

Modelo de análisis para la dimensión física en los estudios ambientales de los proyectos de transmisión eléctrica

María Aleyda García Gómez*, Humberto Caballero Acosta**

Resumen

El presente estudio contiene una descripción y análisis de los aspectos físicos del medio ambiente que se contemplan en los estudios ambientales de los proyectos de alto voltaje para líneas de transmisión eléctrica. Se define el significado y alcances en dichos proyectos en sus diferentes fases de implementación; es decir, en las etapas de diseño, construcción y operación y se hacen propuestas para mejorar la incorporación adecuada de la dimensión física dentro de las actividades ambientales.

Uno de los aspectos importantes que se trabajan en la investigación se refiere a la manera como se encuentra descrita esta dimensión en los actuales términos de referencia para estudios de impacto ambiental (EIA) del Ministerio del Medio Ambiente; por tanto, se analizan y se proponen elementos correctivos que articulen adecuadamente la información en dichos estudios, puesto que fueron encontrados problemas en la articulación y contenido de los aspectos físicos dentro de los EIA.

Otro aspecto igualmente importante que se aborda en la investigación, y con resultados satisfactorios, es la *Propuesta Metodológica para la Integración de los Componentes de la Dimensión Física*, en la cual se definen “unidades síntesis” en diferentes escalas para la integración de dichos componentes. Este hecho facilitará mejor comprensión de los procesos naturales en las áreas de influencia de los proyectos y mejor entendimiento de las relaciones recíprocas entre el proyecto y el medio físico. En el proceso de búsqueda de una metodología para la integración de los componentes de la dimensión física se pretende que los estudios sean más congruentes desde el punto de vista ambiental.

----- *Palabras clave:* modelo de análisis, dimensión física, estudios ambientales, proyectos de transmisión eléctrica.

Abstract

This study makes a description and analysis of the physical aspects of the environment which are contemplated in the environmental studies of the projects of high voltage for electric transmission lines. Its meaning and outreach are defined in these projects, in its different phases of implementation;

* Ingeniera Geóloga, Magíster en Ingeniería Ambiental.

** Ingeniero Geólogo, M. Sc. Geología del Cuaternario, Profesor Director.

that is in the stages of design, construction and operation, making proposals to improve the adequate incorporation of physical dimension in the environmental activities.

A very important aspect, worked out in the investigation, has to do with the way as this dimension is described in the real terms of reference for EIA of the Ministry of Environment; that is why it is analyzed and some elements are proposed which are to correct and to articulate properly the information in these studies, because some problems were found in the articulation and contents of the physical aspects in the studies of environmental impact (EIA).

Another very important aspect which was obtained with this research is the methodological proposal for the integration of the components of the physical dimension in which "synthesis units" are defined in different scales for the integration of those components. These facts will facilitate a better understanding of the natural processes in the areas of influence of the projects and a better understanding of the reciprocal relations between the project and the physical surroundings. In the process of searching a methodology for integration of the components of the physical dimension it is hoped that the studies be more congruent from the environmental point of view.

----- *Key words:* analysis model, physical dimension, environmental study, electric transmission projects.

Introducción

La construcción de una línea de transmisión o de una subestación eléctrica genera una serie de impactos en la dimensión física o medio físico, cuyos efectos se manifiestan en erosión, movimientos en masa, limitación en el uso de recursos minerales y de suelos, contaminación de aguas, entre otros. Dada la interacción de las diferentes dimensiones (física, biótica, cultural, económica, política) del sistema ambiental, si no se logra el manejo adecuado de los impactos, en una o en varias de ellas, el sistema se verá afectado en su funcionamiento; lo que hace necesario diseñar estrategias de gestión ambiental que permitan minimizar los impactos en las etapas de construcción y operación de las líneas de transmisión y de las subestaciones eléctricas.

Al igual que todo el sistema ambiental, la dimensión física está constituida por componentes que se encuentran articulados entre sí, con mutua influencia. Por tanto, su análisis en el medio ambiente no puede circunscribirse a un estudio analítico por componentes sino que debe ser estudiado desde la perspectiva sintética dentro de una unidad completa. Por tanto, se plantea un modelo o metodología que permite efectuar el análisis integral de la dimensión física, durante la fase de diseño, incorporándolo desde las etapas iniciales de selección de alternativas y de la ruta óptima, en la caracterización ambiental del área de influencia de la ruta seleccionada, llevándola finalmente hasta el análisis puntual de los problemas actuales o potenciales de estabilidad, dando así mayores elementos en la selección adecuada de los sitios de torre durante la etapa de diseño.

Del presente trabajo se desprenden varias propuestas que podrán ser retomadas para implementarlas en los futuros estudios ambientales con el objeto de facilitar la adecuada gestión ambiental de los proyectos de transmisión eléctrica.

Aspectos conceptuales

La evaluación de los impactos ambientales de un proyecto de desarrollo implica la caracterización del escenario sin proyecto y la construcción

de escenarios futuros con base en las tendencias actuales de las diferentes actividades a que es sometido el ambiente. En este punto deben tomarse en cuenta los impactos generados en el área de influencia por otras actividades o proyectos diferentes al que está sometido al proceso de evaluación ambiental.

