

METODOS CUANTITATIVOS
PARA
LA TOMA DE DECISIONES

METODOS CUANTITATIVOS
PARA
LA TOMA DE DECISIONES
AMBIENTALES

Métodos Cuantitativos para la Toma de Decisiones Ambientales

Segunda Edición: Abril de 2004

Reimpresión de la segunda edición: Octubre de 2010

ISBN: 958-9352-15-4 (obra completa)

ISBN: 958-9352-78-2 (Volumen Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales)

Enrique Angel Sanint
Ingeniero Civil M. Sc.
Docente Adscrito Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia

Publicado por:
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín
Facultad de Minas
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Posgrado en Gestión Ambiental
e-mail: posgesam@unal.edu

Cubierta: M. C. Escher., Mosaic II, 1957
Remplissage d'une surface II

Diagramación
Mónica del Pilar Rada T.
Coordinadora Publicaciones
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Impresión: Todográficas Ltda.
Impreso y hecho en Colombia
Printed and made in Colombia

SERIE DE PUBLICACIONES DEL POSGRADO EN GESTION AMBIENTAL

- 1. ANTROPOLOGIA Y DESARROLLO SOSTENIBLE**
Sergio Iván Carmona Maya
- 2. EL CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD ECOLÓGICA: GENESIS Y LIMITES**
Luis Jair Gómez Giraldo
- 3. MONOGRAFIAS DE LA PRIMERA COHORTE**
Posgrado en Gestión Ambiental
- 4. METODOS CUANTITATIVOS PARA LA TOMA DE DECISIONES AMBIENTALES**
Enrique Angel Sanint
- 5. MONOGRAFIAS DE LA SEGUNDA COHORTE. Tomo II**
Posgrado en Gestión Ambiental
- 6. ECOLOGÍA Y EFECTO AMBIENTAL DE EMBALSES. Aproximación con casos colombianos**
Germán Márquez Calle y Gabriel Guillot Monroy
- 7. GESTIÓN AMBIENTAL EN PROYECTOS DE DESARROLLO**
Enrique Angel S., Sergio Iván Carmona M. y Luis Carlos Villegas R.
- 8. LA NEGOCIACION INTERCULTURAL. Para una antropología del desarrollo sostenible**
Sergio Iván Carmona Maya
- 9. EL HOMBRE Y SU AMBIENTE. La problemática de contaminación ambiental y aportes para su solución**
Julián Bedoya Velásquez
- 10. MONOGRAFIAS DE LA TERCERA Y CUARTA COHORTE. Tomo III**
Posgrado en Gestión Ambiental
- 11. EL MUNDO DE LA VIDA. Elementos para la elaboración de modelos de educación ambiental rural en el Departamento de Caldas**
Ana Patricia Noguera de Echeverri, Augusto Angel Maya, Inés Sánchez Sánchez, Germán Ignacio Ochoa Zuluaga y María Praenza López
- 12. METODOS CUANTITATIVOS PARA LA TOMA DE DECISIONES AMBIENTALES. Segunda Edición**
Enrique Angel Sanint

A mis hijas, Sara y Laura

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia, por crear el espacio en el que este libro se gestó.

A mi esposa, por su paciencia durante estos últimos años.

A Ricardo Smith Quintero y otro revisor anónimo, por sus acertados comentarios al primer borrador.

A mis alumnos, especialmente a Clara Inés Villegas Palacio, Ana María Zambrano Botero y Carlos Mario Castaño Posada, por su trabajo laborioso y por su ayuda en los detalles de edición.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCION.....	3
1.1. La Gestión Ambiental	4
1.2. La Gestión Ambiental de los Proyectos de Desarrollo	6
1.3. Ideas y Conceptos Claves.....	9
2. TOMA DE DECISIONES AMBIENTALES (TDA).....	13
2.1. Introducción.....	13
2.2. Pasos y Dificultades Cognitivas en la Evaluación Ambiental	15
2.3. Un modelo para la Toma de Decisiones Ambientales (TDA).....	17
2.4. Relación Entorno-Proyecto-Gestión	20
2.5. Relación entre Técnicas y Etapas de un Proyecto	24
2.6. Ideas y Conceptos Claves.....	25
2.7. Ejercicios.....	27
3. TECNICAS DE SIMULACION	31
3.1 Tipos de Simulación.....	31
3.2. Dinámica de Sistemas	33
3.3. Simulación en la Dimensión Física	41
3.4. Simulación en la Dimensión Biótica	44
3.5. Simulación en las Dimensiones Sociales.....	48
3.6. Ejemplo: Colonización del Bosque	49
3.7. Georeferenciación de la Colonización del Bosque	58
3.8. Ideas y Conceptos Claves.....	66
3.9. Ejercicios	67
4. TECNICAS DE OPTIMIZACION	71
4.1. Máximos y Mínimos.....	71
4.2. Programación Lineal	75
4.3. Ideas y Conceptos Claves.....	79
4.4. Ejercicios	80
5. TECNICAS DE GENERACION DE ALTERNATIVAS DE LOCALIZACION	83
5.1. Conceptos Básicos para la Superposición de Mapas	84
5.2. Lógicas para la Superposición de Mapas	85
5.3. Resta de Mapas	87
5.4. Ruta de Menor Costo Acumulado	87

5.5.	Recomendaciones para el Proceso de Superposición de Mapas y Generación de Alternativas de Ruta	91
5.6.	Determinación de Corredores para el Trazado de Proyectos	92
5.7.	Localización de Proyectos Interconectados.....	92
5.8.	Relación entre los Equipos Técnico y Ambiental	98
5.9.	Ideas y Conceptos Claves.....	99
5.10.	Ejercicios.....	100

6. TECNICAS PARA SELECCION DE ALTERNATIVAS ..103

6.1.	Problema General del Análisis Multiobjetivo	104
6.2.	El Diagrama de Desempeño	104
6.3.	Planteamiento de una Metodología para Evaluación Ambiental de Proyectos de Desarrollo.....	105
6.4.	Estudio de Caso: Evaluación Ambiental del Plan de Expansión SEC.....	111
6.5.	Análisis de Sensibilidad	113
6.6.	Entrevistas para el Análisis de Decisiones	115
6.7.	Análisis de Incertidumbre	117
6.8.	Análisis Multiobjetivo Dinámicos.....	120
6.9.	El Análisis Multiobjetivo como un Instrumento para la Fijación de Políticas	125
6.10.	Ideas y Conceptos Claves	131
6.11.	Ejercicios.....	132

7. TECNICAS PARA LA ORGANIZACION DEL TRABAJO .. 137

7.1.	Listas.....	138
7.2.	Matrices	139
7.3.	Matriz de Dimensiones Analíticas.....	140
7.4.	Redes de Impactos	141
7.5.	Redes de Flujo de Información (RFI)	142
7.6.	Técnicas para la Estimación de Costos de Gestión	142
7.7.	Cuadro de Mando Integral	144
7.8.	Ideas y Conceptos Claves	150
7.9.	Ejercicios.....	151

LISTA DE SIMBOLOS 152

BIBLIOGRAFIA.....153

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

*"Que lo débil vence a lo fuerte.
Y lo blando a lo duro,
es sabido por todo el mundo,
más nadie se rige por ello"
Lao Tse. Tao Te King*

1. INTRODUCCION

Con respecto al papel de las matemáticas en las ciencias de hoy (Thom, 1988), se ha planteado que el núcleo de las ciencias que permite una representación matemática se encuentra en la física fundamental "las grandes leyes clásicas, (gravitación, electromagnetismo)", en las cuales los modelos matemáticos pueden llegar a tener una exactitud asombrosa.

Conforme la ciencia se aleja de ese núcleo de la física, la situación pierde representatividad matemática rápidamente. En la mecánica cuántica, al pasar del modelo elemental del átomo de hidrógeno a situaciones más complejas, la capacidad de representación se pierde en un conjunto de aproximaciones.

En otros campos de la física, (física del estado sólido, mecánica de fluidos), muchas leyes empíricas no poseen expresión matemática explícita, esta situación empeora aún más al pasar al campo de la química.

En biología sólo se presentan la dinámica de poblaciones y la genética como casos de formalización matemática con algún rigor y fuera de estos, se presentan casos aislados de representación de fenómenos a escala local. En otras ramas de las ciencias como la fisiología, la etología, la psicología y ciencias sociales, las matemáticas sólo aparecen en la forma de enunciados de tipo estadístico, con la excepción de la economía matemática.

Se citan también algunos casos de aplicación de teoría de grafos en la antropología y sociología, con lo cual básicamente se completa el panorama de las aplicaciones matemáticas a la ciencia.

Frente a este panorama que plantea la dificultad de avanzar con modelos estrictamente matemáticos en otros campos distintos del núcleo central de la mecánica clásica, se contraponen la necesidad de cualificar, hasta donde sea posible, las decisiones que se toman de cara a las actividades orientadas al desarrollo en general y a la gestión ambiental en particular.

En este contexto es necesario un avance de doble sentido entre las disciplinas ambientales y las técnicas existentes en las ingenierías y otras disciplinas aplicadas.

Este doble sentido significa un esfuerzo por parte de los analistas ambientales por apropiarse de técnicas existentes como los diagramas de flujo para el manejo de proyectos o para la sistematización de algoritmos computacionales, en aras de hacer su trabajo más cercano a las instancias de la decisión. En sentido contrario, significa un esfuerzo de los ingenieros por captar los problemas que los analistas

ambientales enfrentan día a día y por poner a su servicio las técnicas que ellos dominan.

Esta tensión, marcada de un lado por la dificultad - imposibilidad dirían algunos- de adecuar modelos matemáticos a campos diferentes a la física y del otro por la necesidad de mejorar la gestión ambiental, enmarca el desarrollo de este texto.

1.1. La Gestión Ambiental

El punto inicial de la gestión ambiental se encuentra en la conceptualización de un "proyecto de desarrollo", entendido como un conjunto complejo de actividades y transformaciones planificadas para transformar el entorno natural y humano y que tal proceso implica siempre la inversión de capital (tanto económico como cultural) y de tecnología.¹

Tales proyectos de desarrollo, son las acciones necesarias para la materialización de un "modelo de desarrollo", entendido como un proceso o serie de etapas que abarca múltiples aspectos de la vida social, sobre los que debe efectuarse un proceso de cambio inducido hacia una situación modernizante, conforme al modelo de los llamados países desarrollados. En este modelo, la inversión de capital y el progreso tecnológico, constituyen los factores principales del desarrollo.

Los grandes proyectos de infraestructura, o los de inclusión e implementación de procesos de transformación de las regiones para incrementar u optimizar las actividades productivas tales como grandes explotaciones mineras, centrales de generación eléctrica, líneas de transmisión o distribución eléctrica, explotación y transporte de energéticos fósiles, infraestructura vial y de transporte, apertura de fronteras agrícolas, proyectos industriales y agroindustriales, etc., constituyen proyectos de desarrollo en sí mismos, no obstante hagan parte de proyectos de desarrollo más amplios tales como los que tienen que ver con el desarrollo económico, político y social de una nación.

En este orden de ideas, el impacto ambiental de los proyectos de desarrollo puede plantearse de manera genérica, como la introducción de factores exógenos de cambio en las relaciones entre naturaleza y cultura, entorno y sociedad, hábitat y poblaciones, ocasionada por la construcción y operación de tales proyectos.

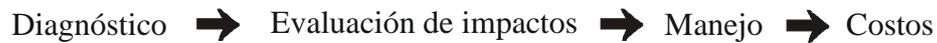
La gestión ambiental contempla de manera integrada todos los aspectos que componen el medio humano y el medio natural en su interacción con los proyectos de infraestructura, en cuanto vectores que introducen modificaciones significativas al mismo. Aunque los posibles arreglos disciplinarios son numerosos, se trabajará con base en cinco dimensiones analíticas: física, biótica, económica, cultural y política.

Los impactos ambientales, específicos para el contexto particular de cada proyecto y su identificación, evaluación, prevención, mitigación o compensación, constituyen

1. Las ideas discutidas en este numeral, son un desarrollo del modelo de gestión ambiental presentado en: Angel, Carmona, Villegas, 1996.

el objeto de la gestión ambiental.

El hecho de ser el impacto ambiental el centro de la gestión, obliga a su identificación y evaluación y a la definición de planes y programas para el manejo de cada impacto y en suma a la articulación de las consideraciones ambientales en cada una de las fases de los proyectos, siguiendo el esquema:



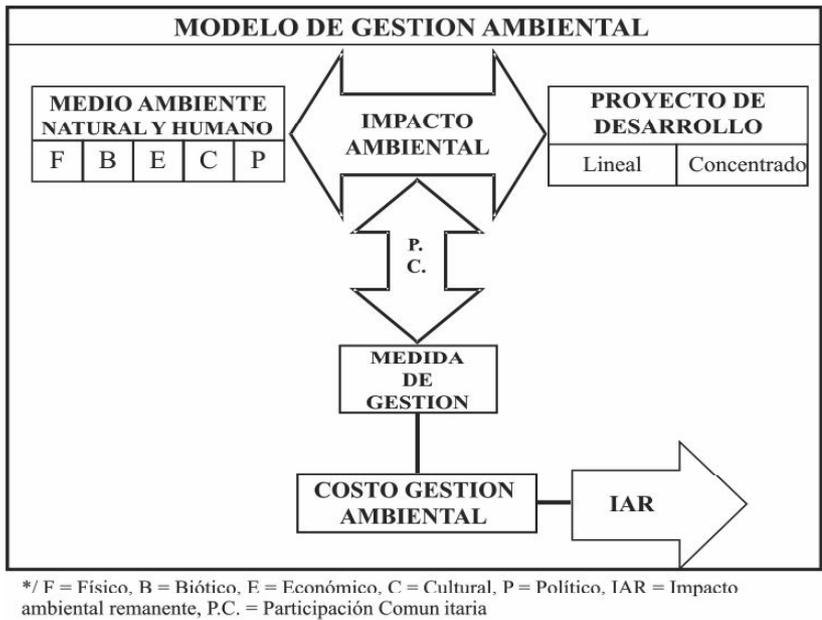
Es importante resaltar el hecho de que la realización de una gestión ambiental responsable, que apunte a un desarrollo sostenible y a la consolidación de procesos democráticos, implica un proceso de participación comunitaria, de aquellas comunidades que de alguna u otra manera se sientan afectadas por los impactos derivados del proyecto. Por tanto, un Estudio de Impacto Ambiental, debe ser construido con la comunidad y cada medida de gestión debe ser validada por la comunidad, a través de un proceso de información, consulta y concertación.

El estudio de los impactos de un proyecto es uno solo y se desarrolla a través de diferentes fases, de una manera progresiva, avanzando desde el reconocimiento general del medio en el cual se circunscribe el proyecto y la identificación preliminar de posibles conflictos e impactos ambientales, pasando por el dimensionamiento y evaluación detallada de los impactos, hasta llegar al diseño, puesta en práctica, seguimiento y evaluación expost del Plan de Manejo Ambiental.

El proceso de los estudios ambientales en un proyecto de desarrollo o infraestructura, obedece en primera instancia, a la lógica de prevenir, evitar si es posible, y si no, mitigar los impactos ambientales no deseables. En segunda instancia, responde a la lógica de compensar por daños o pérdidas inevitables que suelen entrañar los proyectos de desarrollo que resultan de políticas nacionales y de los requerimientos del modelo de desarrollo imperante, y en una instancia final, responde a la lógica de potencializar vectores de desarrollo en beneficio de la región involucrada con el proyecto.

Por último, es necesario reconocer que la gestión ambiental, seguramente no podrá manejar de manera apropiada la totalidad de impactos generados y por tanto existirá una proporción de estos que permanecen sin atención. Esto conforma el " Impacto Ambiental Remanente", conceptualizado desde la economía como "externalidad". Este Impacto es finalmente asumido por la sociedad en su conjunto, bien mediante la destinación de dineros públicos para su gestión, bien mediante la internalización directa de los costos, por parte de los afectados.

Los elementos expuestos se recogen en un diagrama:



1.2. La Gestión Ambiental de los Proyectos de Desarrollo

Los proyectos de desarrollo pueden, según sus características generales de inserción en el ambiente, considerarse como de dos tipos: Proyectos lineales y proyectos concentrados.

Los proyectos lineales son aquellos proyectos longitudinales y localizados en corredores en los cuales imponen restricciones parciales o totales para el uso del suelo.

Desde el punto de vista de los impactos ambientales, estos en su gran mayoría tienen un alcance veredal, únicamente, y su orden de magnitud no es muy alto si se les considera por separado. No obstante, el impacto puede ser significativo si se mira en forma agregada. Normalmente los proyectos lineales atraviesan una gran diversidad de medios naturales y humanos, lo que le confiere complejidad a la gestión ambiental. Dentro de este grupo se enmarcan los proyectos viales, los oleoductos y gasoductos, las líneas de transmisión de energía y los canales o tuberías para la conducción de agua.

Por su parte los proyectos concentrados son aquellos proyectos que hacen un uso restrictivo de áreas relativamente extensas, pero localizadas en torno a un epicentro territorial. Desde el punto de vista de los impactos ambientales, estos habitualmente son de magnitud considerable y tienen alcance local y regional. La diversidad de medios naturales y humanos afectados es menor que en el caso de los proyectos lineales, pero dependiendo del tamaño del proyecto pueden comprometer la totalidad de uno o varios ecosistemas o desarticular social y culturalmente poblaciones completas.

En este grupo se enmarcan desarrollos de mediana y gran minería, centrales de generación de energía tanto hidráulica como térmica, puertos y aeropuertos, explotación y refinación de hidrocarburos, proyectos industriales, agroindustriales y zonas francas.

Etapas de gestión ambiental

En este contexto se hace necesario una articulación del proceso de la gestión ambiental a los aspectos técnicos de los proyectos de desarrollo. Se aborda a

ETAPAS	SUBETAPAS
Planeación y estudios	- Concepción y selección de alternativas - Optimización de alternativas
Construcción	- Actividades previas - Construcción
Operación	
Desmantelamiento ²	

Ciclo técnico y ambiental de los proyectos lineales

ETAPA	ALCANCE TECNICO	ALCANCE AMBIENTAL
PLANEACION Y ESTUDIOS (Concepción y selección de alternativas)	Determinación de las obras lineales necesarias para cubrir la demanda específica. Selección del corredor	Análisis de las restricciones ambientales de la zona de localización del proyecto para la escogencia de los posibles corredores de ruta.
PLANEACION Y ESTUDIOS (Optimización de alternativas)	Evaluación de las alternativas de ruta. Selección de la ruta definitiva.	Análisis ambiental de las alternativas dentro del corredor seleccionado, selección de la ruta óptima desde el punto de vista técnico - ambiental. Información a la comunidad. Evaluación detallada de impactos ambientales y diseño del Plan de Manejo Ambiental. Trámite de Licencias y permisos ambientales e inicio de la negociación de servidumbres o derechos de paso.
CONSTRUCCION (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 en los pliegos de las especificaciones técnicas ambientales. Información y consulta a la comunidad. Conclusión de la negociación de servidumbres.
CONSTRUCCION	Replanteo definitivo, construcción de las obras componentes del proyecto.	Ejecución del Plan de Manejo Ambiental. Concertación con la comunidad. Aplicación del Sistema de Calidad Ambiental.
OPERACION	Puesta en servicio e inicio de la operación comercial del proyecto. Iniciación del plan de mantenimiento	Realización de las evaluaciones expost y ejecución del Plan de Manejo Ambiental de la operación.
DESMANTELAMIENTO	Desmante de estructuras y equipos. Evaluación final del proyecto	Plan de Manejo Ambiental de desmantelamiento. Seguimiento a las responsabilidades no resueltas.

2. Si bien es cierto que en situaciones socioeconómicas y tecnológicas como las de la mayoría de países de América Latina, desmantelar un proyecto es poco usual, pues siempre habrá maneras de que pueda seguir operando haciéndole remodelaciones más o menos sustanciales, la etapa de desmantelamiento se incluye para efectos de que el marco conceptual muestre el ciclo de vida completo del proyecto.

Ciclo técnico y ambiental de los proyectos concentrados

ETAPA	ALCANCE TECNICO	ALCANCE AMBIENTAL
PLANEACION Y ESTUDIOS (Concepción y selección de alternativas)	Identificación de posibilidades y restricciones generales al proyecto, conformación de un catálogo de posibles localiza-ciones y selección de las mejores alternativas. (Reconocimiento). Determinación del esquema tecnológico más adecuado para el objetivo del proyecto. Definición de las alternativas tecnológicas y de localización. (Prefactibilidad).	Identificación general de conflictos y restricciones am-bientales (Reconocimiento). Análisis comparativo de las implicaciones ambientales de los distintos esquemas tecno-lógicos y sus alternativas de localización; recomendación de las que desde el punto de vista ambiental resultan factibles (Prefactibilidad).
PLANEACION Y ESTUDIOS (Optimización de alternativas)	Obtención de los elementos para definir si un proyecto es técnica, económica y financieramente viable para el país. (Factibilidad). Determinación final de las características detalladas de ingeniería y de las especificaciones de las diferentes componentes (Diseño).	Evaluación detallada de los impactos ambientales que oca-sionará el proyecto. Formulación al nivel de prediseño del Plan de Manejo Ambiental (Factibilidad). Evaluación y recomendación de los posibles cambios técnicos derivados de los análisis ambientales a fin de mejorar el desempeño ambiental dentro de las restricciones técnicas. Información a la comunidad. Diseño detallado del Plan de Manejo Ambiental. (Diseño).
CONSTRUCCION (Actividades previas)	Trámites de licitación y contratación de construc-ción de obras civiles y suministro de equipos.	Inclusión en los pliegos de las especificaciones ambientales. Consulta y concertación con la comunidad. Trámite de Licencias y permisos ambientales. Compra de predios y servidumbres.
CONSTRUCCION	Ejecución del proyecto y realización de pruebas operativas.	Ejecución del Plan de Manejo Ambiental, el cual incluye la aplicación del sistema de calidad ambiental.
OPERACION	Funcionamiento comercial del proyecto.	Evaluación ambiental expost. Ejecución de PMA de operación.
DESMANTELAMIENTO	Desmonte de estructuras y equipos. Evaluación final del proyecto.	Plan de Manejo Ambiental de desmantelamiento. Seguimiento a las responsabilidades no resueltas, monitoreo de residuos.

1.3. Ideas y Conceptos Claves

- La Toma de Decisiones Ambientales se mueve entre la dificultad de desarrollar modelos estrictamente matemáticos para campos diferentes a la física y la necesidad de cualificar las decisiones ambientales.
- Los modelos de desarrollo se materializan a través de proyectos de desarrollo.
- Estos proyectos de desarrollo conllevan la introducción de factores exógenos de cambio en las relaciones naturaleza - cultura, entorno - sociedad, hábitat - población, estos factores de cambio se denominan impactos ambientales.
- Los impactos ambientales, su evaluación, prevención, mitigación, corrección o compensación son el objeto de la gestión ambiental.
- Cada medida de gestión ambiental debe ser validada por la comunidad, mediante un proceso de participación comunitaria.
- El diagrama del modelo de gestión ambiental recoge los elementos principales de este:
 - Dimensiones del Medio ambiente: física, biótica, económica, cultural y política
 - Proyectos de desarrollo: concentrados y lineales
 - Impacto ambiental: doble vía entre el ambiente y los proyectos
 - Participación comunitaria
 - Medidas de gestión ambiental
 - Costo de la gestión
 - Impacto Ambiental Remanente
- Las etapas del ciclo de gestión técnico - ambiental son:
 - Planeación y estudios
 - Concepción y selección de alternativas
 - Optimización de alternativas
 - Construcción
 - Actividades previas
 - Construcción
 - Operación
 - Desmantelamiento

CAPITULO 2

TOMA DE DECISIONES

AMBIENTALES



“La historia de la ciencia, como la de todas las ideas humanas es una historia de sueños irresponsables, de obstinaciones y de errores. Pero la ciencia es una de las pocas actividades humanas –quizá la única- en la cual los errores son criticados sistemáticamente y muy a menudo, con el tiempo, corregidos”

Karl R. Popper. Conjeturas y Refutaciones

2. TOMA DE DECISIONES AMBIENTALES (TDA)

2.1. Introducción

Se ha llamado este texto “Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales” por varias razones:

- La necesidad de enfatizar el proceso de gestión ambiental como uno en el que además de realizarse actividades de planeación, estudios, gestión con la comunidad, investigación, desarrollo de programas, evaluaciones, etc., principalmente se realiza a lo largo del mismo la toma de una serie de decisiones, ligadas entre sí, íntimamente interdependientes, que son la columna vertebral de todo el proceso.
- La necesidad de allegar herramientas cuantitativas que se catalogan usualmente como herramientas para la “toma de decisiones”, que provienen de diversas disciplinas (planeación, investigación de operaciones, simulación, etc.).

Un par de definiciones ayudan a fijar conceptos:

Se propone el término “Decisión ambiental” para toda decisión sobre la realización o no de un proyecto, sus características de ingeniería, su cronograma, o cualquier otro rasgo propio del proyecto que pueda llevar a que el conjunto de impactos ambientales asociados al proyecto varíen.

Por su parte la expresión “Toma de Decisiones Ambientales” (TDA) se propone para denominar aquella disciplina cuyo objeto es la racionalización de las decisiones ambientales.

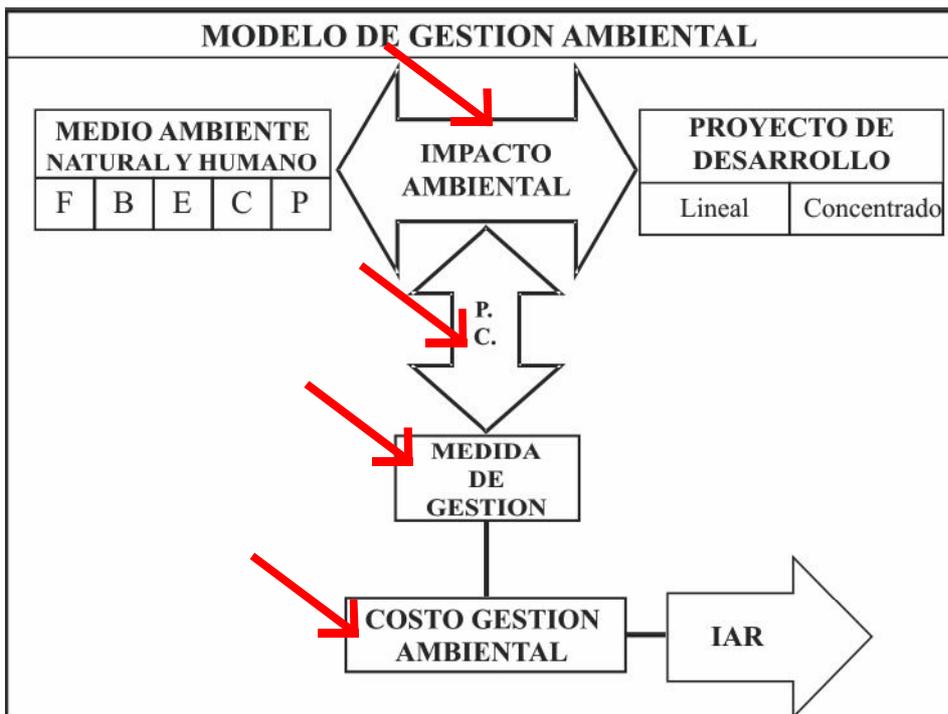
En el contexto de gestión ambiental planteado, la TDA tiene una serie de objetivos claramente definibles:

- Lograr una mejor definición de las necesidades a servir con la construcción y operación del proyecto, lo que lleva a más y mejores alternativas.
- Lograr una mejor selección de los proyectos, mediante la introducción de técnicas de generación y selección de alternativas de desarrollo de los mismos.
- Lograr un mejor secuenciamiento de los proyectos en el tiempo.
- Lograr un mejor dimensionamiento y una mejor evaluación de los impactos

ambientales, lo que debe llevar a Planes de Manejo Ambiental más acertados y eficaces.

- Lograr un mejor proceso comunicacional con las comunidades, mediante el uso de los resultados intermedios del proceso de TDA.
- Lograr un mejor diseño de la gestión, introduciendo herramientas que aumenten la eficacia en la realización de estudios o acciones.
- Lograr una optimización en el manejo de los recursos destinados a la gestión ambiental, mediante la introducción de técnicas de manejo de costos.

Volviendo al diagrama, las instancias en las que la TDA presta su concurso se pueden representar por:



*/ F = Físico, B = Biótico, E = Económico, C = Cultural, P = Político, IAR = Impacto ambiental remanente, P.C. = Participación Comunitaria

Llegando a aspectos puramente operativos, la TDA debería ayudar a contestar algunas preguntas:

- Cómo debe conformarse el equipo interdisciplinario que estudiará los aspectos ambientales del proyecto.
- Cómo deben secuenciarse en el tiempo las actividades de los especialistas, de tal manera que cada uno proceda sobre información suficientemente validada por el equipo y simultáneamente, pueda hacer el mayor aporte posible a este.

- Cuáles son las alternativas tanto de localización como tecnológicas del proyecto, de manera que respete las áreas de alta sensibilidad ambiental.
- Cuál de las alternativas resultantes es la que ,en su conjunto, genera un menor impacto ambiental, suponiendo unas políticas de operación típicas.
- Dada una alternativa seleccionada, cuál es la política de operación óptima para esa configuración del proyecto.
- La selección que se llevó a cabo, tanto de localización y tecnología, como de política de operación, podrá acomodarse en un futuro a los cambios sociales y de regulación que razonablemente se puedan esperar?

El problema central tanto de la gestión ambiental como de la toma de decisiones ambientales son los impactos ambientales, entidades cuya evaluación presenta un conjunto de dificultades a sortear.

2.2. Pasos y Dificultades Cognitivas en la Evaluación Ambiental

En el proceso de conocer y evaluar un impacto ambiental se presentan varias etapas o pasos y unidas a cada una de ellas existen varias dificultades cognitivas.

Etapas 1: Identificación

Consiste esta primera etapa en reconocer la existencia del impacto, darle un lugar dentro de los problemas que merecen ser estudiados.

Usualmente, para llegar a este punto es necesario vencer la carga ideológica que puede significar el reconocimiento de la existencia de un impacto en particular, especialmente si el fenómeno detectado se aleja de las consideraciones prácticas de uso corriente en la Gestión Ambiental.

Un segundo problema lo conforma la identificación de impactos de baja probabilidad de ocurrencia, que pueden pasar inadvertidos durante largos períodos de tiempo, simplemente porque durante ese lapso no ha ocurrido el evento que los desencadena. A esta categoría pertenecen por ejemplo, los impactos asociados a fenómenos de tipo volcánico que tienen períodos de recurrencia muy largos.

Un tercer problema es manejar fuentes de información sumamente precarias que aunque permitan la identificación, llamemos lingüística, del impacto, no permiten allegar datos acerca de su probabilidad de ocurrencia, su magnitud, ni sus consecuencias. Se encuentra el planificador entonces, con un impacto del cual lo único que conoce es su nombre.

Etapas 2. Dimensionamiento

Consiste en determinar la extensión, en el espacio y en el tiempo, del impacto, es decir, atribuirle una magnitud.

Las dificultades en este caso tienen que ver con la escasez de información histórica para determinar tanto su extensión como su probabilidad de ocurrencia.

En el caso de impactos que respondan a eventos causados por el hombre y por lo tanto de los cuales es muy poco probable que se cuente con información de tipo histórico, por ejemplo la creciente generada por la rotura de una presa, el problema suele derivar hacia dificultades diferentes, tales como la falta de información topográfica e hidráulica necesaria para realizar una simulación de la onda de crecida.

En el dominio temporal se tiene una dificultad consistente en la posibilidad de que algunos procesos que se desencadenen como consecuencia del impacto sean de tipo caótico, es decir cuya predictibilidad decrezca de manera irremediable con el tiempo, por ser procesos altamente dependientes de las condiciones iniciales, condiciones que nunca podrán ser determinadas con precisión suficiente.

Etapa 3. Evaluación

Consiste esta etapa en la determinación de qué tan grave considera la sociedad, -o para el caso, los organismos del Estado encargados del tema, en representación de dicha sociedad, lo uno o lo otro dependiendo de la profundidad del proceso democrático- la ocurrencia de ese impacto y de los demás que se desencadenan del primero.

La dificultad principal en esta etapa consiste en la necesaria "politización" de la evaluación. Entendiendo politización como la instancia en la cual se toman decisiones que afectan a la sociedad, de manera discriminada -muy probablemente no afecta a todos por igual- y por tanto se convierte en un escenario de ejercicio del poder.

De la mano de esta dificultad va la necesidad de priorizar la atención que se da a uno u otro impacto, dedicar recursos necesariamente escasos a la atención de uno u otro programa y decidir entre diferentes alternativas de desarrollo de un proyecto, atendiendo al hecho de que diversas alternativas puede favorecer y afectar a diferentes grupos.

En un marco de desarrollo político democrático, el único escenario posible es la decisión de representantes legítimos de la sociedad, avalados por un proceso participativo y tal decisión es necesariamente un asunto político.

Etapa 4. Valoración

Corresponde a esta etapa transformar todo lo anterior en unidades económicas, para responder a la pregunta: Cuánto vale este impacto ambiental?.

Como se expone más adelante, la dificultad mayor radica aquí en el hecho de que para la mayoría de los impactos ambientales no se han desarrollado precios de mercado, pues -prácticamente por definición- los bienes ambientales son no transables.

Señalar las dificultades cognitivas como antesala al planteamiento de un modelo general tiene como principal objetivo puntualizar los límites que muy seguramente acotarán los logros posibles de dicho modelo.

2.3. Un modelo para la Toma de Decisiones Ambientales (TDA)

Uno de los caminos posibles para alcanzar la solidez conceptual de una serie de postulados es someterlo a un tratamiento rigurosamente formal. En este caso se ha considerado un tratamiento lo más matemático posible, dada la facilidad para la manipulación de las entidades matemáticas - una vez sobrepasado con éxito el primer paso de conceptualizarlas y definir las propiamente- y la existencia de un amplísimo corpus de herramientas y resultados que pueden integrarse en este esfuerzo por hacer más sólido el planteamiento de la TDA:

Sea un proyecto, que se denominará **P**, que al ser construido y operado, ocasiona una colección de impactos x_i , que conjuntamente se denota por **X**, los beneficios que se obtienen de la construcción y operación del proyecto se denotan por **W**, la evaluación, necesariamente arbitraria que se realiza sobre estos impactos se denota por **Y**, los costos ambientales del proyecto se denotan por **Z** y los costos de gestión ambiental se notan **C**, por tanto:

CONCEPTO	NOTACION	CATEGORIA
Impactos individuales	x_i	Magnitud es calar
Conjunto de impactos	$X=\{x_i\}$	Vector
Evaluación de los impactos	$Y(X)$	Función escalar de X
Beneficios del proyecto	$W(X)$	Función escalar de X
Costos ambientales del proyecto	$Z(X)$	Función escalar de X
Costos de gestión del proyecto	$C(X)$	Función escalar de X

Simulación

Si bien es cierto que un proceso de simulación per se no implica la toma de ninguna decisión ambiental, también es cierto que la capacidad de simular comportamientos naturales y sociales está en la base de todo el edificio de la TDA.

Cuando se habla de simulación, se habla de encontrar el impacto producido por el desarrollo de una acción o actividad necesaria para la construcción u operación del proyecto. De acuerdo a la recomendación del análisis matricial por dimensiones (Angel, Carmona, Villegas, 1996), **X** debe ser construido desde varias dimensiones diferentes (física, biótica, económica, cultural, política), es decir habrá, por ejemplo, impactos físicos que a su vez desencadenen impactos bióticos y estos serán el disparador de otros de tipo económico o político. Si se utilizan superíndices para indicar la dimensión bajo la cual se considera el impacto y se tienen en cuenta dos generaciones de estos, **X** se convierte en una matriz con:

$$x^{ij} = x^j(x^i)$$

$$i, j = 1 \dots 5$$

Sin embargo, el análisis no tiene por qué detenerse en la segunda generación de impactos, puede continuar hasta incluir varias de ellas.

Optimización

Sean $Y(\mathbf{X})$ una función escalar del vector \mathbf{X} determinada arbitrariamente que califica la gravedad de los impactos y sean $W(\mathbf{X})$ los beneficios económicos o de otro tipo, asociados al proyecto \mathbf{P} . La optimización ambiental del proyecto puede expresarse entonces como:

$$\begin{aligned} \min Y(X) \\ \text{sujeto a: } W(X) \geq W_0 \end{aligned}$$

con W_0 el beneficio mínimo para el cual el proyecto se justifica. Esta perspectiva resultará en el cumplimiento ajustado de los beneficios y una minimización de los impactos. Otra perspectiva sería buscar la maximización de los beneficios, respetando unas magnitudes predeterminadas de impactos, lo que puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \max W(X) \\ \text{sujeto a: } y_i(x_i) \leq y_i^* \end{aligned}$$

con y_i , la evaluación del $i^{\text{ésimo}}$ impacto del vector X , además con y_i^* la evaluación crítica para que ese impacto sea aceptable, esto último también puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \max W(X) \\ \text{sujeto a: } x_i \leq x_i^* \end{aligned}$$

La primera perspectiva podría calificarse como "ambientalista", mientras la segunda sería económica con restricciones ambientales.

Whipple (1996) señala un hecho - presente también en nuestra legislación ambiental colombiana; cuando se pretende realzar la manera como un aspecto ambiental debe ser tenido en cuenta dentro del proceso de planeación integrada del manejo de los recursos, históricamente el enfoque que se la ha dado ha sido convertir ese aspecto en un absoluto, es decir, volverlo una restricción inviolable, por lo cual, el problema general de la planeación - haciendo la analogía con un problema de programación lineal- se ha visto reducido a encontrar un óptimo local, dentro de las fronteras de la región factible redefinidas mediante la proclamación de nuevas restricciones, cada vez más estrictas. La continuación de esta práctica según la cual no se estiman los costos totales para la sociedad provenientes de la redefinición de las restricciones tomándolas como absolutos, implica que ese recurso debe ser preservado al costo que sea. Este enfoque hace que se pierda la función de optimización para la sociedad que lleva implícita la tarea de la elaboración de políticas.

Generación de alternativas de localización

En un plano cartesiano, con (ε, μ) , las coordenadas geográficas, se denota $P(\varepsilon, \mu)$, el proyecto localizado en ese punto específico (ε, μ) , sea $\Phi(\varepsilon, \mu)$, una cierta región

geográfica que cumple un determinado grupo de características $\pi = f(k_i)$, con k_i , usualmente referidas a las dimensiones analíticas del impacto ambiental o a los beneficios esperados del proyecto.

Así definido, el problema de la generación de alternativas puede expresarse como encontrar:

$$\Phi(\varepsilon, \mu) / \forall (\varepsilon, \mu) \in \Phi(\varepsilon, \mu): P_{(\varepsilon, \mu)} \text{ satisfice } \pi(k_i)$$

Selección de alternativas

Una vez generadas las alternativas, es preciso compararlas para seleccionar entre ellas. Si denotamos Φ_j una subregión particular y $P(\Phi_j)$ la alternativa de proyecto localizada en ella, la selección de alternativas para proyectos concentrados puede tomar la forma de:

$$\text{Seleccionar } \phi_j / Y(X(P\phi_j)) \text{ sea mínimo}$$

Para proyectos lineales el problema se convierte en encontrar una ruta $\Theta(\varepsilon, \mu)$, tal que sobre esa ruta se minimice la evaluación de los impactos ambientales; en términos un poco más formales, encontrar:

$$\Theta(\varepsilon, \mu) / Y(X(P_\Theta)) \text{ sea mínimo}$$

Este problema corresponde a una formulación muy general del problema clásico del cálculo variacional.

Organización del trabajo

Si bien no se presenta una formalización en lenguaje matemático, esta parte de la TDA busca incorporar herramientas propias de otras disciplinas al diario quehacer de la gestión ambiental en cuanto a la organización y al secuenciamiento de actividades.

Estimación de costos

De acuerdo con el modelo de gestión ambiental planteado en el numeral 1.2, existen unos impactos ambientales, cuyo costo de gestión en conjunto estará dado, como primera aproximación, por la suma de los costos de gestión de los impactos individuales.

$$\hat{C}(X) = \sum_i \hat{c}_i$$

Si bien es cierto que en sentido estricto, las sinergias tanto de los impactos, que se refuerzan mutuamente, como de las gestiones individuales, que se facilitan mutuamente - pueden también llegar a dificultarse, dado el caso- hacen que la expresión no sea lineal, también es cierto que el enfoque lineal puede usarse como primera aproximación.

Una nota sobre Economía Ambiental

Por su parte la economía ambiental propone la optimización social de los proyectos de desarrollo, por vía de la consideración de sus costos totales, incluyendo estos últimos, además de los costos de bienes y servicios a precios de mercado, aquellos "costos ambientales" derivados de la construcción y operación del proyecto.

Por tanto esta optimización social podría expresarse como:

$$\begin{aligned} &\min Z(X) \\ &\text{sujeto } a: W(X) \geq W_0 \end{aligned}$$

o alternativamente:

$$\begin{aligned} &\max W(X) \\ &\text{sujeto } a: z_i(x_i) \leq z_i^* \end{aligned}$$

Con $Z(X)$ el vector de los costos ambientales z_p , y además, z_i^* el costo ambiental máximo aceptable por impacto.

Como puede deducirse por simple observación, la forma es la misma de una optimización usando una función arbitraria de valoración $Y(X)$. La diferencia radica en que los costos $Z(X)$ recogen todas las afectaciones causadas por el proyecto, valoradas económicamente. En este punto se hace evidente una dificultad, consistente en valorar económicamente, realidades como la ecológica, la cultural o la política, que son consideradas usualmente como dimensiones de lo ambiental.

Apelando a la separación tradicional entre sistema y "ambiente", se suele tomar lo segundo como aquello que no hace parte de lo primero, sino que lo rodea, lo determina y es determinado por él. Si las realidades mencionadas no han sido parte del sistema, es porque no se ha podido establecer para ellas una manera clara de intercambio, en otras palabras, son bienes y servicios no transables y por tanto no poseen un mercado.

La inexistencia de un mercado las hace prácticamente imposibles de valorar económicamente, pues el mecanismo de formación de precios no se ha expresado. Hasta tanto la economía ambiental resuelva esa dificultad, la optimización de acuerdo a los costos ambientales $Z(X)$ no será, ni mejor ni peor, per se, que otra optimización realizada juiciosamente de acuerdo a una función $Y(X)$.

2.4. Relación Entorno-Proyecto-Gestión³

En las discusiones que se llevan a cabo como parte de la aproximación que el equipo interdisciplinario realiza, para caracterizar la realidad regional en la que se inserta el proyecto, estimar sus impactos ambientales y proponer un Plan de Manejo Ambiental - PMA, es usual que estas tres realidades - entorno, proyecto y gestión- estén muy laxamente definidas, sus límites no sean claros y por tanto, se

3. El material de este numeral apareció previamente publicado en Angel, 1999

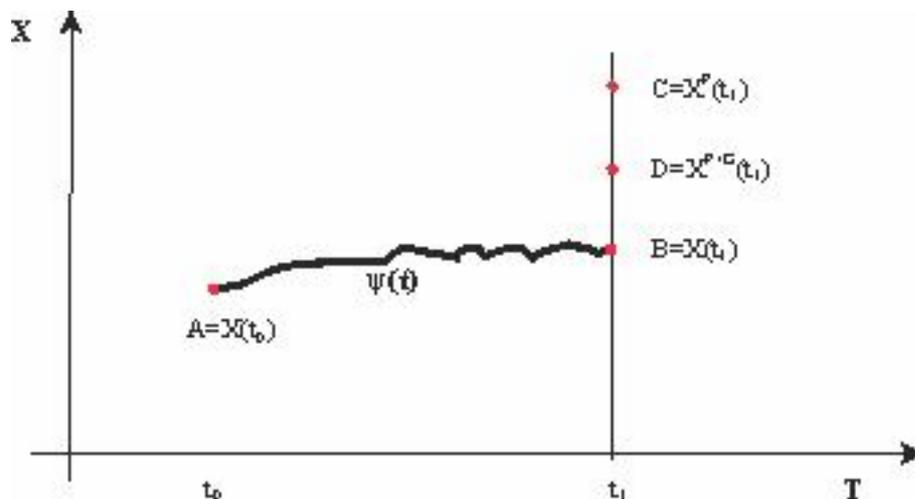
llame a varias cosas por el mismo nombre o a una sola con nombres diferentes.

