

# FORMULACIÓN DE UN ANÁLISIS MULTIOBJETIVO PARA LA TOMA DE DECISIONES AMBIENTALES EN ANDES COLOMBIANOS

## FORMULATION OF MULTIOBJECTIVE ANALYSIS FOR ENVIRONMENTAL DECISION-MAKING PROCESS IN COLOMBIAN ANDES

JORGE ANDRES POLANCO

*Doctor en Socioeconomía del desarrollo, Profesor Universidad de Antioquia, japolanco@economicas.udea.edu.co*

Recibido para revisar febrero 28 de 2008, aceptado junio 18 de 2008, versión final agosto 4 de 2008

**RESUMEN:** En el caso del Sistema de Páramos Alto-Andinos de Antioquia, la toma de decisiones ambientales es esencialmente un problema de asignación de recursos financieros para la protección del bosque. En este texto, se formula el análisis mutiojetivo de este problema con el ánimo de fijar pautas metodológicas para su solución. Para este efecto, primero se proponen criterios de análisis según observaciones de campo y gracias a un marco teórico de Ciencias Sociales. Luego, se estudian sus correlaciones y se identifican dos objetivos de análisis. Los resultados sugieren que coeficientes de correlación del orden de 0.6 pueden ser aceptados para representar el fenómeno social estudiado. La formulación de este método exige pues conocer la realidad de campo dentro de un marco teórico flexible y escoger criterios de análisis teniendo en cuenta su comportamiento estadístico de conjunto.

**PALABRAS CLAVE:** Estadística multivariada, Medio Ambiente, Desarrollo, Andes colombianos.

**ABSTRACT:** Conservation efforts aimed at preserving forest resources in the High-Andean Páramo System of the Antioquia Department is part of a decision-making process fundamentally determined by allocation of financial resources. In this article I attempt to define a methodology to tackle this problem by undertaking a multiobjective analysis. Firstly, I propose specific criteria for analyzing spatial phenomena according to both field observations and Social Science theory. Subsequently I study correlation of such criteria in order to define the two objectives for analysis. Results suggest that correlation coefficients equal or greater than 0.6 are acceptable to represent the studied social phenomena. The methodology here proposed requires understanding the actual social phenomena under scrutiny within a flexible theoretical framework and to select analysis criteria that takes into account its statistical behaviour as a whole.

**KEY WORDS:** Multivariate statistic, Environment, Development, Colombian Andes.

### 1. INTRODUCCION

El Sistema de Páramos Alto-Andinos de Antioquia (SPANA) es una área protegida situada en los Andes colombianos, aproximadamente a 60 kilómetros al noroeste de la ciudad de Medellín (Figura 1). El SPANA es un medio ambiente biodiverso en flora y fauna, pero frágil ante las presiones

antrópicas sobre sus recursos naturales renovables. La perennidad del bosque allí existente, considerado éste como factor esencial en el mantenimiento del equilibrio hidrológico, está en peligro básicamente por dos razones. La primera se refiere a la deforestación engendrada por el desenvolvimiento de actividades agropecuarias. La segunda tiene que ver con

esfuerzos limitados para su protección, principalmente en términos de recursos. En la búsqueda de asegurar dicha perennidad, la asignación de recursos financieros es parte esencial de la toma de decisiones ambientales. Se trata de un problema en el cual deben considerarse varios criterios simultáneamente, que al menos estén en relación con las especificidades de la explotación y protección del bosque. Este estudio asocia, por una parte, la explotación del bosque con el desarrollo socioeconómico basado sobre la producción lechera y, por otra parte, la protección con la movilización de recursos financieros y humanos del sector público [1].

Es necesario además que los criterios escogidos puedan relacionarse entre sí para representar cada uno de estos fenómenos regionales y conocer así las características del problema de perennidad, inherentes a la toma de decisiones. Es decir, conocer el nivel de impacto ambiental de las actividades agropecuarias y el nivel de movilización de recursos en los municipios del SPANA, para

que puedan asignárseles nuevos recursos proporcionalmente a los desequilibrios que tuvieran lugar entre ellos. Estas entidades territoriales son: Sabanalarga, Liborina, Olaya, Sopetrán, San Jerónimo, San Pedro de los Milagros, Entreríos, Belmira, San José de la Montaña y San Andrés de Cuerquia.

En este texto se discute la formulación de un análisis multiobjetivo como un modo de aproximación a la solución del problema de asignación de recursos financieros. Este análisis se estructura con el ánimo de fijar pautas metodológicas en la toma de decisiones ambientales. Primero, se especifica la información primaria y secundaria, así como los métodos y criterios adoptados en el análisis. Estos criterios se proponen teniendo en cuenta la realidad observada en campo y los métodos. Finalmente, se determinan los objetivos del análisis estudiando la correlación de dichos criterios, se discuten los resultados y se proponen algunas consideraciones útiles toda vez que se adopte este tipo de estudios.