Luego de la caracterización es necesario efectuar la predicción de los impactos ambientales causados por las futuras actividades. Realizado el paso anterior se efectúa su evaluación; lo que significa que debe existir claridad sobre la característica del impacto, de tal modo que la evaluación lo dimensione en forma cercana a la realidad. Igualmente, la metodología de evaluación debe permitir la adecuada valoración del mismo.

El apropiado dimensionamiento del impacto permite el diseño de medidas de manejo acordes con él y el hecho de implementar las medidas diseñadas significa efectuar una adecuada gestión ambiental de los impactos; esta gestión es realizada tanto en las etapas de construcción como de operación y de abandono o desmantelamiento del proyecto.

El presente estudio utiliza el “Modelo analítico por dimensiones en la evaluación de impactos ambientales”, en el cual se considera que no existe la exclusividad de una dimensión para definir un impacto; es decir, no podemos hablar del impacto físico sino de la dimensión física del impacto, lo que implica que el impacto tiene relación con ésta y todas las dimensiones del sistema ambiental.

Obviamente, para aproximarnos a la comprensión del impacto ambiental, es necesario hacer un análisis o “separación abstracta” de los componentes que forman la dimensión física y desde allí hacer la articulación con sus demás dimensiones y lograr la integralidad en la comprensión del impacto ambiental.

La estructura del sistema eléctrico colombiano

La red de transmisión del sistema interconectado cuenta a la fecha con aproximadamente 9.644 km de líneas de transmisión, distri-

buidas así: líneas de 230 kV: 8.579 km y líneas de 500 kV: 1.065 km.

El sistema de transmisión nacional (STN) cuenta también con 66 subestaciones a 230 kV y cuatro subestaciones a 500 kV. Adicionalmente se cuenta con interconexiones con Venezuela y Ecuador a través de líneas a 230 kV.

El STN es un sistema multipropietario conformado por diez empresas transportadoras de energía cuya coordinación está a cargo del Centro Nacional de Despacho (CND) y de los centros regionales de despacho; ISA posee el 73% del STN. A raíz de la etapa de transición en la cual se encuentra el sector eléctrico colombiano, que consiste en el cambio de un esquema centralizado a uno en que se fomenta la competencia entre agentes, se espera la inversión de capital privado para la transmisión de energía en el país.

En Colombia existe un único sistema interconectado con redes que enlazan las plantas de generación con los centros de carga de la región andina, litorales atlántico y pacífico y parte de los Llanos Orientales. La demanda del resto del país es atendida con generación local que es apenas superior al 1% de la demanda total (ISA, 1996). El sistema de transmisión está conformado por dos áreas eléctricas (centro del país y costa atlántica).

Aspectos ambientales de los proyectos de transmisión eléctrica

Las líneas de transmisión son proyectos de infraestructura que garantizan el equipamiento social general respecto al servicio de energía eléctrica. Éstos constituyen un conjunto complejo de actividades y transformaciones planificadas para modificar el entorno natural y humano, con inversión de capital y tecnología; alteraciones al medio ambiente que causan impactos ambientales. Como el impacto ambiental es el centro de la gestión ambiental, es necesaria su identificación y evaluación y la definición de planes y programas para el manejo de cada impacto; en sín-

tesis, la articulación de las consideraciones ambientales en cada una de las fases de los proyectos como se muestra en la figura 1 [1].

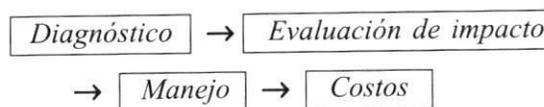


Figura 1 Fases de un proyecto

El estudio de los impactos de un proyecto es uno solo y se desarrolla en diferentes fases, de manera progresiva, desde el reconocimiento general del medio, la identificación preliminar de los impactos ambientales, la valoración y evaluación detallada de los impactos hasta el diseño, implementación, seguimiento y evaluación ex-post del plan de manejo ambiental.

Los estudios ambientales inicialmente obedecen a la lógica de prevenir, evitar o mitigar los impactos no deseables; después, a la compensación de los daños o pérdidas inevitables y finalmente a la lógica de potenciar vectores de desarrollo.

Los proyectos de transmisión eléctrica son de tipo lineal; es decir, proyectos longitudinales localizados en corredores que imponen restricciones parciales o totales al uso del suelo. En este tipo de proyectos los impactos ambientales pueden tener una magnitud no muy alta, si se consideran por separado; sin embargo, el impacto puede ser significativo si se mira en forma agregada, debido al cruce de gran diversidad de medios naturales y humanos, lo que le confiere gran complejidad a la gestión ambiental [1].

La dimensión física en el modelo analítico por dimensiones

El concepto de dimensión analítica en la evaluación de los impactos de los proyectos de infraestructura sobre el sistema ambiente, centra su utilidad en la búsqueda de estrategias de diagnóstico, de identificación y evaluación de impactos y en la formulación de medidas de manejo, a partir de la integración en el análisis de las diversas temáticas y componentes ambientales. Se trata de abor-

dar la compleja interacción entre los múltiples subsistemas específicos del medio humano y el medio natural y comprender que el comportamiento específico de un impacto ambiental contiene variables de origen múltiple. De manera genérica, se definen como dimensiones en este modelo el conjunto de componentes físicos, bióticos, culturales, económicos y políticos del ambiente.

