

Determinación de restricciones y posibilidades ambientales para la expansión del transporte de gas natural en Colombia

Environmental restrictions and opportunities regarding the expansion of the Colombian natural gas transportation network

*Recibido para evaluación: 31 de Junio de 2010
Aceptación: 04 de Noviembre de 2010
Recibido versión final: 12 de Noviembre de 2010*

**Enrique Ángel Sanint¹
Andrea Sanín Hernández²**

RESUMEN

En la línea de la Evaluación Ambiental Estratégica, EAE, se desarrolló un método para la determinación de restricciones y posibilidades ambientales en proyectos de transporte de gas natural por ductos, basado en el uso de herramientas de análisis territorial aplicadas sobre la plataforma SIG (Sistema de Información Geográfica), incorporando criterios ambientales que a escala 1:500.000 apoyarán la toma de decisiones en el nivel de planeación y propiciarán la elaboración del plan de expansión para el transporte de gas natural en Colombia. Para esto, se definió el concepto de ambiente a partir de un Modelo Analítico preexistente; se delimitó un área con posibilidades para la expansión de la red de transporte de gas natural incorporando nuevos trazados; se seleccionaron las variables y factores que complementaban el Modelo Analítico; se definió la estructura de preferencias a partir de una encuesta a expertos; se determinaron las restricciones nacionales y se construyeron superficies numéricas síntesis de criticidad ambiental para cada dimensión.

Como resultado, se obtuvieron 5 superficies síntesis, una por cada dimensión, y una superficie final para Colombia, con restricciones y posibilidades ambientales. Además se propusieron análisis complementarios para establecer prioridades en la gestión ambiental.

Palabras Clave: Colombia, Evaluación ambiental estratégica, Gasoductos, Gas natural, Gestión ambiental, Plan de expansión, Proyecto de desarrollo, Sistemas de Información Geográfica, Transporte de hidrocarburos.

ABSTRACT

Along the lines of the Strategic Environmental Assessment (in Spanish EAE) a method was developed to determine the restrictions and environmental possibilities in projects of transportation of natural gas through ducts, based on the incorporation of tools of applied territorial analysis about the GIS Geographical Information System, incorporating environmental criteria that, on a scale of 1:500.000, support the decision making process regarding expansion plans. To achieve this, the environmental concept is defined based on a preexisting Analytical Model that proposes the work of the physical, biotic, economic, cultural and political dimensions; the area with possibilities for the expansion of the system of transportation of natural gas in Colombia incorporating new tracks was outlined; afterwards, the variables and factors were selected that made up each one of the five dimensions previously mentioned; the structure of preferences was defined based on a survey of experts, the national restrictions were determined and surfaces of numerical synthesis of environmental criticality were constructed for each dimension.

As a result, five synthesis surfaces, one for each dimension, and a final surface for the total area were obtained; furthermore, complementary analyses were proposed for determining the priorities of the environmental management.

Key Words: Colombia, Cost Distance, Cost Path, Expansion Plans, Development Projects, Strategic Environmental Assessment, Gas pipelines, Environmental Management, GIS, Geographical Information System, natural gas, hydrocarbons transport.

1. Ing. Civil. M Sc. Ingeniería Ambiental. M Sc. Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Docente Posgrados en Medio Ambiente y Desarrollo.

2. Ing. Ambiental. Especialista SIG. M Sc. Medio Ambiente y Desarrollo

Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

**enangel@isa.com.co
andreasanin@gmail.com**

1. INTRODUCCION

En las últimas décadas, se produjo un cambio en los objetivos que dirigen las labores de planificación de los megaproyectos de desarrollo. En sus inicios, el único énfasis evidente era el de la eficiencia económica, pero actualmente dicha planificación incorpora objetivos relacionados con el concepto del desarrollo sostenible (Storey y Hamilton, 2003). En esta vía, la expansión o definición de rutas para redes o ductos en proyectos de tipología lineal no pueden ser la excepción y el proceso de planeación debe apoyarse en evaluaciones estratégicas que, partiendo del carácter preventivo y del nivel estratégico en el que se apliquen, permitan la integración de las consideraciones ambientales en los procesos de toma de decisiones. (Partidario, 2000; Sadler y Verme, 1996; Bina, 2005; Dusik et al, 2003; Fischer, 2003; Therivel, 2004).

La evaluación del impacto ambiental (EIA) ha existido formalmente durante casi cuarenta años y nació a partir de la necesidad de manejar los efectos deletéreos de diferentes proyectos de desarrollo sobre los recursos naturales. Se originó en los EE.UU., cuando se decretó la Ley de Política Nacional del Medio Ambiente de 1969 y posteriormente otros países, incluyendo la mayoría de los países industrializados y en desarrollo, adoptaron diferentes requisitos de evaluación del impacto ambiental (Word, 1995). Con el tiempo, las organizaciones internacionales de crédito comenzaron a exigir a los países solicitantes la implementación de los EIA hasta el punto de que éstos hicieron parte integral de los compromisos internacionales aprobados en 1992 durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo celebrada en Río de Janeiro (Kurian, 1995; Johnson, 1993).

En la práctica, la evaluación de impacto ambiental (EIA) ha logrado importantes avances en la minimización y corrección de los impactos sobre el medio ambiente, generados a raíz de la ejecución de proyectos. Sin embargo, se evidenciaron algunas limitaciones en su efectividad y ante esta situación, se inició la búsqueda de nuevas herramientas. Actualmente se ha extendido la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) (Abaza et al., 2004) que consiste en un proceso temprano, formal, sistemático y global para evaluar las posibles repercusiones ambientales de las propuestas de políticas, planes y programas durante su proceso de elaboración, configurándose en un instrumento con marcado potencial de integración en los procesos de toma de decisiones estratégicas (Partidario, 2000; Sadler y Verme, 1996; Bina, 2005; Dusik et al., 2003; Fischer, 2003; Therivel, 2004) y permitiendo que ambos instrumentos (EIA y EAE) se complementen mutuamente.

Este artículo se enfoca en el desarrollo de un método para la evaluación de restricciones y posibilidades ambientales de proyectos lineales con énfasis en el transporte de gas natural. La metodología propuesta tiene un enfoque estratégico y preventivo, basado en la utilización de herramientas de análisis territorial aplicadas sobre un soporte SIG (Sistema de Información Geográfica) y define un procedimiento de evaluación que constituye una herramienta útil en las labores de planificación, y permite la interacción entre planificadores y decisores, además de ser un instrumento de apoyo que garantiza tanto la viabilidad técnica del proyecto, como la prevención de impactos ambientales negativos.

La determinación de restricciones permite conocer previamente la descripción y distribución geográfica de las limitaciones totales en Colombia, evitando zonas que, por sus características, se consideren imposibles de intervenir a la hora de realizar un proyecto, obra o actividad, y potenciando la elección de zonas posibles en las que confluyan distintos niveles de complejidad (criticidad/ posibilidad). Esto permite reducir la incertidumbre con respecto a inconvenientes técnicos que se puedan presentar durante la construcción y operación y por lo tanto, proporciona información confiable sobre las características técnicas que requieren los planificadores para comenzar a determinar los costos del proyecto y poder definir el Plan de Expansión del sector del transporte de gas desde el punto de vista ambiental.

Este estudio es novedoso puesto que es el primer trabajo de su tipo que abarca todo el territorio nacional, y hace una síntesis de la información disponible al nivel más actualizado posible para un gran número de variables del ambiente. El trabajo contribuye a la solución de problemas prácticos en el campo de la elaboración de políticas, planes y proyectos de desarrollo y al mismo tiempo a los esfuerzos de conservación del medio ambiente a escala nacional.



2. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS:

Para la elaboración de este trabajo se tuvieron en cuenta las definiciones de los conceptos de restricción y criticidad ambiental así:

- Restricción ambiental: «Limitación total impuesta para la realización de un proyecto sobre un área geográfica determinada en razón de las características ambientales, y definida en función de la legislación específica, de la extrema fragilidad del ambiente, de la amenaza grave del ambiente al proyecto, de los altos costos que impone la complejidad técnica o tecnológica que requiere la implantación del proyecto y de la incompatibilidad con otros proyectos» (ISA- INER, 1998).
- Posibilidad ambiental: Condiciones del medio ambiente «propicias» para la implantación de un proyecto, mediadas por un plan de gestión ambiental. «Grado de dificultad (posibilidad/ criticidad) a la que se somete la implantación de un proyecto en función de la vulnerabilidad del ambiente frente al proyecto, de la amenaza del ambiente al proyecto, de la complejidad de la gestión y de los costos de gestión correspondientes» (ISA- INER, 1998).

Las posibilidades ambientales (criticidad) se determinan a partir de: a) la caracterización (o descripción) de los factores ambientales; b) los distintos grados de vulnerabilidad -observables, medibles, clasificables y georreferenciables - propios de los factores ambientales comprometidos en el área potencial de un proyecto; c) la complejidad de la gestión que deba adelantarse; d) los costos de gestión ambiental asociados a dicha complejidad.

3. MÉTODO

A continuación se presenta un diagrama de flujo que describe las etapas que configuran el método para la determinación de restricciones y posibilidades ambientales en proyectos de transporte de gas (ver: Figura 1).

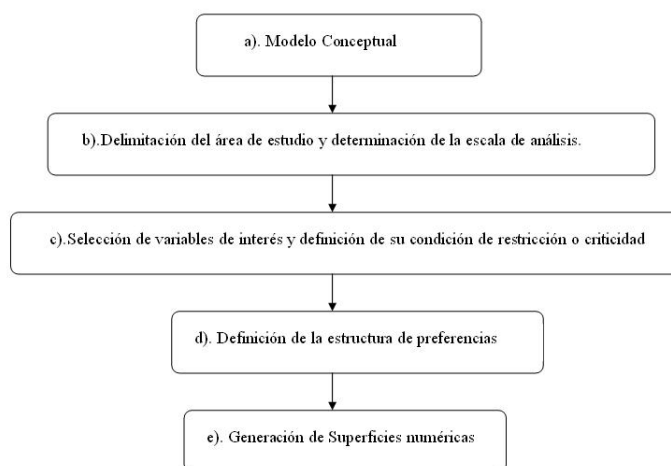


Figura 1. Método para la determinación de restricciones y posibilidades ambientales en proyectos de transporte de gas

3.1. Modelo conceptual

En busca de la integración de las diversas temáticas de interés y de la interacción entre los múltiples subsistemas que conforman el ambiente, se tomó como punto de partida el Modelo Analítico por Dimensiones (Ángel *et al.*, 2001) que permite la combinación de las distintas

dimensiones ambientales para diagnosticar, identificar, evaluar impactos y formular medidas de manejo en distintas etapas de los proyectos.

El modelo introduce el concepto de las Dimensiones Analíticas que «hace referencia a la comprensión del medio natural y humano de la región donde se construirá un proyecto de infraestructura». Esto implica entonces efectuar estudios básicos sobre los distintos ecosistemas tanto en el conjunto de sus componentes físicos como biológicos, teniendo en cuenta al medio humano y constituyendo un universo complejo de subsistemas, donde la cultura, la sociedad y las múltiples interrelaciones entre éstas, constituyan la materia prima que configuran las dimensiones de análisis. Se trabajan entonces cinco dimensiones analíticas (física, biótica, cultural, económica y política), que «articulan el gran número de componentes del sistema ambiental que lo reducen de una forma aceptable desde el punto de vista operativo». (Ángel *et al.*, 2001).

Si la estructura se describe de lo global a lo particular, a cada una de esas dimensiones se les definen y analizan las variables representativas de acuerdo al objeto y de la misma manera a cada variable se le califican los factores que la componen. Un esquema simple se presenta a continuación (ver: Figura 2).

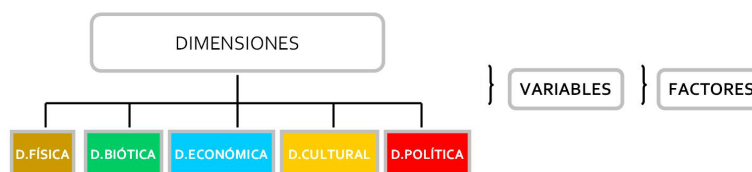


Figura 2. Modelo Analítico adaptado para la investigación.

3.2. Delimitación del área de estudio y determinación de la escala de análisis

La determinación del área de estudio se llevó a cabo dando prioridad a criterios de importancia para el país, a saber:

- Posibilitar la densificación de la red de distribución de gas natural en otros municipios de Colombia que no cuenten con este servicio.
- Establecer una conexión internacional de la red existente.
- Potenciar la red de transporte de gas natural existente en Colombia a través de nuevos tramos que posibiliten en un futuro tener una red «anillada».
- Conectar la red existente a potenciales nuevos yacimientos.

La voluntad gubernamental para que la cobertura de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado, saneamiento ambiental, distribución domiciliar de gas combustible por red y distribución domiciliar de energía eléctrica lleguen a los usuarios de menores ingresos¹, los existentes mercados regionales, las iniciativas de integración regionales², la política de intercambios internacionales de gas natural³, el deseo de retransformar el país en un sitio atractivo para los inversionistas nacionales y extranjeros (exploración y explotación a cargo de la ANH)⁴ y la creación de mecanismos que aseguren el abastecimiento nacional del combustible, sumados la estratégica posición geopolítica de Colombia, permiten ratificar la importancia de dichos criterios para la determinación del área de estudio.

Adicionalmente si se analiza la estructura física de la actual Red Nacional de Gasoductos, se puede concluir que está conformada principalmente por dos subsistemas claramente definidos en propiedad, operación y funcionamiento: el subsistema de la Costa Atlántica (que bordea las ciudades del océano atlántico) pertenece a la empresa PROMIGÁS y el del transporte del interior (atraviesa el sistema montañoso de los Andes) es propiedad de la Transportadora de Gas del Interior TGI y otros propietarios minoritarios.

La conexión entre ambos subsistemas no es suficientemente fuerte, de modo que una falla sobre una troncal, sacaría importantes ciudades del sistema de abastecimiento de gas

1. Artículo 40 de la Ley 142 de 1994, Ley 1151 de 2007.

2. Programa de Integración Energética Mesoamericana con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo – BID-, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Integración de la Infraestructura Regional Suramericana–IIRSA- y el llamado Gasoducto del Sur.

3. Ley 1151 de 2007.

4. Agencia Nacional de Hidrocarburos. ANH. [Sitio en internet]. Disponible en

<http://www.anh.gov.co/>. Acceso el 20 de marzo de 2007.

natural, afectando a los sectores de la economía que se benefician del hidrocarburo. Por tanto se considera que fortalecer la columna vertebral es también un criterio relevante.

El desarrollo y espacialización de cada una de esas posibilidades permiten obtener como resultado la figura 3 (Ángel y Sanín, 2008).

Al superponer las áreas obtenidas de los criterios señalados y observar que se abarca gran parte del territorio nacional (Figura 3), se decidió realizar la aplicación del método sobre la totalidad del territorio continental del país (ver: Figura 4), esto con el ánimo de no fragmentar los resultados y poder analizarlos en el contexto nacional. De esta forma, se tiene en cuenta (implícitamente) cualquier posibilidad en la que el sector gasífero nacional ha avanzado hasta el momento u otras futuras que no se hayan mencionado, incluido el transporte de gas para la generación de energía, gas natural vehicular y el transporte de gas a las industrias.