Representación gráfica

Para empezar, es necesario plantear algunas afirmaciones de carácter axiomático, es decir, que se dan por ciertas y sobre ellas se construye el razonamiento, estas afirmaciones son:

- Existe una magnitud que describe el estado ambiental actual de la región. Esta magnitud se denota por X
- Esta magnitud crece conforme los proyectos se implementan e introducen nuevos impactos sobre la región.
- Esta magnitud es el agregado de todas las posibles dimensiones analíticas y por tanto su valor es un indicador completo -es decir, que abarca todos los aspectos posibles- de la situación ambiental de la región.

Para poder visualizar la escala temporal en la que se toman las decisiones de gestión y se llevan a cabo las acciones pertinentes, se representa la variable estado ambiental a través del tiempo en un plano cartesiano.



El momento t_0 es el momento en el que se toma la decisión de implementar el proyecto y t_1 corresponde al momento de la implementación del mismo. La región, sometida a sus propios procesos físicos, biológicos y sociales, recorrerá durante el período $t_0 - t_1$ el camino **A**→**B**. Es decir, sufrirá una modificación ambiental que no se puede asociar unívocamente al desarrollo de ningún proyecto en particular. Es posible que este deterioro sea cero, con lo cual la línea **AB** sería una recta horizontal o inclusive sea negativo, es decir, se presente una recuperación, por

ejemplo, en el caso de revegetalización natural después de un incendio o una erupción volcánica.

El desarrollo del proyecto conllevará una serie de impactos que forzarán a que el camino recorrido sea $A \rightarrow C$, llegando hasta el punto $C = X^P(t_1)$, en esta expresión la P en el superíndice indica que se ha desarrollado el proyecto. Necesariamente C está por encima de B , y la distancia BC equivale al agregado de los impactos introducidos por el proyecto P .

La gestión $-G$ en el superíndice- evitará, minimizará, mitigará, corregirá o compensará alguna parte de estos impactos, aunque nunca el 100%, llevando la situación al punto D .

La finalidad de la gestión ambiental, será por tanto, tratar de llevar el punto D tan cerca del B como sea posible, haciendo que los impactos remanentes, equivalentes al segmento BD sean tan pequeños como se pueda, dadas las condiciones de disponibilidad de recursos para invertir en la gestión.

Estimación y dinámica regional

Es necesario tener en cuenta que existe una distancia en el tiempo entre el momento de los estudios y las decisiones t_0 y el momento de la construcción y operación del proyecto t_1 , por tanto todas las cantidades referentes a t_1 son meros estimadores ex-ante, no mediciones ex-post. Para diferenciarlos de sus valores reales se denotan con una virgulilla ($\hat{}$), convirtiéndose por tanto en:

$$B = \hat{X}(t_1); \quad C = \hat{X}^P(t_1); \quad D = \hat{X}^{P+G}(t_1)$$

Si se pudiera determinar una función $\psi(\mathbf{t})$ que describiera los futuros estados de X con respecto a \mathbf{t} , se tendría:⁴

$$\hat{X}(t_1) = X(t_0) + \Delta\Psi|_{t_0}^{t_1}$$

Por tanto:

$$\hat{X}^{P+G}(t_1) = X(t_0) + \Delta\Psi|_{t_0}^{t_1} + BC - CD$$

Esto plantea que para poder decidir si un proyecto es aceptable o no a la luz de un conjunto de restricciones ambientales, en otros términos si el segmento BD , para ese proyecto en esa región, es compatible con los lineamientos de política ambiental establecidos, es necesario estimar:

- El estado actual ambiental de la región.
- La tendencia en el tiempo

⁴En principio, se supondría $y(t)$ independiente de la intervención del proyecto y de su gestión, lo que en la realidad puede resultar una hipótesis fuerte. Se realiza así para simplificar el tratamiento del problema.

- Los impactos agregados por el proyecto
- La calidad de la gestión ambiental asociada a ese proyecto.

Proceso no lineal

Desafortunadamente, tanto la concepción del medio ambiente como un sistema complejo con múltiples interrelaciones, como los resultados empíricos de la experiencia real de la gestión ambiental apuntan a la no-linealidad del proceso, presentándose entonces que:

$$BC = f_1\left(P, \hat{X}(t_1)\right)$$
$$CD = f_2\left(G, \hat{X}^P(t_1)\right)$$

Llamando f_1 una función que describa cómo se agrava la influencia de un proyecto, dependiendo del proyecto mismo (P) y del estado de deterioro ambiental de la región y f_2 una función que describe cómo se mitigan/corrigen/compensan los impactos del proyecto, dependiendo de la gestión (G), y de la severidad de los impactos acumulados al momento de su implementación. Poniendo todo junto:

$$\hat{X}^{P+G}(t_1) = X(t_0) + \Delta\Psi_{t_0}^{t_1} + f_1\left(P, \hat{X}(t_1)\right) + f_2\left(G, \hat{X}^P(t_1)\right)$$

Esta expresión plantea claramente algunas de las dificultades de la evaluación ambiental: Se nos pide que diseñemos desde ahora medidas de control futuras cuya efectividad depende del nivel de afectación al que se llega al implantar el proyecto. Ese grado de afectación es producto de la interacción entre el proyecto y una "situación futura sin proyecto" que a su vez depende de la evolución tendencial del medio y del punto de arranque del proceso. Punto de arranque que por demás, no estamos seguros de poder estimar claramente.

Comentarios

- En una región donde la pendiente de $\psi(\mathbf{t})$ es muy alta, $\Delta\psi(\mathbf{t})$ se espera que sea importante con o sin proyecto, por ejemplo, en zonas de intensa colonización. En este tipo de zonas debe tenerse en cuenta la dependencia de $\psi(\mathbf{t})$ con respecto a \mathbf{X} , es decir remplazar $\psi(\mathbf{t})$ por $\psi(\mathbf{t}, \mathbf{X})$, en esos casos, el compromiso con una gestión adecuada de conservación en zonas aledañas al proyecto, puede lograr que el punto \mathbf{D} quede más abajo que el \mathbf{A} , no porque se puedan gestionar más impactos de los causados, sino por intervención directa sobre el proceso $\psi(\mathbf{t}, \mathbf{X})$.
- Aunque esto parece aplicable a todo tipo de proyectos y por tanto convertirse en la panacea de la gestión ambiental - cargarle a un proyecto la gestión de impactos propios y ajenos, lo cierto es que sólo en zonas de alta colonización o rápido deterioro ambiental y para proyectos de grandes dimensiones, el

sobrecosto por la gestión ambiental es marginal frente a los costos propios del proyecto y por tanto aceptable desde el punto de vista de la viabilidad financiera del proyecto.

- En ecosistemas y comunidades muy frágiles, es posible que la situación no pueda ser revertida de **C** a **D**, una vez desplazada de **B** a **C**, al cruzarse umbrales críticos que rompan la integridad del ecosistema o que desencadenen procesos sociales que sobrepasen la capacidad de adaptación cultural de la comunidad. Correspondería a las autoridades ambientales determinar de manera general esos umbrales y prohibir taxativamente la realización de tales proyectos.

2.5. Relación entre Técnicas y Etapas de un Proyecto

Es claro que al materializar la toma de decisiones esbozada hasta aquí, existe un gran número de técnicas que pueden ser aplicadas. En cada etapa del desarrollo de la gestión y de la toma de decisiones que le es consubstancial, alguna técnica será prevaleciente por su utilidad con respecto a las demás, usualmente por que su finalidad concuerda o es muy cercana al problema al que se pretende dar respuesta en esa etapa.

Sin embargo otras técnicas pueden ser usadas como subsidiarias de esta técnica central, a objeto de complementar información o brindar elementos de juicio en cada momento. Es así como una técnica que es subsidiaria durante el diagnóstico, puede ser la central en el momento de generar alternativas y regresar al papel de subsidiaria al conformar el Plan de Manejo Ambiental. (Angel, 1995b).

A manera de propuesta se presenta el siguiente ordenamiento de técnicas a utilizar para varias etapas y tareas durante el desarrollo de la gestión ambiental en proyectos de desarrollo, sin pretender que esta propuesta sea exhaustiva.

ETAPA	PROBLEMA	TECNICA
Reconocimiento	Conformación del equipo interdisciplinario	Matrices
	Organización del trabajo	Red de Impactos Red de flujo de información
Generación de alternativas	Determinación de restricciones	Superposición de mapas
Selección de alternativas	Comparación de alternativas	Análisis multiobjetivo
Optimización de alternativas	Selección de equipos de control	Simulación- Optimización
	Análisis de robustez ante la reglamentación	Dinámica de Sistemas

2.6. Ideas y Conceptos Claves

- La Toma de Decisiones Ambientales (TDA) pretende presentar un modelo de racionalización de las decisiones que pueden tener repercusiones ambientales.
- Pasos y dificultades cognitivas en la evaluación ambiental
 - Identificación
 - Dimensionamiento
 - Evaluación
 - Valoración
- Toma de Decisiones Ambientales (TDA):
 - Simulación
 - Optimización
 - Generación de alternativas de localización
 - Selección de alternativas
 - Organización del trabajo
 - Estimación de costos
- Simulación: No es decisión, pero es la base de la TDA

$$x^{ij} = x^j(x^i)$$

- Optimización: Dos perspectivas:
 - Minimizar impactos respetando restricciones en los beneficios

$$\begin{aligned} \min Y(X) \\ \text{sujeto } a: W(X) \geq W_0 \end{aligned}$$

- Maximizar beneficios respetando restricciones ambientales.

$$\begin{aligned} \max W(X) \\ \text{sujeto } a: y_i(x_i) \leq y_i^* \end{aligned}$$

- Generación de alternativas: Encontrar regiones, o corredores, donde se puede desarrollar el proyecto, respetando ciertas restricciones:
- Selección de alternativas: entre las alternativas factibles, seleccionar la mejor:

$$\Phi(\varepsilon, \mu) / \forall (\varepsilon, \mu) \in \Phi(\varepsilon, \mu) : P_{(\varepsilon, \mu)} \text{ satisface } \pi(k_i)$$

$$\Theta(\varepsilon, \mu) / Y(X(P_\Theta)) \text{ sea mínimo}$$

- Organización del trabajo: Allegar herramientas que permitan un mejor secuenciamento y organización de las actividades.
- Estimación de costos: Permitir una estimación previa de los costos de gestión ambiental, del suficiente nivel de precisión, para ser útil desde el punto de vista de la planeación financiera del proyecto.

- Sobre Economía Ambiental: Los aspectos ambientales se denominan así, por estar por fuera del sistema económico, por ser bienes y servicios no transables, por tanto, el mecanismo de formación de precios no tiene oportunidad de expresarse y cualquier análisis basado en precios asignados no es ni mejor, ni peor que una optimización realizada juiciosamente de acuerdo con una función arbitraria.
- Entorno - Proyecto - Gestión:

$$\hat{X}^{P+G}(t_1) = X(t_0) + \Delta\Psi|_{t_0}^t + f_1\left(\hat{X}^P(t_1), \hat{X}(t_1)\right) + f_2\left(G, \hat{X}^P(t_1)\right)$$

- Relación entre técnicas y etapas

ETAPA	PROBLEMA	TECNICA
Reconocimiento	Conformación del equipo interdisciplinario	Matrices
	Organización del trabajo	Red de Impactos Red de flujo de información
Generación de alternativas	Determinación de restricciones	Superposición de mapas
Selección de alternativas	Comparación de alternativas	Análisis multiobjetivo
Optimización de alternativas	Selección de equipos de control	Simulación - Optimización
	Análisis de robustez ante la reglamentación	Dinámica de Sistemas

2.7. Ejercicios

1. Amplíe la relación entorno-proyecto-gestión para incluir el período de tiempo durante el cual se implementa el proyecto, es decir, considere t_0 , el momento de la toma de las decisiones, t_1 , el inicio de la construcción y t_2 la finalización de la construcción y el inicio de la operación.
2. Amplíe la relación entorno-proyecto-gestión para incluir dos proyectos cuyos momentos de construcción y operación están desplazados en el tiempo un lapso t^* .

CAPITULO 3

TECNICAS DE SIMULACION



“Si, por consiguiente, hay una argumentación que nos comprometa a confiar en la experiencia pasada y a hacer de ella una norma para nuestro juicio futuro, estos argumentos deben ser sólo probables o relativos a cuestiones de hecho y de existencia real”

David Hume. Investigación sobre el entendimiento humano.

3. TECNICAS DE SIMULACION⁵

Los modelos de simulación son representaciones simplificadas de la realidad, de tal manera que permiten -a través de la representación de un grupo de fenómenos de interés-, responder a la pregunta «qué pasaría en el sistema si se implementara un cambio particular?». Estos modelos, usualmente expresados como algoritmos numéricos, una vez concebidos, desarrollados y calibrados, permiten someter el sistema a diversas condiciones ambientales, a diversas configuraciones del proyecto, a varios modos o reglas de operación y permiten también estimar el comportamiento del sistema ante situaciones extremas que lo alejan de sus condiciones más usuales.

3.1 Tipos de Simulación

Aunque con el avance de la capacidad de cómputo con alta velocidad y a bajo costo, las preferencias se han inclinado últimamente por la simulación numérica, se presenta un recuento de otros tipos de simulación existente.

Simulación física

Es la que se realiza utilizando una construcción física a escala reducida del fenómeno de interés. La importancia de la simulación surge de la posibilidad de construir una pequeña realidad -por lo tanto a bajo costo- que se comporta como el prototipo en el mundo real, en lo que respecta al fenómeno de interés.

Su utilidad reside en el hecho de poder manipular el modelo y someterlo, bajo condiciones controladas, a diversidad de combinaciones de los factores que controlan el sistema; la operación del modelo, por sus reducidas dimensiones, conlleva bajos costos y permite simular situaciones de riesgo sin que el modelo corra ningún peligro, pues se está trabajando en condiciones de laboratorio.

Posiblemente donde se ha avanzado más en la simulación física es el campo de la mecánica de los fluidos, con las obvias implicaciones ambientales, tanto desde

5. El contenido de los numerales 3.1 y 3.2 sigue muy de cerca lo presentado previamente en Angel, Carmona, Villegas, 1996.

el punto de vista del flujo de líquidos en los modelos hidráulicos de corrientes naturales y sus implicaciones en el transporte de sedimentos, como desde el flujo de gases y sus problemas asociados de dispersión y movimiento de contaminantes en la atmósfera, utilizando túneles de viento.

Simulación analógica

Consiste en la simulación física a escala reducida de un fenómeno que guarda relación con el fenómeno de interés. Tal relación se establece desde la concepción teórica y está a menudo dictada por una similitud en las ecuaciones que se acoplan al problema, o en la forma de sus soluciones.

Son bastante conocidos los casos de representación de la superficie piezométrica de un acuífero mediante una membrana elástica y de la analogía entre flujo de agua y flujo de corriente eléctrica, pasando por las analogías caudal-corriente eléctrica, cabeza hidráulica-potencial eléctrico y permeabilidad-resistencia.

Una limitación de este método radica en el hecho de que no se conocen analogías sencillas más que para un reducido grupo de fenómenos. Ante el avance, a relativo bajo costo, de la capacidad de cómputo, este tipo de simulación va en camino de convertirse en una curiosidad histórica más que en una herramienta de uso común.

Simulación matemática

Consiste en la reducción a ecuaciones del fenómeno de interés y la solución de estas bajo diversas condiciones iniciales y de borde. El proceso se desarrolla por etapas así:

- **Conceptualización:** desarrollo de las ecuaciones partiendo de unas hipótesis convenientes, las ecuaciones resultantes son usualmente diferenciales si el fenómeno involucra el paso del tiempo.
- **Montaje:** desarrollo de un algoritmo de solución a las ecuaciones, dadas unas condiciones iniciales y de borde, si el algoritmo es complejo y requiere mucha manipulación numérica es recomendable el uso de un computador.
- **Calibración:** configuración de las topologías de interés y estimación de los parámetros numéricos, operación para la que puede ser necesario un período de experimentación en laboratorio.
- **Operación:** etapa en la cual el modelo se pone en producción, se simulan los cambios en configuración interna e influencias externas, se obtienen y se interpretan resultados.

Una vez montado el modelo y calibrado, probar una nueva configuración del proyecto puede ser tan simple como cambiar un valor numérico en una serie de datos y volver a ejecutar el programa de computador, de ahí su inmensa difusión, pues una vez en la etapa operativa, el costo marginal de cada nueva solución es prácticamente cero.

Es de anotar que los modelos matemáticos, como toda aproximación cognoscitiva a la realidad, son tan buenos, como exactas sean las hipótesis sobre las que están desarrollados y producirán unos resultados tan confiables como confiable y representativa sea la información con la que el modelo es alimentado.

3.2. Dinámica de Sistemas

Una alternativa para acercarse al problema de la estimación de condiciones futuras de sistemas con altas componentes biológicas o sociales es la resolución en el tiempo de relaciones matemáticas que no necesariamente presentan los niveles de formalización de las ecuaciones diferenciales, si bien pueden representar de manera adecuada la evolución de un fenómeno.

La técnica más usual es la Dinámica de Sistemas, que permite el acople de sistemas de ecuaciones de estado con otras relaciones que definen el cambio de las tasas de variación como una función de otras variables conocidas. (Dyner, 1993).

Es frecuente que en este tipo de aproximaciones, se utilicen coeficientes técnico-económicos, obtenidos a través de regresiones estadísticas logradas sobre series históricas de las variables de interés. Por tanto, el modelo resultante, si bien no tiene la capacidad de explicar porqué se presenta alguna tendencia, si puede simularla en el tiempo, bajo la hipótesis de que las correlaciones válidas en el pasado lo seguirán siendo en el futuro.

Debido a su menor representatividad, los modelos así obtenidos, arrojarán resultados con unos márgenes de incertidumbre mucho mayores que los asociados a modelos desarrollados sobre bases más formales, sin embargo, esto no impide que se puedan explorar escenarios futuros con ellos, e intentar dilucidar la influencia de diversas políticas ambientales y de operación de los proyectos, sobre su medio ambiente.

Ejemplos de campos donde la dinámica de sistemas puede brindar interesantes resultados son la evolución de las tendencias en la legislación ambiental, evolución de la colonización en áreas boscosas, tendencias en la configuración económica regional y simulación de la dinámica urbana en poblados cercanos a proyectos, entre otros.

La dinámica de sistemas es una herramienta versátil que viene ganando aceptación en Latinoamérica, dado que ofrece facilidades en el manejo de los procesos de realimentación y en la forma de tratamiento de los retardos entre la toma de decisiones y las acciones.

Elementos históricos⁶

Tal como lo presenta Dyner, (1993) inicialmente en 1961, Forrester desarrolla una disciplina con el objetivo de describir las fluctuaciones que se presentan en

6. En el resto del numeral 3.2 se sigue a Villegas y Zambrano, 1997 y a Dyner, 1993.

la producción y mano de obra de una empresa manufacturera; más tarde los elementos de esta disciplina los generaliza para ser aplicados a la dinámica urbana (1969) y a la dinámica del mundo (1971), extendiendo así estos conocimientos a diversos campos como la economía, la política, la medicina, el ambiente, la biología, la educación, el derecho y el transporte.

Conceptos básicos

En la planificación de cualquier proceso se hacen necesarias herramientas para estudiar alternativas en la toma de decisiones que surgen de la comparación entre los objetivos o metas y el comportamiento del sistema. La dinámica de sistemas representa un soporte fundamental en el estudio de sistemas inestables donde los ciclos de realimentación de información son determinantes para el comportamiento del sistema total.

Los modelos que son considerados dentro de la dinámica de sistemas se componen principalmente de relaciones entre flujos de materiales y flujos de información, representaciones de los procesos dentro de la toma de decisiones y los retardos dentro de los ciclos de realimentación; la inclusión de estos elementos permite observar rápidamente los comportamientos ante diferentes condiciones de operación y ante diferentes valores de las variables de funcionamiento.

Los retardos no necesariamente tienen una connotación negativa; forman parte de los modelos y se producen por el tiempo transcurrido durante la recolección de información, la toma de decisiones, la ejecución de acciones, transporte de materiales y las etapas de maduración. En la dinámica de sistemas se tratan en términos de niveles o tasas de la variable afectada.

Elementos

Dentro de los elementos de los modelos de la dinámica de sistemas se consideran:

Los componentes que incluyen los diferentes procesos entre los que se cuentan la toma de decisiones y los flujos de información involucrados.

Las variables se clasifican de acuerdo a su función dentro del sistema y la información que contengan.

- Variables de estado: Representan los niveles en los que se encuentra el sistema.
- Variables exógenas: Variables cuyo valor se determina fuera del sistema.
- Variables endógenas: Pueden ser tasas que reflejan el comportamiento del sistema o variables auxiliares que representan pasos intermedios antes de la formación de las tasas.

Los parámetros son los valores constantes dentro del modelo y **las relaciones funcionales** son las relaciones entre variables y parámetros.

Diagramas de causalidad

Representan mediante una relación causa - efecto los cambios que se dan en una variable cuando se afecta otra de alguna manera. Estas relaciones se presentan de dos maneras:

- Relaciones causa - efecto propiamente dichas, implican precedencia en el tiempo, por ejemplo dinero - ahorro, madre - hijo, trabajo - producción.
- Relaciones causa- efecto como resultado de la correlación entre variables.

Puede existir una correlación positiva entre las variables, como en el caso de estatura – peso, aunque sólo sea una relación de carácter estadístico, a estas se les asigna un signo positivo. Puede existir también una correlación negativa como la relación existente entre contaminación - salud, muertes - población y distancia – migración, a las que se les asigna un signo negativo.

La existencia de retroalimentaciones en los diagramas de causalidad induce la existencia de Bucles. A cada bucle se le asocia un signo dependiendo de la relación entre las variables que lo conforman. Si al aumentar la variable A también aumenta la B, el signo de la relación entre A y B será positivo. Luego se realiza el análisis situándose en B: si al aumentar B, disminuye C, se asigna (-) a BC y así sucesivamente. Finalmente, se le asocia el signo menos (-) al bucle (ABCD) si hay un número impar de relaciones con signo negativo, de lo contrario se le asocia el signo más (+). Los bucles positivos inducen crecimientos exponenciales en los niveles, los negativos autoregulan o retroalimentan el comportamiento del sistema.

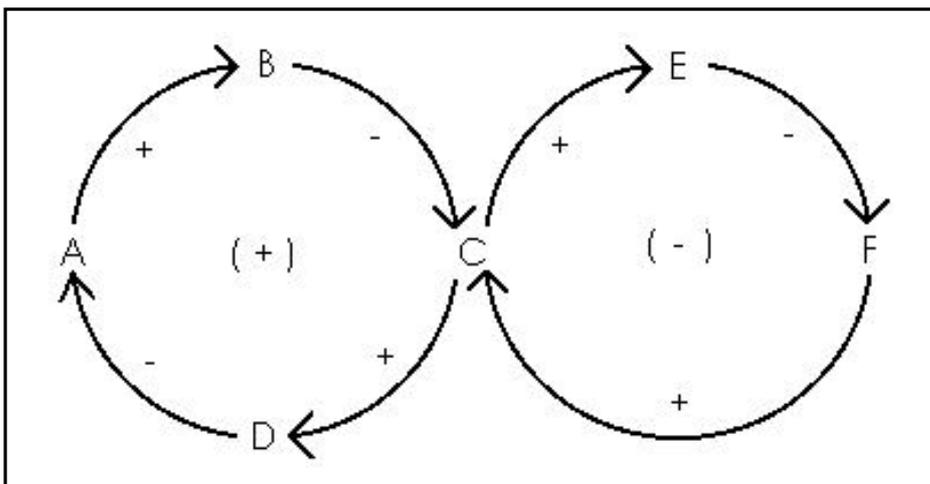
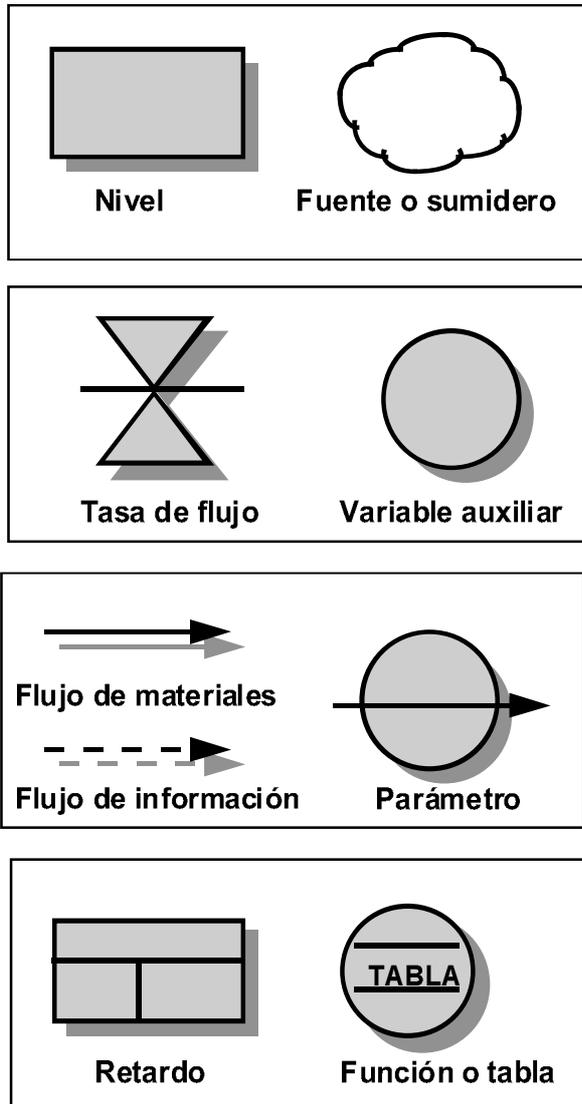


Diagrama de causalidad

Diagramas de influencia

También se conocen como diagramas de Forrester; éstos utilizan símbolos de la hidrodinámica representados de la siguiente forma:



Las variables de estado o niveles se representan por medio de un rectángulo. Indican el estado en el que se encuentra el sistema.

Las tasas de flujo se representan por medio de válvulas y muestran la cantidad de material que puede pasar en una unidad de tiempo.

Las flechas de línea continua indican el origen y destino del material y las flechas de línea discontinua los flujos de información.

Las fuentes o sumideros de materiales se representan por nubes; significando que no importa la cantidad que haya en ellas.

La consideración de una variable como sumidero puede depender de su comportamiento intrínseco o del interés del analista, pues al llegar a los límites de indagación del modelo, a algunas variables puede no realizárseles un seguimiento explícito.

Las variables auxiliares son representadas por una circunferencia y permiten establecer pasos intermedios en el flujo de información o introducir variables exógenas.

En la representación de los retardos la parte superior del rectángulo establece la cantidad de material o de información que se encuentra retardada; el cuadrado de la izquierda indica el tipo u orden de retardo y el de la derecha el tiempo promedio de la demora. El orden de los retardos se puede clasificar como de primer orden o exponenciales, de tercer orden o gamma y por último, de orden infinito llamados también discretos o de tubería.

Ecuaciones del modelo

Si bien se busca que las ecuaciones del modelo tengan una formulación matemática lo más simple posible, gracias a métodos como la simulación de sistemas se pueden resolver problemas para los cuales no se conocen soluciones analíticas.

El modelo matemático es representado por medio de ecuaciones diferenciales, pero esto no implica que el usuario de la dinámica de sistemas deba conocer su solución analítica, ya que el método de cálculo se basa en la actualización de los niveles del sistema que se ven afectados por flujos de entrada y salida en diferentes intervalos de tiempo. Este procedimiento implica acoger el esquema de solución por diferencias finitas en el que el diferencial se aproxima mediante la diferencia.

El proceso de ejecución de un modelo desarrollado utilizando la dinámica de sistemas es el siguiente:

- Lectura de parámetros, tablas y valores iniciales.
- Incremento del tiempo en un valor (dt).
- Pregunta acerca del fin de la simulación. Si la simulación ha llegado a su fin se hacen los gráficos que representan el comportamiento, de manera contraria se procede así:
 - Cálculo de variables auxiliares
 - Determinación de las tasas de flujo
 - Evaluación de los nuevos valores de los niveles
 - Impresión de los valores de los niveles y comienzo de un nuevo ciclo.

Validación

La modelación de dinámica de sistemas tiene establecidos dos objetivos claros: En primer lugar, se debe explicar el comportamiento de los sistemas de acuerdo a su estructura y sus políticas; en segundo lugar debe servir de instrumento para evaluar cambios en la estructura del fenómeno que se pretende simular.

Por lo anterior el modelo se debe someter a pruebas para garantizar los objetivos antes mencionados.

En principio se evalúa la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento del sistema, y mediante pequeñas variaciones en las variables se permite observar los efectos que éstas tienen en su estabilidad y la del sistema en general.

Se evalúa también el modelo en relación con los resultados esperados, de acuerdo a cambios en las variables o en la conformación del problema; de igual manera se **controla la capacidad de reflejar las tendencias y ciclos, los estados de crecimiento o declinación y las estacionalidades del sistema.**

En la validación del sistema se debe incluir la consideración de que la dinámica de sistemas no es un instrumento de alta precisión sino más bien una herramienta para el diseño de políticas de manejo del sistema de acuerdo a los resultados.

3.2.1. Ejemplo

Es conveniente empezar con un fenómeno que es de todos conocido y que por tanto permite una aproximación intuitiva; la simulación del enfriamiento de una taza de café.

Se puede idealizar la taza como si estuviera flotando en el aire, es decir, tener en cuenta sólo el café y no la taza que lo contiene. Esto permite elaborar un modelo más sencillo, que posteriormente se puede hacer más complejo, para que sea más representativo.

El café se va enfriando conforme el calor es cedido al medio circundante. En este sencillo ejemplo es necesario tener en cuenta dos aspectos diferentes, la cantidad de calor que tiene la taza de café y el intercambio de calor de esta con el aire.

La primera se considera un nivel, es decir, un almacenamiento que puede cambiar con el tiempo y sobre el que se puede establecer una ecuación de continuidad, o sea, se puede afirmar que la cantidad almacenada al finalizar el período $t+1$ es igual a la cantidad almacenada al finalizar el período t , más los cambios ocurridos durante el período $t+1$. Las variables de nivel se representan mediante un rectángulo en el diagrama.

El cambio en la cantidad de calor, en este caso salida o pérdida, pues el café se está enfriando, se representa como una válvula situada sobre un conducto que sale del nivel "cantidad de calor" y apuntando hacia un sumidero (nube), que representa el hecho de que, en este caso, el medio puede absorber tanto calor

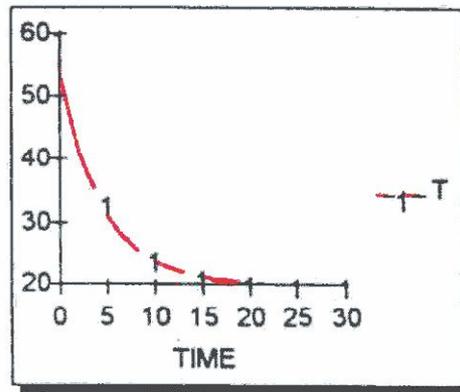
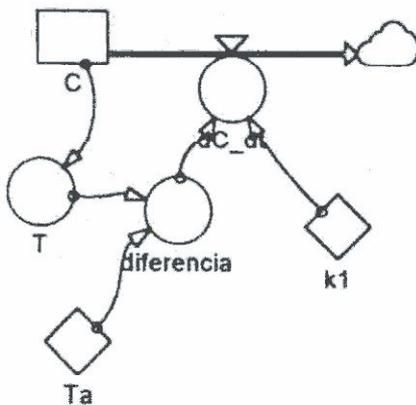
como se le suministre, sin que por ello el medio se "llene", es decir, llegue a una situación en la que no pueda recibir más calor.

El cambio en la cantidad de calor, se puede representar mediante la ecuación:

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = k_1(T - T_a)$$

Donde T representa la temperatura absoluta del café y T_a la del medio ambiente circundante. Mientras tanto, la ecuación de continuidad para la cantidad de calor está dada por:

$$C_{t+\Delta t} = C_t - \frac{\Delta C}{\Delta t} \Delta t$$



Un ejemplo un poco más complejo, pues involucra ciclos de retroalimentación, pero que es igualmente intuitivo es el comportamiento de un calentador de agua que tiene un termostato automático.

En este caso se tienen al menos dos fenómenos diferentes. De un lado tenemos el enfriamiento del calentador, quien, siendo un cuerpo caliente, le cede calor al medio, con la única condición de que este último esté más frío. Esta parte del modelo puede ser representada mediante un modelo exactamente igual al de la taza de café que se enfría. De otro lado se tiene el calentamiento, usualmente causado por una resistencia eléctrica que al paso de la corriente se calienta y cede parte de su calor al agua que se encuentra dentro del calentador.

El ciclo de retroalimentación aparece cuando se tiene en cuenta que el termostato "toma decisiones" basado en una única variable que es la temperatura del agua dentro del calentador (T). Cuando T está por debajo de una temperatura límite inferior T_1 , el termostato cierra el circuito y hace pasar la corriente eléctrica por la resistencia, causando el calentamiento del agua. Cuando T está por encima de T_2 , el termostato abre el circuito, impidiendo que la corriente eléctrica circule

y por tanto, cesando el efecto de calentamiento. En el rango entre T_1 y T_2 , el termostato no toma ninguna decisión.

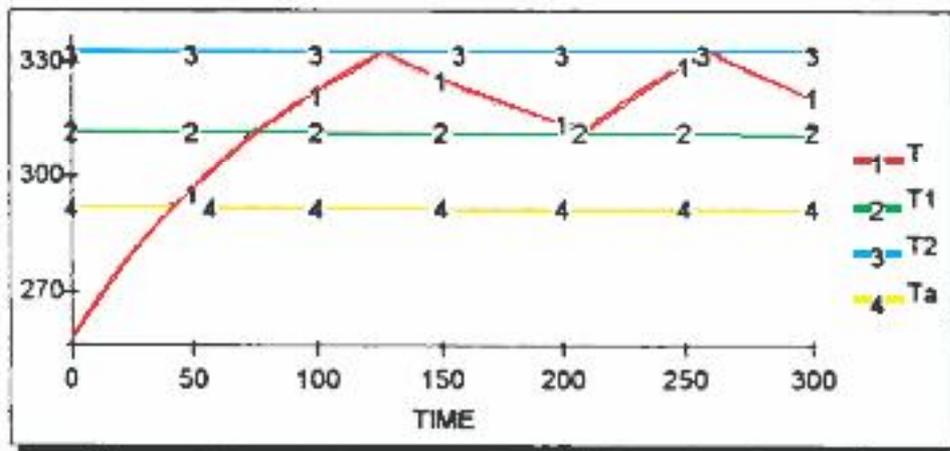
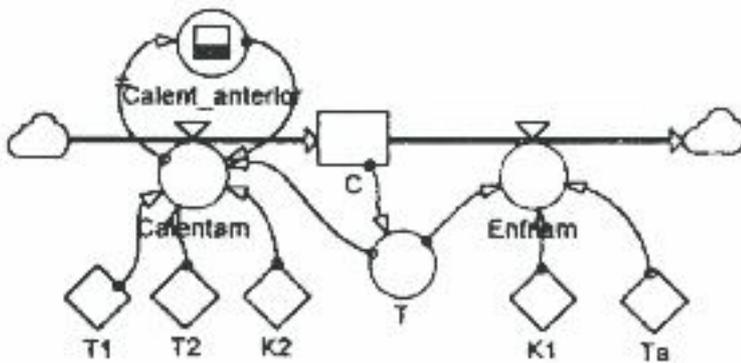
En el momento en el que el calentador inicia su funcionamiento, probablemente la temperatura interior T_i está muy cercana a la temperatura ambiente T_a , se conecta el calentador a la corriente eléctrica y dado que la temperatura T está por debajo de T_1 , el circuito se cierra y (T) empieza a subir, al cabo de cierto tiempo llega hasta T_1 y continúa su ascenso; pasado otro intervalo de tiempo, llega a T_2 y el termostato toma la decisión de abrir el circuito, entonces el agua empieza a enfriarse.

Durante todo el período, el fenómeno del enfriamiento –descrito en el ejemplo de la tasa de café- ha venido manifestándose. Dado que el calentamiento cesó, el agua se enfría hasta que llega a T_1 , donde el termostato decide cerrar de nuevo el circuito, e iniciar un nuevo ciclo de calentamiento.

En este caso la ecuación de continuidad es:

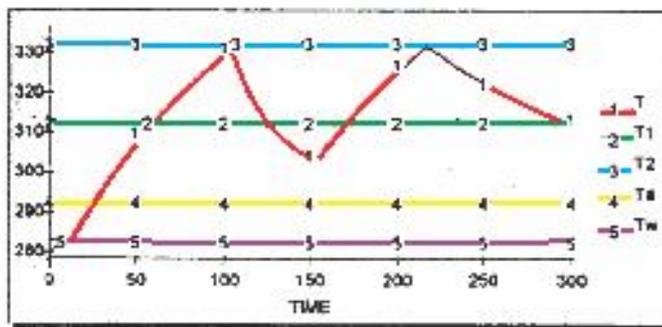
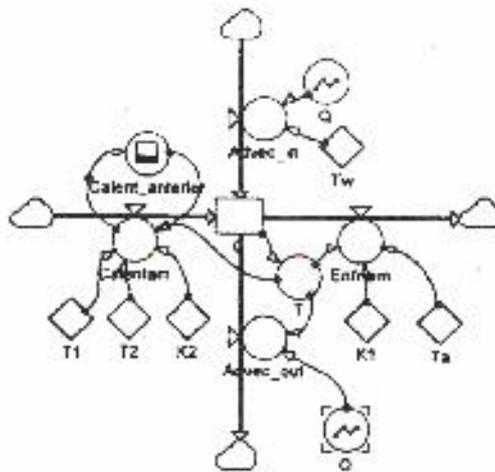
$$C_{i+1} = C_i + \frac{\Delta C}{\Delta t} \Big|_{i+1}$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} \Big|_{i+1} = \text{calent}_{i+1} - \text{enfriam}_{i+1}$$



Una complejidad adicional consiste en tener en cuenta que alguien puede estar tomado una ducha en un determinado momento y por lo tanto, el grifo del agua caliente extrae calor del calentador, mediante el fenómeno conocido como advección, es decir, el transporte de calor por transporte de masa. El agua que sale del calentador se encuentra a una temperatura T , mientras que el agua que ingresa se encuentra a una temperatura T_w , usualmente, cercana a T_a y muy por debajo de T .

Hay que hacer notar que dado que el calentador en cuestión es un tanque cerrado, su masa siempre permanece constante, por tanto, los caudales de entrada y salida son iguales y no hay que preocuparse por modelar explícitamente la masa como un nivel adicional.



3.3. Simulación en la Dimensión Física

En los numerales siguientes se presentan varios casos de aplicación exitosa de simulaciones mediante el uso de dinámica de sistemas. La finalidad, en todo caso, no es sustituir los textos existentes sobre simulación en cada uno de los fenómenos cubiertos. En vez de eso, se trata de mostrar casos que siendo aislados, pueden ser fácilmente articulados unos a otros, tal como se verá en el numeral 3.6.

3.3.1. Suelos

Para la simulación de un aspecto de gran importancia en el comportamiento de los suelos como es la producción de sedimentos por efecto de la erosión superficial, se seguirá el modelo recogido en la Ecuación Universal de Pérdida de suelos -USLE, por sus siglas en inglés. (Weischmeyer, Smith, 1965).

Este modelo, postula que el sedimento producido por cada unidad de área de un terreno, es el producto de seis factores:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

A = Producción de sedimentos [$MT^{-1}L^{-2}$]

R = Factor de erosividad de la lluvia

K = Factor de erodabilidad del suelo

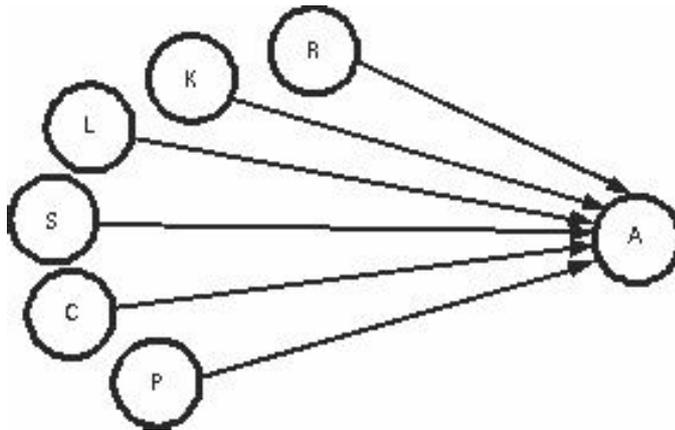
L = Factor de longitud de la pendiente

S = Factor de inclinación de la pendiente.

C = Factor de cobertura vegetal

P = Factor de prácticas agrícolas.

Una excelente presentación de este modelo se encuentra en (Kirkby, Morgan, 1991), la intención aquí es ver cómo este modelo, se puede representar en dinámica de sistemas por un diagrama supremamente simple.



Como puede apreciarse, si bien el modelo sólo no es prácticamente de ninguna utilidad, adquiere un inmenso potencial cuando se piensa en articularlo con otros fenómenos, por ejemplo, los efectos de la deforestación progresiva en la producción de sedimentos de un área (caso en el cual la cobertura vegetal y las prácticas agrícolas dejarían de ser parámetros para convertirse en variables) o la influencia de ésta producción de sedimentos así aumentada, sobre la carga orgánica (y por tanto sobre el comportamiento del oxígeno disuelto) de las corrientes de agua que drenan el área.

3.3.2. Agua

El fenómeno a modelar en este caso específico es el de balance de oxígeno disuelto en un río. Este modelo fue estructurado por primera vez por Streeter y Phelps (1925) para describir el comportamiento del Río Ohio, aquí seguimos la presentación de Tchobanoglous y Schroeder (1987).

