el procesamiento de diversas fuentes de información básica y temática referente a vías, cascos urbanos, red de drenaje y curvas de nivel, y fue extraída de la Cartografía básica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en escala 1:25.000.

A partir de la información disponible se consideraron tres aspectos generales a tener en cuenta en la asignación de los pesos para el análisis multicriterio:

- Aspectos antrópicos: involucran aquellas variables relacionadas con actividades humanas que pueden causar alteraciones en el recurso hídrico.

- Aspectos fisiográficos: se relacionan con los factores físicos que propician o impiden la localización de una estación de monitoreo en algún punto determinado de acuerdo a su accesibilidad.
- Aspectos de calidad del agua: son aquellos aspectos que involucran la calidad del recurso y su potencial de contaminación.

Cada uno de los aspectos generales agrupa los criterios de priorización de los sitios para realizar el monitoreo de calidad del agua, a través de una función de pesos ponderados. En la figura 2 se presentan los aspectos y criterios considerados para realizar el modelo espacial.

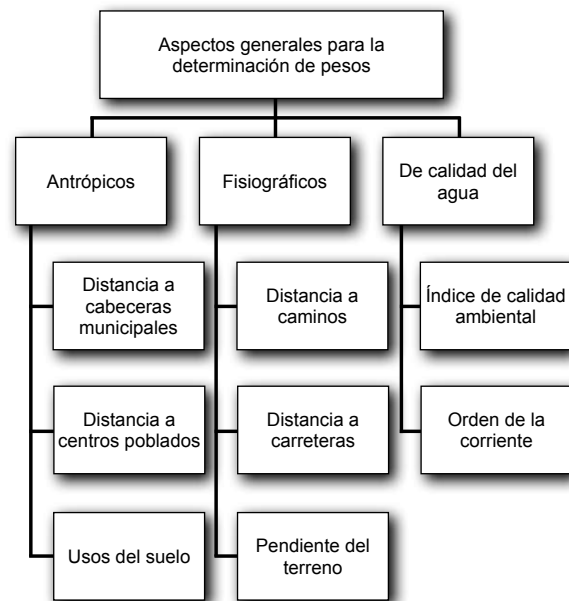


Figura 2. Aspectos y criterios empleados

### Descripción de los criterios utilizados

- Distancia a centros poblados y a cabeceras municipales: estos criterios fueron considerados dado que la mayor parte de las corrientes cercanas a un asentamiento humano son receptoras de los vertimientos de aguas residuales domésticas. En la medida que una corriente esté más cerca de un centro poblado o cabecera, será mayor la posibilidad de que se encuentre afectada por la descarga de los vertimientos mencionados. La cabecera municipal es el área geográfica que está definida por un perímetro urbano y corresponde al lugar en donde se ubica la sede administrativa de un municipio, mientras que el centro poblado es una concentración de mínimo veinte viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí, ubicada en el área rural de un municipio (IGAC, 1996). Dado que la cabecera municipal concentra una mayor población que un centro poblado, se consideraron de manera separada dentro de los criterios utilizados.