El modelo de análisis por dimensiones se aplicará tanto sobre el estado ambiental previo a la intervención de un proyecto, equivalente a la etapa de diagnóstico, como a las etapas subsiguientes de identificación y evaluación de los impactos y la formulación del plan de manejo. Es claro que cada una de las dimensiones analíticas conlleva particularidades propias de los métodos de análisis y el tipo de datos que requiere para realizar sus diagnósticos y explicaciones, lo que demanda el concurso de diversas especialidades científicas y la necesaria adopción de modelos de trabajo interdisciplinario [2].

Los componentes de la dimensión física

A continuación se describe en forma más detallada cada uno de los componentes de la dimensión física del ambiente.

- **Componente geosférico.** Se refiere a aquel que se ocupa del elemento ambiental tierra. En este componente se considera, entre otros, a la geología como ciencia que aporta los elementos de análisis relacionados con la litosfera o las rocas, los recursos minerales y los procesos internos que producen la evolución de la corteza terrestre como son las actividades sísmica y volcánica; incluye también la tectónica, que explica el aspecto dinámico o estructural como son las fallas y las diaclasas.

Igualmente, el componente geosférico involucra la geomorfología como ciencia que ofrece los elementos conceptuales sobre la evolución de la superficie terrestre a partir del análisis de sus formas (geoformas) y de los procesos actuantes recientes bajo la acción de los factores agua y gravedad.

Se incluyen también en este componente la geotecnia y la edafología que estudia los suelos formados en el ámbito superficial, aunque su estudio requiere también de elementos bióticos.

- **Componente atmosférico.** Se refiere a los elementos climatológicos como son la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, la evaporación, el brillo solar, los niveles cerámicos y el viento.
- **Componente hidrosférico.** Se trata de los elementos relacionados con el agua tanto superficial como subterránea. Se prefiere utilizar el término hidrosférico en vez de hidrológico ya que el primero es un concepto genérico para referirse al agua en tanto que el segundo tiende a sesgar el pensamiento hacia las aguas superficiales.

En la tabla 1 se presenta la lista de factores generales que se deben tomar en cuenta en los estudios ambientales de líneas de transmisión. Esta lista varía en función de la localización geográfica del área de estudio, la que implica unas particularidades diferentes del entorno.

Los impactos ambientales sobre la dimensión física de las líneas de transmisión eléctrica

Ángel y otros, [3] en “El impacto ambiental del sector eléctrico colombiano” definen como principales impactos sobre el medio físico para las líneas de transmisión: la pérdida de la cobertura vegetal, que conlleva predisposición a la erosión y aumento de la escorrentía superficial, la alteración hídrica y edáfica por la apertura de accesos y paso de maquinaria pesada, y los impactos derivados de la construcción de accesos, tales como desestabilización de taludes, deslizamientos superficiales y cambios en el paisaje.

De acuerdo con el estudio mencionado, los impactos, en su mayoría, son evitables o mitigables en alto grado por medio de una adecuada gestión. Igualmente explican que una de las principales causas de los impactos había sido la exclusión

Tabla 1 Componentes de la dimensión física relacionada con proyectos de transmisión eléctrica

| Componente | Variable | Factor |
|---------------------|------------------|--|
| Geosférico | Geología | Litología, estructuras, recursos minerales y fuentes de materiales, sismicidad, vulcanismo. |
| | Geomorfología | Unidades geomorfológicas, elementos singulares, formaciones superficiales, procesos morfogenéticos. |
| | Edafología | Acidez, nivel freático, resistividad, unidades de suelos. |
| | Geotecnia | Capacidad portante, cohesión, ángulo de fricción interna, clasificación del suelo. |
| Atmosférico | Climatología | Precipitación, temperatura, humedad, brillo solar, niveles cerámicos, velocidad del viento. |
| | Calidad del aire | Material particulado, ruido, fuentes contaminantes. |
| Hidrosférico | Agua superficial | Red hidrográfica, drenajes susceptibles de contaminarse, usos, usuarios y restricciones de uso. |
| | Agua subterránea | Hidrogeología, caudales de pozos afectados, usos del recurso. |
| | Calidad del agua | Propiedades físicoquímicas, biológicas, bacteriológicas; evaluación del OD, DBO5, ST, SS, pH y T de los drenajes susceptibles de afectarse; fuentes industriales de contaminación y tipos de vertimientos; grado de afectación potencial de la calidad del agua por el proyecto. |

oportuna de criterios de protección ambiental en la selección de corredores y alternativas de ruta.

La dimensión física en las diferentes fases de los proyectos de transmisión eléctrica

Se realizó una descripción y análisis de los proyectos de transmisión eléctrica considerando los criterios ambientales durante sus distintas etapas de implementación desde la fase de diseño, en la construcción y finalmente durante la operación.

Para el análisis se contemplaron los siguientes proyectos de transmisión eléctrica: Betania-Morrolindo, San Carlos-Cerromatoso y Primavera-Playas. Sin embargo, también han sido incluidos en el análisis los estudios ambientales de las líneas de transmisión Sabanalarga-Fundación, La Sierra-Purnio, San Carlos-San Marcos, San Carlos-Barrancabermeja y La Virginia-La Hermosa.

El diseño en las líneas de transmisión eléctrica

El ciclo técnico de los proyectos de transmisión lo conforman actividades que permiten la definición

del proyecto mediante la sucesiva toma racional de decisiones; estas actividades se extienden desde la fase inicial de definición del corredor hasta la construcción y operación de la línea de transmisión. El ciclo técnico se presenta a manera de paralelo con el ciclo de actividades ambientales.

