

# TRATAMIENTO ESTADÍSTICO PARA INDICADORES CUANTITATIVOS DE IMPACTOS, APLICADOS A LINEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Jesús Efrén Ospina Noreña<sup>1</sup> y Álvaro de Jesús Lema Tapias.<sup>2</sup>

---

## RESUMEN

*Se propuso el análisis estadístico multivariado para encontrar las relaciones entre variables e impactos, obtener una alta explicación e interpretación de sus causas y efectos y alcanzar el mayor grado de certidumbre posible, para calificar y clasificar los impactos por su grado de influencia.*

**Palabras claves:** Indicadores, indicadores cuantitativos, análisis multivariado, impactos.

---

## ABSTRACT

### **STATISTICAL METHODS FOR QUANTITATIVE INDICATORS OF IMPACTS, APPLIED TO TRANSMISSION LINE PROJECTS**

*Multivariate statistical analyses are proposed for encountering the relationships between variables and impacts, to obtain high explanatory power for interpretation of the causes and effects and achieve the highest certainty possible, to evaluate and classify impacts by their level of influence.*

**Key words:** Indicators, quantitative indicators, multivariate analyses, impact.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Forestal, M.Sc. Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <jeospina@unalmed.edu.co> <jeob96@hotmail.com>

<sup>2</sup> Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <adjlema@unalmed.edu.co>

Un indicador, asumido como un patrón genérico, sintetiza el estado de un atributo relevante para un análisis dado y su índice el resultado del proceso de su medición. Formalmente, se puede tomar la construcción de un indicador y de su índice relacionado, como el establecimiento de una correspondencia entre la realidad y un conjunto de números o datos que permiten representarla. (Espinoza, 2001).

Según la Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OECD) (1993) y Manteiga (2000), un indicador es un parámetro o valor resultante de un conjunto de otros, que ofrece información sobre un fenómeno, con un significado más amplio que el directamente asociado a su configuración por lo cual se precisa de una definición clara de ellos, que posean además validez científica, representatividad en el marco de la preocupación ambiental, fácil interpretación, respuesta a cambios y comparabilidad en el marco regional, nacional (OCDE, 1993), para los autores de este trabajo, analizables estadísticamente y en el marco de desarrollo de la política ambiental precisar de una permanente revisión que integre los cambios en las metas políticas, los avances en el conocimiento de las preocupaciones ambientales y los resultados de los debates técnico científicos sobre su estructura.

Se propone la estadística multivariada por su objetividad y consistencia, y la posibilidad inferencial a la hora de planificar, diseñar, ejecutar y evaluar proyectos lineales de transmisión de energía eléctrica bajo el modelo de gestión ambiental por dimensiones u otros proyectos lineales cuando se puedan obtener o simular las otras variables.

## METODOLOGÍA

Luego de una revisión bibliográfica exhaustiva, al respecto, se extrajeron todos los aspectos necesarios sobre la elaboración de indicadores cuantitativos para su posterior aplicación a 18 proyectos de desarrollo lineales, de transmisión de energía eléctrica de ISA, a los cuales se aplicaron los: Análisis de Componentes Principales (ACP), Análisis de *Cluster* (ADC) y el Análisis de Factores (ADF) para lograr indicadores lo más objetivos posible, altamente consistentes, calificables y clasificables según su grado de incidencia.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Ospina (2004 a) elaboró una serie de indicadores cuantitativos de los impactos ambientales generados en proyectos de transmisión de energía eléctrica, bajo la óptica integral e interdisciplinaria y mediante el análisis dimensional (biótico, físico, cultural, económico y político), de sus variables explicativas en cada dimensión, determinación de funciones y sus respectivos arreglos matemáticos de acuerdo con la importancia de cada variable, ponderadas por un coeficiente explorado en paneles o consultas de expertos y luego relativizados por la suma de los ponderadores. Los índices de impacto se expresan de acuerdo con los elementos aportados por la Tabla 1 en que, haciendo uso de sus valores a manera de ejemplo se construye el índice de impactos para la dimensión política, como  $I_{IP-P} = (I_{IAPNR} * 2 + I_{IPCR} * 1) / 3$ ,  $I_{IAPNR} = f_{jr}$ ,  $I_{IPCR} = (ncar * 1 + nci * 1) / 2$  y similar procedimiento se sigue para el resto de dimensiones y variables, que generan la Tabla 2, analizables

estadísticamente.

**Tabla 1.** Elementos necesarios para la construcción de los índices en cada dimensión, sus variables explicativas y sus respectivos nombres.