- Usos del suelo: cada unidad de suelo en una cuenca tiene un potencial de contaminación asociado y depende fundamentalmente de su topografía, uso y las características de la vegetación (Vieux & Farajalla, 1994). Es por ello que en el análisis se consideraron los diferentes usos y tipos de suelos en la cuenca y su grado de afectación a la calidad del agua. Las áreas donde la actividad económica que se desarrolla pudiera representar una carga contaminante puntual o difusa, son las que requieren mayor vigilancia en la calidad del recurso hídrico.
- Distancias a caminos y a carreteras: dentro de los aspectos fisiográficos las distancias de las corrientes a las vías de acceso son parámetros habituales de consideración para localizar un sitio de muestreo. Si un sitio se encuentra muy alejado de una vía, requerirá largos tiempos de desplazamiento. Las carreteras son vías que permiten tener un mejor acceso a un sitio determinado por contar con unas especificaciones técnicas para la circulación de los vehículos, mientras que los caminos son vías no pavimentadas que en algunos casos pueden dificultar la accesibilidad a un lugar establecido.
- Pendiente del terreno: con este criterio se busca eliminar las zonas en la cuenca que sean lógicamente inaccesibles por tener pendientes extremadamente pronunciadas. Los sitios con altas pendientes no favorecen la ubicación de una estación de monitoreo de calidad del agua.
- Índice de calidad ambiental (ICA): este índice se usa como un concepto preliminar para diagnosticar el estado sanitario de las corrientes. El ICA es un índice general, es decir, se basa en el supuesto de que la calidad del agua es un atributo general de los cuerpos de agua, independiente del uso para el cual es destinada. Los parámetros involucrados en el cálculo del ICA son el porcentaje de saturación de oxígeno, coliformes fecales, pH, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fosfatos, temperatura, turbiedad, sólidos disueltos totales. El ICA es un número adimensional entre 1 y 100. Un valor alto es indicativo de una mejor calidad del agua (Hallock, 2001). Para el cálculo de este índice se contó con resultados de las jornadas de caracterización de las corrientes analizadas, llevadas a cabo entre agosto y septiembre de 2009 (Universidad de Antioquia – Corantioquia 2009).
- Orden de la corriente: los órdenes de corrientes de Horton han sido utilizados para el diseño de redes de monitoreo como base para dividir la red de drenaje en subdominios (Moreno et al, 2008). A medida que una corriente tenga más tributarios, su potencial de contaminación será

mayor y por tanto la calificación dada también será mayor.

### Análisis multicriterio

Para realizar la evaluación de los pesos de cada uno de los criterios considerados en el análisis se utilizó el método de comparación por pares de Saaty (Gómez & Barredo, 2006). Mediante una encuesta se consultó, a 8 profesionales expertos en el área ambiental, sobre la valoración dada a cada uno de los criterios mediante la comparación en pares jerarquizados. La escala utilizada se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3. Escala de medida para la comparación entre pares, método de Saaty**

Importancia o preferencia	Valor cardinal
Igual	1
Moderada	3
Fuerte	5
Muy Fuerte	7
Extremadamente fuerte	9

Fuente: (Gómez & Barredo, 2006)

La información obtenida con las encuestas fue procesada siguiendo la metodología propuesta y con ello se obtuvo un listado general de los criterios y sus respectivas valoraciones, para posteriormente ser sometida a un análisis espacial. Después de realizar el procesamiento de las encuestas, se obtuvo la matriz de comparación por pares de factores, según los criterios identificados previamente. Para obtener los pesos definitivos se procedió a realizar el promedio de los pesos de cada uno de los expertos consultados, que se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4. Pesos definitivos de los criterios analizados**

Criterios	Pesos
Índice de calidad ambiental	0.10
Orden de la corriente	0.18
Usos del suelo	0.17
Distancia cabeceras	0.13
Distancia población	0.11
Distancia a caminos	0.07
Distancia a carretera	0.10
Pendiente terreno	0.15

### Desarrollo del modelo espacial

Una vez definidos y valorados los criterios, se procedió a realizar el modelo en el que se combinaron las fuentes de información mediante técnicas de análisis espacial. Inicialmente fue necesario realizar la transformación de las capas temáticas de formato vecto-

rial a formato matricial. Una vez organizada la información, se creó el modelo total en formato matricial. En el procesamiento de información espacial es necesario dividir el espacio en unidades más pequeñas a través de un proceso denominado teselado. La teselación planar se conoce como la partición del espacio en celdas no superpuestas. Desde el punto de vista práctico, la finalidad de la teselación es la de crear registros para contener los datos para el procesamiento computacional y allí almacenar sus atributos (Lee et al, 2000). Para realizar la priorización de los sitios de monitoreo se dividió la red de drenaje en teselas, las cuales se obtuvieron al fraccionar la red de drenaje en segmentos de 500 metros, posteriormente se les realizó un buffer de 15 m, y sobre estas áreas se realizó el análisis.