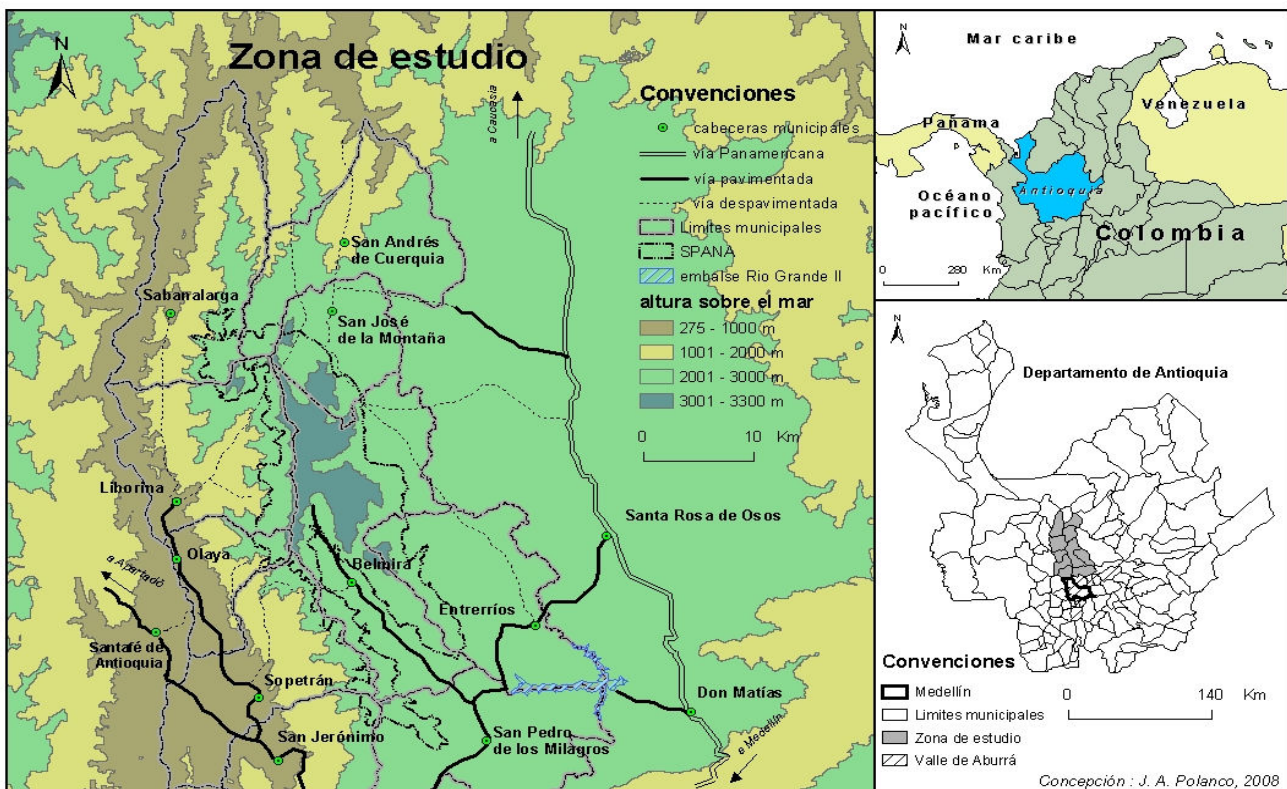


Figura 1. Zona de estudio

Figure 1. Study zone

## 2. DATOS, MÉTODOS Y CRITERIOS DE ANALISIS

La toma de decisiones relacionada con la asignación de recursos financieros para la protección del bosque del SPANA, no es un simple problema multicriterio en el cual los criterios son independientes. Es más bien un problema multiobjetivo, ya que existen relaciones entre criterios que definen los objetivos del análisis [2]. Se trata de dos objetivos. El primer objetivo es jerarquizar los municipios teniendo en cuenta criterios de desarrollo socioeconómico y, el segundo, jerarquizarlos considerando criterios de protección ambiental. La base de datos del análisis es una tabla de tipo variable-individuo, donde las filas (individuos) son los municipios y las columnas (variables) son los criterios. Estos criterios son construidos con la información primaria y secundaria presentada en la tabla 1, como se verá más adelante.

El análisis factorial en componentes principales (ACP) y la clasificación jerárquica de Ward son los dos métodos complementarios utilizados para estudiar las relaciones entre criterios que definen los objetivos. La clasificación ayuda a completar y a matizar los resultados salidos del análisis factorial. El ACP sintetiza la representación de los datos

proyectándolos en espacios de menor dimensión, pero esta visión de conjunto de la información es difícil de interpretar más allá del plano principal. La clasificación jerárquica va a completar el análisis ACP teniendo en cuenta todos los criterios.

La jerarquización de los municipios se hace entonces por objetivo, es decir que se necesita escoger los criterios que definen un objetivo en particular. Los criterios y los objetivos tienen una relación de reciprocidad: la escogencia de criterios depende de sus correlaciones, que definen a su vez los objetivos. Es por esto que su identificación exige un proceso iterativo en el cual se proponen los criterios y, enseguida, se estudian sus correlaciones para determinar los objetivos según el interés del estudio. Los criterios son variables espacializadas y contextuales que ayudan a la formación de gradientes y organizaciones espaciales, como operadores para establecer una visión de conjunto [3]. De una parte, gracias a los gradientes, los municipios pueden ser comparados teniendo en cuenta un criterio en particular. De otra parte, la puesta en común de varios criterios en el espacio de los municipios, determina la organización espacial de éstos. La proposición de criterios tiene en cuenta estos operadores a fin de establecer mejor la relación entre el desarrollo socioeconómico y la protección ambiental.

**Tabla 1** Información utilizada en el análisis multiobjetivo

**Table 1** Information used in multiobjective analysis

<i>Tipo de información</i>	<i>Descripción</i>
1. Imágenes del satélite Landsat 7 (ETM+)	Imágenes ETM+ path-row (9-55) de octubre 14 de 2002 y de febrero 3 de 2003
2. Mapa oficial de usos del suelo del departamento de Antioquia, 1989	Mapa digitalizado sobre la base de cartografía básica a escala 1/100.000. Coberturas del suelo obtenidas de fotografías aéreas.
3. Censos oficiales de población a nivel municipal, 1993 y 2005	Población y densidad de población; tasa de crecimiento de la población rural; Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)
4. Encuesta gubernamental "Medio ambiente y calidad de vida en los municipios"	Información sobre el estado de los recursos naturales renovables y la calidad de la gestión ambiental
5. Diagnósticos e indicadores territoriales	Investigaciones aplicadas sobre el estado de los recursos naturales renovables, la gestión ambiental y la calidad de vida de la población. Indicadores de la presión antrópica sobre dichos recursos.
6. Modelos teóricos	Modelo de economía monocéntrica, bajo hipótesis de competencia imperfecta. Modelo de gobierno en el marco de la gobernanza.

