

## Teoría Conceptual-Sistémica de la Sinergia de Impactos Ambientales y el Establecimiento de Bases para su Evaluación

### *Conceptual-Systemic Theory of Environmental Impact Synergy and Establishment of Bases for its Evaluation*

Diego Ocampo Melgar

Universidad Católica Boliviana "San Pablo", Cochabamba

diego13bo@hotmail.com

**Resumen:** La falta de una metodología explícita para la evaluación de impactos ambientales sinérgicos resalta la necesidad de un entendimiento más completo del fenómeno mediante una teoría adecuada, planteada como una teoría conceptual-sistémica. Esta teoría es obtenida mediante dos procesos explicativos, la generalización y explicación causal, para responder a qué es la sinergia y cómo funciona. Dentro del desarrollo de las explicaciones se construye una sucesión de modelos como una aproximación hacia el fenómeno real, culminando en un modelo funcional de caja translúcida. La teoría plantea el fenómeno de sinergia de impactos ambientales, como un escenario de desestabilización del sistema que permite la generación de efectos mayores a los previstos por solo los impactos aislados.

El escenario es descrito por la coincidencia tanto de: (a) los impactos, efectos y disturbancias, actuando sobre una tendencia específica para describir una amenaza, (b) la estabilidad del sistema, específica para la tendencia, constituyendo una vulnerabilidad, como (c) la influencia que tiene el contexto espacial; entre las tendencias, la cuenca y el paisaje; y el contexto temporal; por las variaciones climáticas directamente o indirectamente por la influencia de sistemas acuáticos adyacentes. El escenario de riesgos de sinergia puede ser descrito por el modelo mediante las Redes Bayesianas de Impactos para analizar la amenaza, la Matriz Multicriterio para analizar la vulnerabilidad, y la construcción del contexto espacial y temporal para plantear los escenarios, que junto con los lineamientos planteados por la teoría, pueden establecer las bases para una metodología adecuada para la evaluación de la sinergia de impactos.

**Palabras clave:** Sinergia, riesgo, estabilidad, escenario, modelo de caja translúcida, Redes Bayesianas, Matriz Multicriterio.

**Abstract:** The lack of an explicit methodology for the assessment of synergistic environmental impacts, highlight the need for more complete

understanding of the phenomenon by means of a proper theory, proposed as a conceptual-systemic theory. This theory is obtained through two explanatory processes, generalization and causal explanation, to answer what is synergy and how does it work. Within the development of explanations a succession of models is built as an approximation to the real phenomenon, culminating in a functional translucent box model. The theory presents the phenomenon of environmental impact synergy as a scenario of system destabilization that allows the generation of greater effects than the predicted by the isolated impacts.

The scenario is described by the coincidence of the (a) impacts, effects and disturbances, acting upon a specific tendency to describe a menace, (b) the system stability, specific for the tendency, constituting a vulnerability, as the (c) influence that the spatial context; between tendencies, watershed and landscape; and the temporal context; by the direct climatic variations y indirect through the influence of adjacent aquatic ecosystems. The synergy risk scenario may be described by the model through the Impact Bayesian Networks to analyze the menace, the Multicriteria Matrix to analyze vulnerability, and the construction of the spatial and temporal context to pose the scenarios, that along with the guidelines established by the theory may set the basis for a suitable impact synergy assessment.

**Key words:** Synergy, risk, stability, scenario, translucent box model, Bayesian Network, Multicriteria Matrix.

## 1 Introducción

El término de sinergia ha sido incluido en la ciencia para describir fenómenos de causalidad múltiple asociados a una incertidumbre en los mecanismos involucrados. Particularmente, el término de impactos sinérgicos se emplea para explicar el resultado de múltiples interacciones entre los impactos simultáneos generados por actividades humanas sobre el ambiente, donde el resultado es mayor a la suma de los impactos contemplados aisladamente.

Esta descripción del fenómeno corresponde con teorías fenomenológicas (Bunge 1975) donde se excluye la descripción de las variables, mecanismos, interacciones y procesos, para describir solamente una noción del funcionamiento, en este caso, la generación de un efecto mayor. Estas teorías frecuentemente carecen de un amplio alcance (Brown, 1981), una clara definición de sus componentes (Rosenberg, 1985) o conexión entre sus elementos (DeAngelis y Waterhouse, 1987), llevando a que sea cada vez menos útil para su aplicación (Margalef, 1983:173). La utilización arbitraria de una teoría fenomenológica limita la experiencia y el entendimiento del fenómeno, perpetuando la noción de incertidumbre y superficialidad. Debido a esto, la intención del avance en la ciencia es la de construir teorías representacionales que incluyan y expliquen las correspondientes teorías fenomenológicas (Bunge 1975).