En el diseño de las líneas de transmisión eléctrica se contempla la etapa de planeación y estudios, que se divide en dos subetapas: concepción y selección de alternativas y optimización de las alternativas. Cada subetapa tiene un alcance tanto técnico como ambiental, lo que se puede observar detalladamente en la tabla 2.

Ajustes propuestos al diseño de las líneas de transmisión eléctrica

En esta investigación se hace la siguiente propuesta para la etapa de diseño, donde se plantean observaciones generales con énfasis en los temas desarrollados que corresponden a la dimensión física.

- **Reconocimiento y selección de ruta.** El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) debe quedar explícito en el concurso

Tabla 2 El ciclo técnico y ambiental de los proyectos de transmisión eléctrica

| <i>Etapa</i> | <i>Subetapa</i> | <i>Alcance técnico</i> | <i>Alcance ambiental</i> |
|-----------------------|--|--|--|
| Planeación y estudios | Concepción y selección de alternativas | Determinación de obras de transmisión necesarias para cubrir demanda específica Selección del corredor | Análisis de restricciones ambientales de la zona del plan de expansión Escogencia de los posibles corredores de ruta |
| | Optimización de alternativas | Evaluación de las alternativas de ruta Selección de la ruta definitiva Trazado Plantillado Replanteo | Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) Selección de la ruta óptima desde el punto de vista técnico ambiental. Información y consulta a la comunidad Evaluación detallada de los impactos. Diseño del plan de manejo ambiental. Concertación con la comunidad Trámite de licencias y permisos ambientales Iniciación de la negociación de predios y servidumbres o derechos de paso |
| Construcción | Actividades previas | Trámite de licitación y contratación del suministro de equipos, montaje o construcción Licitación y contratación de las obras civiles y de la interventoría | Elaboración e inclusión de los pliegos de las especificaciones técnicas ambientales Conclusión de la negociación de servidumbres |
| | Construcción | Replanteo definitivo Construcción de las obras del proyecto | Continuación del programa de información Talleres de inducción a personal Ejecución del Plan de Manejo Ambiental con cogestión de la comunidad Aplicación de controles de la calidad ambiental Electrificación rural Reposición de la cobertura vegetal |
| Operación | | Puesta en servicio e inicio de la operación comercial del proyecto Iniciación del plan de mantenimiento | Evaluación ex-post Ejecución del Plan de Manejo Ambiental de la operación |

de licitación de la contratación de servicios de consultoría en diseño. Es una herramienta que facilita la aplicación de metodologías de integración y análisis de información (como el análisis de susceptibilidad ambiental-costos de viaje) trayendo consigo alto valor agregado a los resultados que se obtengan mediante su aplicación.

- **Trazado, levantamiento y cálculos topográficos.** El levantamiento planimétrico debe detallar los fenómenos de inestabilidad.

- **Geología general y estudio preliminar de suelos.** Se debe realizar una zonificación del terreno mediante unidades síntesis que ayuden en la caracterización preliminar de los suelos y a la identificación y zonificación de las amenazas naturales que pueden poner en riesgo el proyecto.
- **Estudio definitivo de suelos y geología de detalle.** Los estudios para cada sitio de torre deben contener la información de mecánica de suelos para establecer las capacidades

portantes de las fundaciones y la información geológica-geotécnica.

- **Estudio de impacto ambiental.** Es necesario recalcar la importancia de presentar en detalle la metodología que se utilizará. Todos los componentes de la dimensión física deben ser considerados y estudiados adecuadamente durante la fase de caracterización ambiental del estudio de impacto ambiental (EIA). Dejar de lado uno o algunos de ellos significa que no se aportará la información necesaria para la comprensión del funcionamiento del sistema físico del medio donde se encontrará el futuro proyecto y, por tanto, cuando se realice la evaluación de los impactos generados, ésta será insuficiente, lo que se reflejará notoriamente en la calidad del plan de manejo ambiental (PMA) y se harán insuficientes y probablemente más costosas las medidas de gestión ambiental.

Existe un vacío conceptual de integralidad del comportamiento de los componentes físicos del medio natural y la ausencia de una estructura coherente y la información insuficiente se reflejan en los actuales términos de referencia para los estudios de impacto ambiental de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. En este sentido se propone reformar la actual estructura de dichos términos de referencia en cuanto a su forma y contenido.

- **Recolección de información para la caracterización ambiental.** No es adecuado hacer una regionalización estadística de los datos de suelos obtenidos a una escala de trabajo de 1:100.000.

Ajustes propuestos a la construcción de líneas de transmisión eléctrica

En la fase de construcción se levantan las obras del proyecto y paralelamente se cogen los programas específicos del PMA con la comunidad, se ejecuta el PMA definido para la construcción y se aplican los controles de la calidad ambiental.

Otro aspecto importante son las metodologías de evaluación de los impactos ambientales y lo que tiene que ver con los componentes físicos del medio natural. Éstas no responden suficiente y objetivamente a las características de los impactos de los proyectos y el no abordar el comportamiento integral de los componentes físicos no va a permitir el estudio integral de los impactos.

En la etapa de replanteo de la construcción se debe revisar detalladamente el PMA por parte de un grupo interdisciplinario, verificando la localización de cada torre y sus posibles impactos.