## 2.1 Representación del desarrollo socioeconómico

Teniendo en cuenta el modelo clásico de von Thünen, visto por Fujita *et al* [4], los grupos de criterios propuestos para analizar el desarrollo socioeconómico son la “dinámica del bosque”, la “demografía” y el “impacto de la fuerza centrípeta” de Medellín sobre los municipios agropecuarios. Se estudian los criterios de “dinámica del bosque” entre 1989 y 2003 por medio de la teledetección de imágenes Landsat, mientras que los de “demografía” provienen de los censos oficiales de población de 1993 y 2005. Estos dos grupos de criterios representan la frontera agropecuaria, considerando que el número (criterio *densidad de población*) y el crecimiento (criterio *tasa de crecimiento de la población rural*) de habitantes, inducen una “presión de la población sobre el bosque” [5]. Se asume igualmente que la dinámica de la frontera agropecuaria se explicaría por el “impacto de la fuerza centrípeta” de Medellín: la frontera agropecuaria avanzaría aún más hacia el bosque si la tierra es rentable, es decir cerca a dicha ciudad.

Se escogen los criterios *pobreza* y *distancia* para representar el “impacto de la fuerza centrípeta”, el primero porque indica la “riqueza” producida por las actividades agropecuarias y, el segundo, porque indica cuánto la tierra está lejos de Medellín. Gracias a la disponibilidad de información a escala municipal para los dos años de censo señalados y teniendo en cuenta los trabajos de Schuschny y Gallopín [6] y de Sánchez y Nuñez (1999), estos últimos citados por Moncayo Jiménez [7], se adopta el indicador NBI (Necesidades Básicas Insatisfechas) como criterio de *pobreza*. Luego, se calcula el tiempo de recorrido entre las cabeceras municipales y la ciudad de Medellín, adoptándolo como criterio de *distancia*.

### 2.1.1 Dinámica del bosque y demografía

La *deforestación* y la *reforestación* son los criterios considerados para la “dinámica del bosque”; la *población*, la *densidad de población* y la *tasa de crecimiento de la*

*población rural* son los que se consideran para la “demografía” municipal. Los criterios *población* y *densidad de población* están referenciados a los censos de población de 1993 y 2005, y el criterio *tasa de crecimiento de la población rural* a los períodos entre los censos de 1985, 1993 y 2005. La “presión de la población sobre el bosque” está medida a escala municipal y se obtiene de la correlación entre la densidad de población, el porcentaje de superficie en bosque y la tasa de crecimiento de la población rural. Se ha adaptado esta presión, sin tener en cuenta el porcentaje de superficie en bosque en todo el municipio, pero considerando ya sea la *deforestación* o el *índice local de deforestación* en el espacio municipal relacionado con el SPANA. De otro lado, se ha considerado la *reforestación* y el *índice local de reforestación* en este mismo espacio, en la búsqueda de una correlación negativa con los criterios demográficos mencionados. Estos índices se obtienen relacionando las superficies en *deforestación* o *reforestación* de un municipio dentro del SPANA, con la superficie total de dicho municipio dentro del mismo Sistema. Son por consiguiente adimensionales. La frontera agropecuaria así representada, puede estar entonces relacionada con el “impacto de la fuerza centrípeta” de Medellín considerando el efecto de la rentabilidad de la tierra.

### 2.1.2 Impacto de la fuerza centrípeta de Medellín

Los criterios del grupo “impacto de la fuerza centrípeta” ejercida por Medellín sobre los diez municipios rurales, son *distancia* y *pobreza*. El criterio *distancia* está determinado por las horas de viaje entre las cabeceras municipales de los municipios rurales y la ciudad de Medellín, mientras que el de *pobreza* está definido por el indicador sintético de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI). Vista en una economía monocéntrica, la relación entre los diez municipios agrícolas y Medellín (centro manufacturero) está influenciada por una fuerza centrípeta que se manifiesta por la renta de la tierra agrícola. En la medida en que la tierra se aleja de Medellín, su renta disminuye: se atribuye la disminución de la

renta al transporte de mercancías. De este hecho, se adopta la *distancia* como criterio para estimar el efecto del transporte, y la *pobreza* como criterio para estimar el efecto de la pérdida de ingresos. El “impacto de la fuerza centrípeta” puede ser entonces un indicador de la relación socioeconómica entre los municipios rurales y la ciudad de Medellín en términos del desenvolvimiento de las actividades agropecuarias.

El inconveniente de esta última simplificación es que el indicador NBI es más un instrumento de caracterización que de medida de la pobreza [8]: no mide los ingresos de los hogares. Sin embargo, este indicador estima directamente el nivel de satisfacción de las necesidades de base que los hogares pueden esperar gracias al ingreso. La satisfacción de las necesidades domésticas se estima con la ayuda de un censo

de los bienes y servicios disponibles, considerando un “mínimo” necesario fijado según la generalización del estándar de vida colombiano. La ventaja cuando se utiliza el NBI es, de una parte, la disponibilidad de la información a la escala municipal, distinguiendo los habitantes al interior (población urbana) y al exterior (población rural) de la cabecera municipal y, de otra parte, la estimación de la satisfacción de cuatro necesidades básicas de los hogares (Tabla 2): alojamiento, servicios públicos, educación y dependencia económica. Los hogares son considerados “pobres” si al menos una de estas necesidades básicas no está satisfecha. El gradiente definido por este indicador permite considerar un municipio como más “pobre” o más “rico” que los otros, ya sea al interior o exterior de la cabecera municipal, o de las dos.