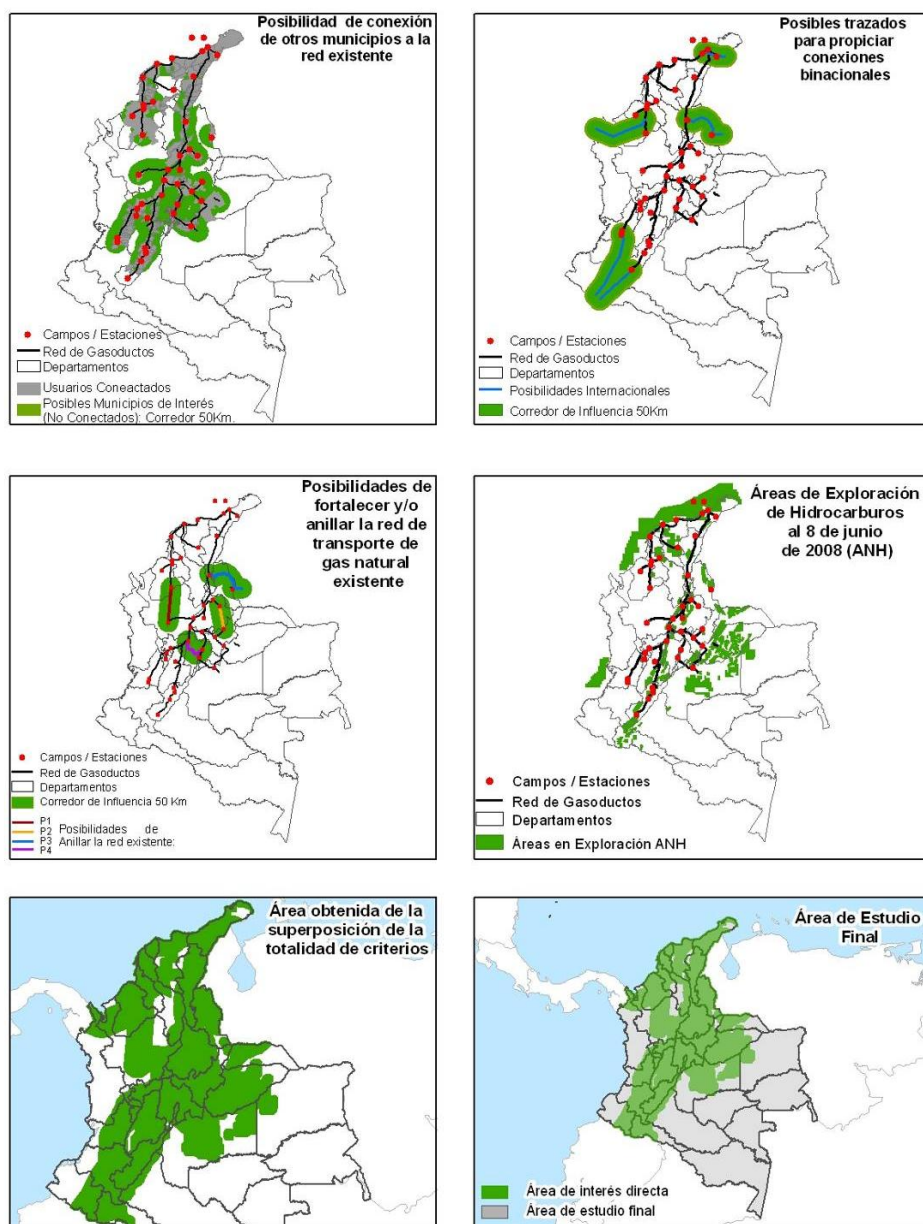


Figura 3: Espacialización de los criterios de importancia para el país. Determinación del área de interés directa y el área de estudio final de la investigación.

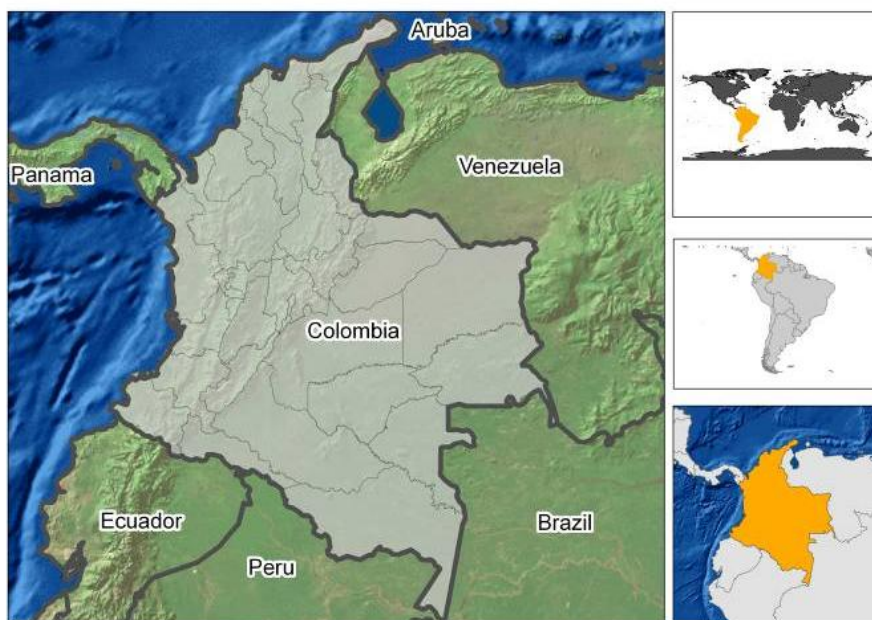


Figura 4: Zona de estudio: área continental colombiana (exceptuando territorios de islas)

Respecto a la determinación de la escala de análisis, cabe anotar que la elaboración de investigaciones de este tipo requiere de la recolección de información que represente variables seleccionadas extraídas de un mundo real que ostenta amplitud, complejidad y dinamismo; por tanto, se definen dos tipos de escalas para describir las variables y paralelamente trabajar apoyado en las herramientas del Sistema de Información Geográfica SIG, a saber: a) la escala para la entrada de información en formato vector y para describir cualitativamente las variables, y b) la escala a la que se representarán los datos obtenidos mediante aplicaciones de análisis espacial cuando se haya trabajado la fase de aplicación (tamaño de píxel de los datos resultantes, incluidos los mapas síntesis en formato raster).

La escala que se definió para la descripción cualitativa de las variables, búsqueda y recolección de información de entrada es de 1:500.000 permitiendo una descripción suficiente.

Para definir el tamaño del píxel, se decidió tomar el valor (tamaño) de uno de los datos raster de entrada obtenido de fuentes secundarias; no obstante fue necesario tener también en cuenta las áreas y las formas de las unidades más pequeñas a representar, haciendo pruebas piloto con el SIG para distintos tamaños de celda a la hora de convertir datos vectoriales en datos raster. Como para esta investigación, se utilizó el modelo de elevación digital de Colombia obtenido de la Misión de Radar Topográfico del Transbordador Espacial, SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) disponible en el portal de Internet del USGS (Servicio geológico de Estados Unidos), el tamaño de píxel al que se decidió que debía ser llevada la totalidad de la información de entrada (incluidos raster existentes) fue de 90 m por 90 m.

3.3. Selección de las variables de interés y definición de su condición de restricción ó criticidad

En Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT, exige que sean desarrollados distintos estudios ambientales (principalmente Diagnóstico Ambiental de Alternativas, DAA, y Estudios de Impacto Ambiental, EIA). Antes de otorgar la licencia a los proyectos que así lo requieran, los estudios deben ser llevados a cabo por las empresas propietarias o entidades consultoras, y para desarrollarlos existen términos de referencia elaborados por la autoridad ambiental. Para el caso de transporte de hidrocarburos por ductos, aplican los términos

HI-TER-1-05⁵ y DA-TER-3-01⁶ No obstante, por el enfoque estratégico de esta investigación, el momento de análisis se considera anterior a los estudios tipo DAA.