Las actividades realizadas en el desarrollo del modelo fueron las siguientes:

- Introducción de las capas de información en el modelo espacial.
- Valoración de los atributos de cada capa de información mediante reclasificación: Cada una de las capas temáticas que corresponde a un criterio de análisis fue reclasificada dependiendo de las características que favorecen o impiden la localización de una estación de mo-

nitoreo, siendo 10 el valor dado a la característica más favorable y 1 a la más desfavorable.

- Integración de los criterios en la regla de decisión, donde se incorporan los resultados de la valoración entre criterios a partir de la consulta a expertos.
- Ejecución del modelo espacial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la ejecución del modelo espacial se realizó la priorización de los sitios para realizar el monitoreo de calidad del agua. Como resultado se obtuvo un mapa que muestra la valoración realizada a cada una de las teselas analizadas en función de los criterios considerados, según lo presentado en la figura 3.

Los resultados del modelo de priorización de sitios de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del Río Grande, en las microcuencas analizadas muestran que las valoraciones obtenidas para los sitios de monitoreo se encuentran entre 2.31 y 8.02, siendo los sitios mostrados en rojo los más significativos para realizar los monitoreos y los sitios en azul los que no se consideran prioritarios. Como puede observarse en la figura 3, los sitios con los valores más altos se encuentran en las corrientes principales de las mi-