Dimensión	Indicador	Variable	Variada	Ponderador	Divisor	Nombre		
Física	$I_{IFF}$	$I_{IDLR}$	mr	3	6	Índice de Impacto físico-físico		
			pr	3		Índice de impacto desestabilización de laderas relativo		
			ulr	2		Índice pendiente relativo		
		$I_{IGRR}$	tr	1	6	Índice unidades litológicas relativo		
			dir	1	3	Índice de impacto generación de residuos relativo		
			tr	2	3	Índice tipo de residuo relativo		
		$I_{IACAR}$	dr	dir	1	10	Índice disposición final relativo	
				cvt	2		Índice de impacto afectación de cuerpos de agua relativo	
				ddr	4		Índice distancia a fuentes de agua relativo	
				qr	3		Índice cobertura vegetal circundante relativo	
				qr	2		Índice densidad de drenaje relativo	
Biótica	$I_{IB-B}$	$I_{IAMVR}$	ebr	3	6	Índice de impacto biótico- biótico		
			tmvr	2		3	Índice de impacto afectación de la matriz de vegetación relativo	
			tmvr	1		3	Índice efecto de borde relativo	
		$I_{IPCVR}$	tcor	1	2	Índice tipo de matriz de vegetación relativo		
			tcor	2		Índice de impacto pérdida de cobertura vegetal relativo		
		$I_{IACFR}$	ter	ter	1	1	Índice tipo de cobertura vegetal relativo	
				ter	1		Índice de impacto afectación de comunidades faunísticas relativo	
		Cultural	$I_{IC-C}$	$I_{IBAR}$	aar	6	21	Índice de impacto cultural-cultural
					aar	6		Índice de impacto incremento del riesgo de accidentalidad relativo
					aar	6		Índice aumento de accidentalidad relativo
				$I_{IAPR}$	perr	5	15	Índice de impacto afectación del paisaje relativo
perr	5				Índice percepciones sobre afectación de paisaje relativo			
$I_{IDFR}$	ttr			ttr	4	15	Índice de impacto desplazamiento de familias relativo	
				ttr	5		Índice tiempo de residencia o permanencia relativo	
				ttr	4		Índice forma de tenencia de la tierra relativo	
				ttr	3		Índice consanguinidad relativo	
				ttr	2		Índice edades de población a desplazar relativo	
				ttr	1		Índice organización social relativo	
				ttr	3		Índice de impacto generación de expectativas relativo	
$I_{IARHR}$	V <sub>st</sub> f			nper	2	21	Índice número de personas con expectativas relativo	
				V <sub>st</sub> f	6		Índice de impacto afectación de patrimonio histórico relativo	
				V <sub>st</sub> f	5		Índice conservación de yacimiento relativo	
				V <sub>st</sub> f	4		Índice cronología de yacimiento relativo	
				V <sub>st</sub> f	3		Índice complejidad estratigráfica relativo	
$I_{IGMR}$	Gar			Gar	2	1	Índice singularidad relativo	
				Gar	1		Índice densidad relativo	
				Gar	1		Índice grado de afectación por el proyecto relativo	
				Gar	1		Índice de impacto generación de molestias a comunidades relativo	
		Gar	1	Índice número de personas que manifiestan malestar relativo				
Económica	$I_{IE-E}$	$I_{IDAR}$	gdr	5	15	Índice de impacto económico-económico		
			nacr	2		3	Índice de impacto daños a accesos relativo	
			nacr	1		3	Índice grado de afectación relativo	
		$I_{IDIR}$	tfr	4	4	Índice número de accesos afectados relativo		
			tfr	4		Índice de impacto desplazamiento de infraestructura relativo		
		$I_{IMUSR}$	tatr	3	3	Índice tamaño-funcionalidad de infraestructura relativo		
			tatr	3		Índice de impacto modificación de uso del suelo relativo		
		$I_{IDCR}$	tar	2	3	Índice tipo de uso de área a transformar relativo		
			tcr	2		Índice de impacto daño a cultivos relativo		
			tcr	1		Índice tamaño predominante de predios relativo		
		$I_{IGTER}$	pdcf	pdcf	1	1	Índice tipo de cultivo relativo	
pdcf	1			Índice de impacto de generación temporal de empleo relativo				
Política	$I_{IP-P}$	$I_{IAPNR}$	fjr	2	3	Índice personal desempleado del área de influencia contratado relativo		
			fjr	2		Índice de impacto político-político		
			fjr	2		Índice de impacto afectación del patrimonio natural relativo		
		$I_{IPCR}$	ncar	1	2	Índice tipo de figura jurídica relativo		
			ncir	1		Índice de impacto potenciación de conflictos relativo		
ncir	1	Índice número de conflictos que se agudizan relativo						
ncir	1	Índice número de conflictos que se inician relativo						



**Análisis de componentes principales.**

El ACP mediante unas pocas combinaciones lineales, relaciona la estructura de varianzas y covarianzas de una serie de variables originales para la reducción de datos, y la dimensionalidad de un problema y mejorar algunas interpretaciones no posibles por otros métodos estadísticos (Lema, 2002).

para la determinación de especies vegetales compatibles con líneas de transmisión de energía eléctrica, Jiménez y Serna (2000), al darle un tratamiento a las variables y a los índices como de carácter cuantitativo, para superar las limitaciones de las variables nominales y utilizar pruebas sólidas de calificación e inferencias como los propuestos no solo para cada dimensión, si no también entre dimensiones.

Existen antecedentes para el manejo de estos, como el índice de valor de importancia etnobotánico relativo (IVER) propuesto por Lajones (2000) y el índice

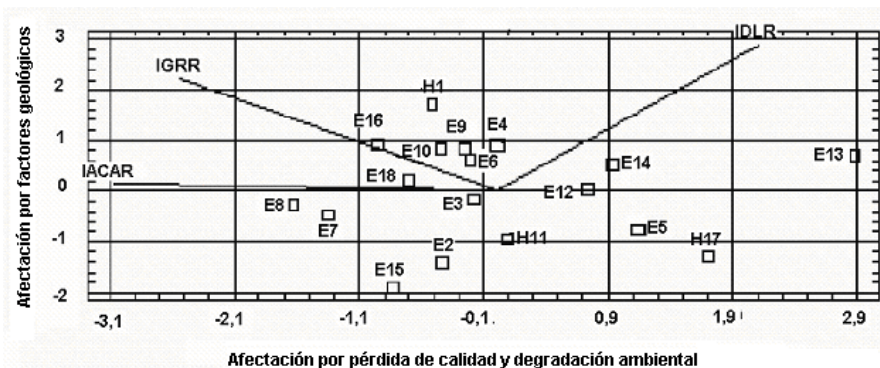
A manera de ejemplo se presenta el ACP para el  $I_{IF-F}$ , índice de impacto en la dimensión física, Tablas 3, 4 y Figura 1.