Básicamente el modelo establece que la carga de materia orgánica de DBO (L) es el alimento principal de las bacterias presentes en el río, estas llevan a cabo un proceso de oxidación mediante el cual consumen oxígeno disuelto en el agua y materia orgánica. Como resultado de este proceso mirado de manera aislada, la cantidad de oxígeno disuelto (O) debería reducirse hasta hacerse cero, llevando el río a la anoxia, con los consecuentes cambios en las rutas de degradación de algunos compuestos, particularmente de aquellos que contienen azufre y hierro, dando origen a H₂S con su característico olor a huevos descompuestos y a la presencia de iones ferrosos precipitables. Este fenómeno puede representarse por:

$$\frac{dL}{d\theta_H} = -kL$$
$$r_o = -kL$$

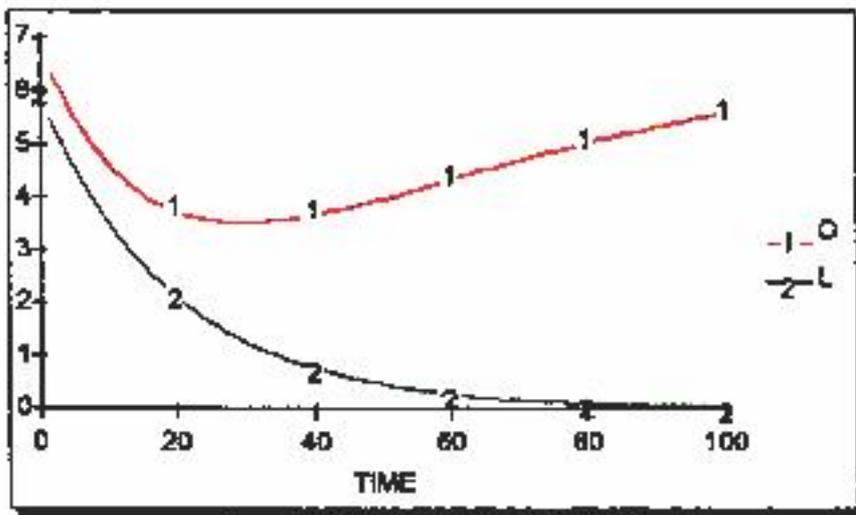
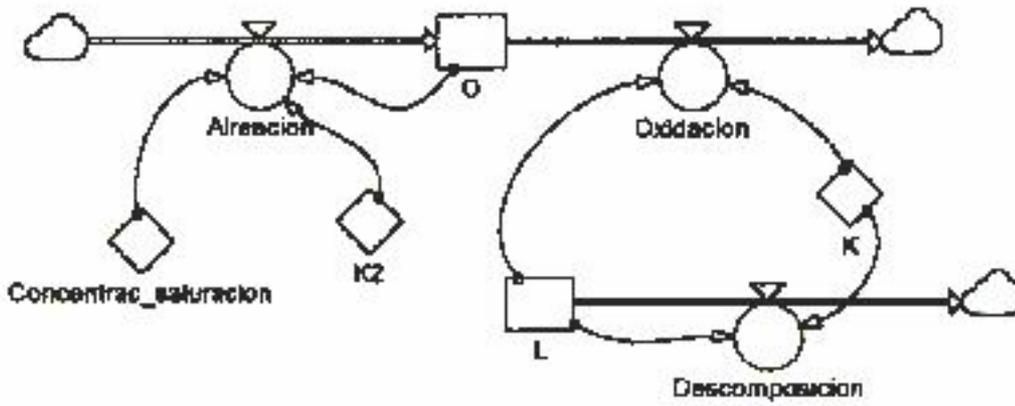
Donde θ_H representa el tiempo de detención hidráulico.

Sin embargo, la situación no siempre llega hasta ese punto, dado que existe un segundo fenómeno que es el de la aireación, mediante el cual el oxígeno pasa del aire al agua, a través de la interfase gas-líquido. De acuerdo con esto, el oxígeno entra al agua de manera proporcional a la diferencia entre el contenido de oxígeno presente en el agua en ese momento y la concentración de saturación, máxima concentración posible de oxígeno disuelto para esa temperatura.

$$r_r = k_2(C_s - O)$$

Sumando las expresiones relacionadas con el oxígeno disuelto, el modelo puede resumirse en:

$$\frac{dO}{d\theta_H} = r_o + r_r = -kL + k_2(C_s - O)$$
$$\frac{dL}{d\theta_H} = -kL$$



3.4. Simulación en la Dimensión Biótica

La simulación biológica es un campo de rápido desarrollo, donde se ha logrado modelar un sinnúmero de conductas fisiológicas. Sin embargo, el análisis se centra en aspectos de ecología de poblaciones, por su obvia importancia para la determinación de la magnitud de impactos ambientales, y para el diseño de medidas de gestión ambiental.

3.4.1. Interacción de dos especies

Desde comienzos de siglo se conoce el modelo de Lokta - Volterra, (Lokta, 1925), (Pielou, 1977) diseñado para simular la interacción de las poblaciones de dos especies, presa y depredador.

El modelo basa su funcionamiento en la descripción de las fluctuaciones poblacionales de las dos especies, partiendo de una descripción del funcionamiento separado de cada una de ellas.

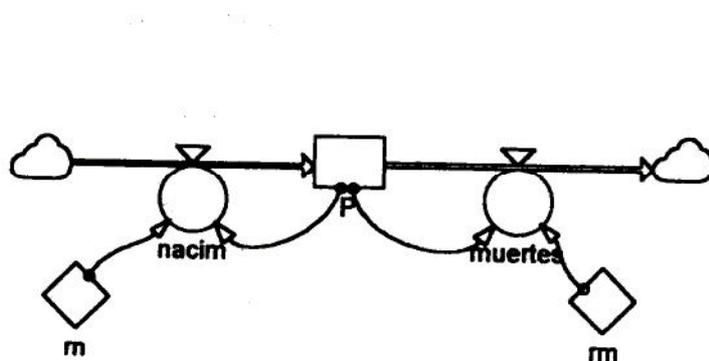
Si nos referimos a Peces (F) que comen Zooplancton (Z), el modelo poblacional de los peces estaría determinado tanto por la población inicial, como por las tasas de natalidad y mortalidad por período, lo que se puede describir, tomando intervalos discretos, por una expresión del tipo:

$$P_{t+1} = P_t + nacim_{t+1} - muertes_{t+1}$$

$$nacim_{t+1} = P_t * r_n$$

$$muertes_{t+1} = P_t * r_m$$

Con r_n y r_m las tasas de natalidad y mortalidad respectivamente.



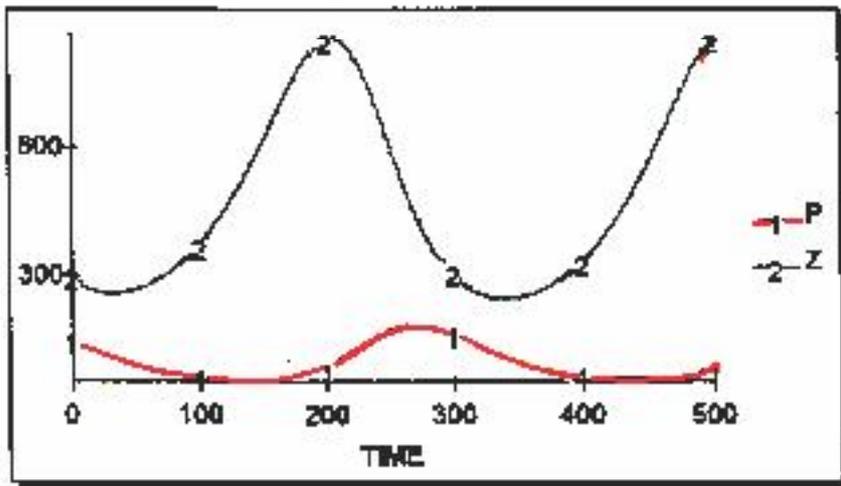
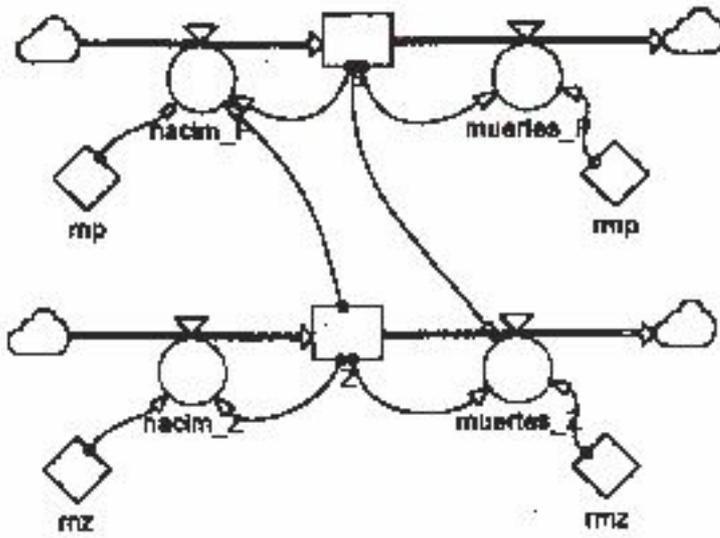
A su vez, la población de zooplancton puede ser descrita por un modelo similar, que diferirá solamente en el valor de las tasas de crecimiento y decrecimiento de población. Este par de modelos independientes se pueden acoplar mediante el argumento de que ambas especies presentan dependencias ecológicas, una con respecto a la otra.

Los peces mueren a una tasa que puede ser considerada constante, pero su tasa de nacimiento depende de la cantidad de zooplancton, pues a mayor disponibilidad de recursos, mayor fertilidad tendrán las hembras o, alternatively, ante una fertilidad igual, se presentará una mayor supervivencia de los peces en sus primeras etapas, lo que en términos poblacionales coincide con una mayor tasa de natalidad.

Por su parte, el zooplancton, si bien nace de acuerdo a una tasa que es independiente del número de peces, sí presenta una tasa de mortalidad claramente controlada por estos, pues a mayor número de peces, mayor es el esfuerzo de depredación que se causa sobre la población del zooplancton.

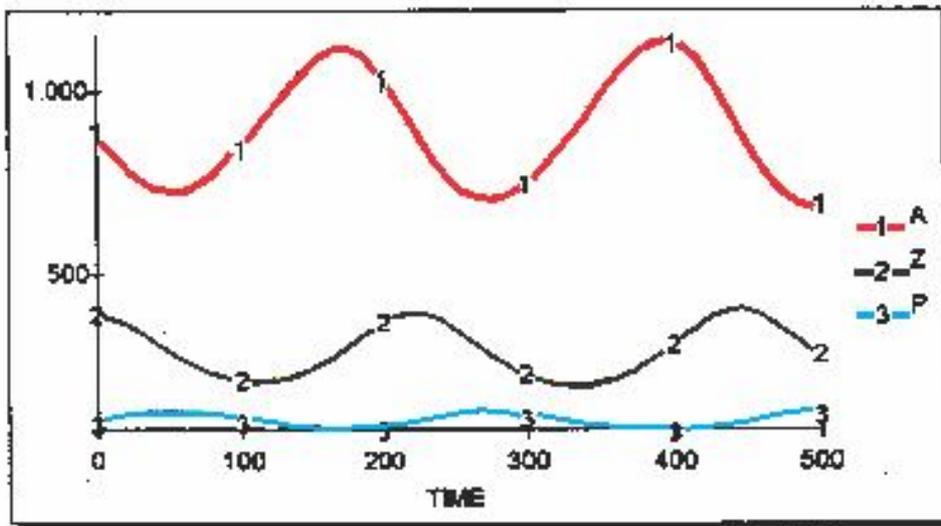
$$P_{t+1} = P_t + P_t * Z_t * r_{np} - P_t * r_{mp}$$

$$Z_{t+1} = Z_t + Z_t * r_{nz} - Z_t * P_t * r_{mz}$$



3.4.2. Interacción de tres especies

La situación anterior puede ser ampliada fácilmente a tres especies, por ejemplo peces, zooplancton y algas, repitiendo el esquema de dependencias ecológicas en el siguiente nivel trófico. Igualmente el zooplancton crecerá más fácilmente ante una situación de abundancia de algas, lo que equivale a decir que su tasa de natalidad efectiva depende del número de algas. Desde el lado de las algas,



3.5. Simulación en las Dimensiones Sociales

Si bien una estricta simulación en las dimensiones sociales es difícil de llevar a cabo, por la complejidad conceptual, por la multiplicidad de agentes que participan en los procesos sociales y por la falta de información existente, entre otros; se han desarrollado modelos de simulación en algunos aspectos parciales de lo social, tales como el demográfico y el económico.

3.5.1. Simulación Demográfica

Uno de los fenómenos sociales que ha sido estudiado ampliamente y que puede ser modelado con algún nivel de detalle es el del crecimiento demográfico.

El hecho fundamental a tener en cuenta es que la población de una cierta región, o grupo, se ajusta perfectamente a la ecuación clásica de continuidad, es decir, el total en el período $t+1$ es igual al total en el período t más los cambios introducidos durante el período $t+1$. Si el balance se realiza para toda la población, es claro que su número total será el correspondiente al período anterior, agregándole los que nacen o inmigran y restándole los que mueren o emigran.

En términos de dinámica de sistemas, la población es un nivel, al cual ingresan los flujos de nacimientos e inmigrantes y del cual salen los flujos de muertes y emigrantes.

Los nacimientos durante un período se suelen expresar como una tasa porcentual con respecto a la población denominada tasa de natalidad, de tal manera que los recién nacidos son el producto de esta tasa por la población en ese período. Estas tasas han venido decreciendo en los últimos años, debido a la influencia de las campañas de control natal y a la creciente demanda de recursos que implica para

los padres el sostenimiento y educación de los hijos hasta la edad en que estos se hacen independientes, edad que ha venido creciendo con el paso de los años. Las muertes se expresan como una tasa similar denominada tasa de mortalidad.

En cuanto a la inmigración, puede ser un fenómeno inspirado por causas de tipo económico, político o cultural. En este caso es posible intentar desarrollar unas funciones mediante métodos estadísticos, que proporcionen estimados de las cantidades de inmigrantes y emigrantes, teniendo como variable independiente la población.

Un enfoque un poco más elaborado, consiste en relacionar las tasas de inmigración/emigración con la situación económica general de las regiones expulsoras y receptoras de población, que puede ser aproximadamente descrita por el ingreso promedio per capita.

Si el ingreso per capita de la región, es decir los beneficios económicos obtenidos por un poblador promedio durante un año debido al desarrollo de las actividades de las cuales deriva su sustento, es menor que el Ingreso per capita en otra región del país, algunos de estos pobladores preferirán desplazarse hacia esas regiones más prometedoras, siempre y cuando la diferencia de expectativas entre ambas regiones sea suficiente para cubrir los costos de desplazamiento y de sostenimiento durante las primeras etapas en la nueva región. Esta relación ha sido expuesta por Molano (1992) en el contexto de las inmigraciones hacia zonas de cultivos ilícitos, en las que se prevén grandes ingresos, aunque los costos de establecerse y vivir son igualmente elevados.

Un refinamiento adicional consiste en modelar la población por grupos de edad, teniendo en cuenta que los recién nacidos sólo ingresan al grupo de la población económicamente activa después de pasar la infancia y la adolescencia y ser diezmos durante ese período por la tasa de mortalidad respectiva.

3.6. Ejemplo: Colonización del Bosque⁷

- **Aspectos generales del modelo**

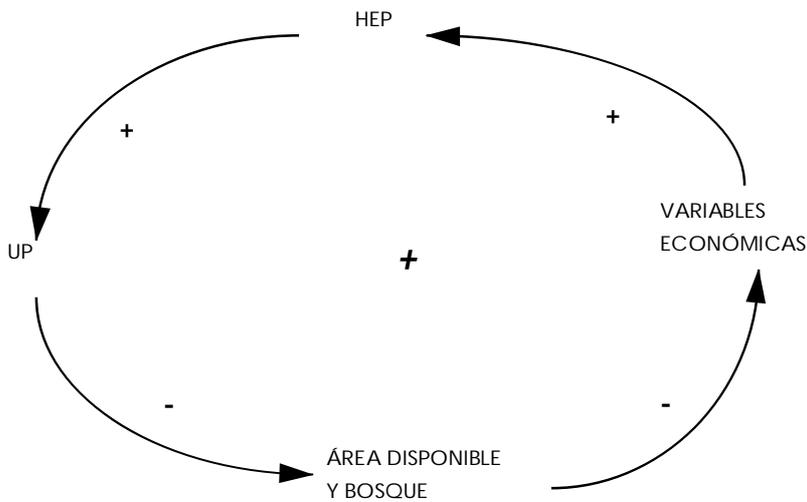
El modelo matemático «Bosques» se desarrolló, utilizando un lenguaje comercial disponible (Powersim) que hace uso de la dinámica de sistemas, como una aproximación al proceso de colonización de los bosques, influenciado por factores sociales y económicos tales como tasas de natalidad y mortalidad rural nacionales, ingreso per capita rural nacional, ingreso per capita en la región, áreas disponibles para colonizar, presencia del Estado en la región de colonización, cercanía a ejes de colonización y actividades de penetración en el bosque (tala, quema y cultivo).

El modelo se compone de tres ciclos interconectados:

- Ciclo de hombres en edad productiva (HEP).

7. Angel, E., Villegas, C.I., Zambrano, A.M. "Simulación del proceso de colonización del bosque. Gestión y Ambiente. No 2, 1998, p39-48.

- Ciclo de unidades productivas (UP) y factores económicos.
- Ciclo de área disponible para colonizar y bosques.



Interrelación entre ciclos del modelo de colonización de bosques.

- **Ciclo de hombres en edad productiva (HEP)**

En todo proceso de colonización los primeros en llegar a la región son generalmente, hombres cabeza de familia, con la finalidad de analizar las condiciones de vida de la zona, establecerse y reservar el área de tierra que les permita realizar sus actividades para garantizar su sustento y el de su grupo familiar.

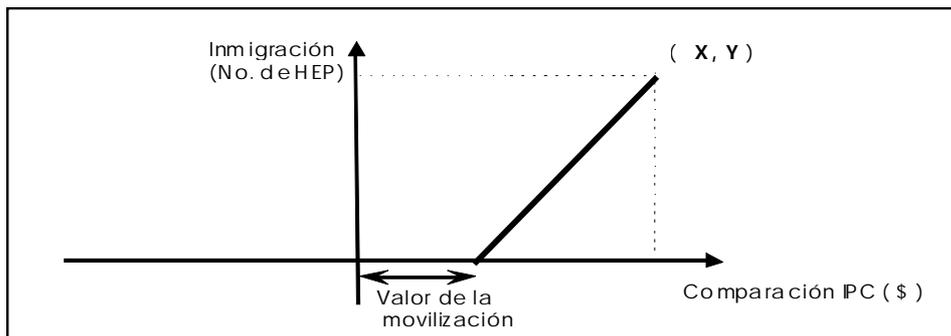
Para el modelo se considera como hombres en edad productiva aquellos que tienen la capacidad física para desarrollar las actividades propias de colonización tales como desmonte, quema y cosecha.

Este ciclo tiene como centro al variable de nivel hombres en edad productiva, nivel que aumenta o disminuye con las tasas de inmigración, emigración, aumento y disminución de hombres en edad productiva.

La tasa de aumento de hombres en edad productiva está determinada por el número de hombres que pasan la pubertad. Para tal efecto, se tiene en cuenta el número de nacimientos por año, considerando que de estos sólo un porcentaje son varones que constituyen potenciales hombres en edad productiva, y que existe además una tasa de mortalidad infantil. A su vez, la tasa de disminución de hombres en edad productiva está relacionada con la tasa de mortalidad.

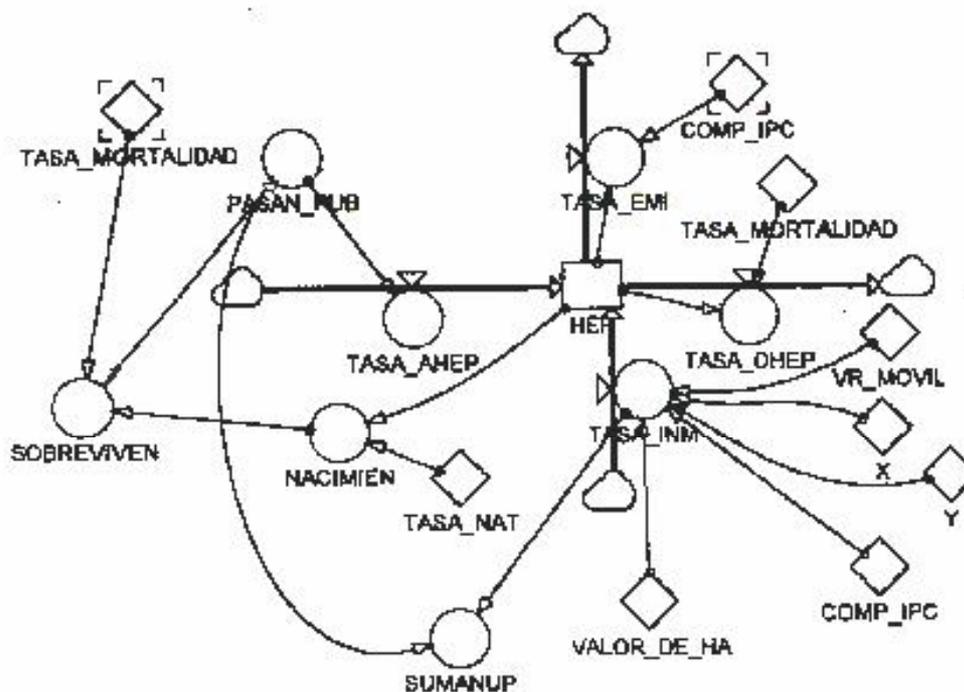
Por otra parte, la tasa de inmigración está determinada por la comparación de ingresos per capita, y el valor de la movilización hacia el sitio de colonización. Si la comparación del ingreso per capita es mayor que el valor de la movilización, se dará una inmigración determinada por la función de inmigración. Esta función, que es determinante para la dinámica de la colonización, (Molano, 1987) se supone lineal por ser la forma que menos información necesita para su definición.

De igual manera, la tasa de emigración está determinada por la comparación entre la situación económica de la región y la situación económica de otras zonas en el resto del país.



Definición de la función inmigración

En este ciclo también interviene el área disponible para colonizar e influye de manera directa en la inmigración, ya que cuando el área disponible se hace cero, el colono debe recurrir al alquiler o a la compra de tierras para su explotación, lo que hace necesario un incentivo económico mayor para que decida su movilización.



- **Ciclo unidades productivas y factores económicos (UP)**

Este ciclo se desarrolla partiendo del nivel de las unidades productivas o fincas que a su vez se ve afectado por las tasas de aumento y disminución de unidades productivas.

Una unidad productiva está constituida, en promedio, por dos hombres en edad productiva. Su tasa de aumento se determina a través de la suma de los hombres que pasan la pubertad y la tasa de inmigración enunciadas anteriormente. La tasa de disminución de las unidades productivas a su vez, se ve influenciada por la tasa de emigración y la tasa de disminución de hombres en edad productiva.

El número de unidades productivas determina el área total cultivada por las mismas. El área cultivada anualmente por unidad productiva es de 10 hectáreas (Molano, 1.987) ya que corresponde al área que el colono está en capacidad de explotar por sus propios medios y con la ayuda del trabajo de otros colonos o personas de la región.

La producción total se determina como el producto del área total cultivada medida en hectáreas y la producción neta por hectárea por año dada en pesos por hectárea por año. Esta producción total define el ingreso per capita como la razón entre la producción total medida en pesos y la población total.

Una vez el colono, o la unidad productiva se ha establecido en la región, decide llevar a su familia al sitio de colonización escogido, de tal manera que en cada momento hay familias completas y otras recién establecidas, conformadas solamente por dos hombres. La relación entre ambos tipos de familias permite establecer un índice, K_p , definido como el número promedio de personas por familia en cada momento. Tal índice será menor en los momentos de alta colonización y se irá aproximando al promedio nacional a medida que la situación tiende a la normal.

- **Ciclo área disponible para colonizar y bosques**

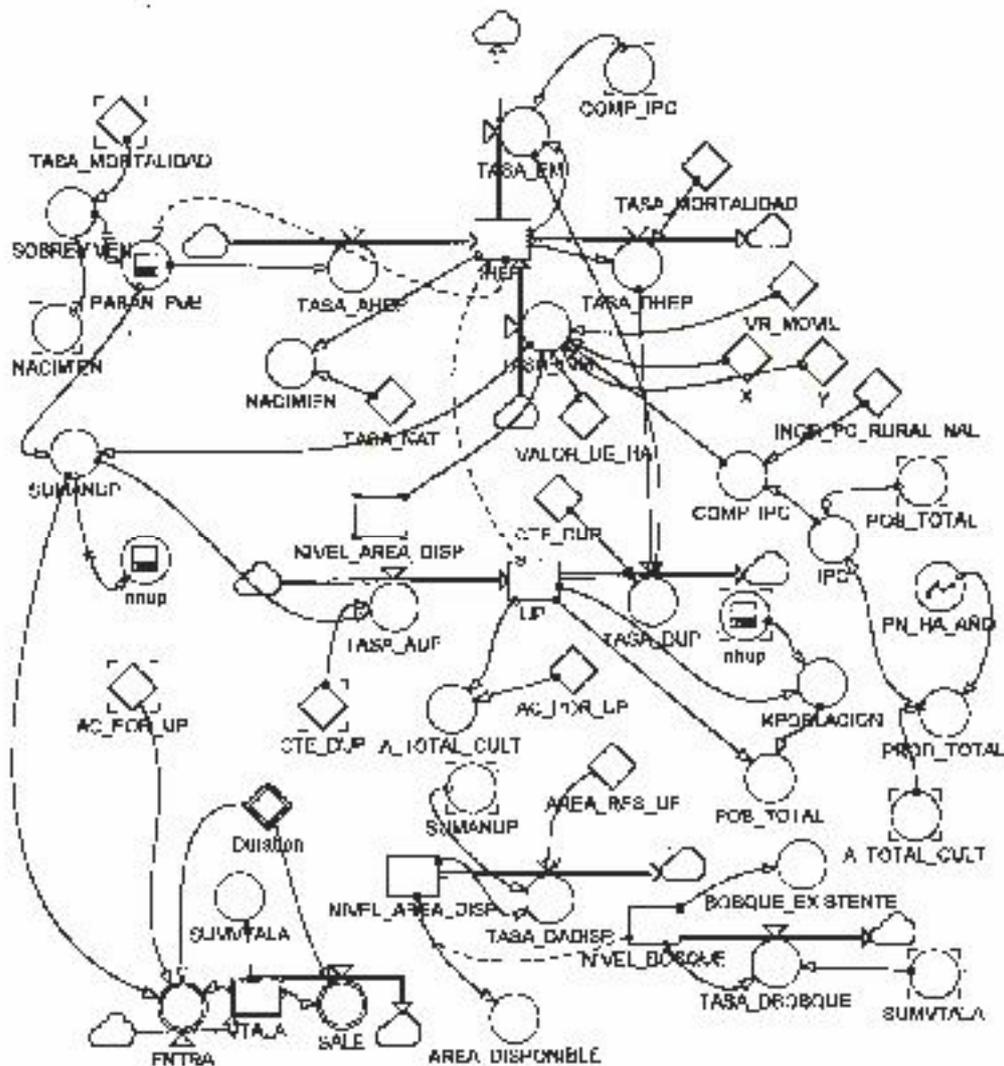
El nivel de área disponible está afectado por la tasa de disminución de área disponible, determinada por el número de nuevas unidades productivas y el área que estas reservan, 250 hectáreas, que corresponden al área que necesita el colono para garantizar su supervivencia y la de su familia.

El nivel de bosque se ve afectado por la tasa de disminución de bosque; ésta tasa tiene en cuenta la cantidad de bosque talado por las unidades productivas durante cinco años (tiempo después del cual el área cultivada durante el primer año recupera su capacidad productiva). En la página siguiente se presenta el modelo completo.

- **Validación del modelo de colonización**

Con el objetivo de validar el funcionamiento del modelo planteado y ante la falta de información de campo que relacione el avance en la colonización del bosque con el estado de las variables económicas o demográficas, se aplica el modelo

a varios casos en abstracto, en cada uno de los cuales se simulan condiciones diferentes y se comparan los resultados, a nivel de tendencias, con las direcciones de cambio en las variables reportadas en la literatura. Aunque este concepto no corresponde exactamente con la noción tradicional de validación de un modelo matemático, sí sirve para chequear su funcionamiento general y garantizar que



Representación en POWERSIM del modelo de colonización de bosque

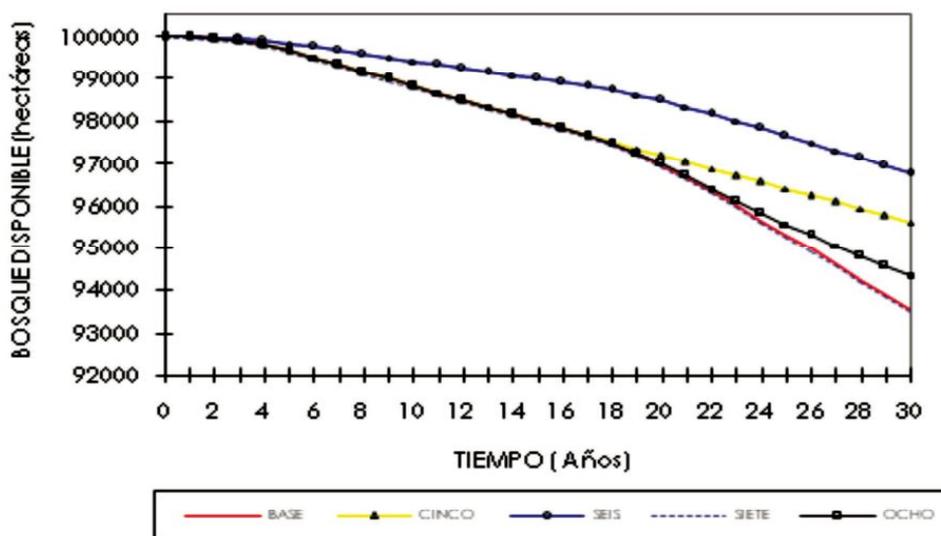
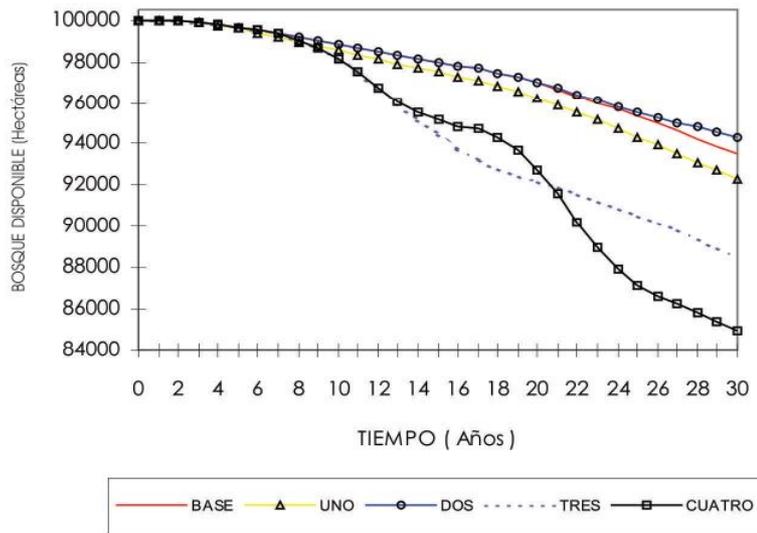
Para mostrar la respuesta del modelo ante variaciones en los parámetros de entrada, se han diseñado escenarios variando el valor de los parámetros de entrada al modelo así:

Caso base	Caso inicial para efectos de comparación
Caso 1	Vías nuevas
Caso 2	Aumento en el IPC rural nacional anual por aumento en el salario
Caso 3	Bonanza en un pulso
Caso 4	Bonanza en dos pulsos
Caso 5	Disminución de la producción neta por hectárea por año en dos pulsos
Caso 6	Disminución del área cultivada por unidad productiva, por un aumento en la productividad
Caso 7	Aumento del área reservada por unidad productiva
Caso 8	Disminución en el nivel de ingresos del colono

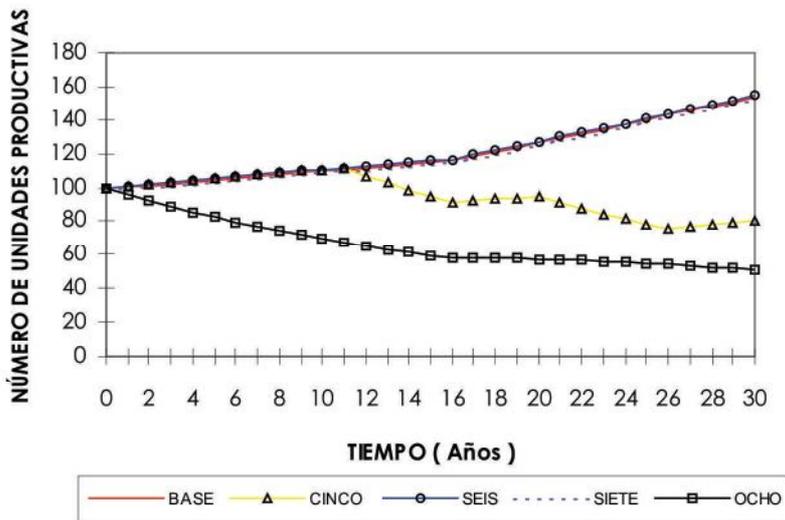
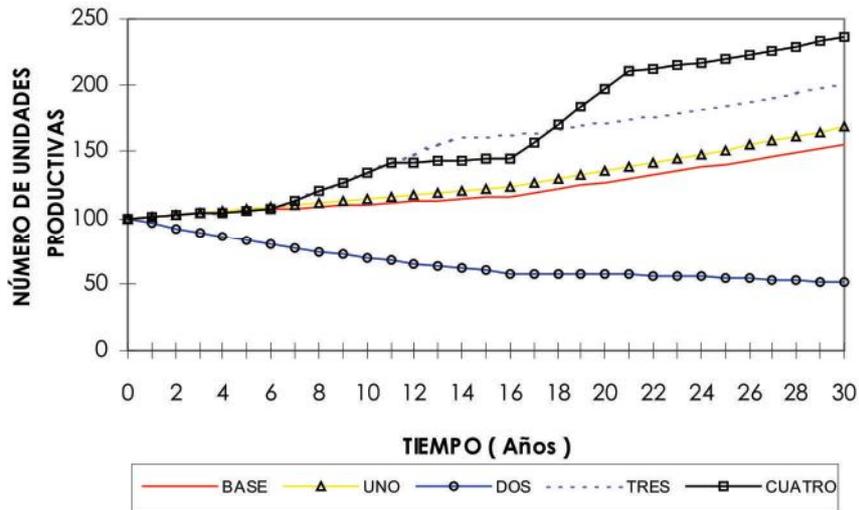
El caso base se desarrolla con el objetivo de contar con un punto de referencia para la comparación con los casos que se desprenden de él al establecer variaciones de importancia a los valores de los parámetros de entrada al modelo. Como es usual en la conformación de un caso base, para éste se tomaron los valores más probables de las variables o los que implican continuidad de las tendencias históricas existentes.

En las figuras a continuación, puede verse la variación de algunas de las variables en cada uno de los escenarios planteados. Para cada uno de estos, se observó que las tendencias del modelo coinciden con las reportadas en la literatura, en tanto la inmigración aumenta en los casos en que la situación económica de la zona se hace interesante para la colonización, acompañada del aumento de la presión sobre el bosque y por tanto tala y disminución del bosque remanente.

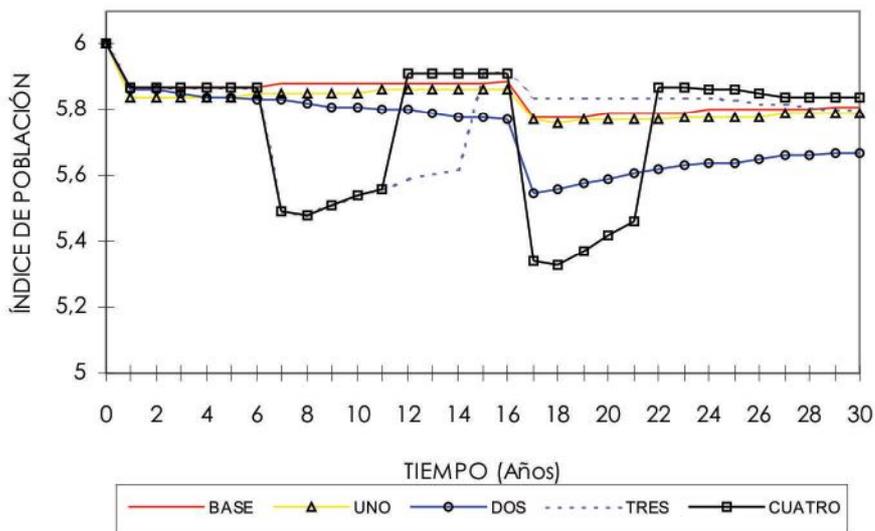
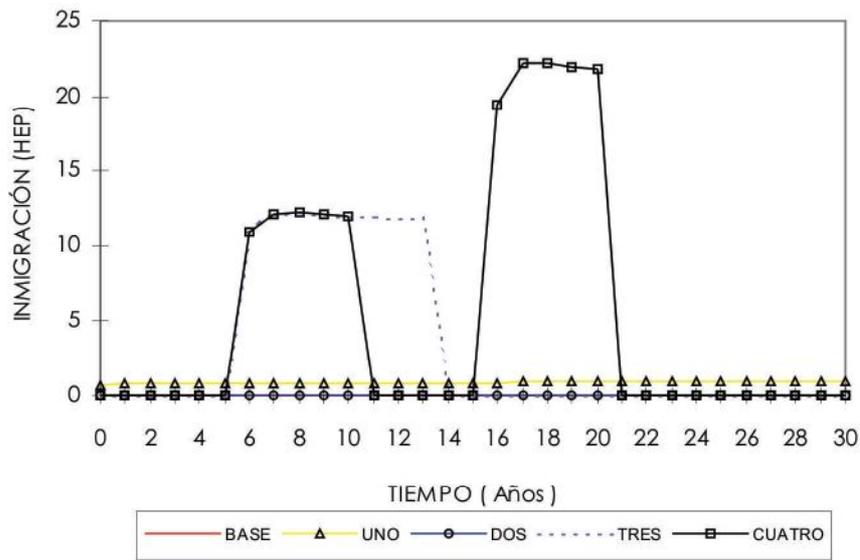
Un factor importante a destacar en todos los escenarios, es el índice de población que representa la composición de las unidades productivas durante las diferentes etapas del proceso de colonización, en los momentos de llegada acelerada de colonos, este índice sufre un descenso, reflejando el hecho de que llegan sólo dos personas por unidad productiva.



Bosque disponible vs. Tiempo



Unidades productivas vs. tiempo



Tasa de inmigración y K de población vs. Tiempo.

Es importante mencionar la aplicabilidad de este tipo de herramientas en el proceso de toma de decisiones acerca de los proyectos, ya que proporciona información que permite estimar de una manera aproximada los impactos futuros en el año que se requiera.

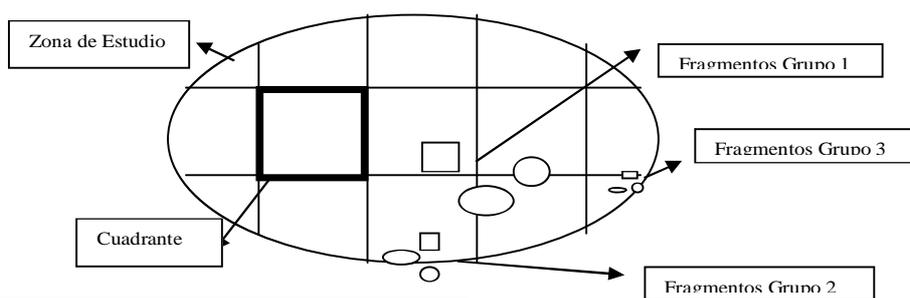
De acuerdo con el comportamiento representado por el modelo, cabe analizar la incidencia de algunas políticas de erradicación de cultivos ilícitos que se han propuesto consistentes en comprar a los campesinos éstos cultivos a precios similares a los de su comercialización en el mercado. Lo anterior provocaría un aumento en el ingreso per capita de la región, lo que la haría mucho más atractiva para nuevos habitantes, conduciendo a una colonización y tala acelerada, aumentando entonces los procesos de deforestación del bosque e incrementando el crecimiento desordenado de la población de la zona.

Se hace evidente la necesidad del desarrollo, calibración y seguimiento de herramientas prospectivas como la que se ha presentado con miras a enfrentar el proceso de toma de decisiones que puedan afectar la estabilidad ambiental, desde un punto de vista más racional.

3.7. Georeferenciación de la Colonización del Bosque⁸

Una vez se tiene un estimado de la colonización futura, la pregunta obvia es: ¿Cómo se va a distribuir espacialmente dicha colonización? El analista se enfrenta en este punto a una dificultad consistente en la preservación de los parámetros espaciotemporales de la colonización como fenómeno geográfico, es decir, que se expresa en un territorio particular.

El fenómeno de la colonización no se presenta en un frente continuo que avanza a velocidad constante. (Little, 1992, Molano, 1997, Etter y Andrade, 1987) Su dinámica se caracteriza por la aparición de núcleos de colonización que van ensanchándose, a la vez que aparecen otros nuevos. Para capturar y preservar, al menos estadísticamente esta dinámica, se introducen dos conceptos: grupo y cuadrante. Grupo es el conjunto de núcleos de colonización cuyas área se encuentran en un rango predeterminado. Por su arte, cuadrante es una subárea del área total de estudio, de forma definida –usualmente cuadrada- y con dimensiones conocidas.



8. Angel E, Castaño M. "Un modelo para la georeferenciación de la colonización del bosque a futuro". *Gestión y Ambiente*. Vol 6 - No. 2, 2003

El procedimiento propuesto es utilizar imágenes de satélite históricas de una zona, a partir de las cuales se puedan capturar los parámetros a preservar, específicamente, la dinámica en el tiempo del número de núcleos de colonización por grupo y por cuadrante para cada momento en el tiempo para el que se tiene una imagen histórica. Luego se puede proyectar hacia el futuro el área total de colonización (haciendo uso de un modelo en dinámica de sistemas como el presentado en el numeral 3.6 o de otro algoritmo más sencillo) y su dinámica espaciotemporal.

• **Modelo Matemático**

Histórico

Sean $1, 2, \dots, u$. los momentos de toma de las imágenes de satélite históricas, siendo u el momento de la última imagen disponible y p el momento para el que se quiere realizar la proyección.

Sea B_t , la extensión de bosque en le período t

$C_{t_1-t_2}$, la colonización en el período $(t_1 - t_2)$, por tanto:

$$C_{(t_1 \rightarrow t_2)} = B_{(t_1)} - B_{(t_2)}. \quad (1)$$

Sea $i = 1, n$; los cuadrantes presentes en la imagen y n el número total de ellos.

Sea $j = 1, m$; los grupos definidos de fragmentos de colonización y m el número total.