**Tabla 2** Indicador de necesidades básicas insatisfechas (NBI) en Colombia  
**Table 2** Index of unsatisfied basic needs for Colombia

Necesidad de base	Parámetros	Estandar de vida “mínimo”	
		Urbano	Rural
Acceso al alojamiento	Alojamiento inadecuado  Hacinamiento	Sin alojamiento fijo o alojamiento fabricado con materiales perecederos, piso de tierra. Más de tres personas por habitación.	Sin alojamiento fijo o fabricado con materiales perecederos, piso de tierra. Más de tres personas por habitación.
Acceso a los servicios públicos	Agua potable y alcantarillado	Agua corriente o alcantarillado no disponibles	Agua corriente y alcantarillado no disponibles
Acceso a la educación	Escolarización de los hijos	Al menos un hijo (entre 7 y 11 años) no está escolarizado.	Al menos un hijo (entre los 7 y 11 años) no está escolarizado.
Capacidad económica	Dependencia económica	Más de tres personas por miembro activo, los cuales tienen escolaridades que no sobrepasan los dos años de la escuela primaria.	Más de tres personas por miembro activo, los cuales tienen una formación que no sobrepasa los dos años de la escuela primaria.

Fuentes: [8] y [9]

El criterio de *distancia* está calculado en dos fases, teniendo en cuenta la duración del desplazamiento (T) entre las cabeceras municipales y la ciudad de Medellín. Estas dos fases se diferencian por la consideración del túnel de Occidente en los cálculos de la *distancia*. La reducción del tiempo de desplazamiento es de una hora en promedio, teniendo en cuenta el túnel. El gradiente definido por este criterio permite estimar los municipios más o menos alejados de Medellín

antes (T<sub>1</sub>) y después (T<sub>2</sub>) de su puesta en funcionamiento. Es decir que los criterios de distancia T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> son utilizados en forma separada, a fin de estudiar el impacto local del desarrollo socioeconómico inducido por el túnel [10]. Frente a este desarrollo influenciado por la aglomeración de Medellín, la asignación de recursos financieros debe considerar entonces el esfuerzo de protección ambiental para mitigar desequilibrios regionales.

## 2.2 Representación de la protección ambiental

La *inversión pública descentralizada*, la *inversión ambiental municipal*, y la *gestión ambiental municipal* son tres criterios que determinan los esfuerzos del gobierno local en la protección del SPANA. Se considera en efecto que estos criterios pueden ser un “resultado” de la coordinación entre actores del gobierno local en los procesos de gobernanza de este ecosistema estratégico [1]. El criterio *inversión pública descentralizada* (IPD) se refiere a los recursos financieros movilizados por Corantioquia, y el de *inversión municipal ambiental* (IME) concierne aquellos movilizados por los mismos municipios. El criterio *gestión ambiental municipal* (GEM) se refiere a las acciones realizadas por esta entidad territorial con el objetivo de fortalecerse institucionalmente, de formular y de realizar proyectos destinados a la protección ambiental.

En lo relativo al criterio IPD, la fuente estudiada de los recursos movilizados se refiere principalmente a las transferencias del sector eléctrico (impuestos sobre el agua) realizadas entre 1995 y 1999. En esta elección, se plantean dos hipótesis en cuanto a la asignación de los recursos financieros. De un lado, esta asignación puede ser un indicador del prisma institucional de Corantioquia, en cuanto a los proyectos financiados en los municipios para la protección ambiental. De otro lado, esta asignación puede ser considerada como un indicador de la redistribución de recursos en los municipios, habiendo considerado las disparidades regionales en términos del desarrollo hidroeléctrico. Este criterio está determinado asumiendo además que Corantioquia es una institución pública descentralizada que realiza una mediación entre los niveles nacional y local del Estado.

El criterio IME, se refiere a las inversiones totales efectuadas sobre la gestión ambiental municipal y la protección del bosque entre 2000 y 2006. Este criterio es escogido para evidenciar la voluntad municipal e intermunicipal de protección ambiental, particularmente en el caso del SPANA. Los

gradientes obtenidos de los criterios de inversiones, ayudan a determinar las diferencias regionales en términos de esfuerzos de protección.

El criterio GEM se ha escogido con el propósito de buscar correlación con los criterios de protección precedentes. Se construye este criterio a partir de un juicio cualitativo. La estimación del GEM es un trabajo de identificación y de caracterización de varios parámetros en función de la información disponible. Se han analizado varias fuentes de información secundaria a fin de crear éstos parámetros. La primera fuente es la encuesta gubernamental “Medio ambiente y calidad de vida en los municipios”, realizada por la Contraloría General de Antioquia [11]. Esta encuesta proporciona unos datos sobre la génesis institucional y los procedimientos de gestión ambiental municipal. La segunda fuente de información es la lista de inversiones de Corantioquia entre 1995 y 1999, con recursos de las transferencias del sector eléctrico. Esta lista proporciona datos sobre el tipo de proyecto financiado y el monto de los recursos financieros movilizados por municipio. Las últimas fuentes de información son diagnósticos regionales obtenidos gracias a las investigaciones universitarias realizadas por Gutiérrez *et al* [12] y Delgado Gómez *et al* [13]. Los datos recolectados de estas investigaciones son complementarios a los obtenidos de las encuestas gubernamentales mencionadas.