**Tabla. 3.** Análisis de componentes principales para el  $I_{IF-F}$

Numero de componente	Valor propio	Porcentaje de variación	Porcentaje acumulado
1	1,24697	41,566	41,57
2	0,966349	32,212	73,78
3	0,786677	26,223	100,00

**Tabla 4.** Vectores propios en 2 dimensiones.

Variables	Componente 1	Componente 2
$I_{IDLR}$	0,46829	0,79087
$I_{IGRR}$	-0,56376	0,61078
$I_{IACAR}$	-0,68035	0,03825



**Figura. 1.** Análisis de componentes principales para el  $I_{IF-F}$

La Tabla 3 muestra una explicación del 73,78 % de la variación con dos componentes, asumida suficiente para el propósito del estudio. La Tabla 4 presenta los pesos de las variables en cada componente, mostrando en el componente 1 un contraste entre el  $I_{IDLR}$  y los  $I_{IGRR}$  e  $I_{IACAR}$ , es decir, un aumento en el índice de impacto en lo físico, implica un aumento en el  $I_{IDLR}$  y/o una disminución en los  $I_{IGRR}$  e  $I_{IACAR}$ , que pone de manifiesto ciertas relaciones implícitas entre algunas o todas sus variables, así: es posible que al actuar sobre áreas con altas pendientes y condiciones extremas de precipitación, que darían un valor alto al  $I_{IDLR}$ , se requiera una mayor atención en la producción de desechos y posterior manejo de estos, reduciendo el  $I_{IGRR}$ ; también, es posible que se reduzca el  $I_{IACAR}$  al encontrar cobertura vegetal (bosque ripario) en buen estado de conservación, densidades de drenaje bajas, altos caudales y medianas a altas distancias a las fuentes de agua.

Por la variación en el primer componente (41,6 %) y los pesos del  $I_{IGRR}$  e  $I_{IACAR}$  dentro de este componente, se deduce que la mayoría de proyectos (E1, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13, E14, E16, E17, E18) tuvieron efecto directo sobre los elementos o variables que conforman los  $I_{IGRR}$  e  $I_{IACAR}$  (Figura 1), además se observa que la variable desestabilización de laderas obtiene un gran peso en el componente 2 cuya varianza fue de 32,2 % convirtiéndola en una variable muy importante en el modelo, siendo los proyectos E2, E3 y E15 los que más influyeron sobre las variables del  $I_{IDLR}$ . Los nombres de los componentes o ejes en las figuras se determinaron de acuerdo a los valores o pesos de las variables dentro de cada uno de ellos y posteriormente corroborados mediante el análisis de factores (ADF).

Además este análisis permite identificar el impacto más importante según la metodología para cada uno de los estudios analizados; de acuerdo a su menor distancia perpendicular al vector del impacto. Por ejemplo el E1, E16, E6, E5 y E17 tienen su mayor explicación por el  $I_{IGRR}$ .

La Figura.1, muestra en forma gráfica el análisis descrito, además el nombre de los componentes se determina a partir del análisis de factores como se podrá apreciar más adelante. Los siguientes análisis se soportan en igual forma.

La Tabla 5 relaciona los resultados del ACP para las cuatro dimensiones restantes y para el índice de impacto total.

Para el  $I_{IB-B}$  se encontró una explicación del 95,04 % de la variación en dos componentes. Del primer componente se deduce que un aumento del índice de impacto en lo biótico, implica un aumento de una o todas las variables que lo constituyen ( $I_{IAMVR}$ ,  $I_{IPCVR}$  e  $I_{IACFR}$ ), mostrando claramente que el tipo de cobertura vegetal, el tipo de matriz de vegetación, el efecto de borde y el tipo de especies faunísticas afectadas están directamente relacionadas, siendo mucha más marcada dicha relación en los elementos del  $I_{IAMVR}$  e  $I_{IPCVR}$  por sus pesos alcanzados. La variabilidad explicada en este componente (70,5 %), sugiere que este fue el comportamiento de la mayoría de los proyectos. La variable de mayor peso en el componente 2 fue  $I_{IACFR}$  el cual es contrastado con el  $I_{IAMVR}$  e  $I_{IPCVR}$  planteando que un aumento en el índice de impacto en lo biótico implica una relación inversa en las variables constituyentes de dicho índice. Es posible que actuar sobre áreas con altos grados de intervención antrópica y bajos

**Tabla 5.** Resumen del análisis de componentes principales (ACP).

Dimensión Análisis	Biótica			Económica			Cultural			Política			II <sub>TM</sub>					
	NC	VP	P/A	NC	VP	P/A	NC	VP	P/A	N	VP	P/A	NC	VP	P/A			
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3			
ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	2,116	70,5	70,54	1	2,612	52,25	52,25	1	2,645	44,08	44,08	1	1,175	58,73	58,73	1	2,659	53,18
	0,735	24,5	95,04	2	0,882	17,64	69,89	2	1,315	21,91	66,00	2	0,826	41,27	100,00	2	1,088	21,77
	0,149	5,0	100,0	3	0,756	15,12	85,00	3	0,863	14,39	80,38	3	0,564	9,40	89,77	4	0,366	7,32
				4	0,468	9,37	94,38	4	0,564	9,40	89,77	4	0,453	7,55	97,32	5	0,262	5,25
				5	0,281	5,62	100,00	5	0,453	7,55	97,32	5	0,161	2,68	100,00	6		
				6				6	0,161	2,68	100,00	6						
ANÁLISIS DE VECTORES PROPIOS EN 2 DIMENSIONES	<b>Va</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>Va</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>Va</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>V</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>Va</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>			
	I <sub>AM</sub>	0,643	-	I <sub>DA</sub>	0,496	-0,033	I <sub>RR</sub>	0,487	0,186	I <sub>A</sub>	0,707	0,707	I <sub>F</sub>	0,138	-0,872			
	VR	0,25	7	R			R			PN			R					
	I <sub>FCV</sub>	0,627	-	I <sub>DC</sub>	0,472	-0,382	I <sub>RR</sub>	0,253	-	R	0,707	-	I <sub>B</sub>	0,424	-0,325			
	R	0,36	6	R			I <sub>DR</sub>	0,251	0,426	IP		0,707	I <sub>E</sub>	0,484	0,345			
	I <sub>ACF</sub>	0,441	0,89	I <sub>TEF</sub>	0,408	0,266	I <sub>DR</sub>	0,251	-	CR		0,707	I <sub>E</sub>	0,545	0,083			
	R		5	I <sub>MUS</sub>	0,295	0,832	I <sub>ER</sub>	0,466	-				I <sub>C</sub>	0,520	0,090			
				R			R		0,229				I <sub>P</sub>					
				I <sub>DR</sub>	0,527	-0,300	I <sub>HR</sub>	0,477	0,226				I <sub>P</sub>					
							I <sub>MR</sub>	0,437	0,438									