Siguiendo el modelo ambiental por dimensiones, se hizo una revisión de cada una de las variables propuestas por las siguientes guías:

- 1) Análisis de Restricciones y Posibilidades Ambientales / ISA- INER, Colombia.
- 2) Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) / DA-TER-3-01 / DAA, Colombia
- 3) Estudios Ambientales Previos/ Normas Mínimas para la Protección Ambiental en el Transporte y Distribución de Gas Natural y Otros Gases por Cañerías NAG 153 / ENARGAS, Argentina.
- 4) Directrices para la Confirmación de Consideraciones Ambientales y Sociales para proyectos en general / JBIC, Japón.
- 5) Guía para Elaborar la Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional de Proyectos Petroleros /SEMARNAT, México.
- 6) Directrices ambientales para la localización, construcción y operación de ductos de transporte de hidrocarburos / OEB, Ontario, Canadá.
- 7) Manual de orientación para la preparación de los informes ambientales, Comisión Federal de Energía / FERC, USA.

Las variables contenidas en las guías anteriormente mencionadas se clasificaron en una de las cinco dimensiones de interés siguiendo el modelo analítico adoptado; se estandarizaron y se contabilizaron sobre el total de guías estudiadas. Adicionalmente se realizó una revisión previa, donde se consultó con expertos del sector del gas natural para discutir y conocer su opinión acerca de las variables propuestas, agregar las faltantes y definir los factores que las representarían, permitiendo así la construcción de la matriz dimensiones, variables y factores para gasoductos (ver: tabla 1).

5. Resolución 1275 de 2006 «Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para los proyectos de conducción de fluidos por ductos en el sector de hidrocarburos y se adoptan otras determinaciones. «Ambiental de Alternativas para proyectos lineales y se adoptan otras determinaciones».

6. Resolución 1277 de 2006 «Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Diagnóstico.

Dimensión D	¿Restrictiva (R)/ Crítica (C)?	Variables (V) y Factores (F)	
FÍSICA	Crítica	Pendientes en grados / Factores: Rangos numéricos de pendiente	
	Crítica	Amenaza sísmica y valores de Aa en Colombia / Factores: Rangos numéricos de aceleración Aa.	
	Crítica	Susceptibilidad a los deslizamientos de tierra / Factores: niveles por descripción cualitativa.	
	Crítica	Cuerpos de agua lóticos / Factores: ríos principales, ríos secundarios.	
	Crítica pero Restrictiva para embalses y lagunas.	Cuerpos de agua lóticos / Factores: lagos, lagunas, embalses, ciénagas, pantanos.	
	Crítica	Fallas Geológicas. Densidad de Fallas / Factores: rangos numéricos de densidad de fallas	
	Restrictiva para 15Km pero Crítica para los demás valores (factores)	Volcanes	Factores Áreas 15Km a la redonda de los volcanes. Áreas 25Km a la redonda de los volcanes. Áreas 35Km a la redonda de los volcanes.
	Crítica	Niveles altitudinales mayores a 3000 m.s.n.m / Factores: valores numéricos de altura en m.s.n.m	
	Crítica	Reservas de la Biosfera / Factor: presencia	
	Restrictiva	Patrimonio Natural de la Humanidad / Factor: presencia	
BIÓTICA	Crítica	Ramsar / Factor: presencia	
	Restrictiva	Manglares / Factor: presencia	
	Restrictiva	Sistema Parques Nacionales Naturales / Factor: presencia	
	Crítica (valor alto de criticidad)	Áreas con alta prioridad para la conservación en Colombia.	
	Crítica (valor alto de criticidad)	Páramos / Factor: presencia	
	Crítica	Ecosistemas/ Factores índice de amenaza y fragmentación.	
	Crítica	Cobertura de la tierra / Factores: tipos de cobertura de la tierra	
			Factores:
			Áreas con presencia de carbón en Colombia
	Restrictiva para todo tipo de infraestructura.	Infraestructura Puntual / área	Áreas 5Km a la redonda de los Aeropuertos Embalses

Tabla 1. Matriz propuesta de Dimensiones, Variables y Factores para Gasoductos

Dimensión D	¿Restrictiva (R)/ Crítica (C)?	Variables (V) y Factores (F)
ECONÓMICA	Crítica	Infraestructura Lineal
		Áreas Urbanas
		Áreas 1Km a la redonda de las instalaciones mineras
		Factores:
		Vías Férreas
		Vías Principales
		Vías Secundarias
		Líneas transmisión eléctrica
		Oleoductos
		gasoductos
CULTURAL	Crítica	Importancia económica de la cobertura de la tierra / Factores: tipos de uso de la cobertura de la tierra
		Densidad de población rural / Factores: Rangos numéricos de densidad de población rural.
		Municipios de influencia donde se ubican los parques arqueológicos / Factor: presencia
		Patrimonio cultural de la humanidad / Factor: presencia
		Ciudades de interés cultural / Factor: presencia
		Área 5km a la redonda de los parques arqueológicos / Factor: presencia
		Territorio negros / Factor: presencia
		Resguardos indígenas / Factor: presencia
		Cultivos ilícitos / Factor: presencia
		Acciones del conflicto armado entre 1999 – 2007 / Factores: Rangos numéricos de acciones.
POLÍTICA	Crítica	Acciones que han generado éxodo de población entre 1999 – 2007/ Factores: Rangos numéricos de acciones.

3.4. Definición de la estructura de preferencias

Cada una de las variables que componen las dimensiones presentadas en la tabla 1, fue sustentada de forma teórica y especializadas (Ángel y Sanin, 2008) a la escala establecida para la entrada de datos, buscando un diagnóstico a nivel nacional de las características más importantes del ambiente.

Los mapas obtenidos en todas las dimensiones fueron llevados a superficies numéricas en el Sistema de Información Geográfica usando dos funciones matemáticas de agregación denominadas promedios ponderados y máximos.

Se obtuvieron entonces tantos mapas digitales (en formato raster/ numérico) como variables se seleccionaron por dimensión. Con este formato se «dividió» el área de estudio en una agrupación de celdas cuadradas ordenadas en una secuencia específica (matriz). Cada una de estas celdas recibió un valor numérico que se consideró representativo para toda el área abarcada por la celda o píxel (en este caso 90 m por 90 m); así, distintas zonas del área de estudio tomaron valores diferentes en los píxeles definidos por el sistema de coordenadas (filas y columnas).

Los valores numéricos con los que se elaboraron dichas superficies, se obtuvieron a partir de la calificación otorgada por los expertos a cada factor (ver: tabla 2) y en el caso de usar la función matemática de agregación denominada promedios ponderados, influyó también el peso otorgado a cada variable sobre cada dimensión y el peso de cada dimensión sobre la evaluación total. La consulta por pesos (W) es lo que se denominó Estructura de Preferencias, entendida como la determinación de aquellos valores numéricos que recogen la valoración que los expertos realizan acerca de la importancia relativa de cada dimensión o variable.



Calificación del factor (F).	Nivel de criticidad o restricción	Definición del nivel de criticidad o restricción.
Critico - Posibilidad 0.0 - 30	Criticidad Baja	Gestión ambiental normal y no implica ni sobrecostos ni demoras, habiendo además escasas dificultades con las comunidades, áreas poco frágiles y/o vulnerables. Impactos ambientales negativos bajos para el tipo de proyecto.
Critico - Posibilidad 30.001 - 70	Criticidad Media	Se prevén riesgos medios, con niveles más altos de esfuerzo en la gestión ambiental comparada con la anterior calificación, sobrecostos, demoras y/o medianas dificultades en términos de comunidades y de áreas frágiles y vulnerables. Impactos ambientales negativos medios para el tipo de proyecto.
Critico - Posibilidad 70.001-99.999	Criticidad Alta	Se prevén riesgos altos, con niveles más altos de esfuerzo en la gestión ambiental comparada con la anterior calificación, altos sobrecostos, demoras y/o dificultades con las comunidades, áreas muy frágiles y vulnerables. Impactos ambientales negativos altos para el tipo de proyecto.
Restricción 100	Restictivo	Áreas restringidas según legislación específica, áreas con extrema fragilidad del ambiente, amenaza grave del ambiente al proyecto o del proyecto al ambiente, altos costos que impone la complejidad técnica o tecnológica que requiere la implantación del proyecto, incompatibilidad con otros proyectos.