El criterio GEM es espacio-temporal. La dimensión espacial está definida por su distribución en el espacio geográfico de los municipios, y su dimensión temporal está definida por el cambio en los datos obtenidos de las encuestas gubernamentales entre 2000 y 2004. Los datos obtenidos de la lista de inversiones de Corantioquia y de las investigaciones universitarias, se suponen constantes entre 2000 y 2004. Se proponen así los siguientes parámetros:

- “Oficina”: disponibilidad de un equipo de la administración municipal especializado en medio ambiente (diferente de la UMATA);

- “Gobierno”: participación de la “Oficina” o de la UMATA en el Consejo de gobierno municipal;
- “Objetivo”: existencia de propósitos “claros” en términos de protección del bosque, teniendo en cuenta el desarrollo económico (turismo y agricultura);
- “Políticas”: existencia de acciones precisas del gobierno municipal sobre el tema de la reforestación;
- “Instrumentos”: fuera del Plan de Desarrollo Municipal (PDM) y del Plan de Ordenamiento Territorial Municipal (POTM), disponibilidad de Plan Ambiental Municipal (PAM);
- “Formación”: desarrollo de programas de formación de funcionarios financiado por Corantioquia entre 1995 y 1999;
- “Proyecto 1”: existencia de proyectos ejecutados entre 1995 y 1999 sobre el programa Áreas protegidas (SPAN), financiados por Corantioquia;
- “Proyecto 2”: existencia de proyectos de protección de las cuencas hidrográficas tributarias de los acueductos municipales, financiados por los municipios;
- “Proyecto 3”: existencia de proyectos de reforestación financiados por los municipios.

Estos parámetros son codificados así: cero (0) para las respuestas negativas y uno (1) para las afirmativas. En ausencia de información se adopta una respuesta negativa, tomando un valor cero (0) para el cálculo. Esta última consideración es conservadora en la medida en que la ausencia de información no es solamente consecuencia de una omisión por parte de los municipios, sino también de la imposibilidad de proporcionarla. La GEM es calculada para cada municipio y es igual a la suma de todos los parámetros en 2000 y 2004. Esta notación es jerárquica y determina el gradiente o variación de este criterio: en la medida en que la notación es más elevada, la GEM se considera más eficiente; al contrario, cuanto más baja sea ella, la GEM se interpreta más deficiente.

Así pues, los criterios se relacionan entre sí con el propósito de representar, por una parte, el desarrollo socioeconómico teniendo en

cuenta aquellos sobre “dinámica del bosque”, “demografía” e “impacto de la fuerza centrípeta”. De otra parte, los criterios se asocian entre ellos para representar la protección ambiental, con la ayuda de aquellos que tienen que ver con el “esfuerzo” de protección. Las relaciones entre los criterios definen entonces los objetivos del análisis.

### 3. RESULTADOS

Los resultados corresponden a la determinación de los objetivos. Estos objetivos están definidos por relaciones estadísticas entre los criterios. El análisis factorial en componentes principales (ACP) y la clasificación jerárquica de Ward son los dos métodos complementarios utilizados para estudiar estas relaciones. Se trata de dos aproximaciones a la formulación de objetivos.

#### 3.1 Primera aproximación: el plano factorial principal

La correlación lineal entre los criterios del análisis está representada por la matriz de correlaciones. Su lectura nos da una primera idea de las relaciones entre estos criterios (variables). En el ACP, el porcentaje de varianza de un factor define su poder explicativo de la información considerada. Pero la apreciación de este porcentaje de varianza debe tener en cuenta el número de variables: 10% de varianza puede ser considerado débil para un factor si la tabla posee 10 variables en promedio, e importante si la tabla tiene 100 [14]. Este estudio cuenta con 24 variables, por lo tanto se acepta el poder explicativo de los factores que se concentra principalmente sobre el plano factorial principal: 55.8% de la información está resumida por los dos primeros ejes factoriales.

Las coordenadas de los criterios de análisis sobre los ejes factoriales traducen las relaciones de estos criterios con cada factor: los criterios “fuertemente” correlacionados contribuyen a la definición de los ejes factoriales. La lectura del plano factorial principal se hace por tanto teniendo en cuenta

criterios fuertemente correlacionados. Se observa en este estudio una correlación fuerte entre un criterio y un factor en la medida en que la coordenada del criterio sobre el eje factorial sea superior a 0.6 o inferior a -0.6. Los criterios en los cuales la coordenada sobre un eje factorial es positiva y superior a 0.6 pueden estar ligados entre ellos, de la misma manera que los criterios en los cuales esta coordenada sobre este eje factorial es negativa e inferior a -0.6. Estas dos familias de criterios se oponen sobre el mismo eje. Las correlaciones entre criterios según los dos primeros ejes factoriales son las siguientes (Figura 2):

- Factor 1. Criterios cuya coordenada es positiva y superior a 0.6: *densidad de población* ( $dp_1$  y  $dp_2$ ), *población municipal total* ( $pop_1$  y  $pop_2$ ), *índice local de deforestación* ( $ild_2$ ) e *inversión municipal ambiental* ( $ime$ ). Criterios cuya coordenada es negativa e inferior a -0.6: *necesidades básicas insatisfechas* ( $nbi_2$ ) y *distancia* ( $t_1$  y  $t_2$ );
- Factor 2. Criterio cuya coordenada es positiva y superior a 0.6: *necesidades básicas insatisfechas* ( $nbi_1$  y  $nbi_3$ ). Criterios cuya coordenada es negativa e inferior a -0.6: *deforestación* ( $deb_1$  y  $deb_2$ ) y *reforestación* ( $reb_1$  y  $reb_2$ ).

El primer eje factorial opone los criterios de “demografía” (*densidad de población* –DP- y *población total* –POP-) y de “dinámica del bosque” (*índice local de deforestación* –ILD-), a los criterios de “impacto de la fuerza centrípeta” (*pobreza* –NBI- y *distancia* –T-). En otros términos, los criterios de “demografía” son correlacionados positivamente con el de la “dinámica del bosque”, y los criterios de “impacto de la fuerza centrípeta” son correlacionados positivamente entre ellos. Pero estos dos grupos de criterios de análisis (ILD-DP-POP y NBI-T) tienen una correlación negativa entre ellos. El segundo eje factorial opone los criterios de *deforestación* (o *reforestación*) a los criterios de *pobreza*. Es decir que estos últimos criterios tienen una correlación negativa entre sí.