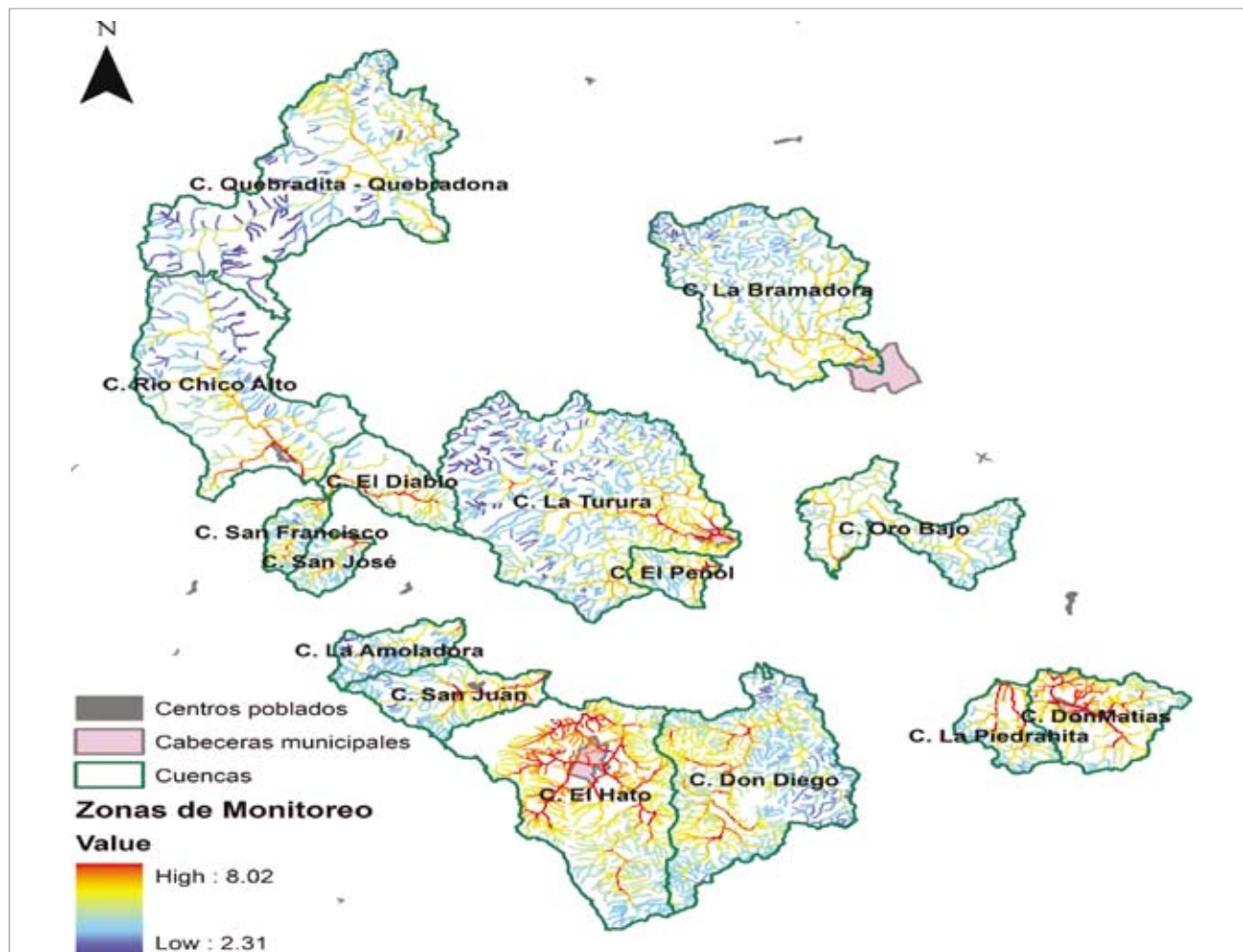


Figura 3. Resultados del modelo de priorización de zonas de monitoreo.

crocuencas, mostrando esto la importancia que tiene realizar seguimiento de la calidad del agua a las corrientes que tienen un mayor número de tributarios por el potencial de contaminación que pueden tener. Con el fin de realizar un análisis más detallado, se realizó una reclasificación de los resultados del para cuantificar el porcentaje de teselas que obtuvieron determinada valoración, en una escala de 1 a 10, siendo 1 las teselas que obtuvieron la calificación más baja y 10 las que presentaron los valores más altos, según lo presentado en la tabla 5. La distribución relativa de las teselas se presenta en la figura 4.

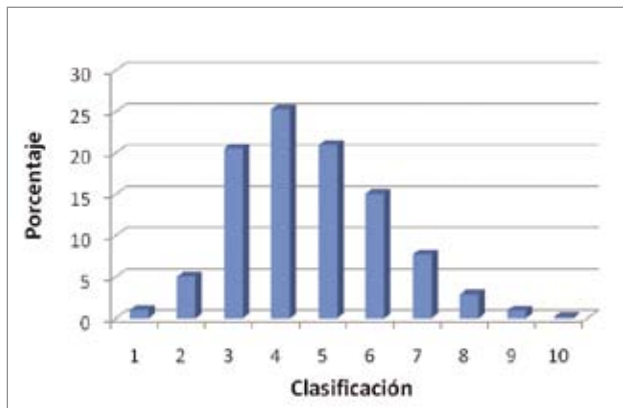


Figura 4. Distribución relativa de las teselas según su valoración

Tabla 5. Reclasificación de los resultados del modelo

Valoración		Clasificación	Porcentaje
Límite inferior	Límite superior		
2.31	2.88	1	1.03
2.88	3.45	2	5.07
3.45	4.02	3	20.60
4.02	4.59	4	25.33
4.59	5.17	5	20.97
5.17	5.74	6	15.11
5.74	6.31	7	7.75
6.31	6.88	8	2.93
6.88	7.45	9	0.97
7.45	8.02	10	0.22
Total			100

A partir de los resultados anteriores, correspondientes a los datos de salida del modelo, se puede identificar que la mayor parte de las teselas obtuvo una calificación intermedia, lo que implica que en estos sitios no es prioritario realizar un seguimiento y control de la calidad del agua. Por otro lado, las teselas con una calificación alta corresponden al 0.22% del total, mostrando el buen desempeño del modelo al destacar las zonas prioritarias para realizar monitoreo del recurso hídrico. Estas teselas con la mayor

calificación deben ser objeto de medición por la combinación de factores que deterioran la calidad del agua. A nivel de identificación de los sitios preferenciales para la ubicación de estaciones de monitoreo de calidad del agua, es de esperar que los lugares con mayor prioridad correspondan a un porcentaje bajo, debido al carácter agregado de muchos de los procesos contaminantes de la cuenca.