Por otro lado, las herramientas convencionales de evaluación ambiental tienen limitaciones para evaluar las características y propiedades atribuidas a la sinergia de impactos ambientales, cómo aspectos de organización espacial y temporal, interacciones con el ecosistema y el paisaje, etc. pudiendo resultar en evaluaciones generales, superficiales o incompletas. Esto sumado a los problemas causados por la naturaleza subjetiva de la Evaluación de Impacto Ambiental (Shepard, 2005: prefacio V), identificado repetidas veces en la ciencia (Margalef, 2002:15) que pueden influenciar el criterio del evaluador, donde la idea de sinergia entre impactos no es suficientemente clara. En suma, la falta de una metodología explícita para la evaluación de impactos ambientales sinérgicos resalta la necesidad de un entendimiento más completo del fenómeno mediante una teoría adecuada, que permita la construcción de las herramientas y metodología requeridas.

## **2 Definición del problema**

Existen clasificaciones para proyectos en todo el mundo que requieren, de acuerdo con la reglamentación local, una evaluación integral, estratégica y exhaustiva de los impactos ambientales, incluyendo los impactos sinérgicos. Todas las metodologías nacionales de evaluación de impacto ambiental tienen limitaciones importantes al evaluar la sinergia. El aspecto sinérgico suele quedar en segundo plano y en muchos casos no es adecuadamente considerado dentro del EIA. Para que exista un método de análisis y evaluación de sinergia de impacto ambiental adecuado, debe primero existir una explicación teórica del fenómeno que cumpla con ciertos componentes básicos para entender la sinergia.

## **3 Objetivo**

Los propósitos de esta investigación radican en desarrollar la construcción conceptual del fenómeno de sinergia (limitado a ecosistemas terrestres continentales), sistematizar un proceso óptimo para su evaluación (mediante herramientas y lineamientos metodológicos), y por último, proponer una aplicación de las herramientas y lineamientos metodológicos para dos actividades hipotéticas. Todo esto cumpliendo con los siguientes componentes teóricos: definición, postulados, patrones, procesos, causas, mecanismos, dominio y modo de traducción; aspectos basados en el Paradigma Constructivista y el Paradigma de la Complejidad de la ciencia, de tal manera de desarrollar los procesos explicativos para construir un modelo adecuado del fenómeno y obtener los componentes teóricos necesarios, basado en el sustento lógico y teórico de las fuentes y herramientas utilizadas. Bajo este enfoque, la teoría propuesta fue validada por confirmación mediante las fuentes utilizadas, la metodología y herramientas, y por los Criterios de las Teorías Científicas propuestas por Bunge (1975).

## 4 Sustento teórico

### 4.1 Construcción de teorías científicas

La teoría es una construcción conceptual (Suppe, 1977) que permite la explicación causal del fenómeno observable dentro de un dominio (Miller, 1987) para obtener un entendimiento de dicho fenómeno. “Entendimiento es una contrastación empírica... entre un conjunto de fenómenos observables y confirmables, del mundo natural y una construcción conceptual” (Pickett *et al.*, 1994:28). Donde la construcción conceptual es un “sistema hipotético-deductivo concerniente a un objeto modelo que es a su vez, una representación conceptual esquemática de una cosa o de una situación real o supuesta real” que en este caso es constituido por un modelo (Bunge, 1975:15, 45). Esta construcción conceptual es constituida por componentes de la teoría, donde se identifican los siguientes: definición, postulados, patrones, causas, procesos, mecanismos, dominio y modo de traducción (Pickett *et al.*, 1994). La construcción conceptual es contrastada científicamente, inicialmente en este trabajo, por Confirmación mediante las bases, metodología y requisitos de la teoría científica y posteriormente por Falsabilidad por la experimentación del modo de traducción (Pickett *et al.*, 1994).

Los requisitos de la teoría científica o síntomas de la verdad de las teorías factuales son condiciones que una teoría debería cumplir para ser aceptada (Bunge, 1975:145-162). Están compuestos por requisitos sintácticos (corrección sintáctica y sistematicidad o unidad conceptual), requisitos semánticos (exactitud lingüística, interpretabilidad empírica, representatividad y simplicidad semántica), requisitos epistemológicos (consistencia externa, capacidad explicativa, capacidad predictiva, profundidad, capacidad unificadora o posibilidad de expansión para abarcar nuevos ámbitos, fecundidad y originalidad), requisitos metodológicos (escrutabilidad, refutabilidad, confirmabilidad y simplicidad metodológica) y requisitos filosóficos (parsimonia de niveles, solidez metacientífica y consistencia desde el punto de vista de la concepción del mundo).

### 4.2 Modelos conceptuales

En el proceso de adecuación de la teoría se utilizaron varios modelos para explicar el funcionamiento, tanto de los impactos como de los ecosistemas. Los modelos hipersimplificados son creados para explicar lo más simple de un proceso, solo los elementos esenciales y causalidades simples, sin entrar en detalle en la noción de procesos y cambios internos. El modelo de riesgos pertenece al análisis de riesgos donde se asigna una amenaza entrante hacia un sistema vulnerable, resultando en un riesgo para cierta eventualidad. Un modelo de caja negra es un modelo provisto solo de entradas y salidas, sin ninguna explicación de los mecanismos involucrados, correspondiente con teorías fenomenológicas (Bunge,

1975). El modelo de caja translúcida abarca los mecanismos y variables internas hipotéticas para explicar el comportamiento exterior de la caja, correspondientes con teorías representacionales (Bunge, 1975).