**NC:** Número de componente, **VP:** Valor propio, **PV:** Porcentaje de variación, **PVA:** Porcentaje de variación acumulado, **Va:** Variables, **C1:** Componente 1, **C2:** Componente 2.

estados de conservación, afecten considerablemente las especies de fauna allí presentes, pues pueden ser los últimos hábitats existentes, relictos boscosos de conectividad estratégicos, que contengan a su vez especies en peligro de extinción, raras, especialistas, etc.; solo los proyectos (E17, E18, E16, E1 y E5) mostraron este comportamiento.

Para el  $I_{IE-E}$  es posible una explicación del 69,9 % de la variación en las dos primeras componentes. El componente 1 sugiere que un aumento en el  $I_{IE-E}$  está relacionado directamente con el aumento de todos los índices de impacto que lo constituyen, siendo los de mayor peso el daño a la infraestructura ( $I_{IDIR}$ ), daño a accesos ( $I_{IDAR}$ ) y daños a cultivos ( $I_{IDCR}$ ) respectivamente, con su afectación directa sobre los elementos de productividad y comercialización de productos ( $tar$ ,  $tcr$ ,  $nacr$ ,  $gdr$ ,  $tfr$ ), en el eje 2 se destaca la modificación de usos del suelo ( $I_{IMUSR}$ ), mostrando a su vez un importante contraste particularmente con las variables anteriormente referidas, lo que indica una relación inversa entre algunos o todos sus elementos constituyentes cuando el  $I_{IE-E}$  aumenta o disminuye. Es posible que la modificación de usos de suelo con características más conservacionistas o menos transformadas como el silvícola, recreativo, turístico y paisajístico, cause una menor afectación en infraestructura funcional de gran tamaño, menos daños a extensos cultivos permanentes y comerciales, que desde luego obedecen a áreas fuertemente transformadas ex-puestas a procesos de alta producción y comercialización como el agrícola, pecuario, minero, este comportamiento se puede observar en el E1, E3, E6, E10.

En el  $I_{IC-C}$  se alcanza una explicación del 65,99 % de la variación con dos componentes, las cuales se asumen como componentes suficientes para el propósito del estudio, además es posible observar que las variables incremento al riesgo de accidentalidad, afectación del patrimonio histórico, generación de expectativas y generación de molestias a comunidades obtienen los pesos más altos convirtiéndose en las variables más discriminantes del modelo, mostrando a su vez cierto equilibrio entre ellas, sugiriendo una relación directa entre sus elementos o variables tanto en sentido como en orden de magnitud. Al experimentar un cambio en el  $I_{IC-C}$ , por ejemplo, al tener índices de impacto relativos altos en los elementos del  $I_{IAPHR}$  ( $Vr1$ ,  $Vr2$ ,  $Vr3$ ,  $Vr4$ ,  $Vr5$  y  $Gar$ ), inmediatamente se podrían obtener valores altos en el  $I_{IGMCR}$  ( $npmi$ ). En el componente 2, desplazamiento de familias y afectación del paisaje adquieren los mayores pesos respectivamente, al presentar un importante contraste con las demás variables. Es posible que a menores valores de el  $I_{IAPR}$  y el  $I_{IDFR}$  sea necesario actuar sobre áreas con ciertas características<sup>3</sup> favorables desde lo paisajístico, disfrute, amenidad y de conservación, donde prevalezcan pocas familias o población pero bien constituidas con altos grados de adaptación, arraigo y pertenencia, lo que puede generar un incremento en el  $I_{IGMCR}$ , y en el  $I_{IRAR}$  por el contacto y desconocimiento de los pobladores con su nuevo entorno, además es precisamente en estas áreas donde se pueden dar las mayores afectaciones sobre los elementos de  $I_{IAPHR}$  como son la singularidad, estratificación, cronología, densidad, conservación. Por la

<sup>3</sup> Características que precisamente pueden actuar como asimiladoras y reductoras del  $I_{IAPR}$



participación del componente dos en la variación (21,9 %), se determina que los proyectos con el anterior comportamiento fueron pocos.

Para el índice de impacto en la dimensión política ( $I_{IP-P}$ ), se tiene una explicación del 58,7 % de la variación en la primera componente. Las variables presentan un equilibrio en ambos ejes, lo que indica que poseen similar influencia en el modelo; de la participación de los ejes, en la variación (41,3 % para el segundo eje) también se deduce que aproximadamente la mitad de los proyectos presentan relaciones inversas entre los elementos o variables que constituyen el  $I_{IAPNR}$  e  $I_{IPCR}$ , es decir, que la afectación de áreas vulnerables y frágiles no contempladas o contempladas en la legislación pero sin reglamentación vigente, factores que le confieren un valor alto al  $I_{IAPNR}$ , pueden causar un menor efecto sobre la iniciación y agudización de conflictos, hecho que puede llevar a la alteración y deterioro de dichas áreas, lo anterior pone de manifiesto la necesidad de una mayor atención de tales aspectos en el diseño e implementación de nuevas políticas ambientales, de tal forma que sea posible minimizar al mismo tiempo y de forma equilibrada el  $I_{IAPNR}$  y el  $I_{IPCR}$ .