La interventoría de la construcción debe monitorear, prevenir y corregir oportunamente los impactos ambientales que presentan en los componentes físicos del medio natural afectados por la implementación del proyecto.

Ajustes propuestos a la operación de las líneas de transmisión eléctrica

La operación de la línea de transmisión consiste en la puesta en servicio comercial, es decir, el transporte de la energía. En este mismo alcance se realiza el plan de mantenimiento de la línea de transmisión y de las subestaciones eléctricas. En cuanto al alcance ambiental, en esta fase se realizan las evaluaciones ex-post y se ejecuta el PMA para la operación del proyecto.

Es evidente la necesidad de implementar en las líneas en operación el plan de manejo ambiental respectivo con el objetivo de que se establezcan criterios de prevención, corrección, compensación y mitigación de impactos remanentes de la construcción o que surjan durante la operación. Igualmente es importante establecer los sistemas de seguimiento y control ambiental que permitan evaluar el comportamiento, eficiencia y eficacia de dicho plan.

También es importante implementar una metodología de evaluación ex-post de la construcción con diferentes períodos de análisis que permitan, de la información obtenida, evaluar todo el proceso de gestión de tal manera que haya una retroalimen-

tación de experiencias que puedan ser consideradas desde las fases de diseño de los proyectos.

Propuesta metodológica para la integración de la dimensión física

La información recopilada de los componentes de la dimensión física tiene sentido si su comportamiento es comprendido dentro de un contexto sistémico específico. De no considerar este aspecto, simplemente lo que se hará es acumular información sin resultados prácticos. Una manera de lograr la integración de los componentes de la dimensión física dentro del contexto de sistema es mediante la definición de unidades síntesis.

En este estudio se proponen unidades que integran los componentes de la dimensión física en diferentes escalas de estudio. Esta propuesta metodológica está basada en la adaptación de tres metodologías:

- La del International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- La Unidad Geomecánica Independiente (UGI) desarrollada por Alejandro Chica.
- La metodología basada en el análisis de taludes naturales (MTN) para análisis de estabilidad en masas de materiales geológicos desarrollada por el ingeniero Tomas Shuk en su artículo "Metodología de taludes naturales" (1997)¹.

El sistema ITC de análisis y clasificación del terreno

El análisis y clasificación de los relieves son básicos en los estudios del terreno. Los relieves pueden definirse como "características del terreno formadas por procesos naturales que tienen una composición y rango definido de aspectos físicos y visuales que ocurren donde se encuentre el relieve". Es en este contexto en el que el análisis y clasificación están ligados a la geomorfología: "un estudio que describe los relieves (genéticamente) y los procesos que condujeron a su formación e investiga las interrelaciones de estas formas y procesos en su disposición espacial en el tiempo" [4].

El sistema ITC de análisis está compuesto por componentes, unidades, sistemas y provincias de terreno basados en los principios geomorfológicos; es decir, una clasificación en el reconocimiento del relieve basado en su forma específica, litología y génesis (los procesos del pasado y el presente), que pueden ser además especificados sobre la base de atributos o parámetros del terreno.

El sistema ITC de análisis está compuesto por componentes, unidades, sistemas y provincias de terreno basados en los principios geomorfológicos; es decir, una clasificación en el reconocimiento del relieve basado en su forma específica, litología y génesis (los procesos del pasado y el presente), que pueden ser además especificados sobre la base de atributos o parámetros del terreno.

- **Componentes de terreno.** En este nivel no existen generalizaciones en clases areales y ninguna o sólo generalizaciones menores en detalle. Ellas forman las clases de terreno más pequeñas en las que el relieve es el criterio más importante de clasificación. Las unidades son básicamente uniformes en relieve, litología, suelos, vegetación y procesos, pero puede ser predominante una forma o una característica del terreno. La escala del mapa en el que tales componentes del terreno se representan generalmente es 1:10.000 o mayor (utilizado para proyectos de desarrollo especiales para ingeniería y gestión).
- **Unidades de terreno.** Se refiere a un relieve o a una asociación homogénea o compleja de relieve relacionada con una característica particular del terreno o patrón de componentes del terreno. Una unidad de terreno refleja características externas e internas diferentes de las de los relieves circundantes dentro del mismo sistema de terreno (a los que ellas genéticamente están relacionadas). El relieve, la litología y la génesis son los principales

¹ Este artículo hace parte de una investigación en proceso de publicación por la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

criterios de clasificación. La escala del mapa en el que solamente se representan las unidades relieve/terreno puede variar de 1:10.000 a 1:100.000 (utilizado para el trabajo consultivo y la planeación detallada de los proyectos de desarrollo).

- **Sistemas de terreno.** Se refiere a una unidad de paisaje con un desarrollo del relieve característico en un determinado ambiente ecológico, frecuentemente determinado por la génesis, la litología o el clima. Un sistema de terreno reflejará modelos repetitivos de relieves similares relacionados genéticamente que pueden diferenciarse de otras formas en el terreno aledaño. La escala del mapa apropiada para señalar los sistemas de terreno está entre 1:100.000 y 1:250.000 (utilizada para estudios de factibilidad de proyectos de desarrollo de uso multipropósito).
- **Provincias de terreno.** Son las unidades más grandes en las que se combinan asociaciones y complejos de sistemas y unidades de terreno. Una provincia es básicamente uniforme en amplias características de relieve, climáticas o litológicas. La escala apropiada del mapa es frecuentemente mayor a 1:250.000 (utilizada para la identificación de sitios provisionales para proyectos de desarrollo como guía de la planeación y la gestión, puede también funcionar como una estructura de estudios de mayor detalle).