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto “Formulación del plan de ordenación del recurso hídrico y diseño de un programa de monitoreo y seguimiento a la calidad de cuerpos hídricos en las cuencas de influencia del sector eléctrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná”, PORH, desarrollado por el Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA) de la Universidad de Antioquia para la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Corantioquia. Para validar los resultados arrojados por el modelo, se realizó una comparación de los resultados obtenidos con una red de monitoreo propuesta en el proyecto del PORH. Esta red propuesta fue planteada por los profesionales del proyecto, teniendo en cuenta los cuerpos de agua que sirven actualmente como fuentes abastecedoras de agua potable para los principales centros poblados, los cuerpos de agua receptores de vertimientos puntuales de aguas residuales provenientes de las cabeceras municipales, centros poblados y actividades industriales más importantes, corrientes de agua que tienen registradas dentro de la base de datos, de Corantioquia, concesiones de caudales superiores a 10 L/s, y que abastecen actividades económicas que podrían impactar la cantidad o calidad del recurso hídrico, tales como: industria, agricultura, minería y acuicultura, los cuerpos de agua asociadas a áreas donde la actividad económica que se desarrolla pudiera representar una carga contaminante difusa que afecte la calidad del agua de fuentes desde las cuales se abastece una población y proyección de nuevos usos del agua, según solicitudes en curso ante la autoridad ambiental (Universidad de Antioquia – Corantioquia, 2009). Finalmente, se realizó la calificación de la red de monitoreo propuesta en el marco del proyecto del PORH, a partir de la asignación de los valores generados por el modelo de priorización de zonas de monitoreo implementado en este trabajo, a cada uno de los puntos de la red, se utilizó para ello la estadística zonal y se evaluó la prioridad de realizar seguimiento de la calidad del agua, como se observa en la figura 5.

Según lo observado en la Figura 5, en las cuencas de las quebradas el Hato y Don Matías se encontraron los sitios con la mayor calificación, es decir que en las estaciones propuestas son consideradas de alta prioridad por los impactos que se generan sobre el recurso hídrico, además que, desde el punto de vista logístico, cuentan con buenas condiciones de accesibilidad (por la pendiente del terreno y la cercanía de vías de acceso al sitio). En segundo lugar de prioridad se encontraron estaciones ubicadas en las