El ACP realizado a las variables del índice de impacto total ( $II_{TDM}$ ), teniendo en cuenta las relaciones entre dimensiones ( $I_{IF-F}$ ,  $I_{IB-B}$ ,  $I_{IE-E}$ ,  $I_{IC-C}$ ,  $I_{IP-P}$ ), presentó una explicación del 74,95 % de la variación en dos componentes, además es posible observar que las variables  $I_{IC-C}$ ,  $I_{IE-E}$  e  $I_{IP-P}$  pertenecientes a la dimensión social obtienen los mayores pesos en el componente 1, seguidas del  $I_{IB-B}$  e  $I_{IF-F}$  mostrando una relación directa entre ellas y sus elementos constituyentes; la

participación de la variación de este eje (53,2 %) plantea que la mayoría de los estudios presentan este comportamiento. El componente 2 muestra la dimensión física-física con el mayor peso, además se observa un importante contraste entre los  $I_{IF-F}$  e  $I_{IB-B}$  y las demás variables (sociales), sugiriendo una relación inversa entre ellas y sus variables explicativas, siendo muy probable que al implantar un proyecto donde predominen procesos complejos de producción y comercialización de productos, con expresiones y relaciones complejas y dinámicas de índole cultural y política y por lo tanto en áreas altamente intervenidas, sean muy pocos los elementos físicos y bióticos que se vean afectados; sin embargo, este hecho es de gran importancia y debe ser tenido en cuenta ya que actuar sobre áreas con altos grados de impacto ambiental puede empeorar la situación y generar o acelerar procesos catastróficos e insospechados por la acumulación y sinergia de dichos impactos, este comportamiento lo presentan pocos estudios (E8, E9, E10, E12, E16), también se puede considerar la posibilidad de excluir la variable dimensión política-política, la cual parece ser explicada por la cultural-cultural, dada su alta correlación, ya que casi se superponen en la gráfica.

**Análisis de factores (ADF).** Se acudió a él como un método de ordenación que busca interpretar la estructura de la covarianza entre algunas variables en términos de algunas pocas subyacentes pero no observables cantidades aleatorias llamadas factores (Lema, 2002).

El anexo 1 presenta los resultados estadísticos para las respectivas dimensiones

que soportan los siguientes análisis, también con base en el ACP, una de sus posibilidades.

Para  $I_{IF-F}$  el análisis de factores (Tabla 1, Anexo1) se obtuvo la misma explicación del ACP, un 73,78 % de la variabilidad en los dos primeros factores, la matriz de factores rotados discrimina o contrasta los pesos de las variables en cada factor, obsérvese que el índice de generación de residuos relativo ( $I_{IGRR}$ ) y el índice de afectación de cuerpos de agua relativo ( $I_{IACAR}$ ) alcanzan los mayores pesos en el factor 1, mientras que en el factor 2, estos pesos son contrastados obteniendo el mayor valor el índice de desestabilización de laderas; el anterior resultado permite inferir más a cerca de las variables, sus relaciones y comportamiento, además permitió nombrar los ejes encontrados en el análisis de componentes principales como se hizo anteriormente, de acuerdo al peso o grado de influencia de las variables en los factores encontrados (Matriz de factores rotados por el método de Varimax, Anexo 1).

En el  $I_{IB-B}$  los dos primeros factores dan una explicación del 100 % de la variabilidad (Tabla 2, Anexo1), las variables  $I_{IAMVR}$  y  $I_{IPCVR}$  obtienen los mayores pesos en ambos factores. El factor 1 explica el 99,7 % de la variación, indicando que la afectación de comunidades faunísticas  $I_{IACFR}$  esta altamente relacionada con la afectación de la matriz de vegetación y pérdida de cobertura vegetal, pudiendo prescindir del  $I_{IACFR}$  en futuros análisis.

Para  $I_{IE-E}$  el 100 % de la variabilidad es explicada en los dos primeros factores (Tabla 3, Anexo1), los mayores pesos en el factor 1 los presentan el  $I_{IDIR}$ ,  $I_{IDAR}$  y  $I_{IDCR}$ ,

determinando que los mayores efectos de los proyectos recae sobre los medios y formas de producción y comercialización de los productos; en el factor 2 son contrastados tomado el mayor peso el  $I_{IGTER}$ , convirtiéndose en una variable importante pero no relevante en el análisis (Matriz de factores rotados por el método de Varimax, Anexo 1).

El ADF para el  $I_{IC-C}$ , presenta una explicación del 91,4 % de la variabilidad (Tabla 4, Anexo 1), las variables con mayores pesos en el factor 1 son:  $I_{IGMCR}$ ,  $I_{IRAR}$ ,  $I_{IAPHR}$  y  $I_{IGER}$ , en el segundo factor las variables mas discriminantes corresponden a  $I_{IAPR}$  y  $I_{IDFR}$  análisis (Matriz de factores rotados por el método de Varimax, Anexo 1).

En la Tabla 5 del anexo se presenta el ADF para  $I_{IP-P}$ , se observa que es posible explicar el 58,7 % de la variabilidad en el primer factor, el mayor peso en este factor corresponde al índice potenciación de conflictos ( $I_{IPCR}$ ), contrastado en el factor 2 siendo aquí, el índice afectación del patrimonio natural ( $I_{IAPNR}$ ) el de mayor influencia en el análisis (Matriz de factores rotados por el método de Varimax, Anexo1).