Estas correlaciones permanecen sin embargo poco definidas puesto que algunas son débiles y otros criterios no han podido ser correlacionados, como por ejemplo los criterios de *tasa de crecimiento de la población rural* y la *gestión ambiental municipal*. La clasificación jerárquica (de tipo Ward) de todos los criterios puede en efecto contribuir a evidenciar las correlaciones buscadas.

### 3.2 Segunda aproximación: clasificación jerárquica de los criterios

Este método procede a la agregación de los criterios sobre el principio de la varianza mínima. El resultado está presentado bajo la forma de un árbol jerárquico (agregación progresiva de los elementos), en el cual la lectura se hace en el orden de las distancias crecientes. Los criterios de análisis (variables) se reagrupan dos a dos en cada etapa del proceso, y un coeficiente de “distancia” (índice de nivel) permite estimar el momento del reagrupamiento. Mientras más rápido se reagrupen dos variables (índice de nivel bajo), ellas estarán más correlacionadas (Figura 3).

El proceso de reagrupamiento es analizado visualmente sobre el árbol jerárquico en dos fases. En un principio, algunas variables se reagrupan en ocho clases en las cuales la varianza es mínima y otras permanecen aisladas:

- Clase 1: *deforestación* (DEB1 y DEB2) y *reforestación* (REB1 y REB2);
- Clase 2: *inversión municipal ambiental* (IME) e *inversión pública descentralizada* (IPD).
- Clase 3: *población total* (POP1) y POP2) y *densidad de población* (DP1 y DP2);
- Clase 4: *índice local de deforestación* (ILD1 e ILD2);
- Clase 5: *gestión ambiental municipal* (GEM1 y GEM2);
- Clase 6: *necesidades básicas insatisfechas* (NBI1, NBI2, NBI3 y NBI4);
- Clase 7: *índice local de reforestación* (ILR1 y ILR2);
- Clase 8: *distancia* a Medellín (T1 y T2);



- Variables aisladas: *tasa de crecimiento de la población rural* (TCPR1 y TCPR2).

Luego, las variables que permanecieron aisladas en la primera fase del proceso, se reagrupan con las clases. Las clases 3 y 4, al igual que las 7 y 8 se reagrupan entre ellas formando dos nuevas clases. Se tiene entonces seis nuevas clases:

- Clase A: es la clase 1 de la fase precedente;
- Clase B: *inversión municipal ambiental* (IME), *inversión pública descentralizada* (IPD) y *tasa de crecimiento de la población rural* (TCPR2);
- Clase C: está formada por las clases 3 y 4 de la fase precedente;
- Clase D: *gestión ambiental municipal* (GEM1 y GEM2) y la *tasa de crecimiento de la población rural* (TCPR1);
- Clase E: está formada por la clase 6 de la fase precedente;
- Clase F: está formada por las clases 7 y 8 de la fase precedente.

Se ha escogido esta segunda fase de la clasificación a fin de definir los objetivos del análisis, puesto que allí se encuentran las correlaciones buscadas entre los criterios. Los objetivos están definidos por las clases (o grupos) de la clasificación jerárquica de Ward y por sus oposiciones en el plano factorial principal. El primer objetivo busca representar el desarrollo socioeconómico, teniendo en cuenta las correlaciones entre los criterios de “dinámica del bosque”, “demografía” e “impacto de la fuerza centrípeta” de Medellín. La formulación de este objetivo se inspira en las correlaciones positivas de los criterios (clasificación de Ward) al interior de las clases A, C, E y F. Posteriormente, este objetivo se inspira en las correlaciones negativas u oposiciones (plano factorial principal) entre los criterios de la clase C y aquellos de las clases E y F, respecto al factor 1. Este primer objetivo se inspira también de las correlaciones negativas entre los criterios de las clases A y E, respecto al factor 2. No obstante, la participación del criterio *tasa de crecimiento de la población rural* en esta lectura del desarrollo puede ser incierta puesto que no pertenece a las clases mencionadas.

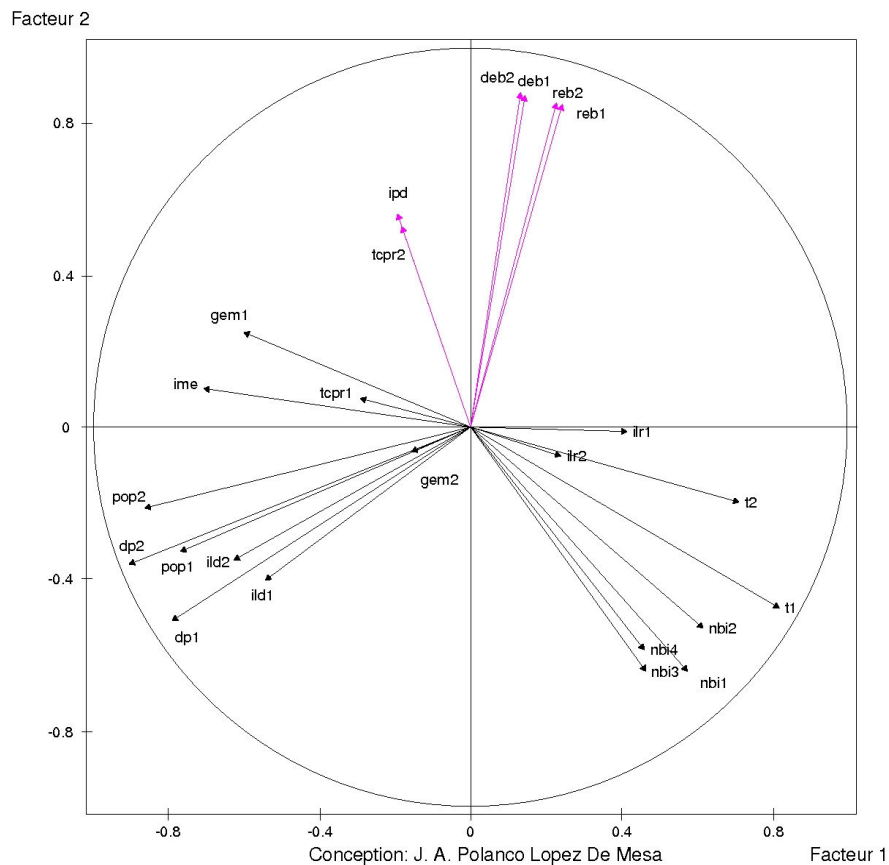
Finalmente, el segundo objetivo consiste en representar la protección ambiental considerando la correlación entre los criterios *inversión pública descentralizada* (IPD), *inversión municipal ambiental* (IME) y el criterio *gestión ambiental municipal* (GEM1 y GEM2). Los criterios de inversión son muy próximos (clase 2), así como también los de *gestión ambiental municipal* (clase 5). Estas dos clases tienen una correlación positiva sobre el primer eje factorial, especialmente en el caso de los criterios IME y GEM1.