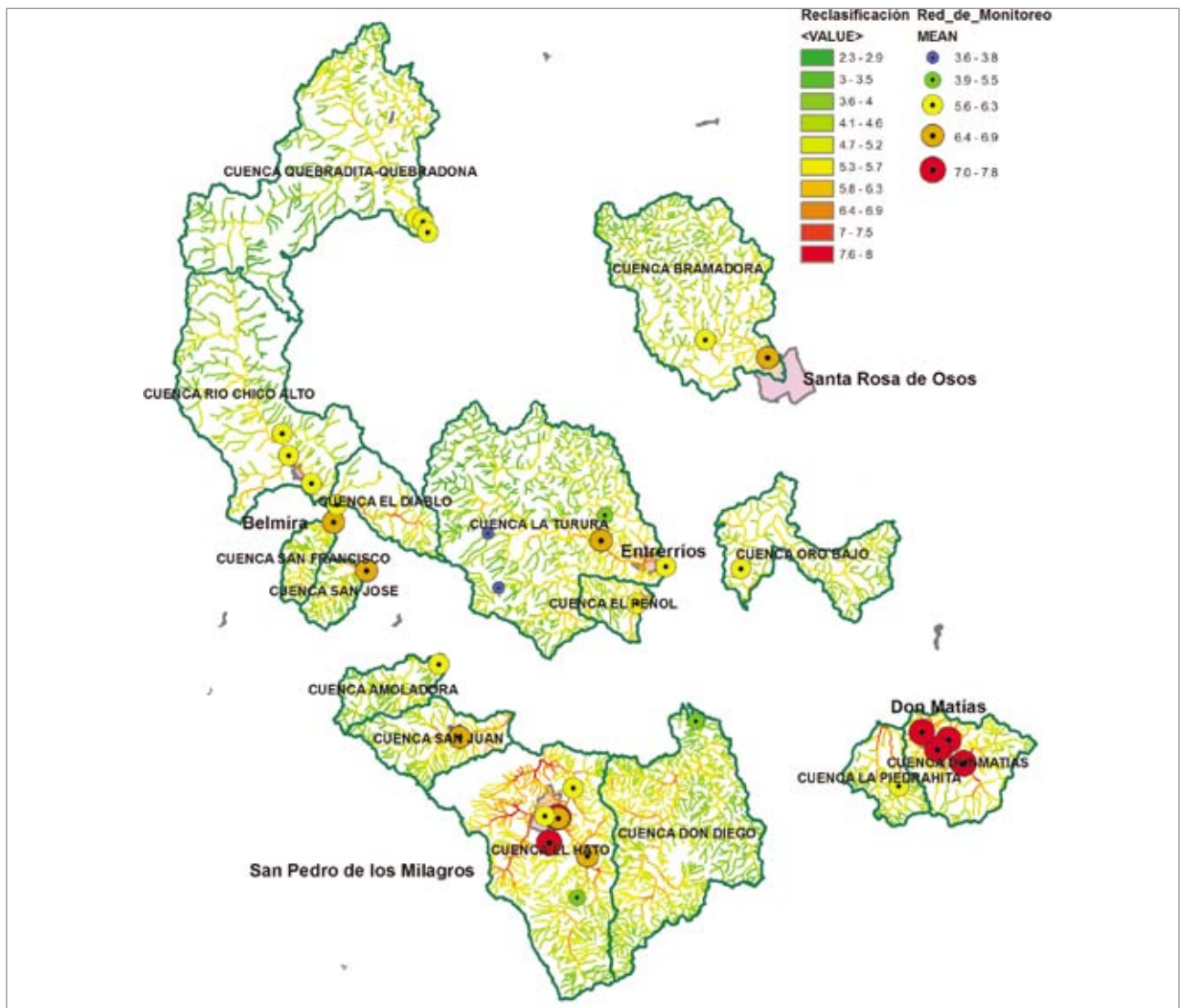


Figura 5. Calificación de la red de monitoreo propuesta en el proyecto del PORH utilizando la información del modelo espacial

cuencas de las quebradas San Juan, la Turura, San José, San Francisco, el Hato y Santa Rosa de Osos, con una calificación significativa. A las estaciones de monitoreo anteriormente descritas es necesario realizarles un seguimiento riguroso y permanente, con el fin de vigilar la calidad de la corriente y recopilar información que permita tener elementos de juicio que ayuden a la toma de decisiones relacionadas con la gestión del recurso hídrico.

Los puntos restantes reflejaron una prioridad de media a baja según los criterios analizados, con calificaciones entre 3.6 y 5.5. Estos puntos, aunque presentan prioridad media y baja, son de interés ya que en muchos de los casos son los sitios de control para determinar la calidad del agua a la salida de la cuenca. En otros casos se encuentran en la parte alta de las cuencas, indicando los sitios en los que posiblemente se encuentran las bocatomas de los acueductos o alguna captación importante. Para estos sitios es necesario realizar un seguimiento, aunque no tan exhaustivo, con el fin de determinar las tendencias

de calidad del recurso hídrico y mantener el control que permita el cumplimiento de los estándares de calidad propuestos por la autoridad ambiental.