Para el  $I_{ITDM}$  la variabilidad explicada en los dos primeros factores es de 99,94 % (Tabla 6, Anexo 1), las variables que mayor peso obtienen en el primer factor son:  $I_{IC-C}$ ,  $I_{IE-E}$  e  $I_{IP-P}$ , es importante resaltar que estas variables constituyen el componente social en todas sus expresiones, mostrando que los proyectos de trasmisión de energía eléctrica generan sus mayores afectaciones en dicho componente; en el factor dos la variable  $I_{IB-B}$  e  $I_{IF-F}$  se convierten en la más discriminantes, obteniendo valores igualmente importantes. (Matriz de factores

rotados por el método de Varimax, Anexo 1).

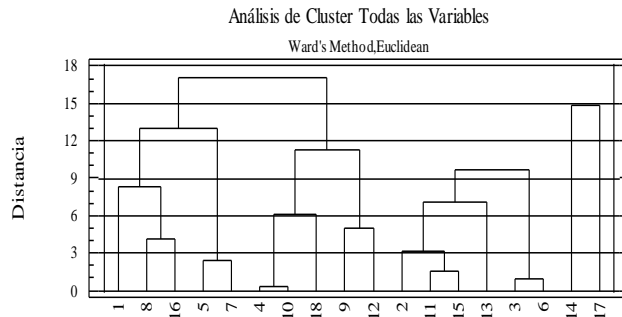
**Análisis de cluster ADC.** Permite clasificar o agrupar cierto número de elementos en clases homogéneas, de tal forma que un objeto se pueda declarar perteneciente a una y solo a una de ellas (Lema, 2002).

Primero se realizó un ADC con todas las variables que definen el impacto total ( $I_{IB-B}$ ,  $I_{IF-F}$ ,  $I_{IE-E}$ ,  $I_{IC-C}$  e  $I_{IP-P}$ ) y posteriormente el índice denominado total final  $I_{IT-F}$  ensayando diferentes conjuntos de factores ponderantes según se considera el peso de las dimensiones dentro del modelo propuesto, basados en los valores que obtienen las variables en los componentes

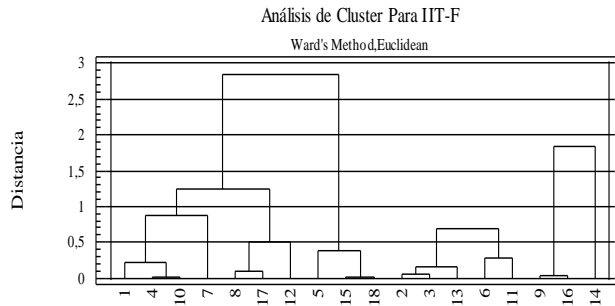
en el respectivo análisis de componentes principales (Tabla 6), buscando que el ADC aplicado al  $I_{IT-F}$  reproduzca o sea muy aproximado al agrupamiento natural que se obtuvo con todas las variables, para asegurar los mejores ponderadores en el modelo. De los factores ponderantes analizados, los sugeridos fueron los siguientes: 5 para la dimensión cultural, 4 para la física, 3 para la biótica, 2 económica y 1 política. El  $I_{IT-F}$  queda expresado de la siguiente manera:

$$I_{IT-F} = (I_{IC-C}*5 + I_{IF-F}*4 + I_{IB-B}*3 + I_{IE-E}*2 + I_{IP-P}*1)/15$$

Una vez calculado el índice se procedió a realizar el ADC para cada uno de ellos (Tabla 6).



**Figura. 2.** Dendrograma de similitud de estudios contemplando todas las variables (sin ponderadores).



**Figura. 3.** Dendrograma de similitud de estudios contemplando el impacto total final ( $I_{IT-F}$ ).

La Tabla 6 presenta el  $I_{IT-F}$  para los 18 estudios y el grupo al cual pertenecen según los ADC.

**TABLA. 6.** Agrupación de estudios según el ADC.

Estudio	E13	E3	E2	E6	E11	E5	E18	E15	E7	E1	E10	E4	E17	E8	E12	E9	E16	E14
$I_{IT-F}$	0,116	0,121	0,125	0,131	0,142	0,178	0,189	0,190	0,207	0,222	0,228	0,229	0,238	0,243	0,255	0,310	0,313	0,376
Grupo	1	2	3															

Al observar los dendrogramas se puede ver que los estudios se agrupan sugiriendo alta similitud entre los elementos (proyectos) pertenecientes a cada grupo, además se pudo determinar que los agrupamientos en el análisis para todas las variables es muy similar al del análisis total final ( $I_{IT-F}$ ) calculado con el conjunto de factores ponderantes sugerido, cambiando de grupo solo unos pocos estudios (Figuras 2 y 3). El anterior análisis posibilita otras interpretaciones acerca de los proyectos: como

similitudes de zonas de vida, climáticas, topográficas, culturales, entre otras de los proyectos o estudios pertenecientes a un mismo grupo o disimilitudes entre los grupos. Sin embargo, dicha interpretación escapa al alcance de la presente investigación, pues solo se buscaba establecer unos rangos, 3 en este caso, teniendo en cuenta el  $I_{IT-F}$ , dentro de los cuales las magnitudes de los impactos generados por los proyectos se pudieron considerar como alto, medio o bajo (Tabla 7).

**Tabla. 7.** Rangos para la caracterización de impactos.

Rango	Calidad
$\leq 0,142$	Bajo
0,143-0,255	Medio
$\geq 0,256$	Alto

De este modo se determinó que el 27,77 % de los estudios analizados se pueden considerar de impacto bajo (E2, E3, E6,

E11 y E13); 55,55 % medio (E1, E4, E5, E7, E8, E10, E12, E15, E17, E18) y 16,67 % alto (E9, E14, E16).