La unidad geomecánica independiente (UGI)

La estabilidad y permanencia proyectadas de una obra civil (vía, puente, fundación de una torre de transmisión, etc.) dependen de su diseño y de la respuesta del conjunto de rocas existentes en su zona de influencia. Esta respuesta es función de factores morfológicos, climáticos, litológicos y estructurales, como los más importantes y que, a su vez, pueden sufrir variaciones con el tiempo. Esto último implica que no basta con determinar, en un momento dado los parámetros geomecánicos y geohidrológicos necesarios para cuanti-

ficar la reacción de un conjunto de rocas ante una obra civil, sino que se hace necesario estimar la variabilidad de dichos parámetros con el paso del tiempo (especialmente el proyectado para la permanencia de la obra).

Son muchos los factores que rigen la variabilidad del comportamiento geomecánico y geohidrológico de un conjunto de rocas, como lo son por ejemplo: las variaciones del nivel freático, la solubilidad o movilidad de rellenos de fracturas y diaclasas o de materiales cementantes presentes en algunas rocas, la meteorización, la distensión de las rocas por liberación de esfuerzos residuales existentes, los deterioros de los niveles más superficiales de suelos y rocas, etc. Tales procesos pueden llegar a definirse como fenómenos continuos, acelerados por la obra construida y sus factores modificantes asociados.

Existen estudios geológicos-geotécnicos que se enfocan para delimitar dentro de terrenos inclinados o pendientes sus zonas estables y así poder planificar obras civiles proyectadas, para evitar problemas que suelen ocurrir especialmente en las épocas de lluvia y en los comienzos de las épocas secas. Lógicamente, desde el comienzo de cualquiera de estos estudios, es determinante considerar que las propiedades geomecánicas de los niveles superficiales de los suelos y rocas son variables con el tiempo y, más aún, cuando su superficie está sujeta a modificaciones geométricas o a deterioros no controlados debido a su uso. Todo estudio debe considerar la proyección de resultados en el tiempo tomando en cuenta esa variabilidad potencial, casi segura, de propiedades.

La UGI es importante porque es una unidad donde se desarrollan una serie de procesos, que una vez reconocidos se pueden definir en una escala adecuada de acuerdo con la que se haya establecido como zona de interés (por ejemplo, para una zona inestable alrededor de la fundación de una torre de transmisión o en los alrededores de una subestación eléctrica). Allí se presenta una serie de acciones y reacciones que generan inestabilidad al terreno. A su vez, se pueden desen-

cadenar más acciones y reacciones y así sucesivamente.

Se pueden desarrollar modelos de trabajo y métodos para estimar y, en ciertos casos, cuantificar el comportamiento de un conjunto de rocas, proyectado en el tiempo; en el presente trabajo se propone un método no convencional para conocer las propiedades geomecánicas de materiales geológicos y por supuesto la estabilidad de estos materiales. El método es del ingeniero Tomas Shuk y en la siguiente sección se presenta un resumen.

Metodología basada en taludes naturales para el análisis de estabilidad en masas de materiales geológicos

Esta metodología se origina en la relación de causalidad dada solamente por las características de resistencia y presurización de la masa, ya que también las afectan los factores exógenos y endógenos que participan en los procesos constructivos y destructivos de taludes que operan a través de esas dos características.

Con base en tres hipótesis de trabajo se llega a una envoluta transformada directamente a partir de la función potencial simple de correlación entre H (altura) y L (longitud) que se denomina "envoluta de esfuerzos de corte actuantes" y que no es relacionable con una envoluta de Mohr: ella es la expresión del equilibrio en el punto de la masa sujeto al mayor esfuerzo vertical, entre los esfuerzos actuantes y los parámetros de resistencia y presurización de la masa; dicho equilibrio desemboca matemáticamente en la ecuación de equilibrio de Coulomb con parámetros de esfuerzos efectivos.

La combinación de esta envoluta potencial para la situación actual de la masa, con otras envolutas para situaciones hipotéticas permite determinar los parámetros de resistencia (cohesión y fricción), de presurización (positiva en exceso, positiva, equilibrio y negativa) y descriptivos (pesos unitarios, etc.), tanto para la masa, como para una condición de "laboratorio", con base sola-

mente en información topográfica y geológica adecuada, y sin efectuar sondeos ni ensayos de laboratorio.

Unidades integradoras de los componentes de la dimensión física

En la tabla 3 se resume la propuesta de unidades síntesis para la dimensión física que a continuación se describe.

Tabla 3 Propuesta de unidades síntesis de la dimensión física en líneas de transmisión y subestaciones eléctricas

| <i>Estudio</i> | <i>Contexto</i> | <i>Unidad de análisis</i> | <i>Escala</i> |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|
| Posibilidades y restricciones | Regional | Provincias de terreno | 1:500.000 |
| DAA | Regional | Sistemas de terreno | 1:100.000 |
| | Selección ruta (regional) | Unidades de terreno | 1:25.000 |
| EIA | Regional | Unidades de terreno | 1:25.000 |
| | Local | Componentes de terreno | 1:10.000 |
| Diseño (Plantillado) | Puntual | UGI | Mayor a 1:10.000 |

- **Unidades regionales.** Las unidades síntesis se definen aquí, en general, como unidades regionales homogéneas en litología, relieve y clima. La línea de transmisión define el sector de unidades homogéneas que son de interés para el estudio. La escala de análisis es 1:100.000 para el diagnóstico ambiental de alternativas.