Tabla 2: Criterios para calificación de factores: escala de calificación.

3.5. Generación de superficies numéricas

Con las variables representadas en mapas digitales numéricos (capas raster), se permitió hacer operaciones matemáticas. A continuación se presentan los pasos seguidos para obtener las superficies numéricas síntesis (*grids*) finales y por dimensión.

El resultado final en el caso de la función promedios ponderados se consiguió otorgando un valor de ponderación (WD(i)) a cada una de las superficies síntesis por dimensión (física, biótica, económica, cultural y política); de la misma manera, cada una de las superficies numéricas síntesis por dimensión se obtuvo luego de otorgar un valor de ponderación a cada una de las variables que la componen (Wv(i)) y la superficie numérica de cada variable se representó por la calificación de sus factores.

De manera similar, el resultado final, utilizando la función de máximos, se consiguió al aplicar dicho algoritmo a las superficies numéricas síntesis de cada una de las dimensiones (física, biótica, económica, cultural y política) obtenidas en el paso anterior.

Al momento de ejecutar la función, los máximos valores de criticidad otorgados a los factores que componían cada variable, fueron quienes entraron a definir la superficie numérica final; esto se diferenció con el resultado obtenido al aplicar la función por promedio ponderado donde no solo tuvo influencia el valor del factor, sino también el valor de ponderación de las variables y las dimensiones.

Matemáticamente, el análisis es el siguiente:

Cálculo de superficies numéricas síntesis

- Superficie Numérica de cada Variable (aplicable a las funciones promedios ponderados y máximos):

SNV(j): Superficie numérica de la variable (i) obtenida a partir de la calificación de los factores que la componen [0.0 – 100].

- Superficie Numérica de la Dimensión: Síntesis de cada dimensión (aplicable únicamente a la función promedios ponderados):

$$SNSD(i) = \sum_{j=1}^n (WV_j \times SNV_j)$$

Donde:

SNSD: Superficie numérica síntesis de la dimensión (i) [0.0 – 100]

Wv(j): Valor de ponderación de la variable (j) [0.0 – 1.0]

SNV(j): Superficie numérica de la variable (j) [0.0 – 100]

n: Número de variables consideradas en la dimensión (i)

- Superficie Numérica Final: Síntesis total (aplicable únicamente a la función promedios ponderados):

$$SNT = \sum_{i=1}^5 (WD_i \times SNSD_i)$$

Donde:

SNT: Superficie numérica total (final) [0.0 – 100]

WD(i): Valor de ponderación de la dimensión (i) [0.0 – 1.0]

SNSD(i): Superficie numérica síntesis de la dimensión (i) [0.0 – 100]

Sobre las superficies así determinadas es posible correr rutas de menor costo ambiental desde un punto de partida A hacia un punto de destino B utilizando las funciones disponibles en ArcGis 9.3 llamadas *Costh Distance* y *Cost Path*, de esa manera es posible conformar el plan de expansión nacional para el transporte de gas natural por ductos incorporando trazados óptimos desde el punto de vista del impacto ambiental y potenciando de esta manera, la red de transporte existente.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis del Mapa Síntesis de Restricciones

El mapa síntesis de restricciones reúne el total de áreas que constituyen barreras geográficas totales (naturales o construidas) que impiden el paso de nuevos ductos, sean éstas (ver: Figura 5):

- Dimensión Física: cuerpos de agua lénticos (lagunas y embalses) y áreas 15 km a la redonda de los volcanes.
- Dimensión Biótica: Áreas de patrimonio natural de la humanidad, áreas del sistema de Parques Nacionales Naturales y ecosistemas de manglar.
- Dimensión Económica: Áreas urbanas, centros poblados e infraestructura.
- Dimensión Cultural: Áreas urbanas de mayor importancia histórica, áreas de patrimonio cultural de la humanidad y áreas 5Km a la redonda de los parques arqueológicos.
- Dimensión Política: no aportó restricciones.

A nivel nacional la dimensión biótica fue la que aportó las zonas restrictivas de mayor extensión distribuidas por todo el país; no obstante la dimensión económica es la que aporta la mayor cantidad de zonas pero con extensiones menores y dispersas. Aproximadamente el 11.19% del país presenta áreas con características restrictivas de los cuales el 9.17% es aportado por las áreas de parques nacionales naturales. Esto muestra que casi el 90% del territorio colombiano permite el desarrollo de proyectos de transporte de gas natural por ductos, aunque no se debe



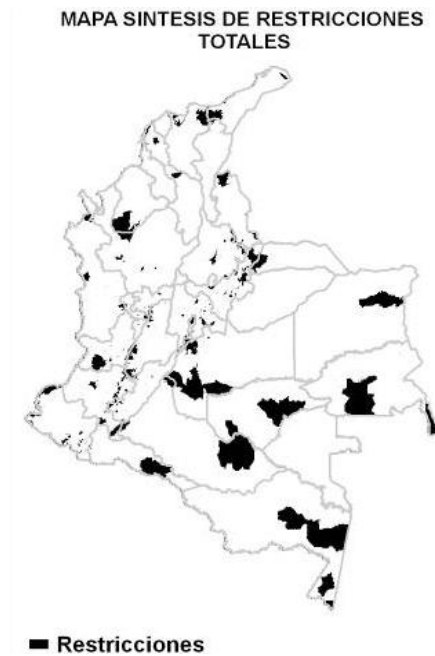


Figura 5. Mapa síntesis de restricciones

dejar de lado las complicaciones que se presentan cuando se atraviesen zonas que se denominen «posibles» a las que se les haya otorgado altos valores de criticidad (ver: tabla 5).

Dimensión	% de Áreas restrictivas para el país	% de Áreas restrictivas para el área de influencia directa calculada
Física	0.21	0.32
Biótica	10.53	6.62
Económica	0.43	0.97
Cultural	0.03	0.23
Política	0	0
TOTAL	11.19 %	8.14 %

Tabla 5. Porcentajes de restricciones totales y por dimensión para el país y para el área de influencia directa calculada.

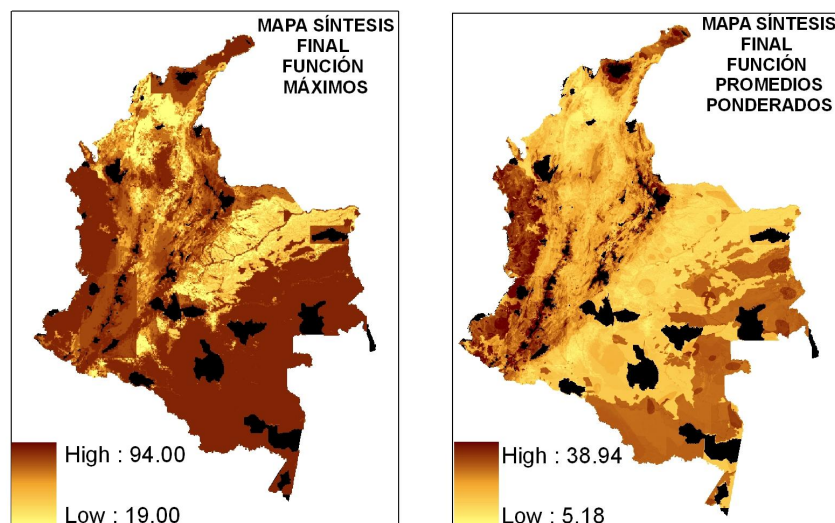
4.2. Análisis de los Mapas Síntesis Finales

Ambas funciones matemáticas de agregación (promedio ponderados y máximos) arrojan resultados diferentes en cuanto a los niveles de dificultad encontrados en cada punto del territorio nacional, aunque gráficamente se presentan de manera similar.