**Propuesta de un modelo para el  $I_{IT-F}$  con base en los Índices de Impacto**

Se corrió un modelo del  $I_{IT-F}$  como variable dependiente y los 5 índices de impacto total en cada dimensión, como variables independientes, sencillo y de fácil aplicación que diera una buena explicación del índice de impacto global generado en las diferentes fases y actividades de los proyectos de transmisión de energía eléctrica:

$$I_{IT-F} = -0,000810576 + 0,276796*IT-F + 0,213537*IT-B + 0,176391*IT-E + 0,323152*IT-C.$$

Se prescinde del índice de impacto político ( $I_{IP-P}$ ), por presentar una alta correlación con el índice de impacto en lo cultural como se había previsto anteriormente en el análisis de componentes principales (ACP). De otro

lado, el modelo permite proponer unos buenos factores de ponderación a tener en cuenta en la elaboración del mapa de síntesis de restricciones y/o criticidad, base fundamental en la planeación, diseño y ejecución de innumerables proyectos de desarrollo.

Al considerar la suma de los coeficientes (0,989876) en el modelo, como el 100 % del peso de las variables dentro el mismo, es posible encontrar el porcentaje de participación de cada dimensión, mediante el producto de la relación entre el peso de cada dimensión y la suma de los pesos por cien. Este proceso sugiere los siguientes factores de ponderación: para la dimensión cultural 32,6 %, física 28,0 %, biótica 21,6 % y económica 17,8 %.

La siguiente tabla presenta los valores observados y sus estimados.

**Tabla 8.** Análisis de varianza para el  $I_{IT-F}$ .

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados medios	F	Nivel de probabilidad	R <sup>2</sup>
Modelo	0,0879700	4	0,0219925			
Residuales	0,0015825	13	0,0001217	180,67	0,000	98,23
Total	0,0895525	17				

**Tabla. 9.** Valores observados y estimados.

Estudio	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18
$I_{IT-F}$ (Obs.)	0,222	0,125	0,121	0,229	0,178	0,131	0,207	0,243	0,310	0,228	0,142	0,255	0,116	0,376	0,190	0,313	0,238	0,189
$I_{IT-F}$ (Est.)	0,225	0,129	0,130	0,243	0,184	0,137	0,202	0,237	0,323	0,241	0,144	0,259	0,119	0,356	0,191	0,306	0,232	0,201

Al realizar las pruebas estadísticas de comparación T, F, Wilcoxon y K-S, que comparan medias, desviación estándar, medianas y distribución respectivamente no se encontró diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confiabilidad del 95 %.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Es necesario generar propuestas que hagan objetivos los análisis de los indicadores, por ello el ACP permite inferir

más acerca de los impactos generados por los proyectos de transmisión de energía eléctrica y revela innumerables relaciones inadvertidas entre ellos y sus variables explicativas, presentando un panorama más claro e integral, permitiendo una mejor comprensión de las complejas relaciones ambientales, así como la eliminación del ruido generado por multicolinealidad.

El ACP junto con el ADC se convierte en una buena herramienta y fuente de insumo a la hora de la planeación, diseño y ejecución de proyectos de desarrollo lineales, analizados desde sus propias particularidades, características y/o limitaciones.

La elaboración de indicadores y el análisis estadístico aplicado a diferentes proyectos de desarrollo tanto lineales como concentrados como lo propuesto, permite igualmente generar elementos de juicio para la selección de alternativas, toma de decisiones, diseño e implementación de políticas ambientales, como se pudo observar rápidamente en este trabajo.

De acuerdo con los análisis estadísticos realizados la mayoría de variables utilizadas en cada dimensión y en el cálculo del índice total, dan explicación de los fenómenos estudiados (impactos), debido a que la variación acumulada, inicialmente desconocida logra ser explicada por medio del ACP mediante unas pocas combinaciones lineales de ellas y por su variación acumulada en los dos primeros componentes para los diferentes casos, siempre mayores del 66%. Además este análisis permite visualizar cual impacto o dimensión tiene mayor efecto sobre uno u otro proyecto según sea su cercanía o en

otras palabras, como se afectaron impactos y dimensiones en un proyecto dado.

El análisis de *Cluster* permitió clasificar los proyectos analizados como alto, medio o bajo según su grado de incidencia total, de acuerdo a los valores obtenidos por cada uno de ellos, además posibilita otras interpretaciones de algunos aspectos semejantes o no entre los proyectos como: similitudes de zonas de vida, climáticas, topográficas, culturales, entre otras de los proyectos pertenecientes a un mismo grupo o disimilitudes entre los grupos, aunque no era el objetivo de esta investigación.

El Análisis de Factores (ADF) corrobora y refuerza los resultados obtenidos en el ACP, además permitió nombrar los ejes o componentes visualizados en las gráficas de dicho análisis de forma categórica, también permite observar la disposición de las diferentes variables en sus respectivas dimensiones y los índices de impacto de las dimensiones dentro el índice de impacto considerado total con relación a los ejes, máximo al usar el criterio de rotaciones para mejorar la interpretabilidad.

El modelo de correlación de los impactos entre dimensiones se convierten en una excelente herramienta para los estudios de índole ambiental en proyectos de transmisión de energía eléctrica en Colombia, por su poder predictor aunque sea incipiente.

El modelo final para el cálculo de impacto total, prescinde del impacto en lo político por presentar una alta correlación con el índice de impacto en lo cultural, sugiriendo o restringiendo el análisis a las cuatro dimensiones restantes.

Los pesos de las variables dentro del mo-

delo final permitieron proponer presumiblemente unos buenos factores de ponderación para la elaboración del mapa síntesis de restricciones y/o criticidad, base fundamental para los diferentes estudios ambientales de innumerables proyectos de desarrollo, ante la ausencia de los paneles de expertos, que de todos modos se insiste deben ser la base de los análisis.

La variable del impacto en lo cultural presentó el mayor peso según el ACP y el modelo resultante, en paneles de expertos esta variable debería obtener igualmente valores altos, como lo sugieren los análisis estadísticos, el INER y varios de los EIA analizados.