En forma paralela se analiza la información relacionada con las características hidrológicas e hidrogeológicas, se determinan las cuencas hidrográficas de interés y se procesa información relacionada con recursos minerales y procesos geológicos (zonificación de amenazas sísmicas, volcánicas e inundaciones); además se puede efectuar adicionalmente la

interacción con especialistas de las otras dimensiones ambientales e incluir información en vegetación, usos del suelo, aspectos socio-económicos y culturales lo que le daría un contexto de paisaje a la zonificación al realizarse la integración de toda la información ambiental. La base para la delimitación de esta unidad está basada en los criterios definidos por Van Zuidam para las unidades de terreno los cuales son aplicables en selección de ruta y contexto regional del EIA en escala 1:25.000.

- **Unidades locales.** Se constituyen en el área directamente afectada por las actividades del proyecto. Sobre las unidades síntesis resultantes en el contexto regional se define el área de influencia de los procesos físicos que existen y se generan por las actividades en las distintas fases de implementación de la línea de transmisión y se delimitan en él una serie de unidades homogéneas relacionadas con el corredor.

En la unidad homogénea se realiza un estudio detallado cuyos criterios principales de análisis y clasificación son el relieve, los procesos geomorfológicos y las formaciones superficiales. Es decir, la definición de las unidades en este nivel de escala permite establecer homogeneidad de características del relieve y en procesos geomorfológicos actuantes.

En este nivel de análisis deben quedar clasificados los recursos minerales estratégicos, las unidades singulares, zonificación de mayor detalle de las amenazas naturales por movimientos en masa e inundaciones, las características y distribución de las formaciones pedológicas e igualmente se determinan las microcuencas, acuíferos y demás cuerpos de agua de interés, se caracterizan los cuerpos de agua afectables por el proyecto y se realizan los muestreos de suelos desde el punto de vista pedológico. Este tipo de unidad es equivalente a las definidas por Van Zuidam como componentes de terreno. La escala de trabajo es 1:10.000.

- **Unidades puntuales.** El contexto puntual se debe considerar en la fase de diseño definitivo (replanteo y plantillado definitivos); en este

nivel interesa estudiar con detalle procesos de inestabilidad crítica (procesos erosivos activos, inundaciones, etc.) identificados y zonificados en la fase del estudio del contexto local; a su vez, se realizan los muestreos detallados de suelos desde el punto de vista geotécnico.

Debido a la gran importancia de conocer el grado de estabilidad de las torres ubicadas en sitios críticos, además de los sitios donde se localizan las subestaciones (debido a su costosa infraestructura), se ha considerado establecer una metodología de análisis y zonificación geotécnica puntual con el criterio metodológico de la unidad geomecánica independiente (UGI).

Al definirse una UGI se condiciona o induce una visión integral "puntual" de la dimensión física, lo que se evita con este aspecto es estudiar procesos aislados, como sucede en algunas ocasiones, especialmente cuando se definen los sitios de torre y de subestaciones; muy delicado y de cuidado ya que si compromete la estabilidad y funcionamiento de una determinada obra pueden ser grandes los daños ambientales y las pérdidas económicas del proyecto debido a los sobrecostos, además de complicarse las labores de construcción, operación y gestión ambiental. La escala de trabajo debe ser mayor a 1:10.000, dependiendo del área de terreno específica definida por la UGI resultante.

Los términos de referencia para EIA de líneas de transmisión y subestaciones

En junio de 1997 el Ministerio del Medio Ambiente publicó los términos de referencia para los estudios de impacto ambiental de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas (ETER 310). Este fue un primer intento por unificar los criterios técnicos y científicos que se debían tener en cuenta en la elaboración de dichos estudios, de tal forma que se lograra mejorar su calidad, lo que generaría mejoras substanciales en la gestión de los impactos de los proyectos, prote-

giendo y conservando con mejores posibilidades los recursos naturales y sociales afectados.

El enfoque actual de la información requerida para la dimensión física en los actuales términos de referencia, no ayuda adecuadamente a establecer procedimientos metodológicos acertados por lo que los estudios finalmente se convierten en inventarios de información sin sentido práctico al momento de evaluar los impactos generados y llevan a un inadecuado plan de manejo, es decir, una gestión ambiental incompleta.

Por tanto es necesario realizar la revisión cuidadosa de estos términos de referencia desde la perspectiva de la dimensión física estableciendo criterios que estructuren e integren sus componentes.

En este estudio se proponen reformas tanto en el *contenido y estructura* como en la incorporación de elementos metodológicos que buscan integrar la información.

Criterios ambientales en la selección de ruta

Los términos de referencia consideran esta etapa como la primera aproximación a un análisis integral de la problemática ambiental con la optimización de la ruta definitiva aprobada por el Ministerio del Medio Ambiente.