Sea $A^{ij}_{t_1-t_2}$ el área total de los fragmentos del grupo j en el cuadrante i en el período $t_1 - t_2$, por tanto:

$$C_{(t_1 \rightarrow t_2)} = \sum_i \sum_j A^{ij}_{t_1-t_2} \quad (2)$$

Sea C^j el área total de los fragmentos del grupo j en el período $t_1 - t_2$, sumando sobre todos los i , por tanto:

$$C^j_{(t_1 \rightarrow t_2)} = \sum_i A^{ij}_{t_1-t_2} \quad (3)$$

Sea $r^j_{t_1-t_2}$ la relación entre la colonización en el grupo j y la colonización total en el período $t_1 - t_2$, por tanto:

$$r^j_{t_1-t_2} = C^j_{(t_1 \rightarrow t_2)} / C_{(t_1 \rightarrow t_2)} \quad (4)$$

Sea $n^{ij}_{t_1-t_2}$ el número de fragmentos de colonización del grupo j en el cuadrante i en el período $t_1 - t_2$, se puede definir un área promedio $a^{ij}_{t_1-t_2}$ de los fragmentos en ese grupo, cuadrante y período como:

$$a^{ij}_{t_1-t_2} = A^{ij}_{t_1-t_2} / n^{ij}_{t_1-t_2} \quad (5)$$

Conceptualizando la aparición de un fragmento de colonización con sus características de grupo, cuadrante y período como un fenómeno aleatorio, se abre la posibilidad de tratar el número de realizaciones de dicho proceso como una variable aleatoria cuyos parámetros futuros (media y desviación) se pueden proyectar en el tiempo a partir de los datos históricos. A partir de los $n_{t_1-t_2}^{ij}$ se pueden determinar $n_{n_2}^j, n_{n_3}^j, \dots, n_{n_u}^j$ la serie de los promedios del número de fragmentos de colonización para el grupo j , al final de cada intervalo entre imágenes de satélite. Igualmente se puede determinar $\sigma_{n_2}^j, \sigma_{n_3}^j, \dots, \sigma_{n_u}^j$ la serie de las desviaciones estándar correspondientes.

Proyección

Para realizar la proyección de la cantidad de bosque remanente en el momento p y de su georeferenciación, las expresiones son las siguientes:

Para el área total:

$$B_p = f_1(B_1, B_2, \dots, B_u) \quad (6)$$

De donde:

$$C_p = B_u - B_p \quad (7)$$

Para conservar la dinámica de la relación entre el área colonizada en un grupo y el total del área colonizada:

$$r_p^j = f_2(r_2^j, r_3^j, \dots, r_u^j) \quad (8)$$

Es posible que los r_p^j no sumen uno, por efecto de que algún grupo con un área promedio de fragmento grande ya no se presente, pues no hay parches remanentes de esas dimensiones, por tanto es necesario ajustar los r_p^j para que sumen uno:

$$r_p^{j*} = r_p^j / \sum r_p^j \quad (9)$$

La media y la desviación estándar del número de fragmentos por cuadrante, para cada grupo j :

$$\begin{aligned} n_p^j &= f_3(n_2^j, n_3^j, \dots, n_u^j) \\ \sigma_{n_p}^j &= f_4(\sigma_{n_2}^j, \sigma_{n_3}^j, \dots, \sigma_{n_u}^j) \end{aligned} \quad (10)$$

Para localizar espacialmente los fragmentos de colonización, se genera como un número aleatorio, el total de fragmentos para cada grupo y cuadrante, utilizando para ello la media y desviación proyectadas mediante [8]:

$$n_p^j \sim N(n_p^j, \sigma_{n_p}^j) \quad (11)$$

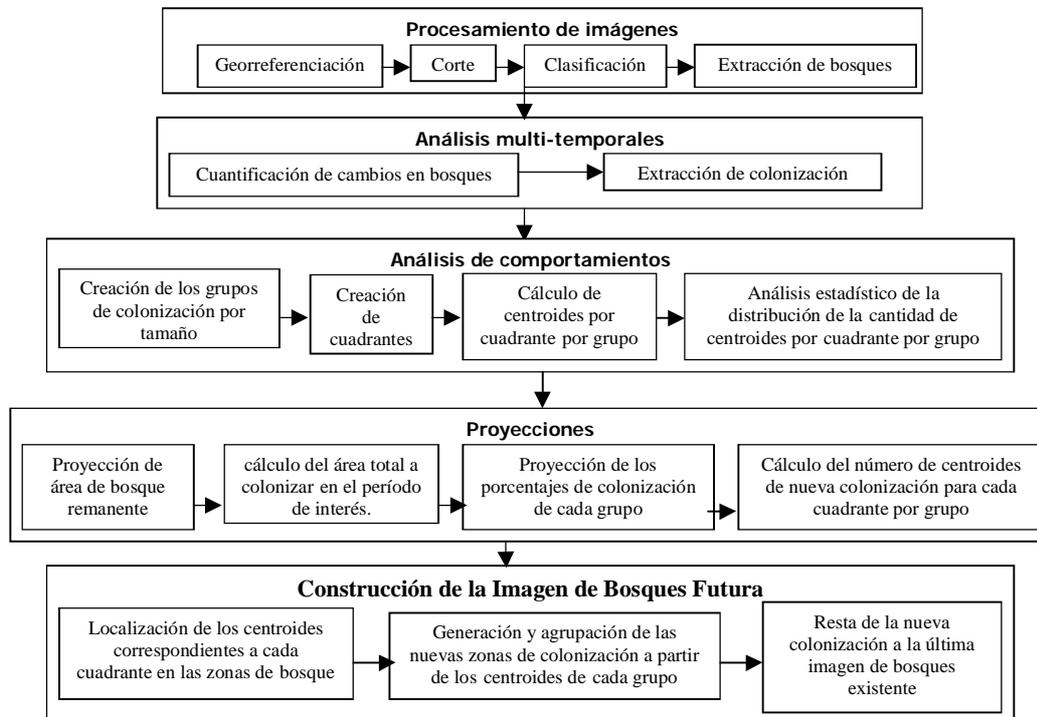
Para el área total por grupo:

$$C_p^j = C_p \cdot r_p^{j*} \quad (12)$$

Finalmente, para determinar el área equivalente de cada fragmento nuevo en cada grupo:

$$a_p^j = C_p^j / n_p^j ; \leftrightarrow i \quad (13)$$

• **Modelo Operativo**



• **Procesamiento Digital**

Georreferenciación

La georreferenciación consiste en la ubicación geográfica real de las imágenes sobre la superficie terrestre. Es decir, es una reubicación o remuestreo de todos los píxeles de la imagen original a la posición geográfica real a la cual pertenecen. Esto se hace a través de puntos de control de terreno o "Ground Control Points" (GCPs) que pueden ser recolectados con GPS o a través de cartografía u otras imágenes existentes previamente georreferenciadas.

Corte

Esta etapa consiste en la creación del subconjunto o "subset" de imágenes que contiene únicamente el área de estudio.

Clasificación supervisada

El proceso de clasificación de las imágenes se realiza utilizando el método supervisado. Para esto debe hacerse la recolección de muestras o firmas espectrales seleccionando algunas zonas de cada cobertura de interés. Para este

caso se identifican varias coberturas de bosque (bien distribuidas espacialmente) que servirán para generar la muestra de la clase o categoría "Bosque" y se señalan sobre la imagen para asignarlas como muestras de bosque. Lo mismo se hace para las demás coberturas: Vegetación, suelo urbano, suelo desnudo, pasto, cultivo, agua, nube y sombra.

- **Análisis Multi-Temporales**

Utilizando las funciones de cambios temáticos de los programas de procesamiento de imágenes, se obtiene como producto otra imagen en la que cada clase representa el cambio que hubo entre cada pixel de las imágenes fuente.

Cuantificación de cambios

De estas imágenes de cambios sólo interesan aquellos que se dieron de bosque a otra cobertura (colonización), es por eso que únicamente se cuantificarán los cambios de bosque a suelo urbano, de bosque a vegetación y de bosque a otros (pasto, cultivo, suelo desnudo, etc.). En este paso se determina B_t

Extracción de Colonización

De manera similar al paso posterior, es necesario extraer sólo los cambios de interés en imágenes de colonización, es decir, todo lo que de bosque pasó a ser vegetación, o suelo urbano, u otro (cultivo, pasto, etc.). Aquí se determina C_{t1-t2}

- **Análisis de Comportamientos y Patrones de Colonización**

Con el fin de allegar los parámetros para la aplicación del modelo, se desarrollaron dos operaciones; la separación en grupos o bloques de fragmentos de acuerdo a su tamaño y la creación de cuadrantes o subimágenes sobre el área de análisis.

Con estas operaciones es posible una caracterización espacial y temporal del comportamiento de los fragmentos de colonización en toda la extensión del municipio. En este paso se determinan A^{ij} , C^j , r^j , n^{ij} , a^{ij} , n^j , σ_n^j

- **Proyección a Futuro de la Colonización del Bosque en la Zona de Estudio**

Se selecciona una fecha para la proyección de colonización futura buscando que haya homogeneidad en los lapsos de tiempo entre imágenes del bosque existentes.

Proyección del área total a colonizar

Lo primero que se proyecta es el área total colonizada, teniendo en cuenta las áreas de bosque de las imágenes clasificadas y los cambios entre ellas, es decir, se proyecta B_p

Determinación y proyección de porcentajes de colonización por grupo

A continuación se procede a proyectar los porcentajes de participación en área de colonización para cada uno de los grupos en el momento de proyección, r_p^*

- **Construcción de la Imagen Futura de Bosques**

Luego de tener las cantidades de colonización futura total y para cada uno de los grupos se procede a la repartición espacial de las mismas.

Cálculo del número de centroides futuros por cuadrante por grupo

Consiste en la asignación del número de centroides o fragmentos nuevos de colonización para el lapso entre la última imagen histórica y la fecha de proyección para cada cuadrante de cada grupo, conservando las características históricas del proceso, generando las variables n_p^j

Localización de polígonos por grupo en zonas boscosas

Es la repartición espacial de los fragmentos de colonización futuros sobre las zonas de bosque remanente en la última imagen histórica, se realiza creando n_p^j áreas para cada cuadrante, con un área media correspondiente a a_p^j (Sawanda, 2002).

Resta de los bosques

A la última imagen de bosques se le resta entonces la proyección de colonización a través de herramientas de geoprocésamiento para generar la imagen futura de bosques.

- **Ejemplo**

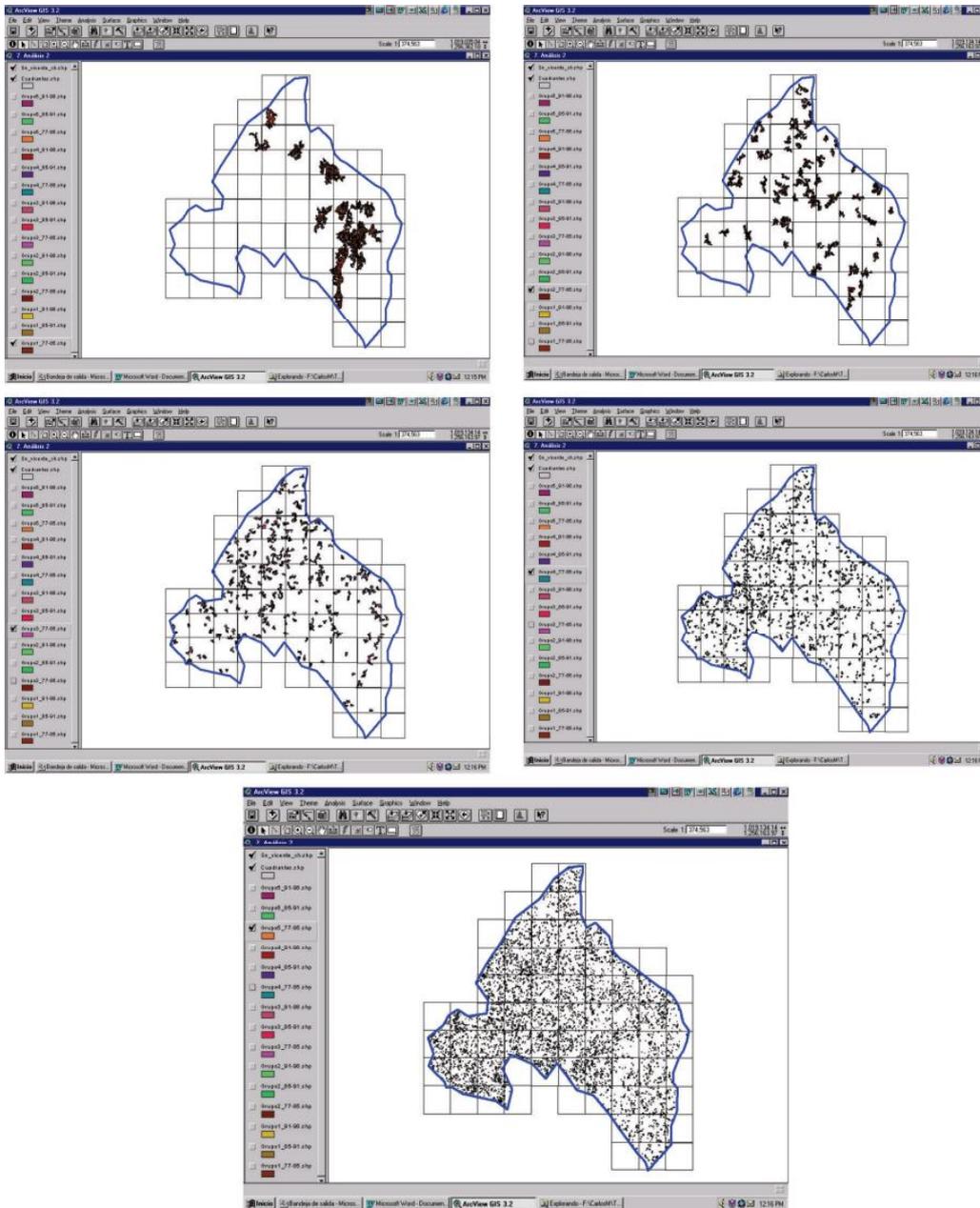
La metodología de proyección del estado de los bosques desarrollada se aplica al municipio de San Vicente del Chucurí (Santander, Colombia) utilizando 4 imágenes de satélite Landsat de 1977, 1985, 1991 y 1998.

Los fragmentos de colonización se dividieron en cinco grupos en un esfuerzo por capturar las diferentes dinámicas de colonización que pueden afectar tanto a zonas extensas como a otras más pequeñas. Para tal efecto se definieron unos límites entre grupos que se utilizaron para la clasificación de los fragmentos de colonización a través de todos los intervalos de tiempo.

Se crearon cuadrantes de 5 km. x 5 km. sobre el área del municipio con el objeto de hacer el análisis del comportamiento de los fragmentos de colonización en una escala más detallado. El área de los cuadrantes debe seleccionarse de tal manera que sea lo suficientemente pequeña para ser representativa del fenómeno de estudio y lo suficientemente grande para que se facilite el proceso estadístico posterior.

En la Figura a continuación, se muestran los fragmentos de colonización para los diferentes grupos del período 1977 a 1985, y se le superponen los cuadrantes.

Pueden observarse claramente las diferencias en tamaño y en cantidad de fragmentos para cada uno de los grupos en este intervalo de colonización a lo largo del municipio y para cada uno de los cuadrantes generados.

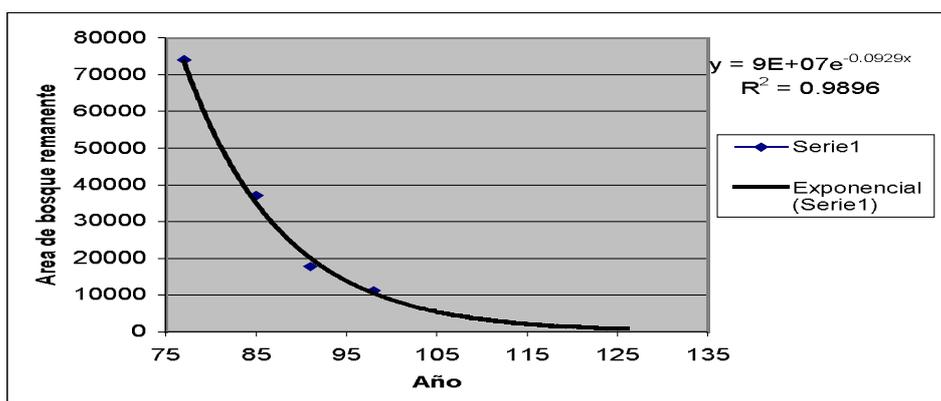


Colonización por grupos en el período 1977 a 1985

Luego de localizar inequívocamente cada núcleo de colonización en un cuadrante, se hizo el conteo de núcleos por cuadrante para cada uno de los grupos de colonización. Se pretende estudiar la distribución estadística de estas cantidades para todos los cuadrantes incluidos en el municipio, con la finalidad de tratar el número de núcleos por cuadrante, n^{ij} , como un campo aleatorio.

Realizado el análisis estadístico correspondiente, mediante el uso de la prueba Chi cuadrado, se determinó que podía utilizarse razonablemente la distribución normal, para describir n^{ij} .

Se seleccionó el año 2005 como fecha para la proyección de colonización futura buscando una homogeneidad en los lapsos de tiempo entre imágenes del bosque existentes. Se proyectó el área total colonizada (B_p), teniendo en cuenta las áreas de bosque de las imágenes clasificadas y los cambios entre ellas. Se realizó la proyección con la siguiente función de ajuste :



Puede observarse que esta curva de proyección exponencial se ajusta muy bien al comportamiento de los puntos históricos. Se obtiene que el área de bosque proyectada al 2.005, (B_{2005}), será de 5.223 Has, por tanto el área a colonizar en el período 1998 – 2005, es de 5893 Ha

Aplicando el modelo matemático descrito se obtiene el siguiente resultado:

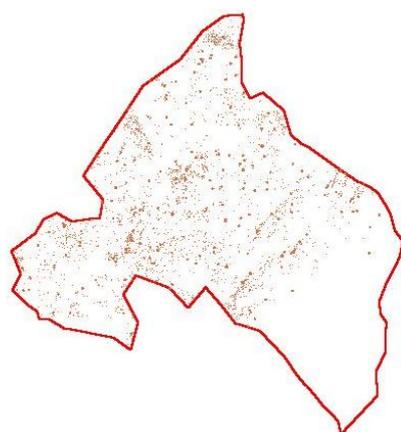


Imagen de Colonización futura

3.8. Ideas y Conceptos Claves

- La simulación permite responder a la pregunta: Qué pasaría si en el sistema se implementa un cambio particular?
- Tipos de simulación
 - Física: construcción física a escala reducida del fenómeno de interés
 - Analógica: construcción física a escala reducida de un fenómeno similar
 - Matemática: reducción del fenómeno de interés a un sistema de ecuaciones e implementación de un algoritmo para su solución.
- Dinámica de Sistemas. Resolución en el tiempo de las relaciones matemáticas que representan el fenómeno, haciendo uso de ecuaciones clásicas, complementadas con otras de origen empírico.
- Características distintivas:
 - Simulación de ciclos de retroalimentación
 - Simulación explícita de retardos en el sistema.
- Diagramas de causalidad. Los de signo negativo dan origen a ciclos de retroalimentación, los de signo positivo a comportamientos de extinción o crecimiento exponencial.
- Elementos de los diagramas de influencia:
 - Variable de nivel: acumula efectos de un período al siguiente.
 - Tasa de flujo: cantidad de materia o energía que se mueve en un período.
 - Fuente o sumidero: suministra o recibe una cantidad infinita.
 - Variable auxiliar: paso intermedio en el proceso.
 - Retardo: permite que la influencia de una variable se sienta en el sistema en períodos posteriores.
- Simulación en la dimensión física
 - Suelos: producción de sedimentos
 - Agua: Balance de oxígeno
- Simulación en la dimensión biológica
 - Interacción entre dos especies
 - Interacción entre tres especies.
- Simulación en las dimensiones sociales
 - Crecimiento demográfico
- Colonización del bosque: desarrollo de un modelo completo de interacciones económicas, demográficas y ecológicas que permite simular el comportamiento de la colonización como respuesta a variables exógenas.
- Georeferenciación de la colonización del bosque preservando los parámetros espaciotemporales del bosque.

3.9. Ejercicios

1. Desarrolle un modelo en dinámica de sistemas, para simular el proceso de colonización de un área boscosa. Tenga en cuenta:
 - Las variaciones en la población por natalidad, mortalidad, inmigración y emigración. (Suponga las nuevas unidades productivas como una función lineal de los nuevos pobladores)
 - La tala del bosque y el área remanente (Suponga que la tala es igual para cada año de cada unidad productiva)
 - El aumento de productividad agrícola por la nueva área disponible para la agricultura
 - El aumento en la producción de sedimentos por la tala del bosque.
 - El aumento de la carga orgánica en el río por los sedimentos
 - La disminución del recurso pesquero por el descenso en la cantidad de oxígeno disuelto (Considere que el recurso pesquero es proporcional a la mínima concentración de oxígeno en el río)
 - La disminución del aporte de la pesca a la economía regional y su influencia sobre la inmigración y emigración.

2. Desarrolle un modelo en el cual el fenómeno a simular es el crecimiento futuro de su país, teniendo en cuenta crecimiento poblacional (natalidad, mortalidad, inmigración, emigración), producción económica (inversión, PIB), consumo de principales insumos para la producción (energía, agua, cemento, acero) e índices ambientales (tala de bosque, generación de emisiones gaseosas, vertimientos líquidos y residuos sólidos). Como información de entrada al modelo, utilice los valores históricos de los últimos 30 años. A partir de las tendencias históricas, simule los próximos 30 años, proponiendo al menos 3 escenarios:
 - Escenarios optimista desde el punto de vista económico
 - Escenario tendencial
 - Escenario pesimista desde el punto de vista económico.

CAPITULO 4



*“Ya se sabe que cuando uno ha eliminado lo imposible,
todo lo que queda, por improbable que parezca,
tiene que ser forzosamente la verdad”*

Arturo Pérez-Reverte. La tabla de Flandes.

4. TECNICAS DE OPTIMIZACION

Cualquier proceso de diseño es, de manera implícita o explícita, un proceso de optimización. “Diseñar es optimizar”. Bien sea que se esté, por ejemplo, buscando la manera de realizar una actividad u obra al mínimo costo, respetando unas especificaciones mínimas de calidad, bien que se busque obtener el máximo de seguridad o confiabilidad dentro de un presupuesto dado.

La optimización del diseño de obras de infraestructura o de procesos productivos bajo criterios ambientales implica la existencia de modelos de simulación matemática - sencillos o complejos- que describan con alguna fidelidad el comportamiento del fenómeno en cuestión. (Angel et al, 1996). Este punto es importante, pues el proceso general de optimización trabaja bajo la premisa de seleccionar un comportamiento óptimo deseado, sea este máximo o mínimo, con respecto a algún criterio, con la limitación de seleccionar posibles soluciones, sólo dentro del espacio de factibilidad, es decir, respetando las restricciones que existan sobre el problema.

Existen numerosos métodos de optimización tales como la programación dinámica, programación entera, programación entera mixta, cuya presentación escapa al alcance de este texto. Por tanto, sólo se presentarán en detalle el método de los máximos y mínimos y la programación lineal.

Para los casos más simples, en los que algún fenómeno ambiental puede ser reducido a una función matemática, la técnica de los máximos y mínimos es directa y de fácil aplicación. Sin embargo las realidades ambientales suelen ser de un nivel de complejidad tal que no son reductibles a funciones matemáticas sencillas.

4.1. Máximos y Mínimos

La técnica de los máximos y mínimos es un desarrollo simple que proviene del cálculo elemental. Se soporta en el hecho de que en los puntos máximos o mínimos de una función, su gradiente es cero, es decir, la pendiente en todas las posibles direcciones es cero.

Para el caso de funciones de una variable, los máximos y mínimos se detectan igualando la derivada a cero y observando el signo de la segunda derivada, pues esta cuantifica la curvatura de la función y por tanto permite distinguir entre máximos y mínimos.

Sea una función $f(x)$ y sus derivada dy/dx . Se iguala la expresión dy/dx a cero y se obtienen los puntos en los que esa condición se cumple. A continuación se evalúa la segunda derivada d^2y/dx^2 y dependiendo del signo se concluye si es máximo o mínimo:

- Si $d^2y/dx^2 < 0$, se tiene un máximo, pues la concavidad es hacia abajo.
- Si $d^2y/dx^2 > 0$, se tiene un mínimo, pues la concavidad es hacia arriba.
- Si $d^2y/dx^2 = 0$, no se puede afirmar nada acerca de la función y es necesario analizarla más detenidamente.

Considérese que la eficiencia de retención de un contaminante en una planta de tratamiento de aguas residuales, como función de la concentración en mg/l de un reactivo, esté dada por:

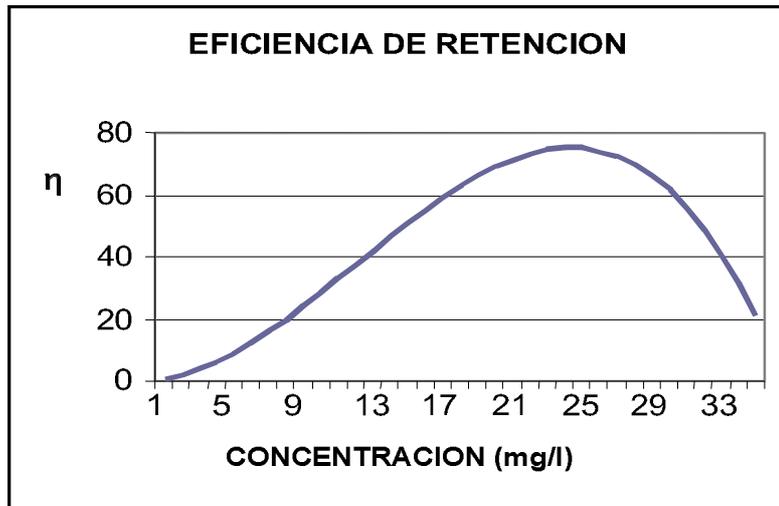
$$\eta = -0.001 x^3 + 0.008 x^2 + 0.002 x + 0.001$$

$$\frac{d\eta}{dx} = -0.003 x^2 + 0.016 x + 0.002$$

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} = -0.006 x + 0.016$$

Igualando $d\eta/dx$ a cero se obtiene $x = 24.33$ mg/l

Evaluando $d^2\eta/dx^2$ en $x = 24.33$ se tiene: $d^2\eta/dx^2|_{x=24.33} = -0.74$, por tanto el punto es un máximo. En la gráfica a continuación se observa la función descrita en el rango (0,35)



Para el caso de funciones de dos variables, se igualan a cero las derivadas parciales de primer orden, lo que da un sistema de ecuaciones que al resolverlo suministra los puntos de interés. Para determinar si tales puntos son máximos o mínimos, se analiza la posible existencia de puntos de silla, mediante la evaluación de la expresión:

$$\Delta = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2$$

Si $\Delta > 0$ y las segundas derivadas son positivas, se tiene un mínimo
Si $\Delta > 0$ y las segundas derivadas son negativas, se tiene un máximo
Si $\Delta < 0$, se puede estar en presencia de un punto de silla.

Para los casos en que las funciones no son continuas o sus derivadas no pueden expresarse de manera analítica, Beasley, Bull y Martin (1993) presentan una clasificación de los métodos de búsqueda de máximos y mínimos:

- **Búsqueda aleatoria**

Los individuos a probar se generan de manera aleatoria o por alguna técnica de enumeración. Aunque esta técnica puede servir para generar una vista general de la función a optimizar - en el hipotético caso de que sea graficable con facilidad- no es usualmente utilizada, porque es un procedimiento de fuerza bruta, es decir, no se explora inteligentemente la región.

- **Métodos de gradiente**

Estos métodos hacen uso del valor de la o las derivadas direccionales de la función, para tomar la decisión de en qué dirección se debe avanzar el próximo paso. Si bien son muy eficientes cuando se trata de funciones derivables y unimodales - con un único máximo -, cuando se buscan soluciones a problemas multimodales, el procedimiento se queda atrapado en el primer óptimo que encuentra y no sale de allí.

- **Búsqueda iterada**

Los procedimientos de búsqueda aleatoria y gradiente se pueden combinar, de tal manera que una vez el algoritmo ha convergido a una solución, se inicia una nueva búsqueda a partir de un punto determinado aleatoriamente. Dado que todas las regiones tienen la misma probabilidad de recibir el primer punto de cada búsqueda, no se da mayor importancia a aquellas regiones de un mejor desempeño y un gran número de búsquedas se realizan localizando óptimos locales en regiones de bajo desempeño.

- **Temple simulado (simulated annealing)**

Es una modificación del método del gradiente, se selecciona, de manera aleatoria, una dirección de movimiento, si el valor de ajuste aumenta, se acepta, si el valor de ajuste disminuye, se acepta con una probabilidad $p(t)$, decreciente, donde t es el tiempo. La probabilidad p empieza cercana a uno, pero disminuye conforme el tiempo de la búsqueda transcurre, de ahí el nombre, debido a la analogía con un sólido que se enfría.

- **Algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos adaptativos que pueden ser usados para resolver problemas de búsqueda y de optimización (Beasley et al, 1993). Este tipo de algoritmos está basado en el proceso biológico de la evolución, en el cual, a través de muchas generaciones, las poblaciones naturales evolucionan de acuerdo a las leyes de la selección natural y de la supervivencia del mejor adaptado. (Holland, 1975), (Goldberg, 1989)

En la naturaleza, los individuos compiten entre ellos por recursos, y por conseguir una pareja. Aquellos individuos más aptos para conseguir recursos y pareja tiene una mayor probabilidad de tener una descendencia numerosa, mientras que los individuos que presentan una adaptación menor, tendrán menor descendencia o no tendrán ninguna.

Esto garantiza que con el paso de las generaciones, los "genes" de los individuos mejor adaptados, representarán una mayor proporción del acervo genético total de la población.

La combinación de buenas características de diferentes ancestros, puede, eventualmente, producir hijos que se desempeñen mucho mejor que cualquiera de sus padres y estos hijos, transmitirán a su vez sus características a sus propios hijos.

Los algoritmos genéticos trabajan con una analogía muy cercana a este proceso. Se trabaja con una "población" de individuos, cada uno de los cuales representa una posible solución al problema. A cada individuo se le asigna un "valor de ajuste", de acuerdo a qué tanto se acerca a la solución del problema. A los individuos con mayores "valores de ajuste", se les dan mayores probabilidades de reproducirse, es decir de pasar parte de su material genético a la nueva generación.

Los cruces se realizan entre dos padres, cada uno de los cuales aporta parte de su material genético. Se forma así una nueva generación que contendrá porciones de material genético de los mejores individuos de la generación anterior. Nuevamente se evalúan los "valores de ajuste" y el algoritmo procede hasta que se logre un criterio de convergencia o, en su defecto se complete un número predeterminado de generaciones. En la mayoría de las oportunidades, las poblaciones presentarán una convergencia hacia la solución óptima del problema.

- **Métodos gráficos**

En el caso de algoritmos que no pueden ser expresados como funciones analíticas, se puede realizar un enfoque gráfico por pasos, en el que se evalúa el valor en una malla de valores y se grafican los resultados, obteniéndose una región en la que a simple vista se observa que se encuentra el máximo. Para precisar el valor es necesario realizar una segunda etapa, en la que se refina el valor del intervalo, reduciéndolo, por ejemplo a la décima parte del anterior y repitiendo el procedimiento en escalas más y más detalladas, se puede encontrar el óptimo con el número de cifras significativas que se desee. El éxito de este enfoque

presupone el hecho de que la función a optimizar varía suavemente, es decir, no presenta cambios muy drásticos en una vecindad pequeña.

4.2. Programación Lineal

La programación lineal es una técnica que permite encontrar él, o los puntos que maximicen, o minimicen, el cumplimiento de una función objetivo, sujeto a que estos puntos están dentro de una región geométrica acotada por restricciones expresables en forma de funciones lineales. Igualmente la función objetivo debe ser lineal.

En el campo de la TDA, la programación lineal, además de permitir realizar un tipo particular de optimización, permite también ser utilizada como modelo para explicar la racionalidad de agentes productores sometidos a restricciones en el uso de bienes o servicios ambientales.

Supóngase que existe una fábrica que produce dos tipos de productos⁹: una cerveza clara y una cerveza oscura. Se designa x_1 los miles de litros de la cerveza clara producida por semana y x_2 , los correspondientes de cerveza oscura. Cada tipo de cerveza produce una cantidad fija de dos contaminantes diferentes, que están controlados por las autoridades ambientales, quienes llevan un estricto control de los vertimientos que salen de la fábrica. La decisión será cuánta cerveza producir de cada tipo, de tal manera que se maximice la utilidad de la fábrica, sin exceder los límites permisibles de vertimiento. En este contexto, x_1 y x_2 , son las variables de decisión

Función objetivo

Las utilidades de la compañía, después de descontar materia prima, salarios, impuestos, etc. son de \$5000 por cada unidad de x_1 y de \$3000 por cada unidad de x_2 . Por tanto, la función objetivo se puede expresar como: maximizar Z dada por:

$$Z = 5000 x_1 + 3000 x_2$$

Restricciones

La producción de cada mil litros de cerveza clara genera 3 kg. de contaminante A y cada mil litros de cerveza oscura generan 5 kg. Igual ocurre con el contaminante B que es producido en proporciones de 500 y 200 gr. respectivamente asociados a la producción de x_1 y x_2 .

La máxima carga contaminante permitida por las autoridades es de 15 kg. semanales del contaminante A y 1000 gr. semanales del contaminante B. Lo cual se puede expresar como:

$$\text{Maximizar } Z = 5000 x_1 + 3000 x_2$$

9. Ejemplo adaptado a partir de Prawda, 1977, p 57-67

$$\text{Sujeto a: } 3x_1 + 5x_2 \leq 15$$

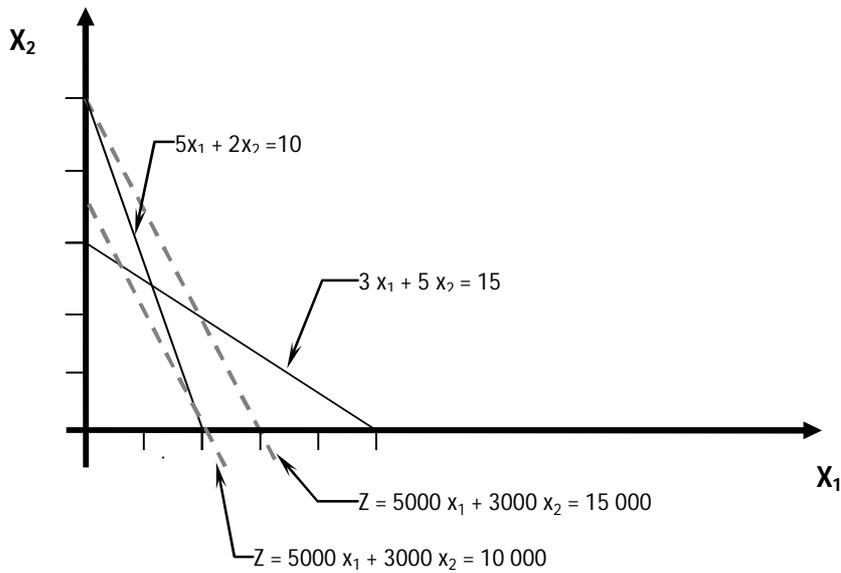
$$500x_1 + 200x_2 \leq 1000$$

$$x_1 \geq 0$$

$$x_2 \geq 0$$

Estas últimas restricciones surgen de la necesidad de limitar el espacio de soluciones factibles a aquellas conformadas por una pareja de producciones no negativas de ambas cantidades.

Un diagrama permite ver el problema en términos gráficos. Utilizando los ejes coordenados para representar las variables x_1 y x_2 respectivamente.



La región factible es aquella en la que se cumplen las cuatro restricciones, dos de no negatividad y las otras dos dadas por las rectas:

$$5x_1 + 2x_2 = 10$$

$$3x_1 + 5x_2 = 15$$

Esto reduce la región factible al cuadrilátero que se encuentra arriba del eje x_1 , a la derecha del eje x_2 y por debajo de las dos rectas. Como puede verse, la línea punteada inferior representa los puntos para los cuales la función objetivo vale 10.000 y la superior, los puntos con un valor de 15.000. Estas líneas se llaman líneas de isoperferencia, en el sentido de que un decisor racional, tendrá el mismo nivel de apreciación por cualquier punto sobre cada una de ellas, dado que le representan igual utilidad.

Se trata pues de seleccionar el punto que estando dentro de la región factible, corta la línea de isopreferencia de mayor valor. En la gráfica puede deducirse que esto ocurre en el vértice donde se cruzan las dos restricciones.

Puede demostrarse, aunque ello excede el alcance de este texto, que siempre que tanto la función objetivo, como las restricciones sean lineales, la solución se hallará en uno de los vértices de la región factible. Esto parece obvio cuando se trata de dos dimensiones, y por tanto de dos variables de decisión, pero no es nada obvio cuando están en juego un gran número de variables de decisión y por tanto ni siquiera se puede representar gráficamente el problema.

En el caso presentado, la solución consiste en producir 1.053 unidades de cerveza clara y 2.368 unidades de cerveza oscura, lo que le representa al fabricante una utilidad de \$12.369, la máxima posible, dadas las restricciones.

La forma canónica se representa por:

Optimizar

$$Z = \sum_{i=1}^n c_i x_i$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \leq b_j; j = 1, \dots, m$$
$$x_i \geq 0; i = 1, \dots, n$$

En términos matriciales: Optimizar

$$Z = \bar{c}\bar{X}$$
$$\bar{A}\bar{X} \leq \bar{b}$$
$$\bar{X} \geq \bar{0}$$

Donde: Z es la función objetivo,
c es el vector de precios o costos unitarios
b es el vector de disponibilidad de recursos
A es la matriz de coeficientes tecnológicos y
0 es el vector 0

Problema dual

El problema dual asociado al problema original consiste en resolver:

$$\min G = \bar{b}^T \bar{Y}$$
$$\bar{A}^T \bar{Y} \geq \bar{c}^T$$
$$\bar{Y} \geq \bar{0}$$

Esta solución permite:

- Resolver problemas grandes reduciéndoles el tamaño, pues el esfuerzo

computacional está en función del número de filas de A , no del número de columnas.

- Dar interpretaciones económicas adicionales a la solución óptima, pues el vector Y puede ser interpretado como los precios sombra asociados a la liberación de una unidad de cada restricción.

4.2.1. Interpretación ambiental

De lo anteriormente expuesto es claro que los agentes económicos asociados a la producción, intentarán moverse hacia las restricciones y ubicarse lo más cerca posible a ellas, en aras de maximizar su utilidad. Dado que el óptimo se encuentra, muy probablemente, en el punto de cruce de varias restricciones, el agente permanentemente estará en las cercanías de dos o más restricciones. Pretender que se localice en un punto diferente, al interior de la región factible, es impensable, especialmente si se tiene que el gradiente de la función objetivo es importante, en términos económicos.

Por tanto, la orientación ambiental de los industriales debe ser mirada con referencia a las restricciones impuestas. A aquellas industrias que se mueven en sus decisiones de producción en las cercanías de las intersecciones entre restricciones, si bien no les cabría el título de "ambientalistas", tampoco se les podría tildar de "depredadoras", pues están moviéndose dentro de la región factible que les ha definido la legislación.

Se desprende del análisis que si una autoridad ambiental decide imponer una regulación más estricta, con el fin de mejorar los niveles de calidad ambiental en una determinada región, los productores se verán afectados necesariamente, pues al definir restricciones más severas, serán obligados a moverse hacia el interior de la región factible y por tanto hacia niveles más bajos de logro de su función objetivo.

Si nada de esto ocurre y los productores no se ven afectados, la explicación sería que se está regulando sobre restricciones no restrictivas, es decir, sobre las cuales no se localiza ningún productor y por ende no se verá ninguna mejoría en el nivel de calidad ambiental regional.

4.3. Ideas y Conceptos Claves

- Las técnicas de optimización permiten la búsqueda sistemática de la situación

óptima para la construcción u operación de un proyecto. Si el criterio de optimización es un criterio ambiental, se estará realizando una optimización ambiental.

- La técnica de los máximos y mínimos permite encontrar el punto óptimo de una función, igualando las primeras derivadas a cero y observando el signo de las segundas derivadas.
- Los métodos de búsqueda permiten encontrar los puntos óptimos de comportamiento, mediante un esfuerzo racional, lo principales son:
 - Búsqueda aleatoria
 - Método del gradiente
 - Búsqueda iterada.
 - Temple simulado
- Los algoritmos genéticos trabajan con una analogía muy cercana al proceso de la selección biológica. Se trabaja con una "población" de individuos, cada uno de los cuales representa una posible solución al problema. A cada individuo se le asigna un "valor de ajuste", de acuerdo a qué tanto se acerca a la solución del problema. A los individuos con mayores "valores de ajuste", se les dan mayores probabilidades de reproducirse, es decir de pasar parte de su material genético a la nueva generación.
- La programación lineal es una técnica que permite encontrar él, o los puntos que maximicen, o minimicen, el cumplimiento de una función objetivo, sujeto a que estos puntos están dentro de una región geométrica acotada por restricciones expresables en forma de funciones lineales. Igualmente la función objetivo debe ser lineal.
- La programación lineal, permite también ser utilizada como modelo para explicar la racionalidad de agentes productores sometidos a restricciones en el uso de bienes o servicios ambientales.

4.4. Ejercicios

1. Suponga que la cantidad de contaminante retenido en un proceso de remoción está dada por:

$$z = \frac{(8 - (x-6)^2) * (8 - (y-4)^2) * (9 - (x-3)(y-7))}{8 \quad 8 \quad 9}$$

con x e y la concentración en gramos por litro de dos reactivos que participan en el proceso. Si las cantidades x e y pueden variar de 0 a 10, cual es el punto de máxima eficiencia del proceso. Se necesita un nivel de precisión de centigramos.