Se consiguieron superficies numéricas (*grids*), es decir, matrices compuestas por filas y columnas que conforman píxeles; a cada píxel, le corresponde una posición particular y un valor numérico dentro de la matriz. Estas superficies pueden representarse con colores; en este caso se decidió usar una escala desde el amarillo claro (valor numérico mínimo) hasta el café oscuro (valor numérico máximo) y los tonos intermedios son distribuidos según los rangos particulares de cada *grid* (ver: figura 6).

Si se comparan los mapas finales con ambos métodos (Figura 6), se observa que el resultado obtenido con la función máximos muestra una superficie que aparentemente genera mayores dificultades en la gestión ambiental, y desde la función por promedios ponderados, se puede evidenciar que cuando se lleva a cabo la agregación de las dimensiones para llegar a un mapa síntesis final, se presenta un proceso de atenuación generado por los valores de ponderación otorgados a las dimensiones y las variables, dando así la sensación de menores dificultades en la gestión.

Figura 6. Mapas síntesis calculados con las funciones matemáticas de agregación (máximos y promedios ponderados)



Sin embargo el resultado al correr la función máximos para obtener cada una de las dimensiones síntesis no permite saber cuántas variables por dimensión presentaban en la misma posición (x,y) el mismo valor máximo de criticidad; de la misma manera, si una dimensión cualquiera tiene un píxel en determinada posición con valor máximo y en las demás variables tiene valores muy bajos, en el resultado obtenido mostrará solo el máximo (lo que se considera en ocasiones pesimista). Este es entonces un resultado con una mirada ambientalmente más estricta, aunque también oculta dificultades a la hora de conocer cuales variables por dimensión tienen altos valores de criticidad de manera simultánea en un lugar geográfico determinado.

Supóngase que exista un píxel en una posición (x,y) con un valor máximo de 85 en la dimensión cultural y bajos valores de criticidad en las demás dimensiones, en ese caso, el 85 cubrirá los demás valores y en ese orden de ideas, se podrá pensar que la gestión ambiental es en general compleja para ese punto, lo que no es cierto para las demás dimensiones.

Por otro lado, supóngase también que exista un píxel en una posición (x,y) con un valor máximo de 85 en la dimensión económica, un valor de 80 en la dimensión biótica, de 80 en la dimensión física, de 78 en la política y de 70 en la cultural, si bien todos los valores son de altos niveles de criticidad, el 85 cubrirá los demás valores y en ese orden de ideas, se podrá pensar que las complicaciones serán mayoritariamente económicas, asunto que no es del todo cierto.

A continuación se presentan los mapas síntesis para cada una de las dimensiones analíticas y la síntesis final obtenida con la función máximos (Figura 7).

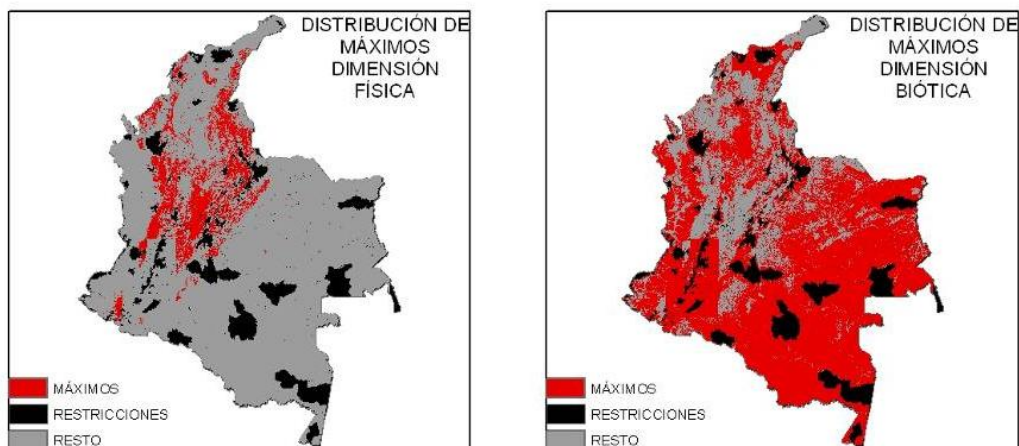
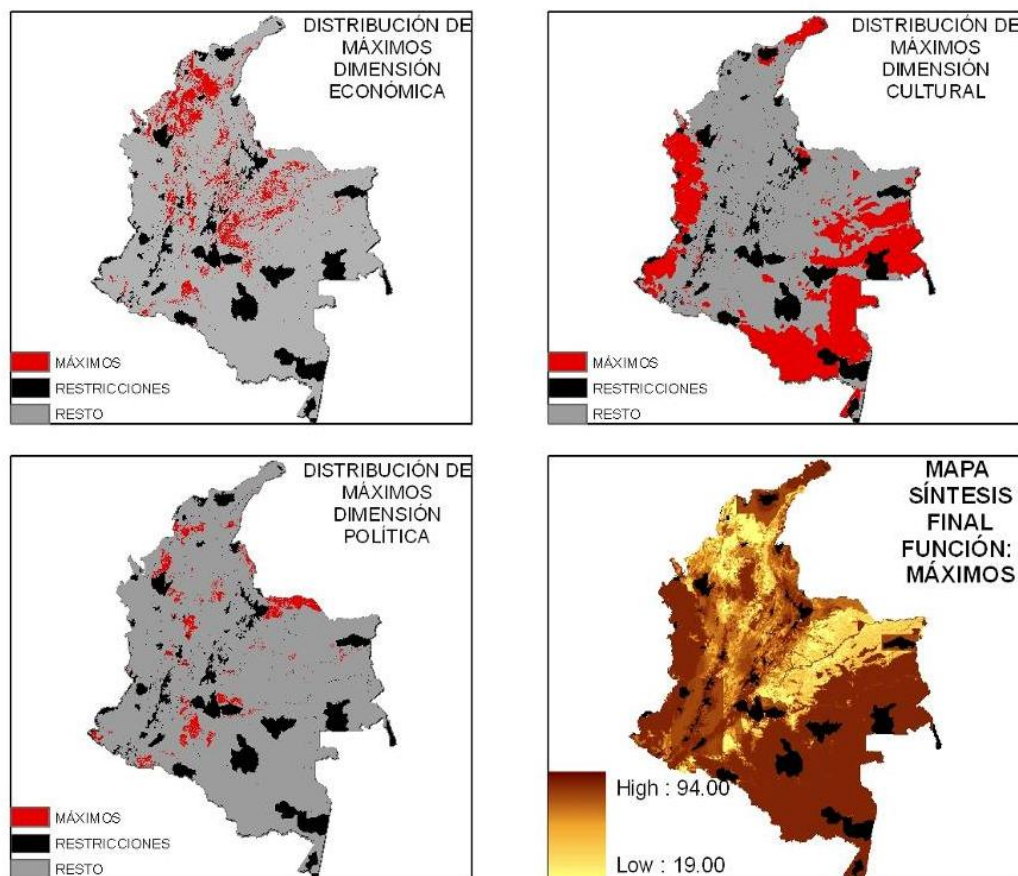


Figura 7: Distribución de máximos por dimensión



Para superar las dificultades que pueden presentarse a la hora de interpretar los resultados con la función por máximos, se presentan a continuación dos propuestas metodológicas para identificar áreas del territorio con alta prioridad para la Gestión Ambiental.