#### 4. CONCLUSION

La formulación del análisis multiobjetivo para la toma de decisiones ambientales, exige escoger criterios que no solamente se adapten a la realidad de campo, sino también que estén correlacionados entre ellos. En el caso estudiado aquí, estas exigencias son satisfechas gracias a herramientas teóricas adecuadas y a procesos iterativos. De una observación cualitativa se pasa a una representación cuantitativa de la relación entre desarrollo y medio ambiente. Es así como, asumiendo una correlación relativamente baja (0.6; -0.6), se observa sin embargo que los fenómenos sociales expuestos pueden ser representados y relacionados entre sí. Vistas en el plano factorial principal y en el árbol jerárquico, estas relaciones muestran que la frontera agropecuaria avanza hacia el bosque del SPANA esencialmente en los municipios “ricos” y/o cercanos a Medellín: Belmira, San Pedro de los Milagros y Olaya. Es allí donde la asignación de recursos para la protección ambiental podría ser privilegiada.

Las pautas metodológicas para la toma de decisiones, obedecen entonces básicamente a dos principios: conocer la realidad de campo dentro de un marco teórico flexible y escoger criterios de análisis teniendo en cuenta su comportamiento estadístico de conjunto. La flexibilidad del marco teórico experimentado radica en su validación empírica y la correlación entre criterios representativos de las Ciencias Sociales no exige coeficientes tan altos como aquellos buscados en las Ciencias Exactas.

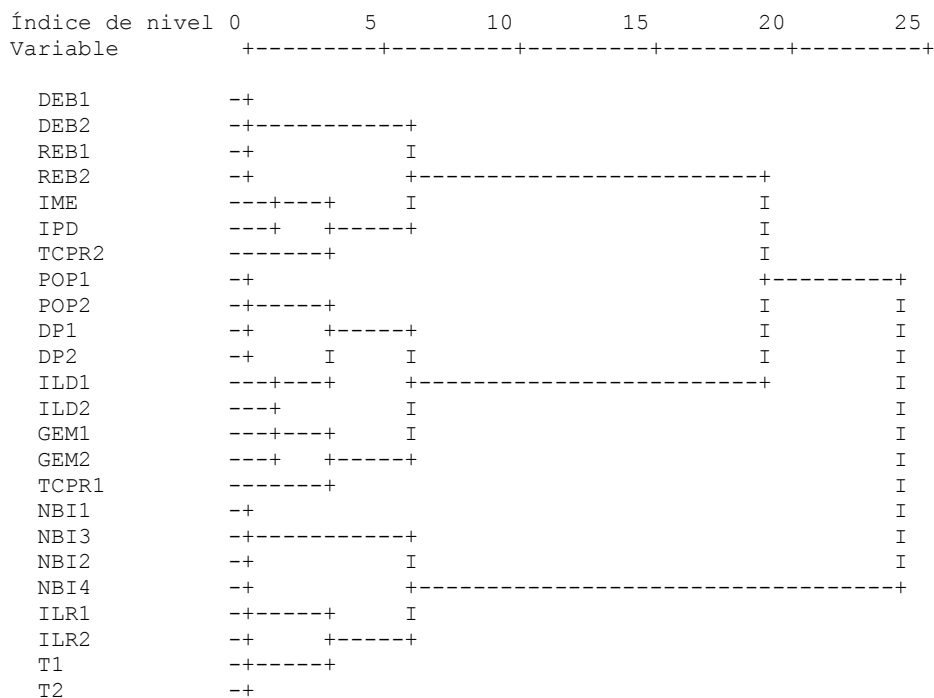
Criterios de análisis		Factores	
		1	2
Deforestación (1989 – 1996)	deb1	-0.142	-0.874
Deforestación (1989 – 2003)	deb2	-0.131	-0.882
Densidad de población (1993)	dp1	0.789	0.509
Densidad de población (2005)	dp2	0.904	0.362
Gestión ambiental municipal en 2000	gem1	0.599	-0.251
Gestión ambiental municipal en 2004	gem2	0.157	0.064
Índice local de deforestación (1989 – 1996)	ild1	0.544	0.401
Índice local de deforestación (1989 – 2003)	ild2	0.628	0.350
Índice local de reforestación (1989 – 1996)	ilr1	-0.415	0.013
Índice local de reforestación (1989 – 2003)	ilr2	-0.240	0.075
Inversión municipal ambiental	ime	0.705	-0.101
Inversión pública descentralizada	ipd	0.192	-0.561
Necesidad básica insatisfecha total (1993)	nbi1	-0.574	0.640
Necesidad básica insatisfecha total (2005)	nbi2	-0.613	0.526
Necesidad básica insatisfecha rural (1993)	nbi3	-0.464	0.641
Necesidad básica insatisfecha rural (2005)	nbi4	-0.458	0.583
Población municipal total (1993)	pop1	0.766	0.328
Población municipal total (2005)	pop2	0.861	0.214
Reforestación (1989 – 1996)	reb1	-0.244	-0.851
Reforestación (1989 – 2003)	reb2	-0.229	-0.853
Distancia municipal a Medellín	t1	-0.816	0.476
Distancia municipal a Medellín (túnel)	t2	-0.711	0.198
Tasa de crecimiento de la población rural (1985 – 1993)	tcpr1	0.292	-0.076
Tasa de crecimiento de la población rural (1993 – 2005)	tcpr2	0.183	-0.527