2. Una fábrica produce dos tipos de cerveza, datos por Kilolitro:

CERVEZA	Precio venta (\$)	Contam A (Kg.)	Contam B (g)
Clara	4500	2.5	450
Oscura	2800	5	300

Los límites de emisión por semana son de 15 Kg. de contaminante A y 1000 g. de contaminante B

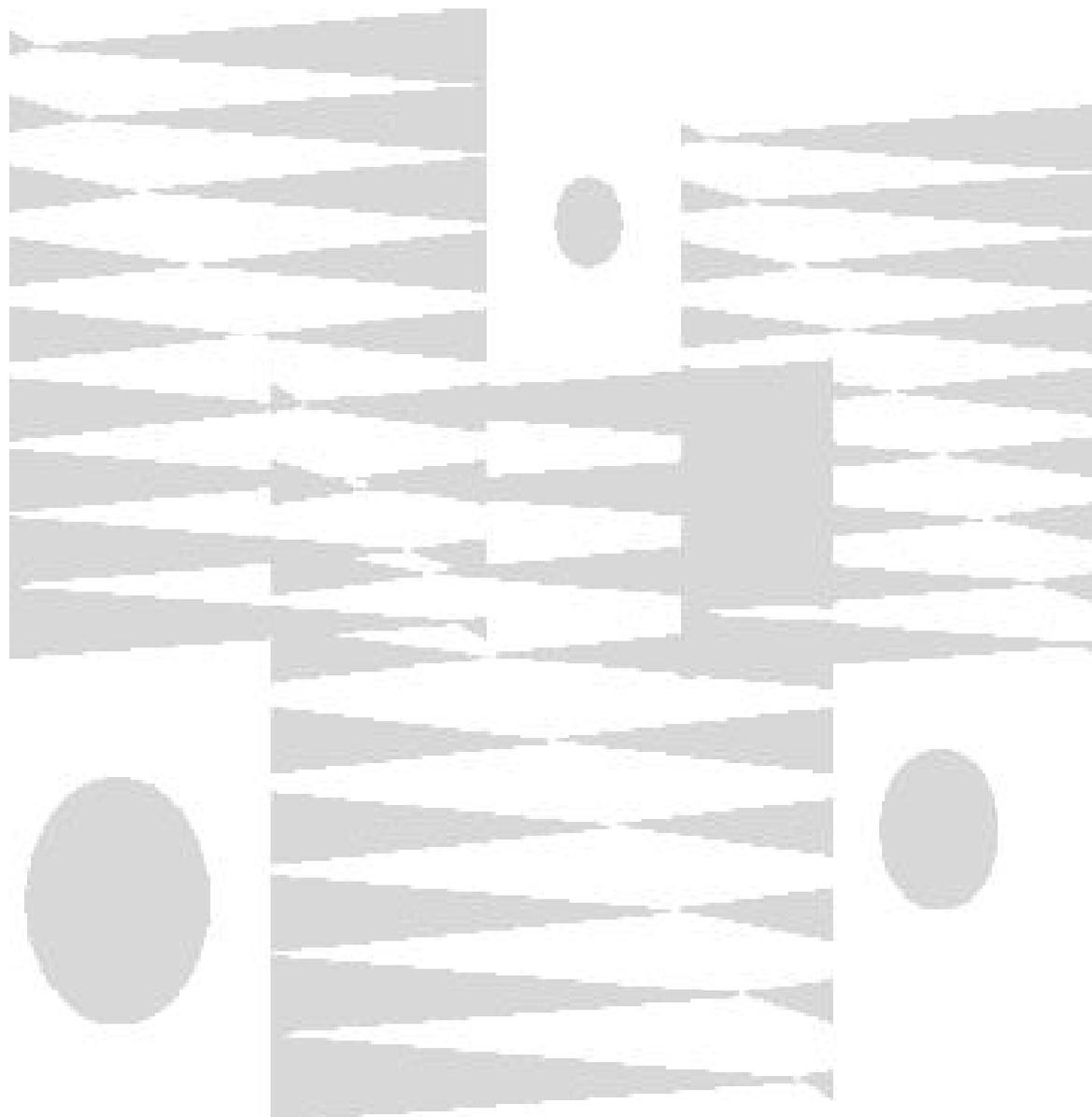
- Plantee en problema en la forma canónica de la programación lineal
 - Cuál es la producción óptima de ambos tipos de cerveza
 - Elabore una gráfica, incluya líneas de isopreferencia.
3. En una fábrica de cervezas se tiene el siguiente modelo de optimización de la producción, para poder atender restricciones de tipo ambiental:

$$\begin{aligned} \max Z &= 5000 X_1 + 3000 X_2 \\ \text{sujeto a : } &3 X_1 + w X_2 \leq 15 \\ &5 X_1 + 2 X_2 \leq 1000 \\ &X_1 \geq 0 \\ &X_2 \geq 0 \end{aligned}$$

El coeficiente w es variable, dependiendo del tipo de tecnología de descontaminación utilizada, con un costo de $1000(w-5)^2$. Se sabe que w puede variar entre 4 y 7. Encuentre w óptimo con tres cifras decimales.

CAPITULO 5

TECNICAS DE GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS



“Mi padre me enviaba de vez en cuando módicas sumas de dinero, que yo gasté en aprender el arte de la navegación y otras disciplinas matemáticas, útiles para quienes se proponen viajar”

Jonathan Swift. Los Viajes de Gulliver

5. TECNICAS DE GENERACION DE ALTERNATIVAS DE LOCALIZACION

Si bien, es posible pensar en múltiples técnicas de generación de alternativas, entre las que se cuenta las de enumeración explícita, que permiten ir generando alternativas, por la vía del análisis combinatorio, la atención se centra en este capítulo en la generación de alternativas de localización. Detrás de esta toma de partido se encuentra la concepción, ampliamente aceptada, de que buena parte de las decisiones ambientales relacionadas con un proyecto de desarrollo se toman durante la etapa de su localización.

Esta concepción parte de la base de definir las características principales del proyecto, al menos las tecnológicas y de tamaño y con base en ellas, encontrar posibles ubicaciones geográficas para el proyecto, que minimicen el impacto ambiental. Una vez ubicado este, será necesaria una segunda etapa de definición de características, estas de más detalle, para completar la especificación del proyecto.

La técnica de superposición de mapas puede ser usada tanto para proyectos lineales, como para proyectos concentrados. Para éstos últimos el resultado final brindará unas zonas propicias para ubicar el proyecto, atendiendo a su menor vulnerabilidad ambiental. Para proyectos lineales el problema se centra en encontrar un corredor, que, atravesando zonas de baja vulnerabilidad ambiental, una los puntos inicial y final de interés para el proyecto.

Consiste esta técnica en la elaboración de mapas temáticos para cada una de las dimensiones analíticas que se está teniendo en cuenta (Física, biótica, cultural, económica y política) definiendo en cada una de ellas áreas aptas para la ubicación del proyecto y áreas con niveles de restricción progresivos. Es usual que estas áreas se coloreen siguiendo una convención tipo semáforo:

verde = aptitud plena
amarillo = precaución
rojo = restricción

Mediante la superposición de las diferentes capas temáticas sobre una base cartográfica común, se identifican áreas con diversos niveles de aptitud, criticidad y restricción. Como se verá en el desarrollo del capítulo, el punto central de esta técnica se encuentra en la regla de combinación, que determina cómo diversos tipos de criticidad se agregan para formar categorías nuevas.

Esta técnica, apelando a la aplicación de una lógica sencilla, permite la realización de operaciones tales como la exclusión de posibles emplazamientos para el proyecto, la confirmación de otros sitios o corredores que no presentan ninguna criticidad - o que si la tienen es manejable con una adecuada gestión- y finalmente la redelimitación del área de estudio para las etapas siguientes, lo que permite concentrar los esfuerzos en las zonas sobre las que se tiene una razonable certeza de ser adecuadas para el desarrollo que se pretende implementar.

La disponibilidad de imágenes de satélite en diferentes bandas del espectro, de una amplia cobertura de aerofotografía y de cartografía a escalas detalladas hace de esta técnica una opción imprescindible para las etapas de localización de rutas y proyectos. La técnica es relativamente fácil de desarrollar en el ambiente de un sistema de información geográfico (SIG), con las obvias ventaja de una alta versatilidad en el orden de superposición de las capas temáticas y la facilidad para explorar varias reglas de combinación de las criticidades y restricciones asociadas.

5.1. Conceptos Básicos para la Superposición de Mapas

Es necesario introducir algunos conceptos básicos que permitan avanzar en la construcción de los mapas temáticos (ISA-INNER, 1998)

• Restricción ambiental

Una restricción la conforman una serie de circunstancias que hacen imposible la realización de un cierto tipo de proyecto de desarrollo en una región dada. Por ejemplo, la existencia de un área protegida, un monumento histórico, un ecosistema de altísima importancia estratégica o una comunidad altamente dependiente de sus recursos locales, pueden ser casos de restricciones.

Son varias las razones por las cuales un conjunto de circunstancias se hace restrictivo para la realización de un proyecto:

- Razones de tipo legal (Prohibición explícita de realizar el proyecto)
- Impactos del proyecto sobre el ambiente (Ej. Atravesar un bosque primario con una carretera)
- Efectos del ambiente sobre el proyecto (Ej: Trazado de un oleoducto por zonas de muy alta pendiente que lo hace inviable)
- Razones económicas (Sí bien el proyecto se puede realizar, el costo asociado a la gestión ambiental adecuada para esas circunstancias hace prohibitivo el sitio)

- **Criticidad ambiental**

La criticidad de una determinada zona para el establecimiento de cierto proyecto de desarrollo está dada por aquellos aspectos que dificultan en mayor o menor grado la implementación del mismo.

Los grados de criticidad, igualmente pueden proceder de aspectos legales, de costos, de los impactos del proyecto sobre el ambiente o de los efectos de este sobre aquel.

- **Posibilidad ambiental**

La posibilidad ambiental está dada por la ausencia de restricciones y cualquier nivel de criticidad, es el estado ideal de una región con respecto a un proyecto, pues implica que se puede implementar sin ningún tipo de consideración especial, sólo atendiendo a una gestión ambiental básica de carácter preventivo.

5.2. Lógicas para la Superposición de Mapas

Existen dos lógicas básicas que permiten llegar a un mapa síntesis, partiendo de mapas de criticidades y restricciones temáticas. Ambas presentan unas ciertas características mínimas que garantizan la coherencia interna del análisis:

- A iguales valores en los mapas temáticos, debe ser igual el resultado en el mapa síntesis.
- Al aumentar el nivel de restricción en uno de los mapas temáticos, el nivel de restricción en el mapa síntesis debe aumentar, o al menos permanecer igual, nunca puede disminuir.

Las posibles lógicas de cruce de los mapas determinan la manera como los valores de restricción temática se combinan para producir el valor de restricción síntesis.

5.2.1. Promedios ponderados¹⁰

Consiste en la ponderación de los niveles de restricción en cada temática por un peso o valor de preferencia de esa temática frente a las demás. Se realiza la ponderación usando una función aditiva, que en este caso es equivalente a un promedio ponderado. En otras palabras, se realiza la sumatoria de los valores de restricción multiplicados por su importancia relativa.

Sean los mapas X, Y, Z, donde X, Y son los mapas a superponer y Z el mapa resultante de esta superposición. Luego, para cada celda X_i , Y_i y Z_i , se tiene:

10. El material de este numeral y de los siguientes hasta el 5.5 había sido previamente expuesto (Castaño, Paz, 1998) aquí se aclaran algunos conceptos y se presenta en un contexto más amplio

$$Z_i = \alpha * (X_i) + \beta * (Y_i)$$

siendo α y β los factores de ponderación

Gráficamente, representando un área rectangular como un «grid»:

$$(2) \times \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 4 & 4 & 1 & 1 \\ \hline 4 & 4 & 1 & 1 \\ \hline 3 & 1 & 1 & 1 \\ \hline 3 & 2 & 2 & 3 \\ \hline 3 & 2 & 2 & 2 \\ \hline \end{array} + (1) \times \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 2 & 3 & 3 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 3 & 3 \\ \hline 2 & 2 & 4 & 4 \\ \hline 1 & 2 & 4 & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 10 & 11 & 5 & 5 \\ \hline 10 & 10 & 5 & 5 \\ \hline 8 & 4 & 6 & 6 \\ \hline 7 & 6 & 8 & 10 \\ \hline 7 & 5 & 5 & 5 \\ \hline \end{array}$$

Esta lógica tiene la ventaja de ser de fácil implementación, pues se reduce a usar una característica de los paquetes de SIG, llamada “calculadora de mapas”. En contraprestación, presenta desventajas que pueden ser graves dependiendo de la magnitud de los proyectos analizados y de los impactos involucrados, la principal es que en los sitios que presentan un temática restrictiva y las demás de aptitud plena, el valor síntesis aparece como de mediana aptitud, enmascarando la restricción, debido a la mecánica operativa propia del método.

Otra desventaja es que requiere un manejo cuidadoso en la redefinición o reescalamiento de los límites máximos y mínimos para cada etapa de la agregación de mapas, pues de no hacerlo así se ponderarán más aquellas dimensiones que posean mayor información y se valorarán por lo bajo aquellas que posean menos.

5.2.2. Booleana

Definida como la lógica simbólica, realiza un manejo puramente simbólico del nivel de restricción en cada punto. Funciona con los operadores tradicionales de la lógica matemática; unión, intersección, negación (\wedge , \vee , \sim). Esta lógica asigna al valor síntesis, usualmente, la mayor restricción presente en alguno de los mapas temáticos.

El valor de restricción en el mapa síntesis será igual al mayor valor de la misma celda de los dos mapas superpuestos.

Sean los mapas superponen los dos mapas del ejemplo anterior, para cada celda X_i , Y_i , Z_i , se tiene:

```

IF  $X_i > Y_i$  THEN
     $Z_i = X_i$ 
ELSE
     $Z_i = Y_i$ 
END IF
    
```

Gráficamente:

4	4	1	1	+	2	3	3	3	=	4	4	3	3
4	4	1	1		2	2	3	3		4	4	3	3
3	1	1	1		2	2	4	4		3	2	4	4
3	2	2	3		1	2	4	4		3	2	4	4
3	2	2	2		1	1	1	1		3	2	2	2

Presenta la ventaja de ser muy conservativa, pues considera, para una localidad, que la gestión total será tan compleja como lo sea la más compleja de las temáticas involucradas. Este rasgo es también su principal debilidad, pues refleja un panorama muy pesimista para la realización del proyecto y tiene la característica de que el nivel de restricción total va aumentando, usualmente, cuando se van agregando mapas con más y más temáticas. Esto se refleja en mayores costos de construcción de los proyectos lineales, pues implica mayores longitudes, que permitan alejarse de todas las restricciones.

5.3. Resta de Mapas

Cuando se están analizando diferentes metodologías para llegar a un mapa síntesis, es necesario comparar los resultados obtenidos con el fin de establecer sus diferencias o similitudes. Se puede encontrar las diferencias entre ellos a partir de una comparación visual, pero dada la dificultad que presenta para el cerebro el manejo de muchos colores y formas simultáneamente, se hace necesario buscar una manera objetiva de hacerlo.

Una metodología sencilla de llevar a cabo esta comparación es hacer una resta algebraica de mapas. El mapa obtenido a partir de la resta permite visualizar las diferencias entre zonas similares de ambos mapas, determinándose de esta forma aquellas que presentan mayores diferencias, gráficamente:

4	4	2	2	-	2	2	3	3	=	2	2	-1	-1
4	4	1	1		4	4	3	3		0	0	-2	-2
3	2	2	1		2	2	1	3		1	0	1	-2
3	3	3	4		2	2	3	1		1	1	0	3

5.4. Ruta de Menor Costo Acumulado

Este método parte de establecer una analogía entre el impacto ambiental acumulado por la construcción de un proyecto lineal y el costo de viaje de un viajero a través de una superficie. En ambos casos se tiene un territorio, la intención de ir de un punto predeterminado a otro, la necesidad de ir atravesando

diferentes porciones del territorio con diferentes grados de dificultad y una función objetivo a minimizar:

ATRIBUTO	PROBLEMA DEL VIAJERO	RUTA DE MINIMO IMPACTO AMBIENTAL
TERRITORIO	Territorio sobre el que se viaja	Territorio sobre el que se selecciona el trazado
PUNTOS INICIAL Y FINAL	Inicio y fin del viaje	Puntos inicial y final del trazado
GRADOS DE DIFICULTAD	Diferentes costos para atravesar cada celda del territorio	Diferentes grados de criticidad para el trazado del proyecto
FUNCION OBJETIVO A MINIMIZAR	Minimizar costo de viaje acumulado	Minimizar el acumulado de las criticidades de las celdas atravesadas

La superficie de costos de viaje (en el caso que nos interesa, la superficie de criticidades ambientales) define la impedancia, fricción o costo para moverse, planimétricamente, una unidad de distancia a través de una celda.

Los valores de las celdas de la superficie de costos de viaje pueden ser enteros o decimales, pero no pueden contener valores negativos, ya que no se puede tener un costo de viaje negativo, esto equivaldría a afirmar que el viajero no gastó nada y además recibió una prima por pasar por allí, en términos ambientales implicaría afirmar que no se causará ningún impacto ambiental y en vez de eso, se mitigará un impacto existente previamente; difícilmente ese es el caso.

A partir de la superficie de costos de viaje se estiman la superficie de costos Acumulados de viaje y el «BackLink», superficies necesarias en el cálculo de la ruta de menor costo (Least Cost Path).

5.4.1. Superficie de costos acumulados de viaje

Para comprender qué es el costo acumulado de viaje de una celda es necesario comprender primero qué es el costo de viaje de una celda a otra. Se entiende por este último el promedio de los costos entre ambas celdas multiplicado por la distancia entre los centros de las mismas:

$$\text{Costo de viaje entre dos celdas}_{(1-2)} = \text{distancia}_{(1-2)} * \frac{\text{Costo1} + \text{Costo2}}{2}$$

Se puede definir el costo acumulado de viaje de una celda como el costo para viajar de esta celda a la celda destino, a través de las celdas con el menor costo acumulado de viaje. En otras palabras, el costo de viaje es acumulado a medida que el algoritmo procede, alejándose de la celda destino, teniendo las celdas más alejadas a la celda destino un mayor costo acumulado. Si bien este orden para resolver el problema, - empezar por el destino y no por el origen- puede parecer enrevesado, es la manera de proceder de la programación dinámica, técnica

que se encuentra en el fondo de este problema de la ruta de mínimo costo. La expresión para definir el costo acumulado de viaje es:

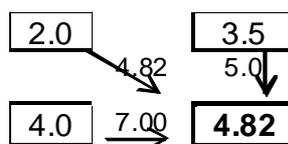
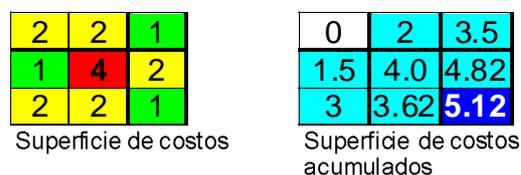
$$\text{Costo Acumulativo de Viaje}_{(2)} = \text{Costo Acumulado}_{(1)} + \text{distancia}_{1-2} * \frac{\text{Costo1} + \text{Costo2}}{2}$$

El método para calcular el costo acumulado de viaje es iterativo, empezando desde la celda destino para luego irse alejando. La celda origen no está involucrada en este cálculo. En la primera iteración, la celda destino es identificada y asignada con un valor de costo acumulado de 0.

En la segunda iteración, a cada uno de las celdas inmediatamente vecinas, tanto ortogonal como diagonalmente, se les calcula el costo para llegar a la celda destino y se les asigna ese valor como costo acumulado.

En la tercera iteración, el cálculo se realiza para la siguiente fila concéntrica de celdas. Para cada una de ellas se calcula el costo de viaje de ella a las celdas adyacentes que ya tienen el costo acumulado de viaje calculado. Se suman ambos y se obtienen varias posibles rutas, cada una de ellas basada en el costo acumulado de viajar de la celda en cuestión a la celda destino. El punto decisivo es que se selecciona entre las posibles rutas la que presente el menor costo acumulado de viaje, con lo cual se garantiza que cuando se realice la cuarta iteración y las subsiguientes, el valor que se presenta en la superficie de costos acumulados, será el menor posible. Esto garantiza que el método encuentre el camino de menor costo total.

Este proceso continúa a través de muchas iteraciones, siempre expandiéndose alrededor de la celda destino y siempre acumulando el menor costo para llegar a este. El proceso termina cuando todas las celdas son calculadas. La anterior explicación se puede ejemplificar como sigue:



En este ejemplo se pretende viajar de la celda inferior derecha a la celda superior izquierda del área representada en la superficie de costos. Comenzando con la primera iteración, tenemos que a la celda destino se le asigna un valor de 0, ya que aún no hay costo de viaje.

Para calcular el valor de la celda de costo acumulado 4.82, se estiman los costos acumulados por todas las posibles rutas que llevan a las celdas cuyos costos acumulados ya están calculados (4.82, 5.0 y 7.00) se selecciona como acumulado el valor 4.82 que es el menor de ellos.

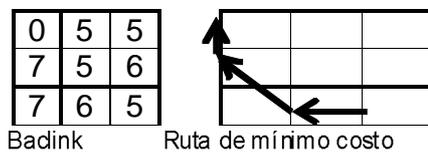
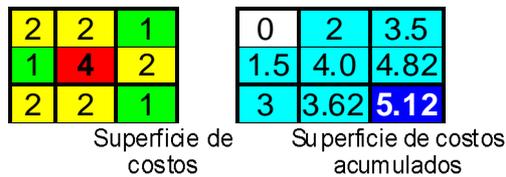
5.4.2. "BackLink"

El "Backlink" es una superficie de las mismas dimensiones que las anteriores, en la que se ha almacenado, para cada celda, la dirección que habría que seguir, estando ubicado en esa celda, para tomar la ruta de mínimo costo. Esta dirección se almacena de acuerdo con un código, siguiendo la convención que se muestra a continuación:

6	7	8
5	0	1
4	3	2

Por ejemplo, una celda con código 6 dentro del "Backlink", tiene como su celda vecina dentro del "Least Cost Path" a la celda superior izquierda. De la misma manera, si una celda es de código 5, entonces la celda a su izquierda es la siguiente celda a lo largo del "Least Cost Path".

Por lo tanto el "Backlink" encierra, por la manera como está construido, la totalidad de las rutas óptimas posibles, es decir, una para cada celda dentro del área geográfica. Una vez determinado cuál es el punto de origen, basta con situarse en él y moverse en la dirección que el «BackLink» indique para esa celda y continuar aplicando las instrucciones de movimiento codificadas en el "Backlink" hasta llegar al punto de destino. Utilizando el ejemplo propuesto se tiene:



5.5. Recomendaciones para el Proceso de Superposición de Mapas y Generación de Alternativas de Ruta

Al utilizar las herramientas planteadas, es necesario tener algunas recomendaciones en cuenta:

- Al definir los valores numéricos de las áreas que componen un mapa temático se debe pensar en valores ascendentes, expresando los mapas en función de la criticidad ambiental. Así, el valor mínimo significa un área de poca criticidad ambiental, y el valor máximo una de alta. Esto posibilita la equivalencia entre criticidad ambiental y mínimo costo de viaje a la hora de decidir la ruta de mínimo impacto ambiental.
- Es conveniente que los mapas temáticos sociales y económicos, debido a su dinamismo espacial, sean construidos de tal manera que se presenten zonas de transición entre dos áreas de diferente valor de criticidad ambiental. De esta manera se da una representación más aproximada a la realidad de la temática. En otras palabras, no es conveniente que al cruzar límites geográficos, por ejemplo municipales, la criticidad social - o cualquiera otra- cambie abruptamente, pues el resultado final de esta situación es que el trazado óptimo se desarrolla siguiendo los límites municipales, lo cual no tiene sentido.
- Para el desarrollo de los diferentes mapas temáticos en niveles intermedios del análisis, es conveniente utilizar la superposición por índices. Las áreas definidas como zonas de alta sensibilidad ambiental deben ser manejadas como zonas restringidas, de tal manera que el trazado del corredor no pase por ellas. Para hacerlo, se evita la inclusión de estas áreas dentro de los cálculos en niveles intermedios del análisis. Sólo deben ser incluidas en el último nivel, en donde su inclusión se realice utilizando la lógica booleana, de tal manera que respete su característica de zona restringida.
- Respecto al manejo numérico de los mapas, se recomienda:
 - Trabajar con variables cuyo límite inferior sea 0 y límite superior 1.
 - Es conveniente que los pesos asignados a las variables indiquen un porcentaje frente a la unidad, es decir, que su suma sea 1. Con esto se garantiza que los mapas resultantes mantengan el mismo rango de valores de 0 a 1.
 - Antes de comenzar los análisis se debe determinar cuántos niveles de sensibilidad se utilizarán en el estudio y los colores asociados, estableciendo límites numéricos inferior y superior, siempre en rangos de valores que varíen entre 0 y 1.
- Desarrollar un mapa temático que represente los costos técnicos de construcción y operación, expresados en términos de costo por distancia (US\$/Km). Una vez desarrollado este mapa, se puede realizar un «Mapa Síntesis Técnico - Ambiental» en el que se hayan agregado el mapa de sensibilidad ambiental y el de costos técnicos.

- Implementar el uso del método de la ruta de mínimo costo, para tomar la decisión de por dónde trazar un corredor que sea ambientalmente óptimo. Aplicar este método sobre el «Mapa Síntesis Técnico - Ambiental».
- Aplicar la ruta de mínimo costo en ambos sentidos, para garantizar que se eviten las zonas de alta sensibilidad. El corredor óptimo sería la franja entre ambas rutas (dos sentidos). Si se encuentra un sector de alta sensibilidad entre ellas, se escoge la más corta hasta que se pase el sector sensible.
- En todo tipo de estudio o trabajo de consultoría, es importante consignar detalladamente todo el proceso metodológico empleado, con el fin de mantener una trazabilidad completa del mismo y evitar errores, inconsistencias y vacíos metodológicos a la hora de reconstruirlo o analizarlo.

5.6. Determinación de Corredores para el Trazado de Proyectos

El empleo de la ruta de mínimo costo genera una única solución al problema, solución que, desde el punto de vista técnico, puede parecer demasiado rígida. Para manejar este problema se pueden generar corredores para el trazado de los proyectos.

Si se tienen dos puntos A y B, inicio y fin de la ruta propuesta, una manera relativamente sencilla de lograrlo es resolver la superficie de costo acumulado de acercarse hacia el punto A; de manera independiente, generar la superficie de costo acumulado de acercarse al punto B y sumar ambas superficies.

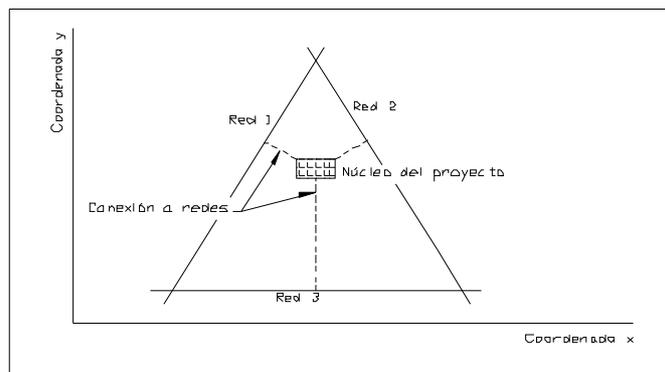
El resultado de esta operación es una superficie que tendrá la forma de un valle, con el río a lo largo de la línea de mínimo costo y unas laderas ascendentes en el sentido transversal. Si sobre esa superficie se dibujan curvas de nivel, lo que aparecerá es una serie de corredores, de sobrecostos crecientes conforme se alejan de la ruta de mínimo costo.

Esto permite a los diseñadores tener una serie de corredores, de amplitud creciente, dentro de los cuales se pueden lograr otros requerimientos de carácter técnico -por ejemplo ángulos máximos en cada vértice de una línea de transmisión-, sin sobrepasar un porcentaje predefinido de sobrecosto por encima del mínimo posible.

5.7. Localización de Proyectos Interconectados¹¹

Se entiende por proyectos interconectados, aquellos que para su funcionamiento necesitan conexión con elementos de infraestructura preexistente o proyectada. Estos proyectos están constituidos por un núcleo central y por unas redes de conexión a la infraestructura. Dentro de estos proyectos, pueden mencionarse las subestaciones y las centrales térmicas. (ISAGEN, 1996)

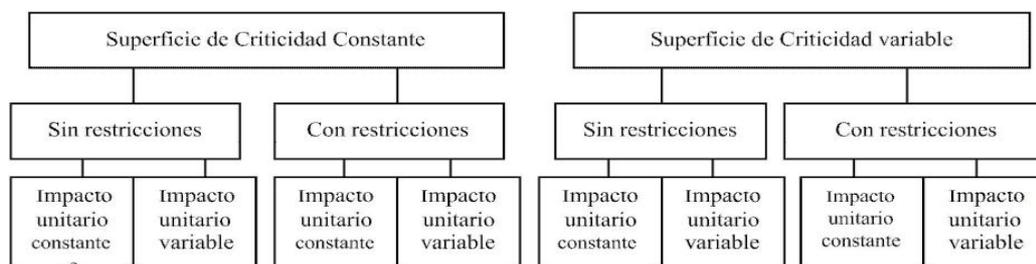
11. El material de este numeral había sido presentado previamente en Villegas, 2000.



Proyecto interconectado

La finalidad del análisis es encontrar un punto con el mínimo costo de implantación, -definido como la suma del costo¹² de localización del núcleo del proyecto, más los costos de conexión. La zona objeto de análisis es aquella que queda enmarcada dentro de las redes a las cuales se desea conectar el núcleo del proyecto, y se constituye como la zona probable para la localización del mismo.

Para el desarrollo del análisis se tienen en cuenta diferentes situaciones posibles en la zona de estudio, estas situaciones se definen en función de la criticidad de la zona de análisis, de la existencia de restricciones en la zona, y de si los impactos por la construcción de las redes de conexión son constantes o variables.



Casos de estudio para localización de proyectos interconectados

• **Superficie de criticidad constante, sin restricciones.**

La localización del proyecto en este caso se determina con base en el costo de conexión calculado como la sumatoria de los productos entre el impacto producido por una unidad de longitud de recta de conexión¹³ y la distancia del punto que se

12. Cabe anotar que el término costo, está asociado a los impactos y no a los costos como valoración económica del impacto ambiental, ni a los valores económicos resultantes de aplicar al impacto ambiental las técnicas normalmente utilizadas para costear externalidades; ni a costos de gestión ambiental asimilados como los costos de gestión en los que se incurre para el manejo del impacto

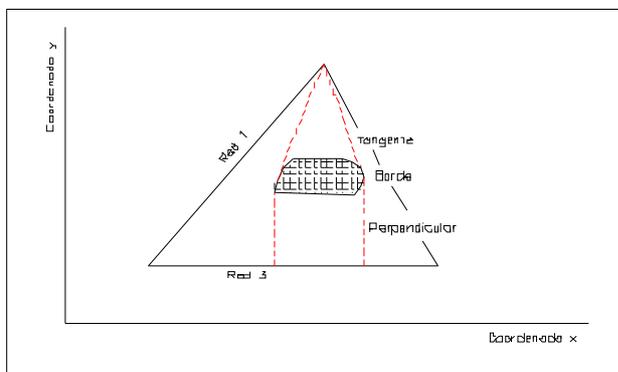
13. p.ej., el impacto producido por la construcción de un kilómetro de un gasoducto.

está analizando hasta cada una de las redes. Puede también analizarse haciendo uso de técnicas como programación lineal, en cuyo caso, la función objetivo es minimizar el costo de implantación del proyecto en la región.

En el caso que nos ocupa, el punto óptimo de implantación del proyecto, es aquel en el cual el costo de conexión tiene un valor mínimo; dado que el costo de localización del núcleo es constante gracias a que la superficie de criticidad es constante. Una vez realizado el análisis de optimización, se encuentra que el punto óptimo está en uno de los vértices del triángulo formado por las rectas de conexión.

- **Superficie de criticidad constante, con restricciones**

Con un análisis análogo al del caso anterior, podría pensarse que para esta situación, el punto óptimo se encuentra en uno de los vértices, pero en este caso no es posible hacer tal generalización, ya que la altura puede estar atravesando la restricción, situación que no es permitida. Cuando se presenta esta situación, se hace necesario la determinación de rutas alternativas para evitar el cruce por la restricción.

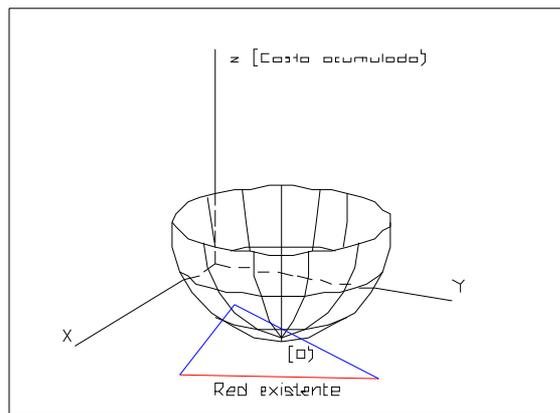


Rutas alternativas

Una vez establecidas las rutas alternativas, se comparan sus longitudes en el caso en el que el impacto unitario es constante; y en el caso en el que el impacto unitario es variable, se comparan los productos entre las longitudes de las rutas alternativas y el impacto unitario, para entre ellas seleccionar la menor

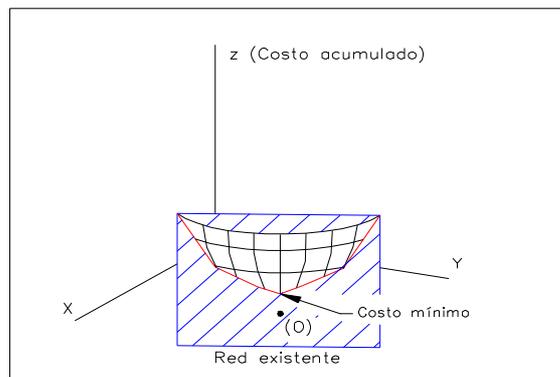
- **Superficie de criticidad variable, sin restricción**

Alrededor de cada uno de los puntos contenidos en el área delimitada por las tres redes, y utilizando la técnica de ruta del mínimo costo acumulado, se construye la superficie de costos acumulados por la construcción de cada una de las redes de conexión utilizando la superficie de criticidad de cada red. A continuación, se esquematiza la superficie de costos acumulados generados por la construcción de la conexión a la red que se muestra en color rojo; dicha superficie es construida alrededor del punto (O).



Superficie de costos acumulados alrededor del punto (O)

Para obtener el mínimo costo acumulado de conexión, partiendo de la superficie construida de costos acumulados, se proyecta sobre tal superficie, cada una de las redes a las cuales se debe conectar el proyecto. El punto mínimo de la curva que se obtiene de tal corte, representa el costo mínimo acumulado de conexión del punto (O) a esa red, tal como se muestra en la siguiente figura en el plano



Corte de superficie de costos acumulados

Una vez seleccionados los costos mínimos acumulados de conexión a cada red, se calcula el costo total de la conexión, como la sumatoria de dichos costos mínimos acumulados.

$$\text{costo}_{\text{conexión}} = \sum_{i=1}^3 z_i$$

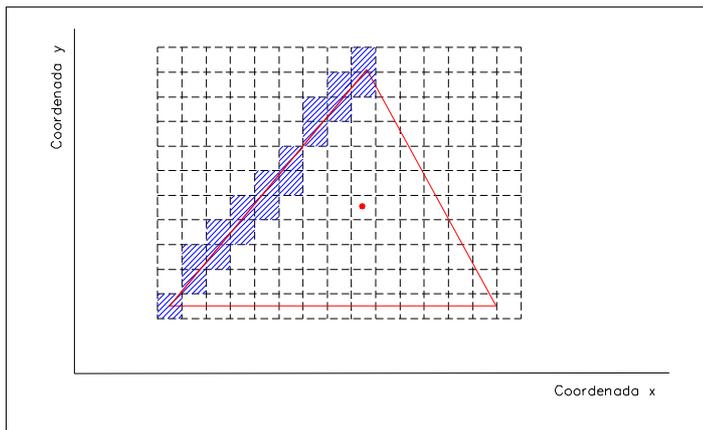
En este caso, a diferencia de los dos casos anteriores, y teniendo en cuenta que las superficies de criticidad son variables, es importante para determinar el costo total de localización del proyecto en el punto de coordenadas (x,y), evaluar el costo asociado con la construcción de las obras del núcleo del proyecto interconectado siendo entonces el costo total del proyecto, la suma del costo de conexión y el costo del núcleo del proyecto.

Dentro de las características de la superficie de costos acumulados, puede mencionarse que es una superficie cóncava hacia arriba dado que el valor del costo acumulado de conexión de un punto determinado, necesariamente crece al alejarse de él. Además dicha superficie, no es en general expresable de manera analítica puesto que su forma depende de las condiciones específicas de cada problema, lo que imposibilita su generalización.

Las características y condiciones descritas, hacen que matemáticamente sea imposible generalizar la ecuación de la curva resultante del corte y por tanto determinar analíticamente el valor del costo mínimo acumulado por la conexión a cada una de las rectas, lo que conduce a la necesidad de implementar un algoritmo para resolver el problema de manera numérica.

Dado que la realización del cálculo de costos presupone una malla de puntos a los cuales se les han asociado las características de criticidad, el análisis anterior ha de efectuarse sobre una superficie en la cual la información geográfica se ha discretizado en celdas.

En este caso, para la obtención del mínimo costo de conexión entre un punto y una red, es necesario establecer el costo de conexión entre este y cada uno de los puntos o celdas que están sobre la red, y que pertenecen a la malla de puntos. En la figura a continuación, las celdas con achurado son aquellas con las cuales debe evaluarse el costo de conexión del punto rojo.



Puntos de conexión sobre la red 1

Además de los costos de conexión, deben considerarse también, los costos asociados a la implantación del núcleo del proyecto en el punto de análisis.

$$\text{Costo implantación} = \text{costo núcleo del proyecto} + \text{costo conexión.}$$

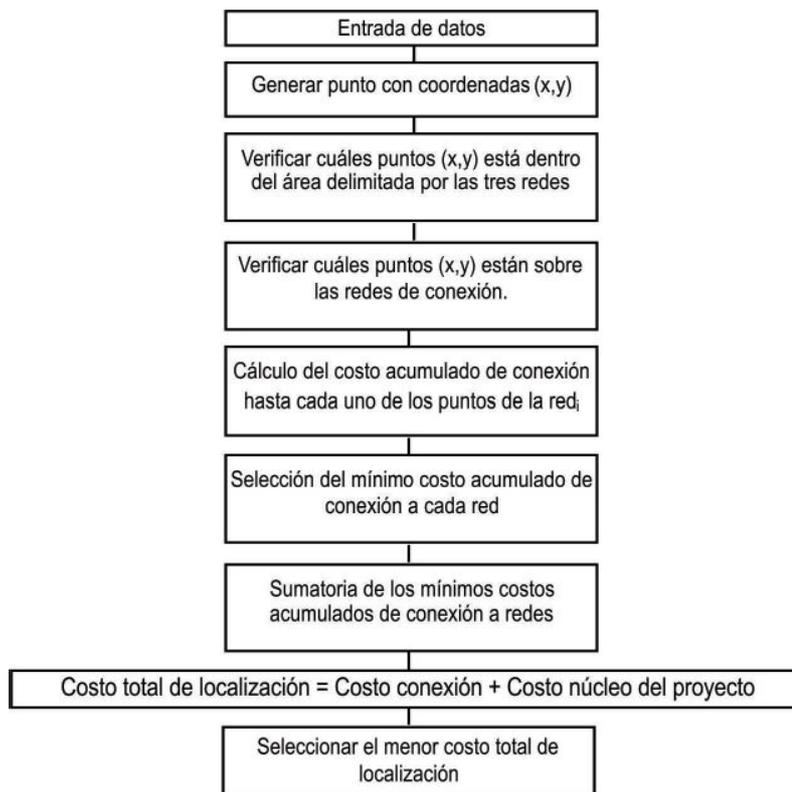
Lo anterior se realiza para todos los puntos de la malla; aquel que tenga el menor valor de costo de implantación, será el punto que implique menores costos ambientales para la realización del proyecto.

• **Superficie de criticidad variable, con restricción**

El análisis se desarrolla de manera similar al caso anterior, con la diferencia de que en este caso deben respetarse las restricciones, esto es, el núcleo del proyecto no debe estar localizado en la zona de restricción, y las redes de conexión a la infraestructura no la pueden atravesar. Para ello, pueden asignarse a las celdas que se encuentran sobre la restricción, valores de criticidad altos. Cuando a la zona de restricción se le asignan valores altos de criticidad, la ruta de mínimo costo acumulado evitará pasar por dicha zona. De igual manera, al tener grandes valores en su grado de criticidad, los puntos ubicados en las zonas de restricción, implican grandes costos en la localización del núcleo del proyecto, lo que hace que estos puntos no sean elegidos como puntos óptimos, conduciendo de esta forma a que se respeten las zonas de restricción.

• **Algoritmo para análisis con superficie de criticidad variable.**

Para el análisis de las situaciones para las cuales se tienen superficies de criticidad variables, se desarrolló un algoritmo que selecciona el punto óptimo de localización de proyectos interconectados; esto debido a que el análisis de tales casos tienen implícitos una gran cantidad de operaciones en el cálculo del mínimo costo acumulado de conexión, lo que haría bastante dispendioso la realización de dicho análisis manualmente. Un esquema general del algoritmo es el siguiente:



Esquema general del algoritmo

5.8. Relación entre los Equipos Técnico y Ambiental

La aplicación de las técnicas tradicionales de trazado de obras lineales lleva a una situación que podría ser descrita como:

- Determinación de una ruta óptima desde el punto de vista técnico (usualmente, formada por tramos de línea recta, por ser la ruta de menor costo).
- Evaluación ambiental de esa ruta frente a otras diseñadas con algo más de criterio ambiental y que por definición serán subóptimas desde el punto de vista económico.
- Necesidad de justificar fuertemente desde lo ambiental cualquier desviación de la ruta óptima técnica.

Sin embargo, la introducción de las técnicas presentadas en este capítulo, especialmente la de la ruta de mínimo costo ambiental, invierte en buena medida las posiciones, con lo cual el panorama será:

- Selección de una ruta óptima desde el punto de vista ambiental.
- Evaluación técnica de esta ruta, frente a otras diseñadas con criterios técnicos y que por definición serán subóptimas desde el punto de vista ambiental
- Necesidad de justificar desde lo técnico cualquier desviación de la ruta óptima ambiental.

Hay que hacer notar que si se diseñó con base en un mapa síntesis técnico-ambiental, esta situación no se da, pues se estará optimizando el agregado de las dos variables conjuntamente.

5.9. Ideas y Conceptos Claves

- Las alternativas para el proyecto terminan siendo alternativas de localización, por tanto el análisis es geográfico y la técnica a utilizar es la superposición de mapas.
- Sobre una cartografía común se elaboran mapas de criticidades temática, de acuerdo a las dimensiones analíticas.
- Restricción: Imposibilidad de realización del proyecto
- Criticidad: Mayor o menor grado de dificultad para la inserción del proyecto en su medio.
- Lógicas para el cruce de los mapas temáticos
 - Promedios ponderados: Combinación lineal, puede ocultar los sitios críticos.
 - Booleana: Selecciona el máximo nivel de criticidad. Tiende a ser pesimista.
- Ruta del menor costos acumulado. Similitud con el problema del viajero, implica una solución de atrás hacia adelante.
- Superficie de costos acumulados de viaje. Costo de viajar hasta una celda destino, siguiendo los caminos menos costosos posibles.
- "Backlink". Superficie que presenta las rutas de mínimo costo de viaje para todas las celdas bajo análisis.
- Recomendaciones para el proceso de superposición de mapas y generación de alternativas de ruta.
 - Valores de criticidad ascendente.
 - Criticidades sociales con transiciones suaves
 - Índices para niveles intermedios, booleana para las restricciones.
 - Trabajar en rangos acotados de cero a uno, los pesos deben también sumar uno.
 - Superficie de costos técnico/ambientales
- Localización de proyectos interconectados: Implica una doble optimización para minimizar el costo total del núcleo y sus conexiones.
- La realización de un proceso de selección de ruta para proyectos lineales, siguiendo el método de la ruta del menor costo, invierte la mayoría de los términos de la relación entre los equipos técnico y ambiental.

5.10. Ejercicios

1. Calcule la superficie de costo acumulada y el Backlink para llegar hasta la celda inferior derecha y señale cuál es la ruta de mínimo costo a partir de la celda superior izquierda. Cuánto es ese costo?

1	2	1	1
1.5	2	3	2
1.5	2.5	4	2.5
1	2	1	1

SUP. COSTOS

COSTOS ACUM.

BACKLINK

Convención

6	7	8
5	0	1
4	3	2

2. Elabore las superficies de criticidad ambiental:

- Criticidad física (*cf*):

$$f = \frac{1}{d+1}$$

Con *d*, distancia de la celda en cuestión a la celda superior izquierda, centro a centro.

- Criticidad biótica (*cb*):

$$b = 0.5 * x + 0.3 * y$$

Con *x*, distancia horizontal de la celda en cuestión a la celda superior izquierda, e *y*, distancia vertical (centro a centro)

- Criticidad social (*cs*):

1.8	1.5	1.2	1
1.5	1.2	1.0	0.9
1.5	1.1	0.8	0.5
1.0	0.7	0.6	0.4

Calcule la superficie de criticidad total mediante:

$$ct = 0.23cf + 0.35cb + 0.42cs$$

Calcule la superficie de costo acumulada para llegar a la celda superior izquierda y el Backlink asociado.

Señale cuál es la ruta de mínimo costo, iniciando el recorrido en la celda inferior derecha. Cuánto es ese costo?