4.3. Aplicación de los resultados obtenidos con la función máximos para identificar prioridades en la Gestión Ambiental

Para superar los problemas antes mencionados al analizar el resultado obtenido con la función por máximos, se presentan dos aportes adicionales y sus respectivos resultados.

Análisis 1: Determinación de dimensiones que aportan el valor máximo

Para conocer cuál dimensión aportaba el valor máximo en cada píxel del área de estudio, se asignó un número identificador a cada superficie síntesis de la siguiente manera: Dimensión física = 1, Dimensión Cultural = 2, Dimensión Biótica = 3, Dimensión Económica = 4, Dimensión Política = 5.

Posteriormente se aplicó la función de análisis espacial *Highest Position* disponible en el ArcGis 9.2®, que determina la posición de un píxel con el valor máximo entre un conjunto de *grids* de entrada.

El algoritmo hace una lectura de todos los píxeles que conforman los *grids* de cada dimensión y ubica el valor máximo en cada una de ellas para cada posición (x,y); el resultado final



es entregado de acuerdo al número de identificación previamente otorgado a cada dimensión, es decir, si por ejemplo el valor máximo al leer todos los *grids* está en la dimensión política otorga como resultado para el píxel que está en esa posición (x,y) el valor de 5, que fue el número de identificación que se le asignó previamente a esa dimensión, y así sucesivamente para cada uno de los píxeles del área de estudio.

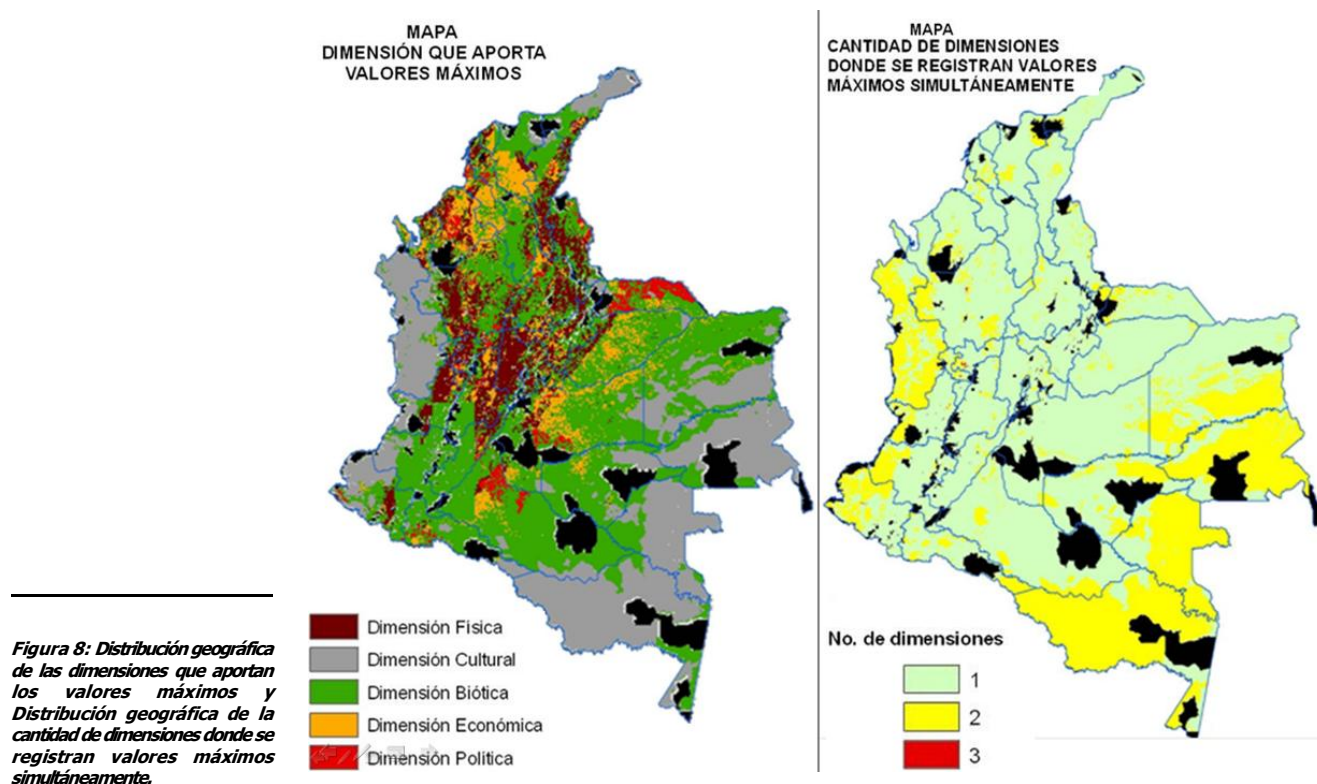
Es importante aclarar que el orden en el cual se numeran los *grids* de entrada, en este caso las dimensiones, juega un papel muy importante, pues de haber dos valores máximos iguales en dos dimensiones diferentes, el resultado que saldrá en esa posición será el del primer *grid* que se entró al sistema.

El *grid* de salida sólo puede tener entonces valores entre 1 y 5, los cuales se interpretan de manera cualitativa (retornando el nombre de la dimensión) cuando se compone el mapa resultante, tal y como se observa en la figura 8.

En la Figura 8 (figura de la izquierda), se observa que gran parte de los esfuerzos de gestión deberán ser enfocados a la dimensión biótica, y además, que las áreas más complejas desde el punto de vista físico se ubican mayoritariamente en la región andina; se aprecian también las áreas de resguardos indígenas y comunidades negras (esfuerzos de gestión desde la dimensión cultural) y las áreas de mayor importancia en función de las dificultades para las dimensiones económica y política.

Sin embargo, es posible que una superficie numérica esté enmascarando máximos de otras superficies y por tanto, no es todavía posible dimensionar hacia dónde se orientarán los mayores esfuerzos de gestión.

Esto se comprueba al calcular el porcentaje de valores máximos por dimensión; los resultados arrojan que el *grid* de la dimensión física tiene el 11.64% de sus píxeles con valores máximos; la dimensión biótica, el 71.81%; la económica, el 9.19%; la cultural, el 30.7% y la



política, el 4.24%. Como este resultado suma más del 100% resulta posible concluir de la anterior afirmación, que un valor máximo puede que se presente simultáneamente en varias dimensiones en la misma posición.

Análisis 2: Cuantificación de dimensiones con valores máximos

Para este análisis, se utilizó nuevamente el software ArcGis ® con el objeto de cuantificar las dimensiones donde se presenta el mismo valor máximo sobre determinada posición (x,y).

Se buscó que si un valor máximo cualquiera estaba por ejemplo en tres dimensiones sobre una posición (x,y), se obtuviera una nueva superficie numérica que en esa posición tuviera un valor de 3 y que de la misma manera, lo hiciera para cada uno de los píxeles del área de estudio.

El *grid* de salida solo puede tener valores entre 1 y 5, pero no necesariamente se tiene que llegar al 5. Se puede observar la Figura 8 (figura de la derecha). En las áreas amarillas y rojas, los máximos de varias dimensiones coinciden simultáneamente indicando que los esfuerzos de gestión deberán ser mayores. Para saber exactamente sobre cuáles aspectos o elementos del ambiente se espera encontrar más problemas o dificultades de gestión habría que analizar la distribución de máximos por dimensión con más detalle y hacer sumas por parejas con todas las combinaciones posibles.



5. CONCLUSIONES

Esta investigación permitió determinar y georreferenciar restricciones y áreas con distintos niveles de criticidad ambiental para el trazado de ductos de conducción de gas en el territorio nacional. A la escala de análisis, solo el 11.19% del país presenta áreas con características restrictivas, aunque no se debe dejar de lado las complicaciones que se presentan cuando se atraviesen zonas que se denominen posibles a las que se les haya otorgado altos valores de criticidad.