En este análisis se considera que desde la etapa de diagnóstico se debe aplicar la metodología que permita integrar todos los componentes físicos del ambiente, lo que facilitará su análisis. En este sentido una propuesta es aplicar los criterios que definen las unidades síntesis denominadas sistemas de terreno (escala 1:100.000) y unidades de terreno (escala 1:25.000); así se puede lograr en forma más objetiva la optimización de la ruta, facilitando la identificación de las características restrictivas y de alta susceptibilidad ambiental del proyecto dentro de la dimensión física.

Caracterización ambiental del área de influencia del proyecto

El área de influencia de un proyecto es un tema discutible entre las distintas disciplinas ambien-

tales, máxime que cuando se estudia el ambiente en su integridad las distintas ciencias presentan alcances diferentes ante los impactos generados por un proyecto. En el caso de la dimensión física en los proyectos de transmisión eléctrica, el área de influencia de los impactos físicos dependerá de las condiciones particulares de cada uno de sus componentes mutuamente influenciados entre sí. Ahora bien, la existencia de dos niveles de análisis, contextos regional y local, permite desarrollar, a partir de la observación y el análisis de la información, criterios que ayuden a caracterizar adecuadamente los componentes físicos en diferentes escalas.

Se considera importante definir el comportamiento integral de los componentes físicos, de tal forma que se pueda efectuar una zonificación de unidades homogéneas de comportamiento similar; de esta manera se podrá identificar, en cada una de ellas, las características y magnitudes de los fenómenos físicos. Una vez efectuado el análisis de las actividades introducidas por el proyecto, se define su influencia tomando en cuenta la dinámica dentro de cada unidad homogénea. Es decir, el área de influencia de un proyecto no puede ser definida por un límite impuesto subjetivamente, sino que debe ser el resultado del análisis integral como el descrito, que permita conocer en forma objetiva la interacción ambiente-proyecto.

La comprensión de la dimensión física en el contexto regional no puede estar sujeta a un corredor de cuatro kilómetros, lo que significa que para su estudio se requiere de un área mayor o menor, es decir, un área que delimite con claridad las relaciones suelo-agua-clima con el proyecto. Esto es factible a una escala de estudio de 1:25.000 a partir de un análisis 1:100.000. En un corredor estricto de cuatro kilómetros no se logra comprender esas relaciones y se corre el riesgo de realizar un inventario de información sin articulación. Esto obviamente afecta el análisis posterior de los impactos, ya que si no se entiende la dinámica natural actual es difícil prever las nuevas condiciones con la presencia del proyecto.

Conclusiones

En los términos de referencia de EIA no se encuentra una estructura coherente y de integralidad en la dimensión física y sus componentes. Como aporte importante de este estudio, se presenta una propuesta concreta para la reestructuración de la información de la dimensión física solicitada en los términos de referencia.

El presente estudio propone desde la etapa de planeación una zonificación en unidades síntesis apropiadas para describir el medio físico, que igualmente podrían servir en la comprensión integral de las restantes dimensiones del ambiente. Se proponen cuatro unidades síntesis que comprenden el análisis de los fenómenos desde la escala regional a las escalas local y puntual; por tanto se propone la aplicación de estas unidades.

Al estandarizar un modelo de unidades síntesis (que varía esencialmente en la escala de estudio que se va a utilizar) permite efectuar estudios ambientales articulados, con un mismo lenguaje, lo cual redundará en la calidad de los mismos y permite efectuar análisis ambientales comparativos y la optimización de la gestión ambiental.

En el contexto regional, la dimensión física no puede estar sujeta a un corredor de cuatro kilómetros; por el contrario en su definición se podrán requerir áreas mayores o menores de acuerdo con los resultados de un análisis ambiental sistémico. Para lograrlo es importante utilizar, en los distintos niveles de estudio, unidades que permitan direccionalidad y coherencia de información desde un marco regional a uno muy puntual.

Se debe implementar eficazmente la metodología de evaluación ex-post con diferentes períodos

de tiempo que permitan obtener y evaluar la información de todo el proceso de gestión; de tal manera que haya una retroalimentación adecuada de las experiencias que luego puedan ser consideradas desde la planeación y diseño de los proyectos. Todo ello enmarcado dentro de la filosofía del mejoramiento continuo.

Se deberán realizar investigaciones que permitan encontrar y aplicar metodologías de evaluación de impactos ambientales adecuadas que se puedan estandarizar y que incorporen criterios integrales.

Se debe implementar un sistema de gestión ambiental que garantice la aplicación de las medidas de manejo de los impactos en las etapas de construcción y operación de los proyectos, incorporando los monitoreos y evaluaciones ex-post como mecanismos de retroalimentación de información hacia la planeación de los nuevos proyectos.

Referencias

1. Ángel, Enrique. *et al.* "Accesos en líneas de transmisión, propuesta para minimizar su impacto erosivo": En: *Revista Técnica*. No. 4. Medellín: ISA. pp. 83-91. Enero-junio 1996.
2. Ángel, Enrique. *et al.* *Gestión ambiental en proyectos de desarrollo*. 2ª. ed. p. 233. Santafé de Bogotá: Fondo FEN Colombia, 1997.
3. _____. "El impacto ambiental del sector eléctrico: Balance, gestión y perspectivas": En: *Revista Energética*. No. 13. pp. 13-44. Universidad Nacional sede Medellín, mayo 1993.
4. Van Zuidam Robert. *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. pp. 442. Holanda: Smits Publishers, 1986.