SUP. COSTOS

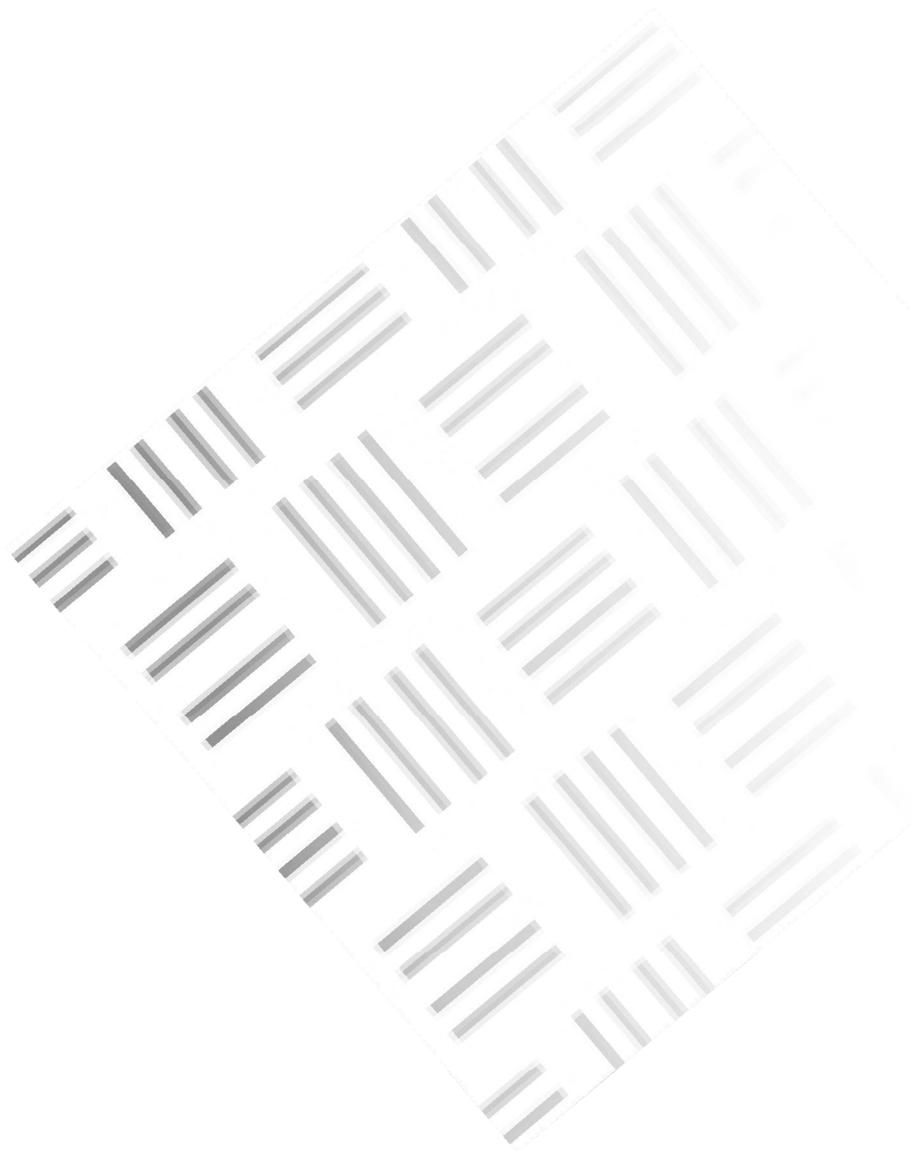
COSTOS ACUM.

BACKLINK

6	7	8
5	0	1
4	3	2

CAPITULO 6

TECNICAS PARA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS



*«Ricardo Reis tiene una curiosidad por satisfacer,
Quien nos mire, a quién ve, a usted o a mi,
Lo ve a usted, o mejor, ve una silueta que no es
ni usted ni yo, Una suma de nosotros dividida por dos»*

José Saramago. El año de la muerte de Ricardo Reis

6. TECNICAS PARA SELECCION DE ALTERNATIVAS

Es relativamente fácil tomar decisiones entre alternativas, por ejemplo financieras, en las que los diversos criterios que intervienen en la formación de la decisión pueden ser expresados en un sistema de medida común v.g. unidades monetarias. El problema se complica en el momento en que se debe decidir entre proyectos de desarrollo que afectan recursos físicos no negociables, causan deterioro sobre ecosistemas cuyo valor económico desconocemos y que están implantados en entornos de comunidades con sistemas de valores diferentes al nuestro.¹⁴

En este tipo de problemas es necesario proponer modelos que permitan tomar decisiones teniendo en cuenta "lo subjetivo", pues si la decisión es una confrontación de juicios de valor, por su misma naturaleza, estamos tomando una decisión subjetiva.

Un camino a seguir es entonces, fijar los juicios de valor, cuantificándolos en un sistema de preferencias, expresado como un conjunto de relaciones matemáticas, al que se puede llegar por consenso entre los decisores. En este contexto es vital poder expresar los juicios de valor lo más claramente posible para poder reducir al sistema de relaciones, todas las percepciones involucradas en la toma de la decisión

La técnica conocida como análisis multiobjetivo (A.M.O.) permite el manejo de decisiones muy complejas, con gran número de criterios independientes y frecuentemente en clara contraposición unos con otros. Esta técnica permite la asignación de índices calculados a partir de la magnitud de cada impacto considerado. Estos índices pueden ser evaluados y llevados a expresar la "gravedad" del impacto. Finalmente estos índices pueden ser agregados pesando la gravedad de cada impacto por un factor que mide la "importancia" de ese impacto frente a la evaluación total. Estos pesos constituyen lo que se llama la estructura de preferencias del decisor.

El análisis multiobjetivo ha sido ampliamente usado como metodología para

14. Los cuatro primeros párrafos del capítulo son tomados casi textualmente de Angel et al, 1996

incorporar la TDA en proyectos de desarrollo, particularmente, desarrollos hidráulicos. (Goicoechea et al, 1982; Fontane et al, 1997; Smith, Poveda et al, 1992). Si bien el análisis multiobjetivo es una técnica de optimización, se presenta aparte, por la gran importancia que ha mostrado tener en la toma de decisiones ambientales.

Hasta tanto la naciente disciplina de la economía ambiental desarrolle herramientas de uso universal para la valoración económica del patrimonio ambiental y de los impactos ambientales asociados a los proyectos de desarrollo, parece inevitable que el planeamiento del desarrollo sostenible es un problema de decisiones multiobjetivo.

6.1. Problema General del Análisis Multiobjetivo

En el fondo de la técnica de análisis multiobjetivo se encuentra el reconocimiento de que en algunos problemas de planificación y de escogencia entre alternativas, no se cuenta con una única regla de decisión, si no que estas pueden ser varias y con frecuencia contradictorias. Un ejemplo ayudará a comprender este punto. Si se está seleccionando un automóvil, el objetivo principal puede ser minimizar el costo, suponiendo que se cumplen ciertas especificaciones en cuanto a seguridad y funcionalidad. Ese es un problema fácil de resolver.

Si además se tienen en cuenta los costos de mantenimiento del automóvil, se pueden calcular las anualidades o el valor presente de un uso esperado, - v.g. recorrido promedio diario - y adicionarlo al costo de compra del vehículo. Aunque un poco más complejo que el anterior, este también es un ejercicio sencillo y su resolución depende del hecho de que se puede construir una función de intercambio entre los objetivos de minimizar costos de mantenimiento y de minimizar costos de compra.

Un tercer ejercicio que incluya además de los dos anteriores, el requerimiento de que el carro sea de color oscuro, dado que su futuro propietario lo considera más estético, nos lanza a una perspectiva diferente pues no se sabe cuanto de los objetivos anteriores (costo), se está dispuesto a sacrificar por obtener una unidad extra de este nuevo objetivo (color).

Para el manejo de este tipo de dificultad, el AMO plantea la construcción de reglas de decisión que involucran explícitamente y de manera matemática la estructura de preferencias del decisor.

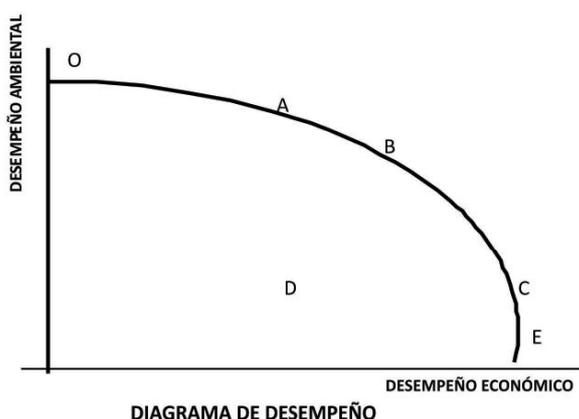
6.2. El Diagrama de Desempeño

El diagrama de desempeño presenta de manera gráfica, el cumplimiento de cada uno de los objetivos para cada una de las alternativas de decisión bajo consideración.

Para nuestro caso, el diagrama será bidimensional, considerando los objetivos de

desempeño económico y desempeño ambiental en los ejes X e Y respectivamente. La curva OABCE representa el conjunto de soluciones no dominadas, pues de ninguna de ellas se puede afirmar que sea igual o esté dominada por otra en todos los objetivos simultáneamente. Soluciones tales como la representada por el punto D, claramente están dominadas tanto por la solución A, que muestra igual desempeño económico, pero mejor en el ambiental, como por C, que presenta la situación contraria.

La curva OABCE significa una frontera tecnológica, u óptimo tecnológico, para un cierto tipo de actividad económica, en el sentido de que reúne los puntos de máximo desempeño ambiental que es posible obtener, dado un nivel predeterminado de desempeño económico. Si esta curva no existiera, se podría pensar que todas las actividades económicas pueden desarrollarse con impacto



Una multitud de técnicas puede ser utilizada para resolver el problema multiobjetivo, Estas, pueden agruparse de varias maneras, dependiendo básicamente de tres criterios: (Goicoechea et al, 1982; Smith, Poveda et al, 1992).

- Si sirven para generar el conjunto de soluciones no dominadas, o si realizan un ordenamiento al interior de este conjunto.
- Si trabajan sobre variables discretas o continuas
- La manera como articulan la estructura de preferencias del decisor.

6.3. Planteamiento de una Metodología para Evaluación Ambiental de Proyectos de Desarrollo¹⁴

Se presenta la estructura de una metodología general para la evaluación ambiental de proyectos de desarrollo. El esquema metodológico es lo suficientemente flexible para que pueda ser adaptado a diferentes tipos de proyectos.

Se utiliza en este caso una técnica conocida como promedios ponderados, que tiene a su favor el hecho de su relativa sencillez y facilidad de implementación; tal

14. Parte del material presentado en este numeral es tomado de "Metodología para la evaluación ambiental del Plan de Expansión del Sector Eléctrico Colombiano" ISA, 1991

como se mencionó en el numeral referente a lógicas de cruce para la superposición de mapas, esta técnica presenta desventajas relacionadas con el hecho de que la evaluación ambiental final de cada alternativa es un promedio ponderado de las evaluaciones de cada uno de los impactos que están siendo considerados, por tanto, se puede presentar el caso en que una alternativa con una evaluación muy negativa para un impacto específico, se vea mejorada al promediar esta evaluación con las de otros impactos en los cuales la alternativa presenta un mejor desempeño; esto llevaría a enmascarar la alternativa, presentándola como de un desempeño promedio con respecto a la totalidad de los impactos.

Para realizar una tarea que es tanto metodológicamente compleja, como demandante en cuanto a la cantidad de información requerida, es conveniente definir varios niveles de agregación para clarificar el proceso evaluativo.

Para efectos de claridad se presentará el desarrollo de un ejemplo sencillo, de manera paralela.

- **Objetivo**

En general un objetivo expresa algo deseable, está constituido por dos elementos, el objeto en sí mismo y una regla de decisión sobre él.

Los objetivos se establecen pretendiendo que ellos sinteticen todos los impactos relevantes asociados a los proyectos de desarrollo de interés, cada uno de ellos debe corresponder a una dimensión o aspecto básico de la relación proyecto-ambiente.

La regla de decisión indica la dirección de la optimización, indica el sentido de lo «deseable», minimizar o maximizar. En el caso de múltiples objetivos, el «satisfactum» implica valores aceptables para todos los objetivos. La búsqueda de un conjunto de soluciones no dominadas (óptimo de Pareto o solución eficiente), es un paso previo a la aplicación de las técnicas de análisis multiobjetivo cuando la dimensionalidad del problema es grande.

En nuestro ejemplo supongamos que queremos evaluar proyectos viales en una zona boscosa y que tenemos dos objetivos, minimizar el impacto sobre el medio físico y minimizar el impacto sobre el medio biótico.

- **Criterios**

Son los elementos con los cuales se construye un objetivo, siendo cada criterio una contribución a aquel. Cada criterio se selecciona con la finalidad de evaluar un impacto ambiental específico. Al plantear los criterios se debe tener presente la necesidad de evitar la duplicidad para no efectuar dobles contabilizaciones. En algunos casos ésta situación puede presentarse pero siempre respondiendo a una intención consciente del analista de asignar mayor importancia a un impacto determinado en la conformación del objetivo, a su vez el decisor debe contar, al asignar su escala de preferencias, con información suficiente sobre este hecho.

En el ejemplo, el primer objetivo, está formado por un único criterio, cruce por zonas de alta pendiente y el segundo objetivo está conformado por dos criterios,

tala de bosque y afectación de humedales.

- **Indicadores**

Son instrumentos de medición de un impacto. Se construyen a partir de un cruce adecuado de las variables asociadas al impacto, buscando aprehender en forma clara y sencilla la magnitud de este. La obtención de los indicadores puede ser analítica, cuando las variables son cuantificables numéricamente y la información está disponible. Puede también ser cualitativa cuando las variables son no cuantificables numéricamente o la información no está disponible. En cualquiera de los casos la construcción de los indicadores está sujeta al conocimiento que se tiene de la región, del proyecto y de la relación entre ambos expresada en los estudios correspondientes.

Cada indicador está asociado a un criterio (impacto); de tal manera que el indicador se constituye en el evaluador del criterio. Escoger un indicador es seleccionar una manera específica de evaluarlo, descartando otras alternativas. Sobre mencionar cómo en algunos aspectos sociales la dificultad para la construcción de indicadores cualitativos es una consecuencia de la complejidad del objeto de estudio y no es ocasionada por escasez de información o por bajo desarrollo de la disciplina.

Para nuestro ejemplo, los indicadores pueden ser, longitud de carretera que cruza por zonas de alta pendiente, índice de afectación del bosque e índice de afectación de humedales.

- **Variables**

Cada variable es un atributo mensurable ya sea en forma cualitativa o cuantitativa, un elemento que permite establecer el seguimiento confiable de la evolución de un comportamiento, de un sistema o de una relación. Las variables se toman del análisis, del estudio, de la observación directa, de la medición o del diálogo con la comunidad.

En el ejemplo, la variable asociada al primer indicador sería la longitud de carretera, en Km., que cruza zonas de alta pendiente, para el segundo indicador serían las áreas respectivas de bosques primarios y secundarios y para el tercero, sería el área de humedales afectados, todas ellas expresadas en hectáreas [Ha].

6.3.1. Procedimiento

El procedimiento a seguir consiste en ir realizando evaluaciones incrementales desde las variables, insumo básico del problema, hasta la evaluación ambiental del proyecto.

- **Evaluación de indicadores para cada proyecto.**

Consiste en el cruce lógico, adecuado de variables para el comportamiento ambiental que se desea indicar. Se construyen para cada proyecto ya sea en

forma cualitativa o cuantitativa.

En el ejemplo, para el indicador de cruce de zonas de alta pendiente, el valor del indicador sería el mismo de la variable. El segundo, índice de afectación del bosque (iab) se evaluaría de acuerdo con:

$$iab = w_{abp} * abp + w_{abs} * abs$$

Donde abp y abs representan las áreas del bosque primario y secundario afectados y w_{abp} , w_{abs} representan la importancia relativa de cada estado sucesional. El tercer indicador sería igual a la variable área de humedales afectada.

- **Evaluación de criterios para cada proyecto**

Los indicadores cualitativos se encuentran en una escala de valores numéricos entre cero y uno, luego sobre ellos se puede entrar directamente a efectuar la agregación usando los pesos de cada criterio. Los indicadores que tienen un significado físico se evalúan aplicando una «función de impacto ambiental». Estas funciones se presentan en detalle en el numeral siguiente.

- **Evaluación de objetivos por proyecto**

Una vez se tienen los criterios para cada uno de los proyectos se ejecuta un proceso de agregación efectuando la sumatoria de los productos de cada criterio por el peso relativo de ese criterio dentro de su objetivo respectivo. En el caso del ejemplo, el objetivo primero, es igual al indicador de cruce por zonas de alta pendiente, pues es el único dentro del objetivo. A diferencia de este, el segundo objetivo implica la agregación de dos criterios, ponderándolos por sus respectivos niveles de importancia, a través de:

$$obj_2 = w_{21} * crit_1 + w_{22} * crit_2$$

- **Evaluación final**

En este paso como en el anterior se realiza una agregación usando pesos relativos (estructura de preferencia), en este caso los pesos de los objetivos en la conformación de la evaluación final. La evaluación final es un único calificador que permite ordenar los proyectos desde el de menor valor (mejor desde el punto de vista ambiental) hasta el de mayor valor (peor ambientalmente).

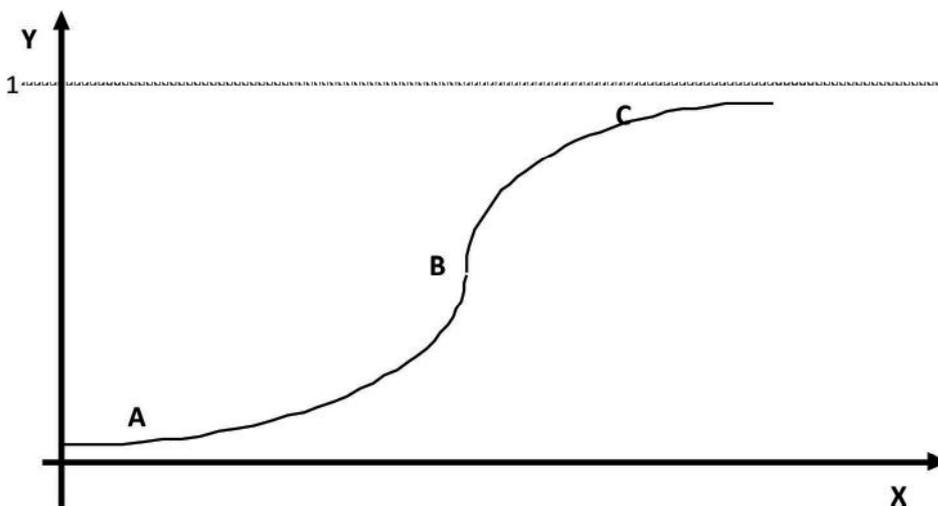
$$evaluac = w_1 * obj_1 + w_2 * obj_2$$

6.3.2. Funciones de impacto ambiental

Las funciones de impacto ambiental son funciones de valor que permiten adjudicarle un índice (Y) de gravedad a un impacto ambiental, como función del indicador que determina la magnitud (X) del impacto causado, es decir, son funciones que expresan de manera matemática, los juicios de valor del decisor en cuanto a su evaluación de los impactos ambientales. Poseen las siguientes características:

- Su dominio es $[0, \infty]$ luego, no están limitadas a un cierto tamaño del impacto.
- Son funciones continuas y por tanto no hacen necesaria la división de los impactos en «rangos» o «categorías» sino que permiten la evaluación, sea cual sea el tamaño del impacto.
- Su rango es $[0, 1]$ lo que unifica la escala de evaluación para todos los criterios y por tanto al otorgarle peso a cada uno de ellos, este peso reflejar la importancia relativa del criterio frente a los demás y está libre de influencias de escala.

Existen varias posibles formas para las funciones de impacto ambiental: lineales, exponenciales asintóticas al valor de uno, dobles exponenciales, etc. La forma general que parece recoger lo mejor de las demás es la doble curva exponencial, tal forma incluye una primera parte propensa a aceptar el tamaño del impacto, es decir, en ella el decisor acepta fácilmente que la magnitud del impacto crezca, mientras que la segunda, parte de la función es aversa al tamaño del impacto, reflejando las preferencias de los decisores, y de alguna manera, anticipando el



Este tipo de curva queda unívocamente determinada por tres pares de coordenadas. La filosofía para la localización de estos tres puntos se basa en la escogencia de un punto (A) con bajo impacto (X) y bajo índice (Y), tal que por debajo de él, el impacto es aceptable y se puede manejar. Un segundo punto (B) con impacto e índice medios indica una situación para la cual el tamaño del impacto ya implica que el índice debe estar a medio camino entre «aceptable» y «no deseable».

El tercer punto con valores altos en ambos ejes (C) denota la situación a partir de la cual el impacto es considerado no deseable, de ahí en adelante la curva se aproxima asintóticamente a uno que es el máximo valor posible para el criterio y que indicaría la menor propensión a aceptar tal tamaño de impacto

En el ejemplo, las funciones podrían ser curvas exponenciales dobles así:

FUNCIÓN	CRITERIO	Punto A		Punto B		Punto C	
f1	Cruce por zonas de alta pendiente	2	0.05	5	0.5	10	0.9
f2	Índice de afectación de bosques	15	0.05	30	0.5	60	0.9
f3	Índice de afectación de humedales	0.5	0.05	2	0.5	5	0.9

• **Aproximación mediante lógica difusa**

Se puede plantear una aproximación completamente diferente a la construcción de las funciones de valor (Owen et al, 1997), utilizando lógica difusa, disciplina introducida por Zadeh (1965).

Un conjunto claramente definido (crisp) es aquel en el cual se puede clasificar claramente si los elementos pertenecen o no al conjunto. En cambio, un conjunto difuso A_0 es aquel en el cual no se puede llegar a tal clasificación de manera clara y es necesario crear una función de pertenencia $m_0(x)$ cuyo dominio son todas las posibilidades que pueden tener los elementos en cuestión y cuyo rango es $(0,1)$ donde el valor de cero indica total no-pertenencia y el valor de uno, total pertenencia. Estos valores límites de 0 y 1 son los propios de los conjuntos claramente definidos.

Los diferentes grados de pertenencia de una política de operación al conjunto de las políticas que satisfacen un objetivo, pueden ser interpretadas como los grados de satisfacción de ese objetivo que proporciona esa política. (Klir y Yuan, 1995), (Pedrycz, 1993).

Aunque basadas en dos fundamentaciones diferentes, en la práctica esto es equivalente a las funciones de valor, haciendo la analogía función de valor - función de pertenencia, con la diferencia en la lógica de cruce, pues las funciones de valor se pueden agregar mediante funciones aditivas o multiplicativas, mientras que las de pertenencia se agregan siguiendo una lógica de tipo booleano. (Owen et al, 1997; Fontane et al, 1997)

• **Resumen del ejemplo**

Reuniendo todos los elementos del ejemplo se tiene:

Objetivo	Peso	Criterios	Peso	Función impacto	Indicador	Variable	Peso
Minimizar impacto medio físico	W_1	Cruce por zonas de alta pendiente	1	f1	Longitud de carretera que cruza por zonas de alta pendiente	Longitud de carretera que cruza por zonas de alta pendiente	
Minimizar impacto medio biótico	W_2	Tala de bosque	W_{21}	f2	Índice de afectación del bosque	Área de bosque primario (abp)	W_{abp}
		Afectación de humedales	W_{22}	f3	Índice de afectación de humedales	Área de bosque secundario (abs) Área de humedales afectada	W_{abs}

6.4. Estudio de Caso: Evaluación Ambiental del Plan de Expansión SEC¹⁶

La evaluación ambiental del Plan de Expansión surgió en 1991 ante la necesidad de involucrar consideraciones ambientales en el proceso de planeamiento de la expansión del Sector Eléctrico colombiano (SEC). Si bien el actual esquema de planeación indicativa hace que ningún agente público ni privado del sector energético tenga como atribución realizar una evaluación ambiental al nivel de la canasta de energéticos del país, ni al del catálogo de proyectos para la expansión, sería muy conveniente que algún agente del sector ambiental tal como el Ministerio del Medio Ambiente, realizara tal tipo de evaluación, para dar señales desde etapas muy tempranas de la planeación en el sentido de indicar composiciones de la canasta o proyectos del catálogo que deban tener un tratamiento especial, por su considerable complejidad ambiental.

La metodología que se presenta fue diseñada por un equipo de profesionales de las áreas de ingeniería, físicas, biológicas y sociales, con el objetivo de calificar los impactos ambientales producidos por los proyectos de generación eléctrica y hacer comparables estos proyectos entre sí desde el punto de vista de sus impactos. (ISA, 1991; Angel y Jurado, 1992).

• Objetivos y criterios considerados

Los objetivos y criterios se seleccionaron con el ánimo de cubrir todos los posibles impactos de una central, sea hidráulica o térmica, su estructura es:

Objetivo 1: Minimizar el impacto sobre el medio físico:

- Estabilidad de la zona del proyecto
- Incremento de caudal en el cauce receptor
- Reducción de caudal
- Calidad del agua
- Calidad del aire

Objetivo 2: Minimizar el impacto sobre el medio biótico

- Biota de ecosistemas terrestres
- Biota de ecosistemas acuáticos
- Biota de otros ecosistemas

Objetivo 3: Minimizar desalojo de población

- Población desplazada

Objetivo 4: Minimizar costos regionales

- Area requerida
- Producción perdida
- Pérdida de patrimonio histórico
- Deterioro del ordenamiento regional

16. El contenido de este numeral proviene de ISA, 1991,

- Trauma social
- Empleo desplazado
- Potencialización de conflictos

Objetivo 5: Maximizar beneficios regionales

- Mejora en la red física de comunicaciones
- Otros beneficios del aprovechamiento diferentes al de energía
- Mejora en la electrificación rural
- Mejora en la disponibilidad para la inversión social
- Otras partidas de ley 56
- Generación de empleo en la región

Las funciones de impacto ambiental fueron construidas por el equipo interdisciplinario con base en información tanto de centrales en operación, como de proyectos en etapas de prefactibilidad y factibilidad, intentando cubrir el universo posible de tamaños de los impactos. (GIASE, 1990; ISA, 1988).

• **Determinación de la estructura de preferencias**

El equipo que desarrolla un análisis multiobjetivo llega al punto en que es necesario determinar las ponderaciones o pesos que se van a usar en la metodología, se enfrenta al problema de decidir si el consenso se debe realizar alrededor de los valores mismos de la ponderación o de un conjunto de reglas que alimentadas con las opiniones de los decisores produzcan los valores.

Entre estas dos posiciones extremas, hay todo un espectro de posibilidades en cuanto al método para lograr la concertación. Al interior del equipo ecológico se utilizó un método de definición de reglas para acordar los pesos de los diversos criterios que conforman el objetivo número uno. En primera instancia se realizaron encuestas entre los profesionales del equipo en las que se calificaban algunos de los atributos de cada criterio, tales como duración, posibilidad de ocurrencia, mitigabilidad e impactos asociados. Con base en la encuesta se llegó a un acuerdo acerca de estos atributos para cada criterio y se determinó una escala numérica para evaluarlos. Usando esta escala se encontraron las ponderaciones para cada criterio.

Un enfoque diferente se utilizó para unificar la propuesta de ponderaciones que presentaría ISA ante otras empresas del Sector Eléctrico. Los profesionales de las áreas ecológica y socioeconómica elaboraron propuestas separadas para los pesos de todos los objetivos, esas propuestas fueron cotejadas y se encontraron diferencias sustanciales entre ellas, se optó entonces por llegar a un acuerdo sobre la base de discusiones conceptuales.

La determinación final de los pesos tanto de objetivos como de criterios realizada por los grupos Socioeconómico y Ecológico del Comité Ambiental del Sector Eléctrico Colombiano - CASEC, dado el gran número de decisores y la restricción del tiempo disponible, se realizó utilizando el promedio matemático, este promedio se realizó previa exposición de cada decisor sustentando sus puntos de vista. Los valores así acordados son la materialización de los juicios de valor que se tienen

en el Sector Eléctrico sobre la importancia de cada uno de los objetivos.

OBJETIVO	PONDERACION
Minimizar impacto sobre el medio físico	20.42 %
Minimizar impacto sobre el medio biótico	22.68 %
Minimizar desplazamiento de población	20.88 %
Minimizar costos regionales	18.50 %
Maximizar beneficios regionales	17.50 %

• **Validación de la metodología**

Se realizó un ejercicio de validación de la metodología para probarla desde los puntos de vista conceptual y operativo y para cotejar sus resultados con la percepción de la gravedad de la problemática ambiental que se tiene para varios proyectos en operación que pertenecen al Sistema Interconectado.

Se seleccionaron cinco centrales en operación en Colombia, cuatro hidroeléctricas y una térmica: Jaguas, Chivor, Betania, San Carlos y Termotasajero I. Se escogieron básicamente por cubrir un amplio rango de capacidades instaladas e impactos asociados y por brindar una buena cobertura de distintos ámbitos geográficos. La información base para la validación fue suministrada por las Empresas propietarias de las centrales. Una vez refinada la información, se aplicó la metodología y se obtuvieron los valores de los objetivos y de la evaluación ambiental para cada una de ellas que se presentan a continuación:

Objetivo	JAGUA	S.CARLOS	CHIVOR	TASAJERO	BETANIA
Imp.medio físico	0.281	0.116	0.286	0.246	0.099.
Imp.medio biótico	0.207	0.131	0.119	0.076	0.453
Desplaz.población	0.173	0.212	0.332	0.073	0.114
Costos regionales	0.473	0.380	0.629	0.099	0.574
Benefic.regionales	0.187	0.405	0.278	0.330	0.324
Evaluación ambiental	0.195	0.097	0.223	0.044	0.196

Los resultados concuerdan ampliamente con la percepción que se tiene de la complejidad ambiental de los proyectos.

6.5. Análisis de Sensibilidad

Una vez se obtienen los resultados de la evaluación, surge de inmediato la pregunta de si se habrían obtenido los mismos resultados en caso de que las ponderaciones hubieran sido diferentes.

Supongamos una evaluación en la que se tienen tres objetivos denominados O_1 , O_2 y O_3 . Para resolver la pregunta es necesario realizar un análisis de sensibilidad. En nuestro caso, dado que la suma de los pesos otorgados a los objetivos debe ser uno, al asignarle pesos a los objetivos 1 y 2, el peso del objetivo 3 queda unívocamente determinado, por lo tanto sólo hay dos variables libres y el problema puede representarse bidimensionalmente en un diagrama.

El análisis consiste en estimar el ordenamiento de los proyectos, al ser evaluados teniendo en cuenta ponderaciones diferentes permitiendo que los pesos asignados a cada objetivo varíen en un entorno cercano, alrededor de los valores seleccionados para los objetivos.

Para efectos didácticos de apreciar la variación de ordenamientos, el análisis se hace desde el mínimo valor posible, cero, hasta el máximo posible, uno. Sin embargo se advierte que en situaciones reales el análisis se reduce a una variación razonable alrededor de los valores iniciales dados por el decisor.

Como ejemplo, se presenta el resultado del análisis para el ordenamiento ambiental, de acuerdo a una evaluación por promedios ponderados, de tres proyectos, cuyos valores de cumplimiento de objetivos son:

	A	B	C
O1	0.2	0.5	0.3
O2	0.1	0.2	0.4
O3	0.7	0.4	0.3

Se barre todo el espacio de análisis en ambas direcciones, es decir, dejando el valor del primer objetivo fijo, se va variando el valor del segundo objetivo y se sabe que el valor del tercer objetivo es la suma de los anteriores restada de uno. Se realizan los promedios ponderados para esa combinación de pasos de los objetivos y se ordenan los proyectos de mejor (menor valor de evaluación) a peor (mayor valor de evaluación).

A cada ordenamiento resultante diferente, se le asigna un código. En la tabla a continuación se observan los resultados del ejemplo. En el punto de cruce de los valores para los pesos de los objetivos 1 (dirección vertical) y 2 (dirección horizontal), se encuentra el código que corresponde al ordenamiento de los proyectos para esa combinación de pesos. El significado de los códigos de ordenamiento se muestra a continuación del análisis de sensibilidad. Por ejemplo, para un valor de 0.2 para el objetivo 1 (dirección vertical) y 0.4 para el objetivo 2 (dirección horizontal), y por tanto 0.4 para el objetivo 3, el ordenamiento que se obtiene es el 6 tal como se lee en la tabla siguiente, el significado de este ordenamiento es que los proyectos en orden de impacto ambiental son 3-2-1.

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	6	6	6	6	3	3	4	4	1	1	1
0,1	6	6	6	6	3	3	1	1	1	1	
0,2	6	6	6	6	6	1	1	1	1		
0,3	6	6	6	6	2	1	1	1			
0,4	6	6	5	2	2	1	1				
0,5	6	5	5	2	2	2					
0,6	5	5	2	2	2						
0,7	5	2	2	2							
0,8	5	2	2								
0,9	2	2									
1	2										

Código	Ordenamiento
1	1-2-3
2	1-3-2
3	2-3-1
4	2-1-3
5	3-1-2
6	3-2-1

Este tipo de análisis puede llevar a concluir si la evaluación es robusta, caso en el cual el ordenamiento de los proyectos no cambia dentro de un rango factible de variación de las ponderaciones asignadas a los objetivos, o solo se presentan variaciones entre los proyectos que no están siendo elegidos para construcción; también puede llevar a concluir que la evaluación no es robusta, caso en el cual sí se presentan cambios de ordenamiento entre los proyectos que están siendo seleccionados para construcción y por tanto, es necesario incluir criterios adicionales o profundizar la evaluación de algún otro modo.

Por ejemplo, si los pesos definidos por los decisores hubiesen sido $w_1=0.3$, $w_2=0.4$ y por tanto, $w_3=0.4$, se tendría la situación que se observa en el diagrama: el ordenamiento seleccionado sería el 2, es decir, el orden de elegibilidad de los proyectos sería 1-3-2. Si nos movemos un intervalo de 0.1 en todas las direcciones, hasta abarcar la totalidad del área sombreada, se observa que de los ocho nuevos posibles ordenamientos presentes en el área, dos son iguales al seleccionado, otros tres responden al código 1, con un orden de elegibilidad 1-2-3 en el que el proyecto seleccionado sigue siendo el número 1. Sin embargo, otros tres ordenamientos corresponden al código 6, cuyo orden de elegibilidad es 3-2-1, es este caso el proyecto elegido sería el 3, lo que produce un resultado diferente, en tanto difiere la decisión a tomar. Puede afirmarse, por tanto, que la decisión es poco robusta y que el decisor debe allegar mejor información o hacer uso de criterios de decisión adicionales.

6.6. Entrevistas para el Análisis de Decisiones

Mattunen y Hämäläinen (1995) presentan un procedimiento que permite acercar los decisores al análisis multiobjetivo, logrando que se familiaricen con el método de solución y que se comprometan con las ponderaciones que han expresado.

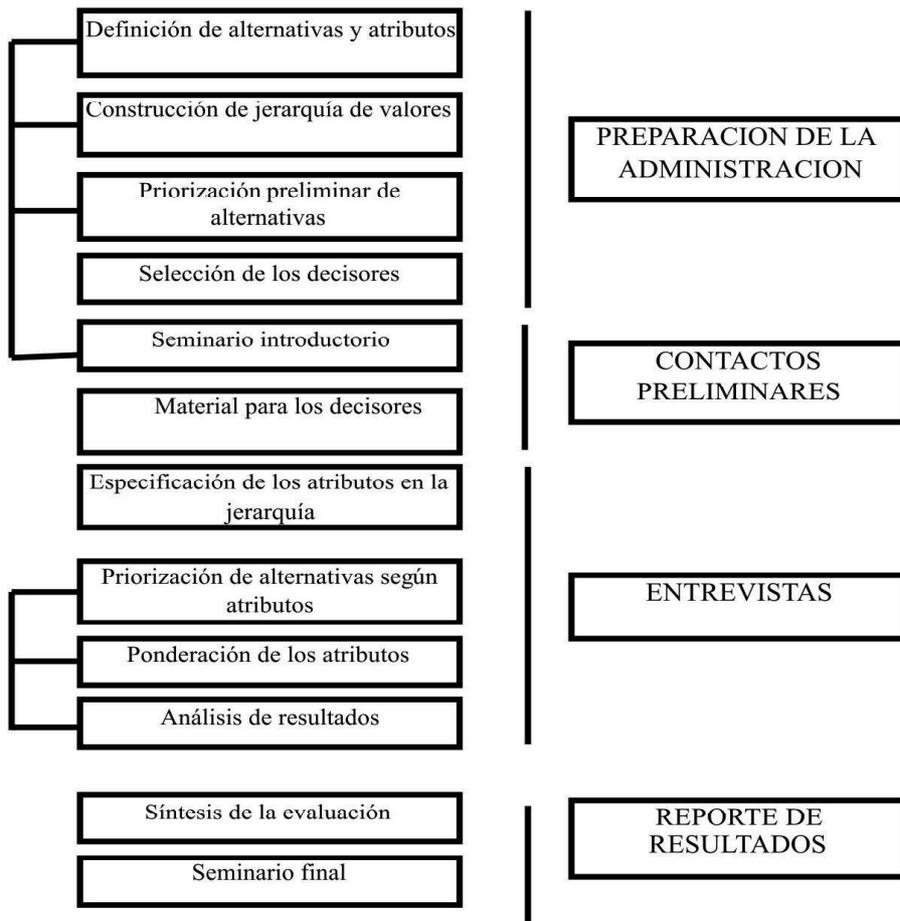
Una manera de aproximarse al problema de lograr que los decisores se involucren y hagan explícitos sus valores, es organizar "entrevistas para el análisis de las decisiones", en las cuales se desarrolla el proceso analítico de la toma de estas.

Este método de las "entrevistas para el análisis de decisiones" se puede comparar con los cuestionarios y las entrevistas personales. Las primeras pueden ser usadas por un gran número de decisores, pero pueden tener problemas de confiabilidad y falta de consistencia entre las respuestas, por la falta de interactividad. Las entrevistas personales pueden resultar en un gran volumen de opiniones de los

decisores, inestructuradas y mayormente descriptivas, que son difíciles de tener en cuenta a la hora de tomar la decisión.

• **El proceso de las entrevistas para el análisis de decisiones**

El proceso general se presenta en la figura siguiente. La primera etapa es de preparación, en la cual se definen de manera preliminar las alternativas y los atributos, se construye una jerarquía de valores, y se priorizan las alternativas. Luego se seleccionan los decisores, se realiza un primer seminario con todos ellos en el que se plantean las alternativas al proyecto, sus impactos y se presenta el método a seguir para las entrevistas.



• **Las entrevistas**

El analista conduce la entrevista, opera el computador, si es del caso, y familiariza al decisor con los detalles. La sesión se inicia con las ponderaciones previamente definidas, pero cada decisor es libre para cambiarlas si tiene razones para ello.

Dependiendo del decisor, la equivalencia entre atributos se puede especificar de

manera verbal, numérica o gráfica, para garantizar que personas con diferentes esquemas de representación tengan todas un modo comprensible de expresar su valoración.

La última fase de la entrevista es el análisis de resultados, se recopilan las ponderaciones y se presentan de manera gráfica para que el decisor pueda darles una mirada en conjunto. Igualmente, se analizan los resultados de la priorización, para explicar el porqué de ordenamientos contraevidentes a la luz del juego de valores del decisor.

Este tipo de metodologías puede llevar a que los grupos inicialmente considerados como promotores y opositores al proyecto, alcancen consensos muy significativos, en el proceso de definición y justificación tanto de la jerarquía de valores, como de sus ponderaciones.

Una ventaja adicional es el compromiso con el proyecto que se logra al hacer que los decisores se "apropien" de él, por la vía de su participación en la definición de valores, dado que el método los obliga a pensar en el problema de la decisión, utilizando una perspectiva mucha más amplia que la que habían tenido inicialmente.

6.7. Análisis de Incertidumbre

Al comparar proyectos de desarrollo - centrales generadoras de energía, plantas de producción industrial, aprovechamientos mineros, etc.-, desde el punto de vista de sus impactos ambientales, frecuentemente el analista se ve enfrentado a uno o varios de los siguientes problemas (Angel, 1995):

- a. Cómo tener en cuenta que la evaluación realizada (Y') es sólo una estimación de la verdadera magnitud (Y), desconocida para el evaluador.
- b. Cómo evaluar la obsolescencia de los estudios de impacto ambiental, es decir, la pérdida de representatividad de los estudios con respecto a la realidad, bien sea porque las condiciones ambientales que rodean al proyecto han evolucionado, bien porque la concepción técnica de los estudios, ha cambiado con el tiempo.
- c. Cómo incorporar la incertidumbre en la evaluación ambiental, es decir, cómo escoger entre dos proyectos que al ser evaluados presentan resultados similares, cuando la incertidumbre asociada a cada uno de ellos es muy distinta.

Sea la evaluación Y' que puede ser expresado como:

$$Y' = \sum_{i=1}^n w_i \alpha_i$$

Y' reúne n objetivos, cada uno de ellos denotado por α_i y ponderado por un peso w_i adicionalmente se cumplen las restricciones:

$$\alpha_i \in (0,1)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

La aplicación de la evaluación Y' permite la comparación de proyectos en términos de los valores esperados de sus evaluaciones ambientales. Si se pretende resolver el primer problema planteado (**a**), es necesario un esquema probabilístico en el que se conozca el valor estimado de la evaluación de cada objetivo y pueda estimarse de alguna manera la varianza asociada a cada uno de ellos.

• **Esquema probabilístico**

Es posible y necesario realizar un análisis de incertidumbre en la información que sirve de base para la aplicación de la evaluación Y' , este análisis tiene por finalidad estimar la varianza de cada objetivo y por ende la varianza de la evaluación total. Esto puede realizarse de manera aproximada asignando un valor «optimista» y un valor «pesimista» a cada objetivo (Dandy, 1985). El proceso para estimar la varianza de la evaluación final es:

PASO 1: Otorgarle a cada objetivo además de su valor esperado, α_i , un valor «optimista», α_i^o , y un valor «pesimista», α_i^p . La regla que permite otorgar tales valores debe ser tal que el objetivo tenga un 95 % de probabilidades de estar en el rango definido por ellos.

PASO 2: La evaluación de cada proyecto será:

$$Y' = \sum_{i=1}^n w_i \alpha_i$$

PASO 3: La varianza de cada objetivo será:

$$S_i^2 = \left(\frac{1}{k} (\alpha_i^o - \alpha_i^p) \right)^2$$

Si los estimativos «optimista» y «pesimista» se han pensado de tal manera que sean límites de confianza al 95 %, y asumiendo una distribución normal, la constante será $k = 3.92$

PASO 4: La varianza para la evaluación final será:

$$S_r^2 = \sum_{i=1}^n w_i^2 S_i^2$$

El valor esperado Y' y la varianza S_r^2 describen completamente la función de densidad de probabilidad de la evaluación, si se asume que tal distribución es normal. La aplicación de este algoritmo permite la solución del problema (**a**).