El estudio configura un tipo de Evaluación Ambiental Estratégica, EAE, dado su carácter preventivo y el nivel temprano en el que se aplica, integrando consideraciones ambientales en los procesos de toma de decisiones. Por tanto, es útil como herramienta para identificar las repercusiones de un nuevo proyecto de transporte de gas natural por ductos.

Se desarrolló una herramienta de planificación ambiental sectorial, para que tanto los estamentos del Estado responsables por fijar lineamientos, como las empresas promotoras del desarrollo, tengan reglas claras que les permitan proyectar, ejecutar y operar las obras necesarias para desarrollar sosteniblemente cada sector.

El ente planificador energético debería abordar planes de expansión alineados con las restricciones ambientales de cada sector, dando señales claras a los inversionistas.

Las autoridades ambientales pueden usar los resultados aquí obtenidos para calcular y conocer una primera aproximación de los corredores ambientalmente óptimos al momento de recibir diagnósticos ambientales de alternativas elaborados por una empresa o entidad que busca obtener licencia ambiental. De la misma manera, las empresas públicas y privadas pueden usar estos resultados para formular propuestas asertivas a las autoridades ambientales e inversionistas con una menor inversión de recursos.

A partir de exploración de la relación criticidad - costos de gestión, se posibilitaría la estimación de costos preliminares y el nivel de complejidad de la gestión ambiental a adelantar.

La utilidad de los resultados obtenidos en esta investigación aplica en distintos niveles:

- En primera instancia se aporta el conocimiento de las restricciones y la determinación de las zonas con distintos valores de criticidad en el territorio nacional a la escala de análisis.
- El uso de superficies de criticidad como las que se obtuvieron al desarrollar este método sirve para tomar decisiones en el nivel de planeación y calcular el mejor plan de expansión



desde el punto de vista ambiental; se posibilita conocer de forma inmediata, con el apoyo de un Sistema de Información Geográfica y a partir de un punto de llegada y uno de salida, la longitud que en primera instancia podría tener la ruta de menor costo ambiental en un proyecto de transporte de gas a escala 1:500.000, con lo que se puede presentar a las empresas o entidades de financiación nacionales o internacionales reportes que desde la etapa más temprana de concepción de los proyectos incluyan la variable ambiental. Por tanto, para las áreas de planeación de las empresas, es un insumo valioso; permite también la selección de corredores donde posteriormente se puede hacer estudios a escalas más detalladas y determinar rutas de diseño. Análisis similares (con metodología similar) serían útiles para la planificación de otros proyectos de desarrollo de carácter lineal y puntual.

- A la hora de planear conexiones internacionales, las superficies numéricas obtenidas se pueden usar para conocer una primera aproximación del mejor corredor en el tramo Colombiano. El método también se puede aplicar en otros países para contar con resultados comparables a la hora de pensar en proyectos de integración de la infraestructura regional sur y centro- americana, además de definir puntos de encuentro en la frontera.
- El estudio posibilita la inclusión de consideraciones ambientales para formular el plan de expansión del gas natural en Colombia y es el primero de su tipo que se realiza a nivel de todo el territorio continental del país.

Al llevar a cabo el análisis de resultados, se posibilitó proponer un aporte metodológico para el análisis de las superficies numéricas síntesis obtenidas al ejecutar la función por máximos con el objeto de conocer prioridades en la gestión ambiental. La metodología propuesta para determinar dichas prioridades permite predecir hacia dónde y de qué manera deben planear los recursos las entidades propietarias de los proyectos. Entre otras cosas, sirve para decidir si es conveniente realizar o no el proyecto, dadas las posibilidades particulares de cada entidad.

Antes de rechazar o reconocer bondades definitivas, los resultados deben ser examinados a una escala mayor, teniendo en cuenta que, en ocasiones, puede ser más beneficioso para el propietario de un proyecto incurrir en gastos adicionales para hacerse ideas más claras antes de impactar negativamente el medio natural y humano. Las ventajas y desventajas de las áreas factibles o no factibles deben ser pensadas en función de los impactos potenciales y de la complejidad que desde aquí se señala.

BIBLIOGRAFIA

- Abaza, H., Bisset, R. and Sadler, B., 2004. Environmental impact assessment and strategic environmental assessment: Towards an integrated approach. The United Nations Environment Programme. 147 P.
- Ángel, E., Carmona, S., y Villegas, L.C., 2001. Gestión ambiental en proyectos de desarrollo. Tercera Edición, Colombia. 235 P.
- Ángel, E. y Sanín A., 2008. Un método para la determinación de restricciones y posibilidades ambientales en proyectos de gas natural. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Bina, O., 2005. Strategic environmental assessment. In: Innovation in Environmental Policy Integrating environment for sustainability, Jordan, A. and Lenschow, A. (Eds. Forthcoming).
- Dusik, J., Fischer, T. and Sadler B., 2003. Benefits of strategic environmental assessment. [Sitio en internet] UNDP Briefing Paper. Disponible en www.undp.org. Acceso el 8 de enero de 2005.
- Ente Nacional Regulador de Gas de Argentina, ENARGAS, 2006. Normas técnicas argentinas mínimas para la protección ambiental en el transporte y distribución de gas natural y otros gases por cañerías, NAG 153, 87 P.

- Federal Energy Regulatory Commission, FERC, Office of Energy Projects, 2002. Guidance manual for environmental report preparation. USA.
- Fischer, T. 2003. Strategic environmental assessment in post- modern times. Environmental Impact Assessment Review, Vol. 23(2). pp. 155- 70.
- Interconexión Eléctrica S.A., ISA, e Instituto de Estudios Regionales de la Universidad de Antioquia, INER, 1998. Estudio de restricciones y posibilidades ambientales para los proyectos del Plan de Expansión Eléctrica 2001- 2010. Metodología general. Tomo I. Gerencia de Expansión. Medellín. 114 P.
- Johnson, S., 1993. The Earth Summit: The United Nations Conference on Environment and Development, UNCED, London: Graham & Trotman.
- Japan Bank For International Cooperation, JBIC, 2002. Guidelines for confirmation of environmental and social considerations, 26 P.
- Kurian, P. A., 1995. Environmental impact assessment in practice: a gender critique. The Environmental Professional, N° 17: pp. 167- 78.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT, de Colombia. 2006a. Resolución 1277 «Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para proyectos lineales y se dictan otras disposiciones». Identificados con el código DA-TER-3-01.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT, 2006b. Resolución 1275 «Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para los proyectos de conducción de fluidos por ductos en el sector de hidrocarburos y se adoptan otras determinaciones». Identificados con el código HI-TER-1-05. 43 P.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT, 1998. Guía ambiental para el transporte de hidrocarburos por ductos, Bogotá, 113 P.
- Ontario Energy Board, OEB, 2003. Environmental guidelines for the location, construction and operation of hydrocarbon pipelines and facilities in Ontario. 70 P.
- Partidario, M., 2000. Elements of an SEA framework: improving the added- value of an SEA. In: Environmental Impact Assessment Review, 20 (6), pp. 647- 663.
- Sadler, B. and Verheem, R., 1996. Strategic environmental assessment: status, challenges and future directions. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment of the Netherlands, The Hague. Report Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment of the Netherlands N° 53.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, SEMARNAT, (sin fecha). Guía para elaborar la manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad regional de proyectos petroleros, 34 P.
- Storey, K. and Hamilton, L. C., 2003. Planning for the impacts of megaprojects. *In*: R. O. Rasmussen and N. E. Koroleva (eds.), Social and Environmental Impacts in the North, 281- 302. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- Therivel, R., 2004. Strategic environmental assessment in action. London, UK: Earthscan.
- UPME. Unidad de Planeación Minero Energética 2007. La Cadena del Gas Natural en Colombia. 111 P.
- Wood, C., 1995. Environmental impact assessment: A comparative review, New York, NY. Wiley.