**Figura 2.** Coordenadas de los criterios de análisis sobre el plano factorial principal

**Figure 2.** Principal Components Analysis Biplot

Fuente: Polanco (2007)



**Convención:**

- DEB1 : Deforestación (1989 – 1996)
  - DEB2 : Deforestación (1989 – 2003)
  - DP1 : Densidad de población (1993)
  - DP2 : Densidad de población (2005)
  - GEM1 :Gestión ambiental municipal en 2000
  - GEM2 :Gestión ambiental municipal en 2004
  - ILD1 : Índice local de deforestación (1989 – 1996)
  - ILD2 : Índice local de deforestación (1989 – 2003)
  - ILR1 : Índice local de reforestación (1989 – 1996)
  - ILR2 : Índice local de reforestación (1989 – 2003)
  - IME : Inversión municipal ambiental
  - IPD : Inversión pública descentralizada
  - NBI1 : Necesidades de base totales no satisfechas (1993)
  - NBI2 : Necesidades de base totales no satisfechas (2005)
  - NBI3 : Necesidades de base rural no satisfechas (1993)
  - NBI4 : Necesidades de base rural no satisfechas (2005)
  - POP1 : Población municipal total (1993)
  - POP2 : Población municipal total (2005)
  - REB1 : Reforestación (1989 – 1996)
  - REB2 : Reforestación (1989 – 2003)
  - T1 :Distancia municipal a Medellín
  - T2 :Distancia municipal a Medellín (túnel)
  - TCPR1 : Tasa de crecimiento de la población rural (1985 – 1993)
  - TCPR2 : Tasa de crecimiento de la población rural (1993 – 2005)
- Índice de nivel : « distancia » entre variables ; indicador de su correlación lineal.

**Figura 3.** Árbol jerárquico  
**Figure 3.** Hierarchical tree  
*Fuente: Polanco (2007)*

## REFERENCIAS

- [1] POLANCO, J. A., L'Etat décentralisé à l'épreuve de la gouvernance (Colombie). Tesis de doctorado de la EHESS, dirigida por Alain Musset, Paris, 2007. Disponible en: <http://cyberato.pu-pm.univ-fcomte.fr/theses/lecture.php>
- [2] MALCZEWSKI, J. Spatial Multicriteria Decision Analysis. In THILL, J.-C., Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A Geographic Information Sciences Approach. Ashgate, Hants, 1999.
- [3] HAINING, R., Spatial Data Analysis. Theory and Practice. Cambridge University Press, 2003.
- [4] FUJITA, M.; KRUGMAN, P.; VENABLES, A. J., The spatial economy: cities, regions and international trade. Cambridge, The MIT Press, 1999.
- [5] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), Indicadores ambientales en Colombia. La presión de la población sobre los bosques. Convenio entre el Departamento Nacional de Planeación y el Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1998. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/indicadores/index4.htm>.
- [6] SCHUSCHNY, A. R.; GALLOPÍN, G. C., La distribución espacial de la pobreza en relación a los sistemas ambientales en América Latina. CEPAL, Serie Medio Ambiente y Desarrollo, No. 87, 2004.
- [7] MONCAYO JIMÉNEZ, E., Nuevos enfoques del desarrollo territorial: Colombia en una perspectiva latinoamericana. Universidad Nacional de Colombia, UNDP, CEPAL, Bogotá, 2004.
- [8] FERES, J. C.; MANCERO, X., El método de las necesidades básicas insatisfechas (NBI) y sus aplicaciones en América Latina. CEPAL Series, Estudios Estadísticos y Prospectivos, No. 7, 2001.
- [9] DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE), Condiciones de vida. Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI). 2005. <http://www.dane.gov.co/censo/>.
- [10] POLANCO, J. A., Impacto local del desarrollo socioeconómico inducido por el túnel de Occidente en Antioquia, Colombia. Ponencia VII Seminario de la ACIUR, 2008.
- [11] CONTRALORÍA GENERAL DE ANTIOQUIA, Estado de los recursos naturales en Antioquia y Encuesta "Medio Ambiente y calidad de vida en los municipios". Medellín, 2000 y 2004.
- [12] GUTIERREZ, A. L. ; MURIEL, R. D. BETANCUR, T., Dinámicas socioespaciales asociadas a los problemas ambientales urbanos en el departamento de Antioquia. Lineamientos para la gestión del ordenamiento ambiental del territorio. Fase I: Occidente de Antioquia. Universidad de Antioquia; Colciencias ; BID, Medellín, 2003.
- [13] DELGADO GÓMEZ, D. L.; POSADA ARRUBLA, D. M., Perfil urbano regional para la gestión ambiental del altiplano norte antioqueño. Universidad de Medellín; Corantioquia, Medellín, 2003.
- [14] LEBART, L.; MORINEAU, A.; PIRON, M. Statistique exploratoire et multidimensionnelle. DUNOD, Paris, 2006.