• **Estimación de la varianza de los objetivos**

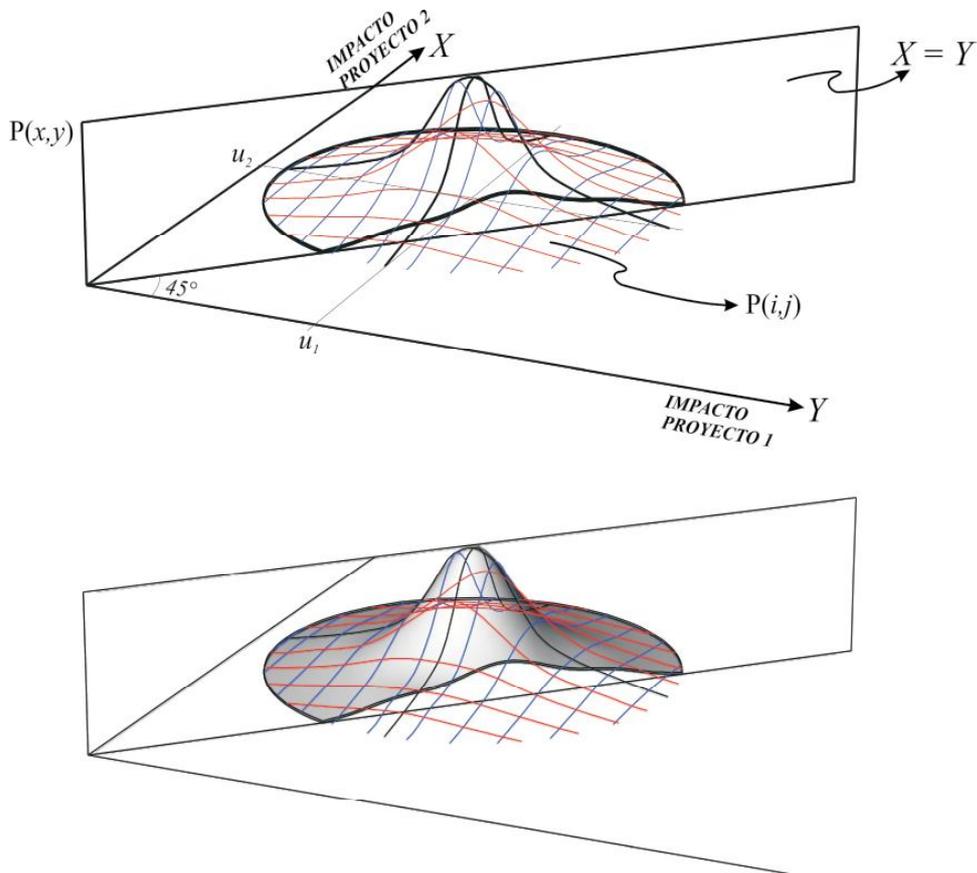
En el problema de la obsolescencia es necesario tener en cuenta que el tiempo transcurrido entre la realización de los estudios y la realización de la comparación con otros proyectos, aunque no es la única variable explicativa, puede considerarse como la principal, por tanto, la solución del problema (**b**), es posible fijando una regla que otorgue la varianza en función del tiempo transcurrido. La función que describe tal regla tendrá la forma:

$$S_i^2 = f(t_2 - t_1)$$

donde f tendrá las propiedades de ser monótonamente creciente, tender a cero cuando $(t_2 - t_1)$ tiende a cero y tender a un valor límite f^* a partir del cual se considera que los estudios están demasiado obsoletos, no reflejan la realidad del entorno del proyecto y deben realizarse de nuevo.

• **Escogiendo proyectos**

Cuando se tengan varios proyectos con valores esperados de la evaluación ambiental (Y), cercanos entre sí, la decisión obvia es optar por el proyecto con el menor valor de evaluación, o sea, menor valor de impactos. El problema (c) se reduce entonces a calcular la probabilidad de equivocación al seleccionar el proyecto que tiene el menor valor esperado. Para simplificar la representación imaginemos que son sólo dos proyectos. Cada uno de ellos tiene asociada una función de densidad de probabilidad a su evaluación ambiental, que se asumió anteriormente eran distribuciones normales. Si se representan perpendicularmente una a la otra, se tiene una normal bivariada. Si la distribución correspondiente al proyecto con menor impacto ocupa el eje de las x , el máximo de la curva estará situado en el semiplano $(x < y)$.



La probabilidad de tomar la decisión equivocada al escoger el proyecto i sobre el proyecto j , (P_{ij}), corresponde al volumen bajo la curva normal bivariada y limitada por el plano $x=y$. Explícitamente, se trata de evaluar:

$$P_{ij} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_i) g(x_j) dx_i dx_j$$

La matriz de probabilidades así conformada tiene las propiedades:

$$P_{ii} = 1/2$$
$$P_{ij} + P_{ji} = 1$$

Estas integrales pueden realizarse bien mediante integración numérica, bien utilizando técnicas de Montecarlo, generando secuencias de números aleatorios pertenecientes a las distribuciones de probabilidad definidas para la media y varianza de cada proyecto y contando el número de veces que se presente la condición de equivocación en la decisión.

La inclusión de la obsolescencia en la información requiere determinar una regla que permita otorgar varianzas a los objetivos como una función del tiempo, si bien tal regla puede ser difícil de construir desde el punto de vista práctico, -al tener que enfrentar a los decisores con un nuevo problema que repercutirá en la elegibilidad de sus proyectos-, un primer análisis no parece indicar ninguna complicación mayor desde el punto de vista teórico.

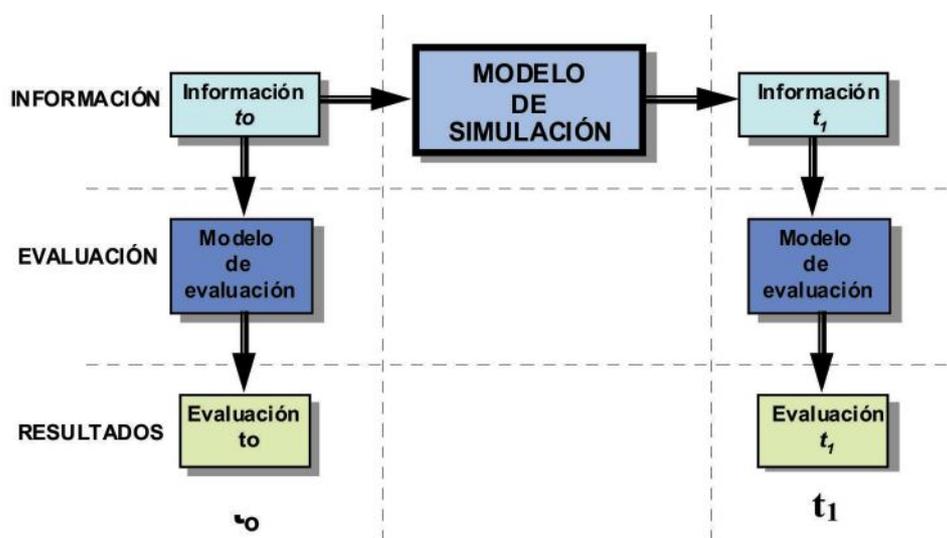
La comparación entre proyectos con evaluaciones similares se puede facilitar si se emplea como criterio extra la probabilidad de equivocación en la decisión, el cálculo de tales probabilidades es elemental, aunque puede volverse tedioso desde el punto de vista numérico.

6.8. Análisis Multiobjetivo Dinámicos

Los análisis planteados hasta aquí, se caracterizan porque los proyectos se evalúan independientes del paso del tiempo, es decir, es lo mismo que un proyecto se ejecute e inicie su operación en el presente, a que lo haga dentro de cinco años, o dentro de diez.

Una posibilidad de análisis para subsanar tal limitación, es a través de algunos enfoques que tienen como común denominador algún intento por simular el cambio a través del tiempo en las variables que determinan la evolución del ambiente en el cual se inserta el proyecto, de acuerdo al esquema que se presenta a continuación.

El decisor en el momento t_0 , toma la decisión teniendo en cuenta la información disponible en t_0 y lo que él estima será la información en t_1 . Una vez se implementen las decisiones tomadas en t_0 y pasado el tiempo hasta t_1 , el decisor tendrá en cuenta la información existente en ese momento, que muy posiblemente no coincidirá con la información relativa a t_1 que se había pronosticado cuando se estaba en t_0 .



6.8.1. Simulación del crecimiento de la población afectada

Existe un intento de consideración de variación de la evaluación ambiental de proyectos utilizando el módulo ambiental (modelo MODAMB) del programa de simulación-optimización SUPER OLADE / BID, dicho módulo está concebido para realizar una evaluación ambiental mediante análisis multiobjetivo, tal como se describe en el numeral 6.4.

Fue realizado por Campo et al, (1996) mediante la simulación de dos escenarios, el de referencia que considera la población constante en el tiempo y el escenario "pesimista" que considera un aumento de la población en el tiempo, a una tasa fijada de manera externa al modelo.

6.8.2. Simulación mediante dinámica de sistemas

Angel, Villegas, Zambrano (1998) basados también en el módulo MODAMB, plantearon un esquema que hace uso del modelo de simulación de colonización del bosque (modelo BOSQUES), presentado en el numeral 3.6 para estimar la variación dinámica de la evaluación ambiental de los proyectos hidroeléctricos Fonce, Sogamoso, Nechí, Arrieros de Micay, Porce III, Urrá I, Miel II y Porce II, todos en Colombia

El procedimiento que se siguió para realizar el análisis dinámico para la evaluación ambiental fue el siguiente:

- Selección de variables correspondientes a la evaluación ambiental de centrales hidroeléctricas que presentan posibles variaciones en el tiempo.
- Transformación de las variables seleccionadas en sus correspondientes dentro del modelo de colonización del bosque.
- Realización de las simulaciones utilizando el modelo de colonización del bosque.
- Una vez obtenidos los resultados del modelo dinámico, se realiza la transformación inversa para obtener las variables asociadas a la evaluación ambiental

- Se comparan la calificación de los proyectos obtenida para diferentes años con la calificación para el año cero (1992).

• **Equivalencia entre variables**

La primera parte de la tabla que se muestra a continuación, presenta la transformación de las variables entre la evaluación ambiental (modelo MODAMB) y la colonización del bosque (modelo BOSQUES).

Con base en ésta primera parte se obtuvieron los datos de entrada al modelo de colonización para cada uno de los proyectos y una vez éste arrojó los resultados, se realizó la transformación inversa a las variables del plan de expansión, utilizando para ello la segunda parte de la tabla, para hacer de nuevo la evaluación.

MODELO MODAMB	MODELO " BOSQUES "
BOSQUE PRIMARIO + BOSQUE SECUNDARIO	NIVEL DE BOSQUE
BOSQUE PRIMARIO + BOSQUE SECUNDARIO	ÁREA DISPONIBLE
PÉQUEÑOS PRODUCTORES + MEDIANOS PRODUCTORES + MINORÍAS ÉTNICAS	UNIDADES PRODUCTIVAS

MODELO " BOSQUES "	MODELO MODAMB
NIVEL DE BOSQUE	BOSQUE PRIMARIO + BOSQUE SECUNDARIO (guardando la proporción original)
UNIDADES PRODUCTIVAS	PÉQUEÑOS PRODUCTORES + MEDIANOS PRODUCTORES + MINORÍAS ÉTNICAS (guardando la proporción original)
Δ PRODUCCIÓN TOTAL	Δ PRODUCCIÓN PERDIDA
Δ UNIDADES PRODUCTIVAS	Δ PERDIDA DE ORDENAMIENTO ESPACIAL
? HOMBRES EN EDAD PRODUCTIVA	Δ EMPLEO DE FÁCIL RECUPERACIÓN

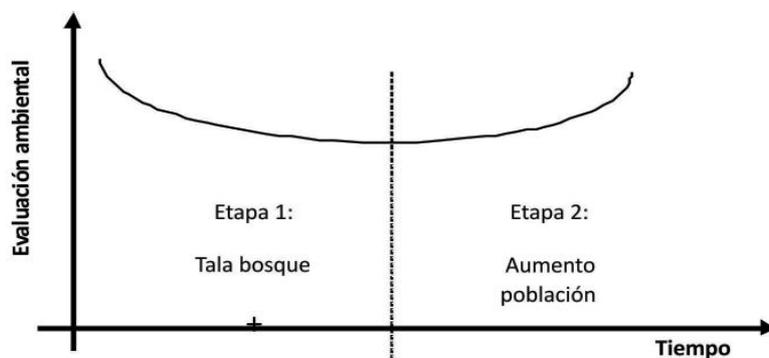
Para todos los proyectos, los objetivos uno y cinco: Minimizar el impacto sobre el medio físico y maximizar los beneficios regionales, tienen un valor constante; esto debido a que las variables propias de estos objetivos no cambian con el tiempo.

Al comparar los resultados actuales con las proyecciones futuras se observa que para el objetivo dos: Minimizar el impacto sobre el medio biótico, el nivel de bosque primario y secundario de cada uno de los proyectos disminuye a través del tiempo debido al proceso de colonización; lo que conduce a una reducción en el valor de este objetivo para todos los proyectos.

En los objetivos tres y cuatro: minimizar el desplazamiento de población y costos regionales, las variables asociadas a la población de pequeños y medianos productores y minorías étnicas y los valores de la producción perdida y pérdida de empleos, sufren un notable aumento en el tiempo, lo que causa que los proyectos presenten una evaluación ambiental más deficiente en éstos aspectos, por ser mayores los impactos causados en el medio social.

A la luz de los resultados anteriores se puede formular una conclusión general de la evolución de la evaluación ambiental a través del tiempo, que puede ser representada como se muestra a continuación.

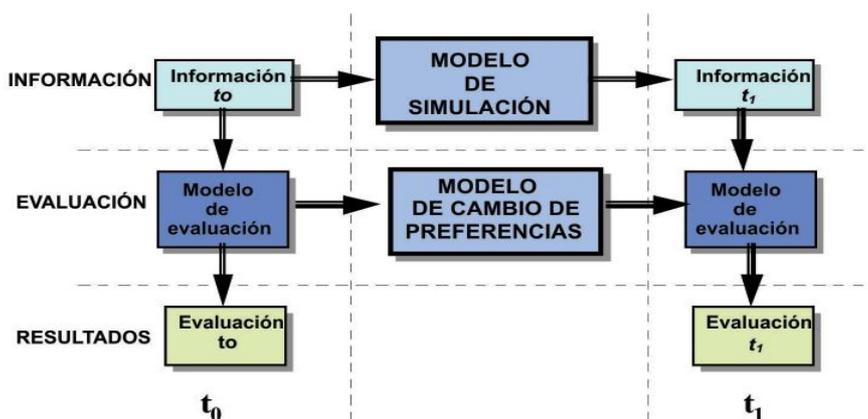
En la etapa 1 correspondiente al aumento de población y tala de bosque, la evaluación ambiental de los proyectos mejora, gracias a que en ella, la calificación de los aspectos físico - bióticos determinada por la presencia cada vez menor de bosque muestra un proyecto cada vez menos impactante.



En el momento en el que se acaba el bosque (etapa 2), la calificación empieza a desmejorar debido a la importancia que a partir de ahí adquieren los aspectos sociales, pues se da un aumento progresivo de la población y por tanto mayor afectación económica y regional.

6.8.3. Consideración del cambio de las ponderaciones en el tiempo

El análisis planteado hasta aquí intenta tener en cuenta el hecho de que la información y condiciones referentes al proyecto cambia con el tiempo y esto afecta la valoración ambiental del proyecto. Pero también la estructura de preferencias es una función del tiempo, en cuanto la sociedad consultada modifica sus percepciones acerca de la importancia relativa de unos temas frente a otros. Estos cambios en la estructura de preferencias deben reflejarse en la selección de alternativas, de acuerdo al esquema:



Un enfoque posible para tener en cuenta este fenómeno, sería realizar encuestas en que les pregunte a decisores involucrados en la toma de decisiones de planificación ambiental, preguntas del tipo: **Cuál era su estructura de preferencias con respecto a determinados temas, para diferentes fechas en el pasado y estimar promedios sobre las respuestas.**

Este enfoque tiene algunos serios problemas en cuanto a la formulación misma de la pregunta: **Quiénes habrían sido los decisores hace un año o dos o tres? Habrían sido los temas considerados lo suficientemente relevantes para incluirlos como criterios en la toma de decisiones de tipo ambiental?.**

Ante estas dificultades, existe un enfoque que se está trabajando en la actualidad, basado en la hipótesis ampliamente aceptada en la comunicación social en el sentido de que el espacio que se le otorga a un tema en artículos de prensa o en otros tipos de medios informativos es un indicador de la importancia relativa que la sociedad le asigna a tales temas. Se recolecta información proveniente de un medio escrito de difusión masiva para determinar -partiendo del espacio que se le dedica a cada tema en la publicación-, la evolución a lo largo del tiempo de las tendencias que permiten reconstruir la estructura de preferencias del decisor.

Para este análisis se hace uso de la metodología de Análisis de Contenido (Krippendorff, 1.990) descrita como el «conjunto de métodos y técnicas de investigación destinados a facilitar la descripción e interpretación sistemática de los componentes semánticos y formales de todo tipo de mensaje, y la formulación de inferencias válidas acerca de los datos reunidos...»

De manera complementaria, se retoman las formulaciones relacionadas con métodos para la valoración de un texto (Kayser, 1963), las cuales permiten otorgar valores numéricos a las noticias reportadas en los diarios, a través de la definición de parámetros asociados a la ubicación, los títulos y el tamaño del texto. El contenido a analizar en cada una de las noticias de prensa se asocia a las cinco dimensiones formuladas en el modelo de gestión ambiental (Angel, et al, 1996)

6.8.4. Evaluación dinámica para proyectos lineales

Un análisis posible con respecto a los proyectos lineales es visualizar cómo cambian las rutas ambientalmente óptimas ante cambios en los niveles de restricción o criticidad detectados desde cada una de las dimensiones analíticas.

Para realizar tal análisis Zambrano, Angel (1999) han propuesto un enfoque metodológico consistente en determinar una estructura de preferencias única en el tiempo y un grupo de mapas temáticos de restricciones y criticidades actuales. Mediante el uso de la estructura de preferencias se determinaría el mapa general de criticidad y sobre éste, se trazarían las rutas de mínimo impacto ambiental, mediante el método del mínimo costo de viaje acumulado.

Paralelamente, se construye un modelo de simulación que permite capturar la evolución de las variables más relevantes en cuanto a la determinación de niveles

de criticidad y restricción. Este modelo incluye dos mecánicas diferentes de variación. La primera busca reflejar los cambios de nivel cualitativo de algunas de las variables, por ejemplo el paso de zonas de alta importancia ecológica, al grado de restricciones de tipo legal, lo que afecta el mapa de criticidad de la dimensión biótica.

La segunda pretende reflejar algunos cambios de tipo cuantitativo, para lo cual se plantea un modelo de inmigración-emigración que simula la movilidad de la población de acuerdo a las condiciones cambiantes del conflicto armado en Colombia. Con base en los cambios poblacionales se determinan cambios de densidad poblacional que afectan los mapas de criticidad de las dimensiones cultural, económica y política

Con este modelo se generan estados futuros de las variables seleccionadas, que a su vez sirven para redibujar mapas futuros de criticidad. El cruce de estos produce el mapa general de criticidad futuro. Sobre éste se trazan de nuevo las rutas ambientalmente óptimas y se comparan con la versión inicial, con el objetivo de detectar situaciones en las que un tramo de proyecto se esté haciendo más o menos restrictivo con el tiempo.

6.9. El Análisis Multiobjetivo como un Instrumento para la Fijación de Políticas¹⁷

El análisis multiobjetivo además de ser una herramienta útil en la comparación o evaluación de alternativas, puede ser una ayuda a la hora de fijar políticas ambientales.

• La gestión de los proyectos de desarrollo ante las autoridades ambientales

La Ley 99 de 1993 (Congreso de la República, 1993) contempla tres instancias básicas para la gestión de los proyectos de desarrollo:

- Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA), consagrado en el artículo 56: "El Diagnóstico Ambiental de Alternativas incluirá información sobre la localización y características del entorno geográfico, ambiental y social de las alternativas del proyecto, además de un análisis comparativo de los efectos y riesgos inherentes a la obra o actividad, y de las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas"
- Estudio de Impacto Ambiental (EIA), consagrado en el artículo 57: "El Estudio de Impacto Ambiental contendrá información sobre la localización del proyecto, y los elementos abióticos, bióticos y socioeconómicos del medio que puedan sufrir deterioro por la respectiva obra o actividad, para cuya ejecución se pida la licencia, y la evaluación de los impactos que puedan producirse. Además, incluirá el diseño de los planes de prevención, mitigación, corrección y compensación

¹⁷. El contenido de este numeral fue previamente presentado en (Angel, 1996)

de impactos y el plan de manejo ambiental de la obra o actividad.”

- Para aquellos proyectos construidos y en operación antes de la vigencia de la Ley 99, se fija, en el artículo 5, “Funciones del Ministerio del medio Ambiente”, en el numeral 32, un lineamiento que permite este tipo de gestión: “Establecer mecanismos de concertación con el sector privado, para ajustar las actividades de este a las metas ambientales previstas por el gobierno; definir los casos en que haya lugar a la celebración de convenios para la ejecución de planes de cumplimiento con empresas públicas o privadas para ajustar tecnologías y mitigar o eliminar factores contaminantes y fijar las reglas para el cumplimiento de los compromisos derivados de dichos convenios. Promover la formulación de planes de reconversión industrial ligados a la implantación de tecnologías ambientalmente sanas y la realización de actividades de descontaminación, de reciclaje y de reutilización de residuos”.

Resumiendo, el DAA le plantea al peticionario de una licencia ambiental la necesidad de presentarle a la autoridad ambiental competente, una comparación entre varias alternativas de desarrollo del proyecto. Sobre esta información la autoridad decidirá sobre cuál o cuáles alternativas se adelanta el EIA. Este a su vez está diseñado para mostrar que los impactos ambientales derivados de la construcción u operación del proyecto están suficientemente estudiados y las medidas de manejo propuestas realmente logran mitigarlos, corregirlos o compensarlos. Los planes de cumplimiento, para actividades en curso, buscan la posibilidad de mejorar el desempeño ambiental de una obra o actividad, de manera concertada entre sus propietarios y la autoridad ambiental.

- **Utilización del Análisis Multiobjetivo**

El hecho de que la gestión ambiental de un proyecto de desarrollo sigue una serie de etapas y subetapas que son altamente demandantes de recursos humanos para su desarrollo y seguimiento, unido a que la normatividad vigente restringe a tres las interacciones entre la autoridad ambiental y los promotores de proyectos, lleva a plantearse la pregunta de cómo fijar políticas que conduzcan a una óptima relación entre esos dos agentes, permitiendo que la información que se intercambia supere los requerimientos de formalismo jurídico y ayude en efecto a la implementación de proyectos que armonicen con el entorno natural y social en el que se insertan.

- **Aplicación del diagrama de desempeño para la fijación de políticas referentes al Diagnóstico Ambiental de Alternativas**

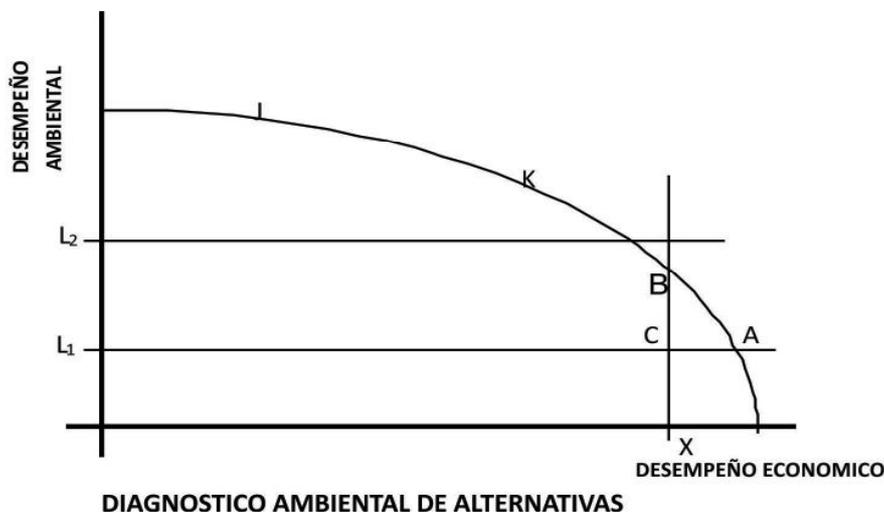
Se pretende realizar una crítica a la concepción misma de este instrumento, (DAA) por la manera como está diseñado y por la falta de una definición clara del concepto de “alternativa”.

Se puede reformular el problema de la escogencia de la alternativa óptima para un proyecto de desarrollo en los términos de seleccionar, de entre un grupo de alternativas previamente definidas, aquellas que mejor satisfagan la estructura

de preferencias del decisor, incluyendo preferencias ambientales.

El Estado fijará unos límites mínimos de calidad ambiental (L_1) a través de legislación específica v.g. calidad de agua, calidad de aire, etc. Por su parte el mercado determinará el grado de cumplimiento del objetivo económico (léase rentabilidad) que los agentes públicos o privados esperan obtener (X). Si L_1 y X se cruzan bajo la curva de soluciones no dominadas, la actividad económica es factible, y existirá alguna región como la designada ABC, tal que en ella se satisfacen ambas restricciones.

Si -como en el caso del artículo 56 de la Ley 99- es el interesado en el proyecto quien define las alternativas a estudiar, la racionalidad económica indica que las alternativas consideradas para el DAA se encontrarán todas dentro de la zona ABC, por tanto muy cerca unas de otras en cuanto a rentabilidad esperada y a realización del objetivo ambiental. En esta situación, el problema de seleccionar alternativas será, probablemente complejo desde el punto de vista operacional, - pues los proyectos y sus impactos serán muy similares y por tanto habrá que afilar



Salir de esa situación y lograr que otras alternativas sean tenidas en cuenta (v.g. J, K en el diagrama) implicará tomar uno de varios caminos posibles:

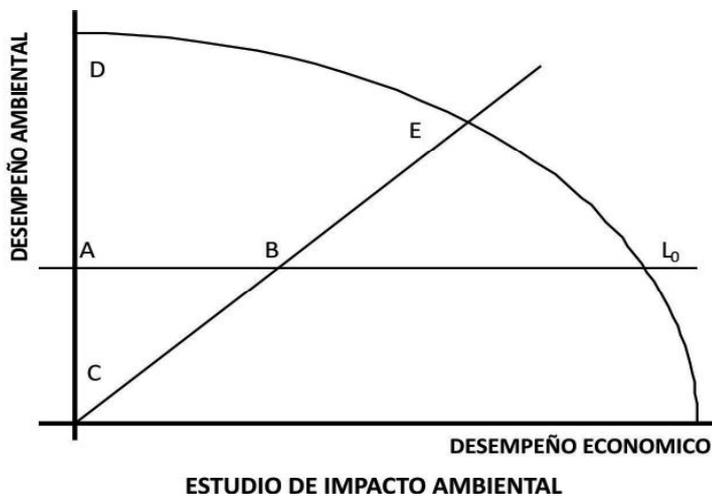
- Que se eleven arbitrariamente las reglamentaciones particulares hasta niveles más exigentes (L_2 en el diagrama), de tal manera que algunas de las alternativas actualmente consideradas se hagan no factibles y deban ser consideradas otras de mejor desempeño ambiental.
- Que las alternativas a ser estudiadas por el usuario requieran aprobación antes del DAA y la autoridad pueda solicitar que se incluyan alternativas diferentes a las planteadas por el usuario. Esto implicaría, lamentablemente, un trámite adicional con su consiguiente demora
- Que las autoridades ambientales realicen por su cuenta y con ánimo prospectivo, estudios de restricciones y posibilidades ambientales para diversas actividades económicas, de tal manera que su relación con el usuario pase de revisar

el estudio realizado por este, a una posición de interlocutor que le permita recomendar de manera general alternativas de localización y tecnología para ser consideradas por los usuarios y posteriormente validadas por la autoridad.

• **Aplicación del diagrama de desempeño para la fijación de políticas referentes al Estudio de Impacto Ambiental**

En este caso, un criterio que se ha usado con alguna frecuencia es el de los "impactos unitarios", definidos como la magnitud del impacto total dividida por la producción total del proyecto, evaluada en unidades del bien o servicio que el proyecto provee. La lógica subyacente a los impactos unitarios es que es más aceptable desarrollar un proyecto de medianos impactos y grandes beneficios, y por tanto con impactos unitarios bajos, que desarrollar proyectos con impactos bajos y beneficios bajos y consecuentemente con impactos unitarios altos.

Aquí nuevamente el diagrama de desempeño permite llegar a conclusiones interesantes.

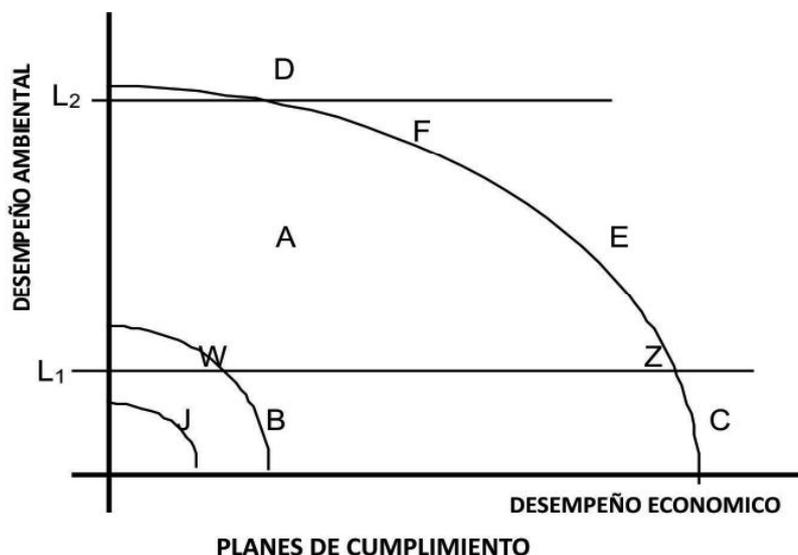


Bajo la lógica exclusiva del "impacto unitario", serían factibles todos aquellos proyectos que se encuentren por encima de la línea C-B-E, pues ofrecen un alto desempeño ambiental para un desempeño económico dado. Si aceptamos que el límite L_0 puede corresponder a una "disponibilidad de la sociedad a aceptar un determinado impacto ambiental", esto añade una restricción adicional a la consideración del "impacto unitario", pues los proyectos situados por debajo de la línea L_0 serán inaceptables, con lo cual el área factible se reduce a la zona ABED.

• **Aplicación del diagrama de desempeño para la fijación de políticas referentes al Estudio de Impacto Ambiental**

Para esta situación el diagrama de desempeño es especialmente útil. La legislación ambiental define un límite mínimo aceptable L_1 , esto divide el problema en dos diferentes zonas:

- Proyectos que no cumplen la legislación. En este caso se presentan por lo menos tres posibles situaciones:
 - ★ Proyectos en situación similar a C, localizados sobre el óptimo tecnológico, en este caso el proyecto debe moverse a la posición Z y para el productor, el costo será $(X_C - X_Z)$



- ★ Proyectos en situación similar a B, localizados al interior de la región, es decir en la zona de soluciones dominadas. En este caso, existirá una curva - en principio paralela al óptimo tecnológico, que determina los óptimos posibles para esa tecnología en particular. Esa curva cortará a L_1 en un punto W y en ese caso, $(X_B - X_W)$ es el costo del productor.
- ★ Proyectos en situación similar a J, en este caso la curva paralela al óptimo tecnológico no alcanza a cortar a L_1 y por tanto la actividad debe salir del mercado, a menos que lleve a cabo un proceso de sustitución tecnológica.
- Proyectos que cumplen la legislación. En este caso se tienen dos situaciones diferentes:
 - ★ Si no están sobre el óptimo tecnológico, como es el caso del proyecto A. Dado que el proyecto cumple con la normatividad, la autoridad ambiental debe trabajar en la proposición de opciones que mejoren ambas realidades para el proyecto, es decir que le permitan incrementar sus desempeños ambiental y económico simultáneamente, en el diagrama, llevarlo a F. En ese caso, $(X_F - X_A)$ será el beneficio del productor y $(Y_F - Y_A)$ el beneficio ambiental para la sociedad.

Pretender que el proyecto se desplace hacia la posición D, sin ofrecerle mejoría en su desempeño económico, es el equivalente de imponerle una restricción adicional L_2 , lo que sería inequitativo en el tratamiento de ese proyecto frente a los demás. Un movimiento hacia E, si es posible, lo logrará

el agente económico sin la intervención de la autoridad ambiental.

- ★ Si el proyecto está sobre la curva del óptimo tecnológico, es necesario recordar que la investigación y su consecuencia, el desarrollo tecnológico contribuyen a que se presente un desplazamiento de la curva hacia arriba y la derecha. En este caso, el proyecto pasaría de la situación E, a una situación similar a la del proyecto A y serían aplicables de nuevo los razonamientos del punto inmediatamente anterior.

- **Conclusiones**

- El DAA en su actual concepción en la que es el interesado el que define las alternativas, es un ejercicio que lleva a que estas sean tan similares que el ejercicio mismo pierde frecuentemente todo su sentido. Salir de esa situación sin demorar excesivamente los trámites implicaría la realización de estudios de tipo prospectivo por parte de las autoridades ambientales.
- El concepto de los "impactos unitarios" debe ser aplicado conjuntamente con el de la "disponibilidad de la sociedad" a aceptar un determinado impacto ambiental, para que juntos conformen la región de proyectos factibles para la sociedad, desde el punto de vista ambiental.
- Los planes de cumplimiento, si son para proyectos que no cumplen la norma, implican en todos los casos un costo para el productor y en algunas circunstancias, su desplazamiento del mercado, a menos que se adelante un programa de reconversión tecnológica. De otro lado, si son para proyectos que cumplen con la normatividad, deben incluir una componente de mejoría en el desempeño económico para sus propietarios. Lo contrario equivaldría a establecer límites discrecionales que llevarían a inequidades en el tratamiento de algunos proyectos.
- Si bien las líneas pueden no ser tan claras, convirtiéndose en unas bandas más o menos difusas, se conserva la esencia del razonamiento, es decir, el propietario del proyecto deseará estar en el punto - la región- de cruce del mínimo legislativo con la superficie de las soluciones no dominadas.

6.10. Ideas y Conceptos Claves

- La dificultad de evaluar proyectos de desarrollo que generan impactos sobre las dimensiones física, biótica, económica, cultural y política se puede manejar fijando los juicios de valor, expresándolos como un conjunto de relaciones matemáticas.
- El problema general del análisis multiobjetivo incluye al menos dos objetivos entre los cuales no se puede construir a priori una función de transferencia.
- El diagrama de desempeño provee una herramienta que permite visualizar el desempeño relativo de cada alternativa frente a cada objetivo, permite además identificar, de manera gráfica, el conjunto de las soluciones no dominadas.
- Una posibilidad para evaluar ambientalmente proyectos consiste en construir una jerarquía de conceptos relacionados a través de análisis multiobjetivo así:
 - * Objetivo - Dimensión de análisis
 - * Criterio- Impacto ambiental
 - * Indicador - Evaluador del impacto
 - * Variable - Elemento medible a partir de estudios ambientales.
- Función de impacto ambiental: Permite evaluar la gravedad del impacto con base en su magnitud. Se construye con base en las experiencias existentes acerca de magnitud de impactos y su gravedad percibida
- Análisis de sensibilidad es el que permite responder a la pregunta: Cuál sería el ordenamiento de los proyectos ante variaciones en la estructura de preferencias, mediante una variación sistemática de estas.
- En las entrevistas para el análisis de decisiones, se logra que los decisores hagan explícita su estructura de preferencias al confrontarlos con los posibles resultados de la evaluación, de manera interactiva.
- Análisis de incertidumbre es el que permite responder a la pregunta: Cuáles son las probabilidades de tomar la decisión equivocada, teniendo en cuenta que la información que se tienen puede haber variado o estar sesgada. El método usado es probabilístico.
- Los análisis multiobjetivo dinámicos permiten introducir la dimensión temporal en la evaluación del desempeño ambiental de los proyectos, esto puede realizarse:
 - * Incluyendo los cambios de la información en el tiempo (p.e. mediante el uso de dinámica de sistemas para simular la evolución del sistema.)
 - * Incluyendo los cambios en el tiempo de la estructura de preferencias de los decisores.
- También permite estimar cambios en la ingeniería o el trazado de los proyectos de acuerdo con los cambios en la información o las preferencias.
- El análisis multiobjetivo y en particular el diagrama de desempeño, pueden ser de gran utilidad a la hora de fijar políticas relativas a la selección de proyectos y al tipo de información que estos deben aportar a las autoridades ambientales, esto es válido para las instancias de:
 - * Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA)
 - * Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)
 - * Plan de Manejo Ambiental (PMA)

6.11. Ejercicios

1. Se tienen tres alternativas de proyecto A, B y C. Se ha desarrollado un análisis multiobjetivo con tres objetivos: O1, O2 y O3. Los indicadores de las alternativas son:

	A	B	C
O1	2	5	3
O2	1	2	4
O3	7	4	3

Las funciones de impacto ambiental responden a la forma $y = 1 - e^{-kx}$

Las características de las funciones y pesos de los objetivos son:

	x	y	peso
O1	2.5	0.5	0.3
O2	2.2	0.5	0.3
O3	3.5	0.5	0.4

- ¿Cuál es el proyecto seleccionado?
 - Desarrolle un análisis de sensibilidad a los pesos, variándolos de 0.0 a 1.0 con intervalos de 0.1 y mostrando los cambios de ordenamiento
 - Calcule las probabilidades de tomar la decisión equivocada, si cada indicador puede variar $\pm 20\%$

2. Se tiene un análisis multiobjetivo con tres objetivos:

$$\min Z = w_1 * f_1(x_1) + w_2 * f_2(x_2) + w_3 * f_3(x_3)$$

con f_i crecientes de cero a uno y $\sum w_i = 1$

- A. Demuestre que si uno de los pesos es negativo y su respectiva función es decreciente de uno a cero, la evaluación de los proyectos conserva el orden, pero a todos los proyectos se les suma o resta una constante.
- B. ¿A cuánto equivale esa constante?

3. Se tienen dos alternativas de proyecto A y B. Se ha desarrollado un análisis multiobjetivo con tres objetivos: O1, O2 y O3. Los indicadores de las alternativas son:

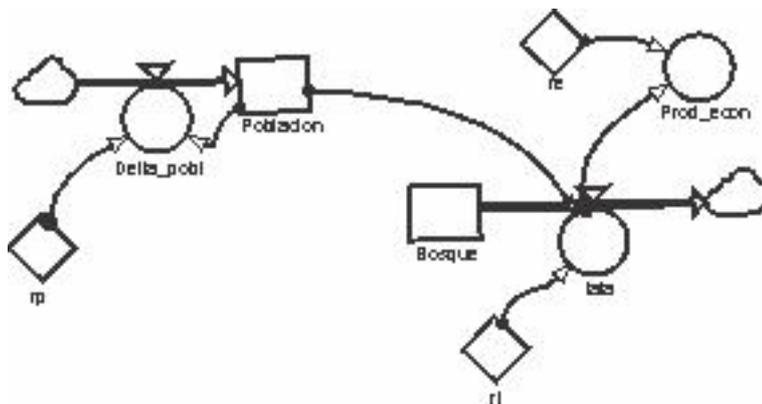
		A	B
O1	Población afectada [hab]	500	700
O2	Area de bosque afectada [Ha]	1000	1100
O3	Producción económica [US\$]	50000	70000

Las funciones de impacto ambiental responden a la forma $y = I - e^{-kx}$

Las características de las funciones y pesos de los objetivos son:

	x	y	peso
O1	600	0.5	0.3
O2	800	0.5	0.3
O3	20000	0.5	0.4

Realice una evaluación dinámica, comparando el desempeño actual de los proyectos con el desempeño esperado en el año 5. Para ello, utilice el modelo de simulación cuyo diagrama en dinámica de sistemas se presenta a continuación, tenga en cuenta: $r_p = 0.02$; $r_t = 5$; $r_e = 100$



CAPITULO 7

TECNICAS PARA LA

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO



*Cada cuerpo tiene
su armonía y
su desarmonía*

*en algunos casos
la suma de armonías
puede ser casi
empalagosa*

*en otros
el conjunto
de desarmonías
produce algo mejor
que la belleza*

Mario Benedetti. Inventario

7. TECNICAS PARA LA ORGANIZACION DEL TRABAJO¹⁸

La concepción moderna de mejoramiento continuo en la gestión por procesos implica la aplicación sistemática del ciclo Deming, que considera en cuatro simples pasos los lineamientos necesarios para el sostenimiento y mejora de los niveles de calidad obtenidos. Estos cuatro pasos son Planear, Hacer, Verificar y Actuar y en adelante se nombrarán de acuerdo a sus iniciales PHVA.

Planear recoge todas las actividades previas al inicio de la acción física, implica direccionar, decidir, secuenciar, programar, etc.

Hacer recoge las actividades físicas de implementación del proyecto

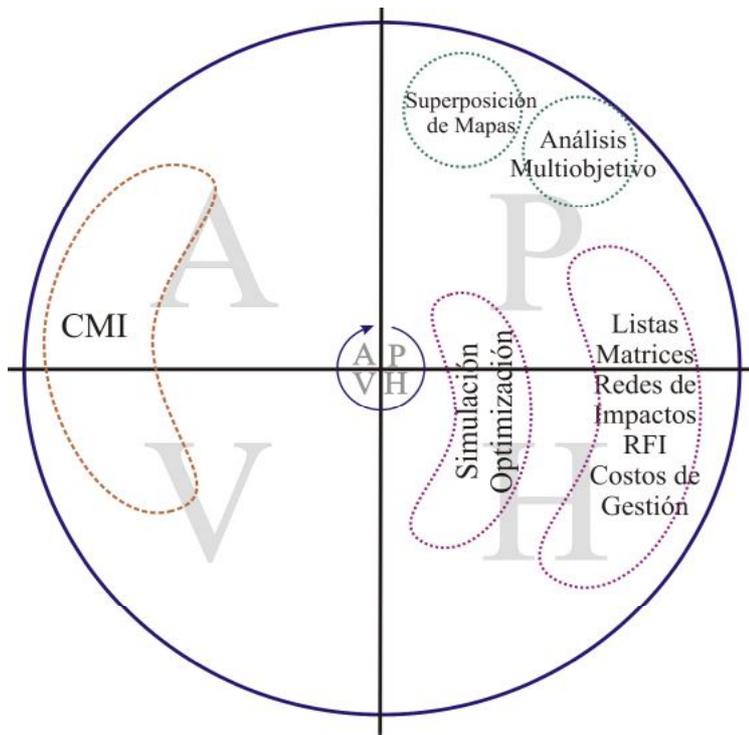
Verificar implica comparar lo obtenido con lo planeado, para encontrar una medida objetiva del logro en la implementación del proyecto.

Actuar implica tomar decisiones correctivas con el fin de cambiar el rumbo, cuando se encuentran discrepancias entre lo planeado originalmente y lo logrado.

En el resto del capítulo se presentan algunas técnicas apropiadas para los pasos **Planear** y **Hacer** del ciclo, tales como las listas, las matrices, las redes de impactos, las redes de flujo de información (RFI) y la estimación de costos de gestión. Al final del capítulo se presentará la aplicación de la estructura conceptual del "Balanced Score Card" o Cuadro de Mando Integral (CMI) al seguimiento de la gestión ambiental, lo que la ubica en los pasos **Verificar** y **Actuar**.

En este contexto, se puede retomar lo presentado en el numeral 2.5 y reexpresarlo, conjuntamente con lo expuesto aquí, en los siguientes términos:

18. El material de los numerales 7.1 a 7.4 había sido previamente presentado en Angel, Carmona, Villegas (1996), aquí se sitúa en el contexto más amplio del análisis por dimensiones.