## **BIBLIOGRAFIA**

ESPINOZA, G. ESPINOZA, G. Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. Santiago, Chile: Banco Interamericano de Desarrollo, 2001. 83 p.

JIMÉNEZ, G., y SERNA, L. M. Propuesta de un índice para la determinación de especies vegetales compatibles con las líneas de transmisión de energía eléctrica. Medellín, 2000. 118 p. Trabajo de grado (Ingeniería Forestal). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

LAJONES BONE, Digmar Alfredo. Etnobotánica en las comunidades de Arenales y San Salvador, Esmeraldas-Ecuador. Medellín, 2000. 103 p. Tesis (Magister en

Bosques y Conservación Ambiental). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

LEMA. TAPIAS, Alvaro. Elementos de estadística multivariada. Medellín. Universidad Nacional de Colombia, 2002. 428 p.

MANTEIGA, L. Los indicadores ambientales como instrumentos para el desarrollo de la política ambiental y su integración en otras políticas. *En: Estadística y Medio Ambiente*. Instituto de Estadística de Andalucía. (2000); p. 75-87.

ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN ECONÓMICA Y DESARROLLO. Core set of indicators for environmental performance reviews. Paris: OECD, 1993. 39 p. (Environmental Monograph; no. 83).

OSPINA NOREÑA, José Efrén. Indicadores cuantitativos de los impactos generados en proyectos de desarrollo lineales. *En: Revista Gestión y Ambiente*. Vol.7, No.1 (2004a); p. 91-112.

\_\_\_\_\_. Propuesta de indicadores cuantitativos de los impactos por su grado de incidencia identificados por un modelo de gestión ambiental por dimensiones, en proyectos de transmisión eléctrica de ISA. Medellín, 2004 b. 186p. Tesis (Magister en Medio Ambiente y Desarrollo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

## ANEXO 1

### ANÁLISIS DE FACTORES (ADF)

**Tabla. 1.** Análisis de factores para variables del  $I_{IF-F}$ .

Número de factor	Valor propio	Porcentaje de variación	Porcentaje acumulado
1	1,246970	41,566	41,566
2	0,966349	32,212	73,777
3	0,786677	26,223	100,000

Matriz de Factores Rotados por el Método de Varimax para Variables del  $I_{IF-F}$

Variable	Factor 1	Factor 2
$I_{IDLR}$	-0,008767	0,936917
$I_{IGRR}$	0,856061	0,154866
$I_{IACAR}$	0,655003	-0,386706

**Tabla. 2.** Análisis de factores para variables del  $I_{IB-B}$

Número de factor	Valor propio	Porcentaje de variación	Porcentaje acumulado
1	1,76389	99,690	99,690
2	0,00548	0,310	100,000
3	0,00000	0,000	100,000

Matriz de factores rotados por el método de Varimax para variables del  $I_{IB-B}$

Variable	Factor 1	Factor 2
$I_{IPCVR}$	0,678033	0,554252
$I_{IAMVR}$	0,673430	0,596804
$I_{IACFR}$	0,281595	0,336861

**Tabla. 3.** Análisis de factores para variables del  $I_{IE-E}$

Número de factor	Valor propio	Porcentaje de variación	Porcentaje acumulado
1	2,04931	91,316	91,316
2	0,19489	8,684	100,000
3	0,00000	0,000	100,000
4	0,00000	0,000	100,000
5	0,00000	0,000	100,000

Matriz de factores rotados por el método de Varimax para variables del  $I_{IE-E}$

Variable	Factor 1	Factor 2
$I_{IDAR}$	0,466268	0,530227
$I_{IDCR}$	0,702720	0,256686
$I_{IGTER}$	0,225759	0,570171
$I_{IDIR}$	0,679036	0,447038
$I_{IMUSR}$	0,167617	0,347662



**Tabla. 4.** Análisis de factores para variables del  $I_{IC-C}$

Numero de factor	Valor propio	Porcentaje de variación	Porcentaje acumulado
1	2,18193	66,655	66,655
2	0,80924	24,721	91,377
3	0,28228	8,623	100,000
4	0,00000	0,000	100,000
5	0,00000	0,000	100,000
6	0,00000	0,000	100,000

Matriz de factores rotados por el método de Varimax para variables del  $I_{IC-C}$

Variable	Factor 1	Factor 2
I <sub>IRAR</sub>	0,712969	0,223308
I <sub>IAPR</sub>	0,139042	0,352515
I <sub>IDFR</sub>	-0,041953	0,756758
I <sub>IGER</sub>	0,455628	0,627829
I <sub>IAPHR</sub>	0,679274	0,206502
I <sub>IGMCR</sub>	0,780380	0,011031

**Tabla. 5.** Análisis de factores para variables del  $I_{IP-P}$

Número de factor	Valor propio	Porcentaje de variación	Porcentaje acumulado
1	1,17453	58,727	58,727
2	0,82547	41,273	100,000

Matriz de Factores rotados por el método de Varimax para variables del  $I_{IP-P}$

Variable	Factor 1	Factor 2
I <sub>IPCR</sub>	0,996156	0,087602
I <sub>IAPNR</sub>	0,087602	0,996156

**Tabla. 6.** Análisis de factores para variables del  $II_{TDM}$

Número de factor	Valores propios	Porcentaje de variación	Porcentaje acumulado
1	2,17469	87,273	87,273
2	0,31574	12,671	99,944
3	0,00140	0,056	100,000
4	0,00000	0,000	100,000
5	0,00000	0,000	100,000

Matriz de Factores rotados por el método de Varimax para variables del  $II_{TDM}$

Variable	Factor 1	Factor 2
I <sub>IF_F</sub>	0,025123	0,432046
I <sub>IB_B</sub>	0,451015	0,462711
I <sub>IE_E</sub>	0,751118	-0,012740
I <sub>IC_C</sub>	0,794852	0,264128
I <sub>IP_P</sub>	0,764585	0,187433