## CONCLUSIONES

Con el desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas para el análisis, la toma de decisiones cuenta con nuevas herramientas que permiten abordar la solución de problemas relacionados con la gestión del recurso hídrico. La implementación de la metodología para el diseño y evaluación de redes de monitoreo de calidad del agua descrita en este trabajo a partir de la utilización de herramientas SIG es una alternativa que puede ser empleada por las autoridades ambientales ya que es de fácil uso e involucra información que puede estar disponible, además de servir como complemento al criterio de expertos con base en la información disponible de la zona de estudio.

La definición de criterios de priorización y sus respectivas valoraciones son la base de la metodología

empleada. Es de gran importancia realizar el análisis con un amplio número de criterios con el fin de involucrar la mayor parte de las variables que tienen influencia sobre la calidad del recurso hídrico. En el modelo desarrollado se omitieron algunos criterios relevantes debido a que no fue posible contar con información relacionada con la localización de vertimientos puntuales y concesiones superficiales.

A pesar de las dificultades asociadas con la información deseada para desarrollar el modelo, la aplicación realizada permite identificar los sitios críticos a partir de diferentes criterios relacionados con aspectos fisiográficos, socioeconómicos y ambientales. Adicionalmente, el modelo tiene en cuenta las condiciones de accesibilidad, que en muchos casos se constituye en una limitante de tipo logístico para realizar monitoreo de calidad de agua.

La metodología de análisis multicriterio para la obtención de los pesos es flexible y permite su utilización en otras cuencas, dependiendo de la información que se encuentre disponible, el grado de detalle y el nivel de actualización de la misma. En la medida que la información sea más detallada, los resultados del modelo serán mucho mejores ya que la delimitación de las zonas potenciales para realizar monitoreo de la calidad será más precisa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a Corantioquia y a todo el equipo de trabajo del proyecto "Formulación del plan de ordenación del recurso hídrico y diseño de un programa de monitoreo y seguimiento a la calidad de cuerpos hídricos en las cuencas de influencia del sector eléctrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná".

## REFERENCIAS

Corantioquia - Ecosistemas. 2005. Plan de ordenación y manejo de las cuencas de los Ríos Grande y Chico incluido todo su sistema de drenaje, hasta su desembocadura en el Río Porce, jurisdicción de los

municipios de Don Matías, Entreríos, San Pedro de los Milagros, Belmira y Santa Rosa. Medellín.

Gómez, M., & Barredo, J. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio. Alfaomega. México. 279p.

Hallock, D. 2001. A Water Quality Index for Ecology's Stream Monitoring Program. Washington: Washington State Department of Ecology. Environmental Assessment Program. 23p.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 1996. Diccionario Geográfico de Colombia. Tomo 1. IGAC. Bogotá. 638 p.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC S.F. Planchas: 115-VI-C, 130-II-A, 130-I-B, 130-II-C, 130-I-D, 131-I-B, 131-III-B, 131-III-d, 147-I-B, 131-II-C, 131-IV-A, 131-IV-C.

Lee, Y., Li, Z., & Li, Y. 2000. Taxonomy of space tessellation. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 55:139-149.

Mendoza, G., & Martins, H. 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 230: 1-22.

Moreno T, A., Toro B, M., y Carvajal, L. 2008. Revisión de criterios y metodologías de diseño de redes para el monitoreo de la calidad del agua en ríos. *Avances en Recursos Hidráulicos* 18: 57-68.

Saloranta, T. 2006. Highlighting the model code selection and application process in policy-relevant water quality modeling. *Ecological modelling* 194 1-3: 316-327.

Universidad de Antioquia – Corantioquia. 2009. Formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná. Medellín.

Vieux, B., & Farajalla, N. 1994. Capturing the essential spatial variability in distributed hydrological modelling: Hydraulic roughness. *Hydrological Processes* 83: 221-236.