Las técnicas vistas desde el ciclo de gestión

7.1. Listas

Las listas permiten en primera instancia organizar la información de una manera lineal o unidireccional, otorgando valores a cada posible impacto; esta asignación puede realizarse sobre la base de un valor máximo constante para cada impacto (lista de escala) o sobre la base de un total de puntos diferente para cada impacto, este total se ha establecido para reflejar la importancia relativa frente a los demás impactos (listas de escala y peso). (Witzenfeld,1991).

Otorgar escalas y pesos convierte las listas en una metodología de análisis multiobjetivo, sin embargo, solo son útiles para problemas de baja complejidad en los cuales no sea necesario el uso de funciones de valor.

Tal vez la técnica mas conocida entre las de este tipo es la evaluación ambiental de Batelle - Columbus, que otorga un total de 233 puntos distribuidos así:

Contaminación	
Contaminación del agua	126
Contaminación del aire	35
<hr/>	
Estéticos	
Suelos	45
Agua	27

7.2. Matrices

Una vez enfrentados con el problema de manejar un volumen de información grande, la idea de organizar esta información acerca de los impactos ambientales en un arreglo cartesiano - en que un eje coordinado sean las actividades necesarias para desarrollar el proyecto y el otro los componentes del sistema susceptibles de recibir los impactos, es bastante natural.

Desgraciadamente, se trabajó durante mucho tiempo sobre la hipótesis de que las matrices eran la única herramienta útil para la planificación ambiental y se dejaron de lado otras herramientas que permiten juicios de un carácter más cuantitativo o una mejor ayuda en la toma de decisiones con respecto al proyecto.

Los factores que se tienen en cuenta en estas matrices no corresponden a las dimensiones analíticas del impacto en su totalidad. Su alcance es limitado a aproximaciones parciales en cuanto a temáticas. Posiblemente por el alto uso que se les dio a las matrices, llegaron a desarrollarse muchas variantes, diferenciadas entre sí sólo por detalles de notación las más de las veces. (Witzenfeld,1991)

Matriz de Cribado (FEARO)

En la intersección de la actividad con el componente receptor en el ambiente, se utiliza un signo que corresponde a la siguiente convención:

- No hay impacto
- / Efecto adverso
- X Efecto benéfico
- | Falta información para determinar el impacto
- \ Efecto significativo adverso
- + Efecto significativo benéfico

Matriz de Leopold

Universalmente usada por años, en la intersección de actividad y componente se colocan un par de valores:

M /
/ I

 M = Magnitud
I = Importancia,

que corresponden al dimensionamiento (etapa 2) y la evaluación (etapa 3), de acuerdo a lo expresado en el numeral 2.1, pasos y dificultades cognitivas en la evaluación ambiental.

Matriz escalonada de Sorenson

Además de las columnas correspondientes a las actividades, presenta cuatro columnas extra donde se consignan respectivamente:

- El estado inicial del componente receptor (v.g. agua subterránea o bosques)
- El mecanismo de cambio
- La posible condición final
- La medidas correctivas potenciales

Esta matriz brinda mayor información que las dos anteriores porque logra una relativa caracterización de los cambios en el componente receptor y avanza en la proposición de medidas remediales particulares para cada impacto, aunque no logra articularlas en un Plan de Manejo Ambiental.

La utilidad de las matrices radica en la relativa facilidad con las que se puede detectar una actividad altamente impactante (columna sobrecargada de signos con alta sumatoria de puntos), actividades inocuas, componentes receptores altamente impactados (filas sobrecargadas) con la consiguiente necesidad de incorporar nuevas disciplinas o análisis al equipo de trabajo; un número considerable de marcas de incertidumbre llevará a la conclusión de que es necesario darle más profundidad a los estudios, mientras que un número considerable de marcas de «no hay impacto» llevará a pensar que posiblemente se sobredimensionó el equipo de trabajo.

7.3. Matriz de Dimensiones Analíticas

La matriz de dimensiones analíticas, propuesta en Angel, Carmona, Villegas (1996), permite la presentación de los impactos ambientales de un proyecto, organizados por sus dimensiones física, biótica, económica cultural y política.

Tanto en las filas como en las columnas el encabezado es el nombre de la dimensión y la lógica de presentación de los impactos corresponde a un arreglo donde la posición a_{ij} de la matriz está ocupada por aquellos impactos que son originados en la dimensión j y su efecto se manifiesta sobre la dimensión i .

DIMENSION	FISICA	BIOTICA	ECONOMIC A	CULTURAL	POLITICA
FISICA					
BIOTICA					
ECONOMICA					
CULTURAL					
POLITICA					

Los elementos sobre la diagonal principal corresponden al contenido no interdisciplinario de un estudio ambiental, es decir cada disciplina va a lo suyo y no se exploran los efectos cruzados. Las implicaciones del uso de este tipo de matriz sobre la interdisciplinariedad del trabajo han sido expuestas detalladamente antes, aquí se hace énfasis únicamente en el aspecto metodológico.

7.4. Redes de Impactos

Una red de impactos es el encadenamiento lógico, en un grafo, de una serie de impactos derivados de uno que encabeza la red. Para desarrollarla es necesario un trabajo exploratorio con el equipo interdisciplinario, para determinar toda la serie de consecuencias que pueden desprenderse de una acción (impactos de primera generación), luego los que pueden desprenderse de aquellos (impactos de segunda generación) y así sucesivamente.

Aunque a primera vista puede parecer que el procedimiento propuesto no tiene fin y que el resultado final será una serie interminable de impactos provenientes de otros impactos, que a su vez se desprenden de otros impactos, etc., la utilidad de esta técnica es múltiple.

De un lado permite detectar receptores que sufran impactos procedentes de varias actividades, pues este proceso puede darse en el ámbito de varias generaciones de impactos simultáneamente; además -si se posee un conocimiento suficiente que nos permita cuantificar cómo una variación porcentual en un impacto, influye sobre la magnitud de sus impactos derivados, esta técnica sirve para ir acumulando la magnitud de los impactos, hasta el momento en que en alguna generación, el impacto, aunque conceptualmente claro, sea cuantitativamente irrelevante.

Esta información es de suma importancia pues permite acotar el universo de estudio a aquellos impactos con magnitudes que de alguna manera comprometan la estabilidad del sistema. Como una primera aproximación puede pensarse que, impactos de tipo físico o biótico, cuyas magnitudes caigan dentro del rango de las variaciones estacionales históricas, a las que por condiciones naturales, el sistema está «habitado», o impactos de tipo social de magnitudes comparables a aquellas ante las que el sistema ha reaccionado con adaptaciones exitosas, son mucho menos comprometedores que aquellos que sobrepasan los citados límites.

Como puede deducirse de una observación cuidadosa, la información contenida en la red de impactos y en la matriz de dimensiones analíticas es la misma, difiriendo en la manera como se ha llegado a cada una pues en el caso de la red es de manera secuencial, mientras que en el de la matriz es por dimensiones analíticas.

La experiencia permite recomendar que para identificar los impactos de un proyecto, probablemente la mejor estrategia es empezar con una matriz de FEARO, que actúa como disparador (driver) de los impactos causados por las actividades de construcción y operación. Una vez identificada esta primera generación de impactos, se inicia con ellos un doble proceso, de un lado se va elaborando la red de impactos –cuantificados hasta donde sea posible- y simultáneamente se va elaborando la matriz de dimensiones analíticas. La ventaja de hacerlo simultáneamente radica en que el analista se obliga a sí mismo a pensar con dos lógicas simultáneamente, la secuencial y la más organizada –porque es más sistémica- del análisis por dimensiones.

La elaboración de una red de impactos clara y adecuada al proyecto de interés permite la aplicación de la técnica que se presenta a continuación -red de flujo de información- facilitando grandemente la planeación y coordinación del trabajo

interdisciplinario.

7.5. Redes de Flujo de Información (RFI)

Un flujo de información es un grafo que identifica y ordena la manera como la información de las diferentes dimensiones analíticas ha de fluir de unas hacia otras, para lograr que cada especialista tenga información con el nivel de certidumbre necesario para que pueda llegar a sus propias conclusiones representativas, dentro de unos límites de tiempo prefijados.

Esta técnica permite secuenciar los estudios en el tiempo, ubicando la participación de cada especialista y enmarcándola dentro de dos estados diferentes de información y conocimiento del proyecto. Se diferencia de la red de impactos en que aquella sólo engloba los impactos, mientras que ésta recoge además etapas previas de recolección de información primaria o secundaria y su procesamiento.

Su utilidad radica en enmarcar el trabajo en el tiempo, permitirle a cada especialista contar con información de partida y marcarle un punto de llegada a su trabajo, de tal manera que esta técnica se constituye en un paso intermedio en el camino hacia la aplicación de técnicas de programación del trabajo más ortodoxas como el CPM y el PERT. En Angel, Carmona, Villegas (1996) se presenta un ejemplo detallado de la aplicación tanto de redes de impactos, como de redes de flujo de información.

7.6. Técnicas para la Estimación de Costos de Gestión

Las técnicas para estimar desde etapas tempranas los costos de gestión que puede implicar la construcción y operación de un proyecto de desarrollo pueden clasificarse según la etapa en la que se empleen y por tanto, según la información disponible acerca del proyecto y sus impactos en ese momento.

7.6.1. Costos de gestión para proyectos concentrados

Para proyectos concentrados la técnica consiste en encontrar un porcentaje del costo total del proyecto que ha de ser asignado a costos de gestión ambiental, esto se logra trabajando con una muestra de proyectos similares tanto tecnológicamente, como en cuanto a su entorno,. Este porcentaje debe tener en cuenta aspectos tales como (Angel et. al, 1996):

- **Alcance de las fuentes de Información**

Los estudios de Impacto ambiental en general deben proporcionar la información necesaria para establecer razonablemente los costos de gestión ambiental asociados a un proyecto de desarrollo teniendo en cuenta que mientras más inicial sea la fase, más inciertos serán los resultados.

- **Asignación para imprevistos**

En el caso de los costos de gestión ambiental la asignación del porcentaje de imprevistos es un tema de especial cuidado debido a las insuficiencias en el conocimiento del medio ambiente y a las incertidumbres asociadas a la efectividad que realmente tengan las acciones previstas en el Plan de Manejo Ambiental. Entre los factores a tener presentes para determinar los valores de estos imprevistos están:

- **Complejidad**

Se relaciona, de un lado, con la importancia de los ecosistemas y con su uso cultural, y de otro con la magnitud del impacto del proyecto, así como con la capacidad de gestión ambiental y la existencia de tecnologías adecuadas para el manejo de los impactos.

- **Incertidumbre**

La dinámica de los ecosistemas y de las condiciones sociales puede obligar a encarar acciones de gestión ambiental que en un principio no se hicieron evidentes, o que se descubren con el avance en el conocimiento del proyecto o del medio ambiente. Como se mencionó al inicio de este capítulo, los impactos ambientales pueden operar en condiciones de umbral, o generarse como consecuencia de encadenamientos de orden ecológico o social cuya dinámica solamente es identificable en períodos de tiempo considerables.

7.6.2. Costos de gestión para proyectos lineales

Para los proyectos lineales se puede implementar una técnica de estimación de costos de gestión basada en el mapa síntesis de criticidades. Requiere de la existencia de una base de datos de proyectos similares construidos, que suministre sus costos unitarios de gestión ambiental por kilómetro de proyecto.

El trazado de los proyectos existentes se superpone sobre el mapa síntesis de criticidades y se estima el número total de kilómetros por proyecto sobre zonas de criticidad baja, alta y media –verde, amarilla y roja, en términos de la convención tipo semáforo. Con esta información se busca una correlación ,simple o múltiple, que entregue costos de gestión ambiental como una función del número de kilómetros en cada tipo de criticidad. La regresión resultante se aplica a los trazados de los nuevos proyectos.

7.6.3. Presupuestos detallados

Conforme avanzan los estudios y se tiene un conocimiento detallado de los impactos, se van diseñando las acciones, planes y programas con los cuales se atenderán cada uno de ellos. De cada uno debe elaborarse un presupuesto detallado, teniendo en cuenta cantidades, precios de insumos y mano de obra, imprevistos, pago de impuestos, transferencias y regalías, etc.

Este tipo de presupuesto debe ir acompañado de los correspondientes cronogramas que garanticen que las acciones se adelantarán en el debido momento para lograr

el manejo del impacto ambiental, con la mínima perturbación del programa general del proyecto de desarrollo.

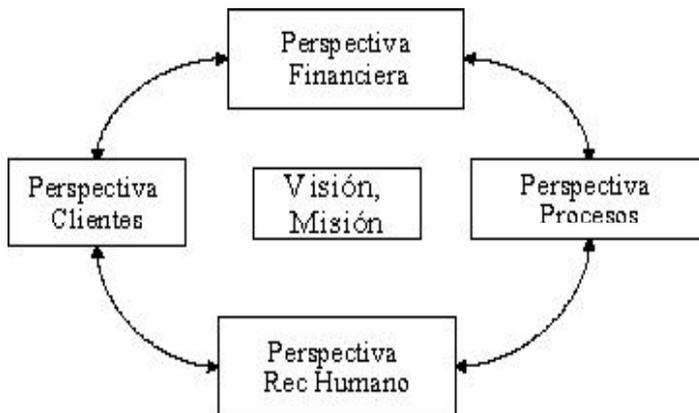
7.7. Cuadro de Mando Integral¹⁹

El Cuadro de Mando Integral (CMI) o Balanced Scorecard, desarrollado por Kaplan y Norton (1997, 2000) se presentó como una alternativa de solución a los problemas de medición de las empresas, que en general se limitaban a Indicadores de tipo financiero.

El CMI nació de la necesidad de establecer un equilibrio entre la gestión financiera (los resultados) y las demás variables que también condicionan la vida de una organización. Las medidas de gestión basadas exclusivamente en el desempeño financiero son limitadas. Primero, se refieren a resultados históricos. Segundo, ignoran las medidas no financieras. Tercero, no dan señales referentes a si la estrategia se lleva a cabo de acuerdo con lo planificado. Cuarto, no ayudan a hacer converger las actividades operativas con los objetivos estratégicos.

Según lo propuesto en el CMI, los factores críticos de éxito suelen agruparse en cuatro bloques, grupos o perspectivas, que representan las áreas más relevantes de la mayoría de organizaciones. La teoría general del CMI propone agruparlos en:

- Los resultados económicos y financieros
- Los usuarios o clientes
- Los procesos internos
- Los recursos humanos



Esquema de Cuadro de Mando Integral para la gestión empresarial

Trascendiendo el ámbito empresarial en el que se presenta la teoría del CMI, es posible adaptar su aplicación como herramienta de gestión a la consecución de un objetivo definido cualquiera que éste sea, en nuestro caso, la realización de la gestión ambiental de un proyecto de desarrollo. (Universidad Nacional de

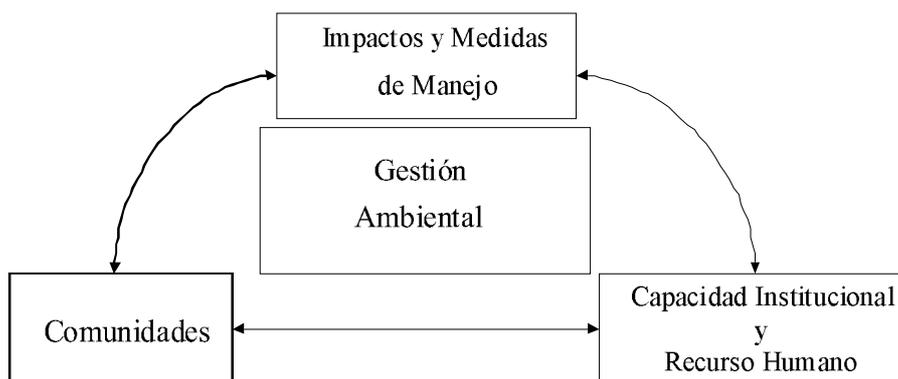
19. El material del numeral 7.7 se había presentado previamente en Angel, Carmona, Sánchez, 2003. Aquí se amplía a todas las dimensiones del Gestión Ambiental.

Una vez estructurado permitirá el establecimiento de señales de corto mediano y largo plazo que alerten sobre la brecha existente entre el estado deseado y el estado real de los factores críticos de éxito identificados. En este sentido, el CMI permite hacer seguimiento y apoya la toma de decisiones oportunas para retomar o redefinir el objetivo planteado.

• **Definición de las perspectivas de primer nivel:**

Lo primero debe ser la adecuación de las perspectivas de primer nivel (el más alto). En este caso los factores críticos de éxito son:

- Las comunidades (El cliente final)
- Los impactos y su manejo (Los procesos)
- Capacidad institucional y recurso humano.



Esquema de Cuadro de Mando Integral para la gestión ambiental en proyectos de desarrollo

• **Perspectiva Comunidades:**

Esta perspectiva se diseña para recoger todas las afectaciones finales de la gestión –o falta de gestión- ambiental del proyecto sobre las comunidades afectadas por él. Se parte de que la finalidad última de la autoridad ambiental es hacer que los impactos ambientales remanentes sean aceptables por la sociedad en general y por los afectados en particular. Esta perspectiva se identifica en cuanto a horizonte de tiempo con la perspectiva financiera del CMI empresarial, dado que recoge las expresiones de corto plazo. Esta perspectiva se divide en el segundo nivel en:

- Programa de información y participación comunitaria.
- Consulta previa a comunidades indígenas y negras
- Estado legal y manifestaciones de inconformidad social.

• **Perspectiva Impactos y sus medidas de manejo:**

Se diseña esta perspectiva para recoger los procesos propios de la gestión ambiental, es decir la serie de operaciones que el desarrollador del proyecto adelanta con el fin de gestionar los impactos derivados del mismo. Se identifica con la perspectiva de eficiencia operacional de CMI empresarial, en cuanto hace

énfasis en las expresiones de mediano plazo. Se subdivide en el segundo nivel en:

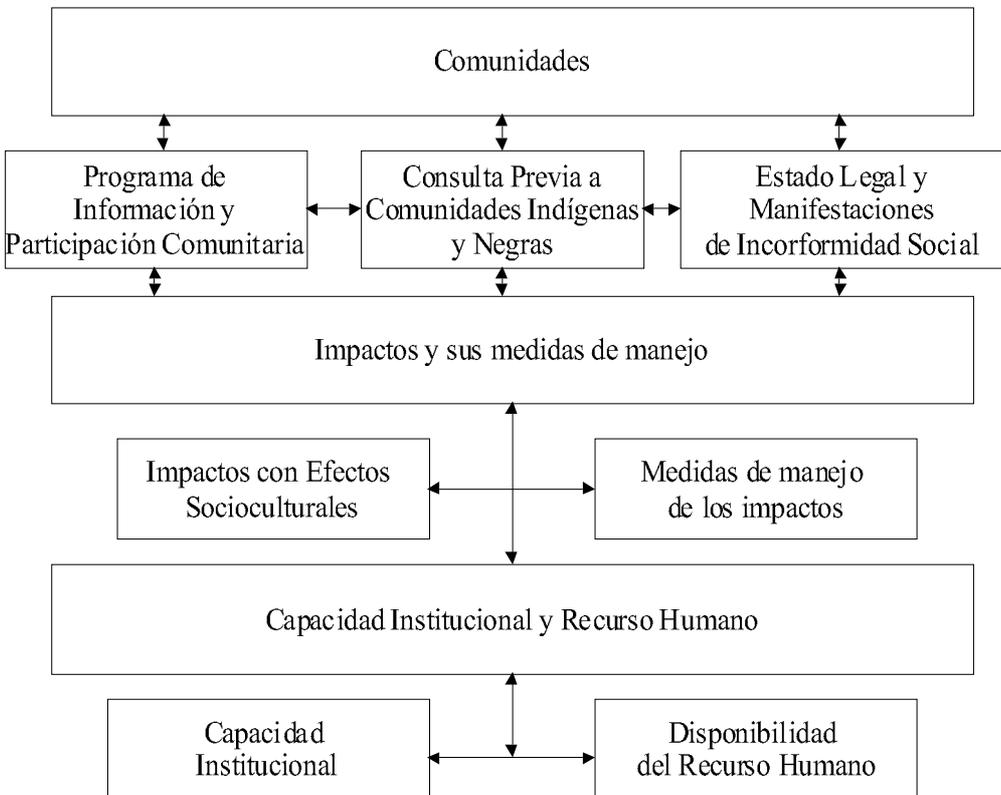
- Impactos ambientales
- Medidas de manejo

• **Perspectiva Capacidad Institucional y Recurso Humano:**

Esta perspectiva se diseña para recoger los aspectos atinentes a la disponibilidad de recursos adecuados para la implementación de la gestión ambiental. Se identifica con la perspectiva de igual nombre en el CMI empresarial en cuanto se centra en las expresiones de largo plazo. En el segundo nivel se subdivide en:

- Capacidad Institucional
- Disponibilidad del recurso humano.

Lo expuesto hasta aquí puede representarse en el diagrama mostrado a continuación:



Estructuración de las perspectivas de primer y segundo nivel

El diagrama de causalidad entre las perspectivas de primer y segundo nivel, muestra cómo se encadenan lógicamente los elementos contenidos en las perspectivas y porqué es necesario realizar seguimiento a la totalidad de ellas.

Con un Recurso Humano Disponible que responda a la magnitud de los impactos y a la gestión necesaria, se puede identificar de manera más idónea los Impactos ambientales del proyecto y consecuentemente determinar más asertivamente las Medidas de Manejo de los impacto de cada uno de ellos. o anterior garantiza mejores Programas de Información y Participación Comunitaria (y de Consulta Previa a Comunidades Indígenas y Negras cuando se afecten) que permitirán mantener un Estado Legal adecuado y oportuno y que minimice las Manifestaciones de Inconformidad Social.

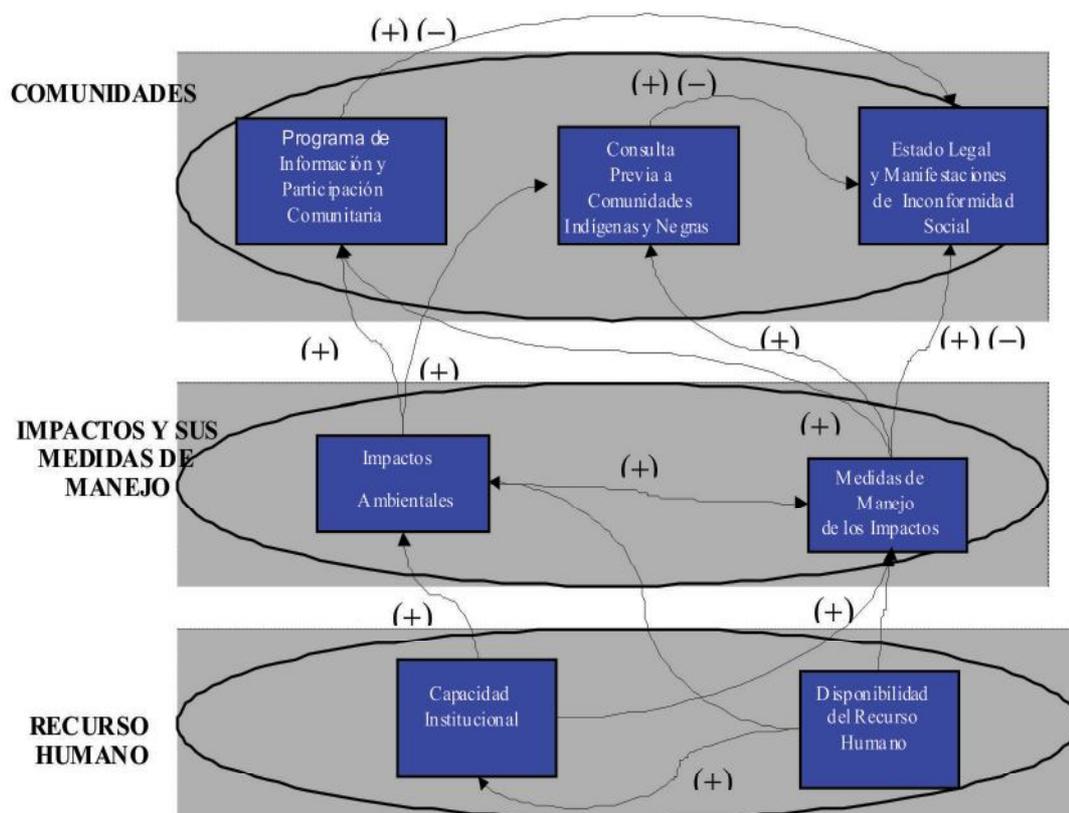


Diagrama de causalidad entre las perspectivas del primer y segundo nivel

El siguiente problema que debe atacarse es cómo garantizar coherencia entre las diversas etapas del ciclo de licenciamiento ambiental, de tal manera que el seguimiento incluya la información pertinente generada en las etapas anteriores, para que se preserve la continuidad en la gestión.

Para tal efecto se consideran tres etapas diferentes:

- Etapa de planeación y estudios, específicamente la actividad de licenciamiento

- Etapa de construcción
- Etapa de operación

En el licenciamiento, el objetivo del Sistema de Indicadores será brindar elementos de juicio que permitan un doble propósito: de un lado entregar al equipo de profesionales encargados de la aprobación de la licencia herramientas que les permitan confrontar la calidad del estudio contra los estándares de una gestión adecuada a la legislación y a las mejores prácticas de gestión ambiental, de otro, brindar señales de "Alerta Temprana" que permitan detectar cuáles son los puntos críticos que, desde la óptica del Estudio de Impacto Ambiental, se presentarán en la gestión del proyecto y por tanto, señalen cuáles han de ser los aspectos más relevantes sujetos a seguimiento en la etapa de construcción.

En la etapa de construcción, el objetivo del Sistema de Indicadores será brindar herramientas que permitan monitorear los impactos que se están presentando, garantizar que el manejo que se está dando a dichos impactos es adecuado, detectar impactos no considerados en el EIA pero presentes en la realidad y por último, señalar aspectos que quedarán pendientes para ser gestionados en la etapa de operación del proyecto.

En la etapa de operación, el objetivo del Sistema de Indicadores será hacer seguimiento a los temas pendientes de la construcción, detectar impactos que se presenten, no contemplados en el EIA y velar por que el Plan de Manejo Ambiental de Operación (PMAO) se desarrolle sin tropiezos.

A continuación se presenta el esquema general del Sistema de Indicadores de gestión Ambiental definiendo los alcances de los indicadores para cada perspectiva y etapa.

PLANTEAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA DE INDICADORES

PERSPECTIVA DE PRIMER NIVEL	PERSPECTIVA DE SEGUNDO NIVEL	Qué se va a medir	Indicadores en el subproceso de otorgamiento de licencia	Indicadores en el subproceso de seguimiento a la construcción	Indicadores en el subproceso de seguimiento a la operación
1 COMUNIDADES	1A PROGRAMA DE INFORMACIÓN Y PARTICIPACIÓN COMUNITARIA	Aspectos del programa: Procedimiento General Escenarios y espacios de participación Contenidos y alcance de la convocatoria Información Consulta Concertación	Indicadores que muestren evidencia de: Inclusión Convocatoria Realización Discusión Acuerdo	Cumplimiento a lo exigido en la licencia Desarrollo del programa de PIPC con los mismos indicadores	Cumplimiento a lo exigido en la construcción Oportunidad en el cumplimiento de compromisos pendientes
	1B CONSULTA PREVIA A COMUNIDADES INDIGENAS Y NEGRAS	Procedimiento General Escenarios y espacios de participación Contenidos y alcance de la convocatoria Información Consulta Concertación	Indicadores que muestren evidencia de: Inclusión Convocatoria Realización Discusión Acuerdo	Desarrollo del programa de PIPC con los mismos indicadores atendiendo a las particularidades de estas comunidades	Oportunidad en el cumplimiento de compromisos pendientes
	1C ESTADO LEGAL Y MANIFESTACIONES DE INCONFORMIDAD SOCIAL	Acciones judiciales Acciones de hecho	Indicadores de Uso y frecuencia de acciones judiciales Indicadores de Uso y frecuencia de acciones de hecho	Indicadores de Uso y frecuencia de acciones judiciales Indicadores de Uso y frecuencia de acciones de hecho	Indicadores de Uso y frecuencia de acciones judiciales Indicadores de Uso y frecuencia de acciones de hecho
2 IMPACTOS Y SUS MEDIDAS DE MANEJO	2A IMPACTOS AMBIENTALES	Impactos Ambientales en cada una de las 5 dimensiones dependiendo del tipo de proyecto	Indicadores correspondientes a la evaluación de magnitud de cada uno de los impactos en construcción y operación, diseñados con el objetivo de ser alertas tempranas	Indicadores que midan la evolución en el tiempo de la magnitud del impacto real causado Evolución en el tiempo de impactos ambientales no contemplados en los estudios	Seguimiento a impactos ambientales remanentes Seguimiento a impactos ambientales remanentes
	2B MEDIDAS DE MANEJO DE LOS IMPACTOS	Correspondencia entre impacto y medida de gestión Oportunidad en el planteamiento de la medida	Para los impactos contemplados, indicadores que midan: Correspondencia entre impacto y medida de gestión (Juicio de experto) Oportunidad en el planteamiento de la medida (Ajuste de cronogramas propuestos)	Para los impactos contemplados, indicadores que midan: Oportunidad en la implementación de la medida de manejo Eficiencia en la implementación de la medida de manejo	Oportunidad en el cumplimiento de compromisos pendientes Oportunidad y eficiencia en la implementación de medidas del PMA de Operación
3 CAPACIDAD INSTITUCIONAL Y RECURSO HUMANO	3A CAPACIDAD INSTITUCIONAL	Disponibilidad de Políticas Disponibilidad de Recursos	Grado de adecuación de las políticas Indicadores de disponibilidad de recursos técnicos y financieros	Grado de adecuación de políticas, procedimientos y normas Indicadores de disponibilidad de recursos técnicos y financieros	Grado de adecuación de políticas, procedimientos y normas Indicadores de disponibilidad de recursos técnicos y financieros
	3B DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HUMANO	Conformación del equipo interdisciplinario Competencia del Recurso Humano	Indicadores de correspondencia entre los impactos y la gestión y la planta de personal propuesta Indicadores de nivel de capacitación	Conformación del equipo de gestión: Cobertura temática Nivel de formación Aceptación por la comunidad	Conformación del equipo de gestión: Cobertura temática Nivel de formación Aceptación por la comunidad

7.8. Ideas y Conceptos Claves

- Algunas técnicas permiten la organización del equipo interdisciplinario, la detección de vacíos de información / formación y la detección de áreas temáticas, componentes del sistema o localidades geográficas importantes.
- Las listas permiten corroborar que todos los posibles impactos han sido tenidos en cuenta. Si además asignan valor a cada impacto, permiten una rápida, pero superficial comparación de alternativas.
- Las matrices permiten organizar la información relativa a los impactos por actividades causantes y componentes receptores del mismo. Si bien no evalúan los impactos, si permiten detectar temáticas, actividades o localidades de interés.
- La matriz de análisis por dimensiones permite construir un panorama completo de los impactos causados teniendo en cuenta las dimensiones física, biótica, económica, cultural y política.
- Las redes de impactos permiten organizar los impactos de acuerdo a relaciones crecientes de causalidad, habrá por tanto, impactos de primera, segunda, hasta n^{ésima} generación
- La matriz de análisis por dimensiones y la red de impactos contienen la misma información, presentada de manera disciplinaria en el primer caso y de manera causal en el segundo. La recomendación es usarlas conjuntamente.
- Las redes de flujo de información se construyen a partir de las redes de impacto y presentan además, la información inicial, intermedia y final que se requiere o se produce en el estudio ambiental.
- La estimación de los costos de gestión se realiza:
 - ★ Para proyectos concentrados, se estima un porcentaje del costo total que se dedicará a la gestión ambiental, comparando con proyectos existentes, tecnológicamente similares.
 - ★ Para proyectos lineales, se asigna un costo ambiental unitario, asociado al mapa de criticidades.
- El Cuadro de Mando Integral (CMI) permite realizar un seguimiento sistemático a la gestión ambiental, cubriendo una gama de dimensiones, perspectivas y etapas.

7.9. Ejercicios

1. Seleccione un proyecto que se encuentre en la etapa de estudios, construya la matriz de FEARO y con base en ella elabore la matriz de análisis por dimensiones y la red de impactos para ese proyecto.
2. Con base en lo anterior, elabore la red de flujo de información y la programación (cronograma) de las actividades necesarias para la realización del estudio ambiental.
3. Seleccione un proyecto que se encuentre construido y operando y sobre el que se tenga información suficiente. Elabore la matriz de análisis por dimensiones a partir de la información existente de construcción y operación. Compare con la matriz de impactos realizada en la etapa de estudios. Discuta los impactos no detectados o no gestionados y asígnelos a una de las dificultades cognitivas en la evaluación (capítulo

LISTA DE SIMBOLOS

$C(X)$	Función escalar que evalúa el costo de gestión asociado al vector de impactos X
c_i	Costo de gestión asociado al impacto i
k_i	Cada una de las características de aptitud ambiental que definen la aptitud general de una región geográfica
P	Proyecto de desarrollo
P_θ	Proyecto de desarrollo lineal que sigue una determinada ruta θ
\hat{u}	Estimador del valor de la variable u en t_1 , realizado en t_0
X	Vector que contiene la totalidad de impactos de un proyecto P
x_i	Cada impacto particular en un proyecto de desarrollo
x_i^*	Valor máximo permisible del impacto i
$Y(X)$	Función escalar que evalúa la gravedad del vector X
y_i	Evaluación de la gravedad para el impacto i
y_i^*	Valor máximo permisible de la evaluación del impacto i
$W(X)$	Función escalar que evalúa los beneficios asociados al proyecto P , cuyos impactos se denotan por X
W_0	Beneficios mínimos para que el Proyecto P se justifique
$Z(X)$	Costos ambientales correspondientes al vector X
z_i	Costos ambientales asociados al impacto i
z_i^*	Valor máximo permisible del costo ambiental para el impacto i
$\varphi(\varepsilon, \mu)$	Región geográfica que cumple ciertas características
ε, μ	Coordenadas (x,y) geográficas
$\pi = f(k_i)$	Características predeterminadas de aptitud ambiental
$\theta(\varepsilon, \mu)$	Ruta posible para un proyecto lineal
$\psi(t)$	Función que describe la evolución de X a lo largo del tiempo
$\dot{\iota}_0$	Función de pertenencia a un conjunto, en lógica difusa

BIBLIOGRAFIA

- Angel, E. "Manejo de la incertidumbre en las evaluaciones ambientales" Energética No 13, Revista de la Universidad Nacional de Colombia. 1995. p 47-49.
- Angel, E. "Técnicas para el desarrollo de estudios ambientales". En Seminario "Políticas y criterios sobre la realización de estudios ambientales" ISA-ISAGEN-AICO, Medellín, nov/95. p 99-117
- Angel, E. "Impactos y Gestión Ambientales en Proyectos de Desarrollo: Instrumentos para la Fijación de Políticas". En Seminario Energía y Medio Ambiente. Fondo FEN- Uniandes. Bogotá, octubre/96.
- Angel E. "Una aproximación a la relación entorno-proyecto-gestión". Gestión y Ambiente, revista de la Especialización en Gestión Ambiental de la Universidad Nacional. No 2, 1999, p 29-31
- Angel, E., S.I. Carmona, L.C. Villegas. Gestión ambiental en proyectos de desarrollo: una propuesta desde los proyectos energéticos. Fondo FEN Colombia. Bogotá, 290 pp. 1996.
- Angel, E., Jurado, J.L. "Metodología para la Evaluación Ambiental del Plan de Expansión del Sector Eléctrico Colombiano", ENERGETICA, Revista de la Organización Latinoamericana de Energía OLADE. Año 16, No 1, Ene-Abr 1992, p 25-32
- Angel, E., Villegas, C.I., Zambrano, A.M. "Simulación del proceso de colonización del bosque". Gestión y Ambiente, revista de la Especialización en Gestión Ambiental de la Universidad Nacional. No 1, 1998, pp.39-48
- Angel, E., Carmona S.I. Sánchez. F.A. "Indicadores socioculturales para la evaluación y seguimiento de la dimensión social en los EIA y PMA". Gestión y Ambiente, Revista Gestión y Ambiente. Universidad Nacional. Vol 6 - No 1, Agosto 2003, pp. 5-16
- Angel, E. Castaño C.M. " Un modelo para la georeferenciación de la colonización del bosque a futuro". Revista Gestión y Ambiente. Universidad Nacional. Vol 6 - No 2, Diciembre 2003, pp. 71-86
- Beasley. D, Bull D.R. Martin R.R. "An overview of genetic algorithms. Part 1. Fundamentals". University Computing 1993, 15(2) 58-69
- Campo. R., Angel. E., Gómez. D., Leon., O.L. "Assessment of environmental

issues using SUPER-OLADE/BID for comparing alternative electricity system expansion strategies" En Seminario Electricity, health and the environment: Comparative assessment in support of decision making. International Atomic Energy Agency, Viena, Oct/96

Castaño Carlos Mario. "Los SIG como herramienta de proyección de variables ambientales: Colonización del bosque". Trabajo de grado. Especialización en Gestión Ambiental. Universidad de Antioquia. 2002

Castaño C., Paz S. "Los Sistemas de Información Geográfica como una herramienta de Planeación Ambiental" Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería de Antioquia. 1998

CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Ley 99 de 1993

Dandy, G.C. "An approximate method for the analysis of uncertainty in benefit-cost ratios", Water Resources Research, vol 21 No 3, p 267-271, marzo 1985

DYNER, Isaac. "Dinámica de sistemas y simulación continua en el proceso de planificación". Edición 1. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Colciencias. 1993. 160 p.

Etter, Andrés; Andrade, Angela. "Seguimiento de la Colonización en la Amazonía Colombiana, el caso de San José del Guaviare (1973-1986)". CIAF, IGAC, Bogotá. II SIMPOSIO LATINOAMERICANO SOBRE SENSORES REMOTOS. Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER). 1987.

Fontane D.G., Gates T.K., Moncada E. "Planning Reservoir Operation with Imprecise Objectives" Journal of Water Resources Planning and Management Vol. 123, No 3 May/Jun. 1997. P 154-162

Forrester J.W. "Industrial Dynamics." MIT Press, 1961

Forrester J.W. "Urban Dynamics." MIT Press, 1969

Forrester J.W. "World Dynamics." MIT Press, 1971

GIASE. – Grupo Intrasectorial de Asuntos Socioeconómicos. "Diagnóstico de centrales hidroeléctricas en construcción y operación, 1991

Goicoechea, A., Hansen, D.R., Duckstein, L. "Multiobjective decision analysis with engineering and business applications". John Willey & Sons, Inc., New York, N.Y. 1982

Goldberg D.E. "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning." Addison-Wesley. 1989

Holland J.H. "Adaptation in natural and artificial systems." MIT Press, 1975

Interconexión Eléctrica S.A.-ISA. Oficina ambiental. "Calificación ambiental de los proyectos del plan de expansión." 1988

Interconexión Eléctrica S.A.-ISA, "Metodología para la Evaluación ambiental del

- Plan de Expansión del Sector Eléctrico Colombiano”, Documento OAPE-144, mayo 1991
- Interconexión Eléctrica S.A.-ISA -Instituto de Estudios Regionales- INER Universidad de Antioquia. “Estudio de Posibilidades y Restricciones Ambientales para los Proyectos del Plan de Expansión Eléctrica. ISA 2001-2010.” 4 vol. Medellín, mayo 1998
- ISAGEN S.A. E.S.P. selección y recomendación de sitios adecuados para la instalación de turbogases y ciclos combinados – metodología y resultados. Informe presentado al Ministerio del Medio Ambiente. Santafé de Bogotá D.C. Agosto de 1996.
- Kaplan, R.S. y Norton, D.S. “El cuadro de mando integral” Gestión 2000, Barcelona. 1997
- Kaplan, R.S. y Norton, D.S. “The Strategy Focused Organization” Gestión 2000, Barcelona. 2000
- Kayser, J., Le quotidien français, Paris, A. Colin, 1963
- Kirkby M.J., Morgan R.P.C. “Erosión de Suelos”. Editorial Limusa. México. 1991.
- Klir, G.J., Yuan B. “Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications.” Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1995
- Krippendorff, K.: Metodología de análisis de contenido. Teoría y práctica, Barcelona, Paidós, 1.990.
- Little, Paul E. “Ecología Política del Cuyabeno”. Edición Abya-Yala. Quito, 1992.
- Lokta A.J. “Elements of Physical Biology”. Williams and Wilkins. Baltimore. 1925
- Mattunen M., Hämäläinen R.P. “Decision Analysis interviews in environmental impact assessment”. European Journal of Operational Research. 87. 1995. P 551-563.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE - UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLIN “Indicadores Socioculturales Para la Evaluación y Seguimiento de la Dimensión Social en los EIA y PMA”,_Medellín, 2001
- Molano A. “Selva Adentro: Una historia oral de la colonización del Guaviare”. El Ancora Editores. 1987. 138 p
- Owen W.J., Gates T. K., Flug M. “Variability in Perceived Satisfaction of Reservoir Management objectives”. Journal of Water Resources Planning and Management vol. 123, No 3, May/Jun 1997. p 147/153.
- Pedrycs, W., “Fuzzy control and fuzzy systems”, 2nd Ed., John Willey & Sons, Inc., New York, N.Y. 1993
- Pielou E.C. “Mathematical Ecology”. John Wiley & Sons, Inc. New York N.Y. 1977
- Powersim User,s guide and Reference version 2.0 360 p

- Prawda J. "Métodos y modelos de investigación de operaciones". Ed Limusa, México, 1977, vol. I, 935 p
- Sawanda. M. "Instructions to Use the Random Point-in-Polygon Generation Program (VBA Macro)". University of Ottawa. 2002.
- Smith, R.A., Poveda, G., Mesa, O.J. Valencia, D., Dyner, I. "Decisiones con Múltiples Objetivos e Incertidumbre". Versión preliminar. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1992
- Streeter, H. W., Phelps, E. B. "A study of the pollution and natural purification of the Ohio River, III. Factors concerned in the phenomena of oxydation and reparation" U.S. Public Health Service, Bulletin No. 146. 1925
- Tchobanoglous, G. Schroeder E.D. "Water Quality". Adisson Wesley 1987.
- Thom R. "Matemática y teorización científica". En "Pensar la matemática". 2a Ed. Tusquets Editores. Barcelona. 1988. 319 pp
- Villegas, C.I. Localización de proyectos interconectados con base en criterios de mínimo costo ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Posgrado en Gestión Ambiental. Monografía de Grado. 2000
- Villegas, C.I., Zambrano A.M. "La Dinámica de Sistemas como una Herramienta en la Planeación Ambiental", Tesis de grado, Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería de Antioquia, 1997.
- Weiscmeier W.H., Smith D. "Rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains". Agricultural Handbook N. 282 U.S.D.A. Washington D.C. 1965.
- Witzenfeld H. "Metodologías más utilizadas para la evaluación de impactos ambientales". En: Seminario Internacional sobre Impacto Ambiental Cali. 1991.
- Whipple W. Jr. "Integration of water resources planning and environmental regulation". Journal of Water Resources Planning and Management vol. 122, No 3, May/Jun, 1996. p189/196.
- Zadeh, L.A. "Fuzzy sets". Information and control, 8, 338-363. 1965
- Zambrano A.M., Angel E. "Modelación Dinámica aplicada al Estudio de Posibilidades y Restricciones de ISA". Monografías de la primera cohorte. Posgrado en Gestión Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.