Finalmente la cuantificación del modelo puede relacionarse con modelos matemáticos donde el objeto real es plasmado mediante conexiones lógicas y fórmulas, para realizar el estudio del objeto sin su análisis experimental (Gertsev y Gertseva, 2004:329). Obteniendo así un modelo funcional (Pickett *et al.*, 1994:72) a partir del modelo de caja translúcida. Este modelo funcional es desarrollado mediante tres herramientas, la Red Bayesiana de Impactos, una Matriz Multicriterio de Vulnerabilidades y una Construcción del Contexto Espacial y Temporal para el modelo. Una Red Bayesiana es un grafo dirigido, acíclico, que consta de nodos conectados por arcos que implican una influencia directa entre nódulos, dependiendo de la complejidad del fenómeno, pueden existir varios niveles en los cuales se describen varios nodos de relación; para cada relación se establecen los eventos contingentes asociados a la influencia de un nodo a otro (generalmente son solo positivos o negativos, P y Q) y un valor probabilístico para cada evento. La Matriz Multicriterio es una herramienta para combinar diferentes criterios para una sola conclusión, de manera que la herramienta base es una matriz que permite un cruce de variables dentro de las celdas para generar una composición de aspectos, que podrían ser vistos como varias matrices dentro de una sola. El contexto es construido de modo descriptivo solamente, planteando las principales relaciones de influencia para aspectos de paisaje, cuenca y clima.

### **4.3 Acercamiento a la definición de sinergia**

Para el término de sinergia, se pueden encontrar muchas definiciones que difieren según el área en que se utiliza, casi todos sin alejarse de la noción básica de reforzamiento, pero también, sin profundizar en una explicación clara del funcionamiento. La sinergia es entendida como: procesos de estructuración, emergencia, auto-organización, procesos no-lineales, sistemas dinámicos, etc. Es fecunda en muchos campos científicos pero, a su vez, en muchos campos no científicos. Aún no hay consenso sobre el estado de la sinergia y su papel en el sistema del conocimiento científico. Para el caso de la sinergia que ocurre en impactos ambientales, existen algunas definiciones variadas según los autores, que pueden ser resumidas por un reforzamiento entre impactos, agentes o efectos que lleva a un resultado, manifestación o efecto mayor que al ser aislados (Fraume Restrepo, 2007:242; Gómez Orea, 1999; Bolivia, ley N° 1333, 1995:Art. 4) en términos de magnitud, intensidad, severidad o complejidad (Contant y Wiggins, 1993). Para Bolivia, los impactos sinérgicos, junto con otros, pueden tener un resultado final importante, definido como Desequilibrio Ecológico Grave: “Alteración significativa de las condiciones ambientales en las que se prevén impactos acumulativos, sinérgicos y residuales que ocasionarían la destrucción, el

aislamiento o la fragmentación de los ecosistemas” (Bolivia, ley N° 1333, 1995 Art. 3). Los impactos sinérgicos forman parte de la clasificación de impactos que deben estar incluidos tanto en una Evaluación Ambiental Integral de Impactos como en una Evaluación Ambiental Estratégica, que es utilizada en la Unión Europea.

#### 4.4 Teorías y fuentes para la integración de conceptualizaciones ecológicas en el entendimiento de la sinergia ambiental

El principal sustento para esta investigación proviene del paradigma holístico y sistémico de la ciencia del cual provienen las ciencias sistémicas y de complejidad (Riechmann, 2008). Este enfoque interpreta al mundo como una gran organización jerárquica de totalidades complejas y propiedades emergentes, estudiadas por la **Teoría General de los Sistemas** de Von Bertalanffy (1968) para describir su funcionamiento y predecir su desarrollo. Esta teoría describe los sistemas como totalidades compuestas por elementos y relaciones, que son más importantes que los elementos mismos, donde el todo concreto es indivisible y no puede ser reducido a sus partes sin perder información.

Dentro de estas totalidades, el sistema exhibe diferentes comportamientos debido a la retroalimentación e histéresis. La retroalimentación es un proceso cíclico que controla el funcionamiento del sistema en función a la salida que genera. En este caso generando la estabilización, y la desestabilización. La **retroalimentación negativa** es importante en sistemas ecológicos pues permite un ecosistema estable frente a cualquier perturbancia mediante las capacidades de resistencia y resiliencia. Mientras que la **retroalimentación positiva** puede desencadenar cambios estructurales en el sistema, modificando su equilibrio. La **histéresis** se refiere a la contingencia de un sistema a las modificaciones y estados pasados: como una respuesta lenta o una recuperación lenta o incompleta del estado original, por una acumulación gradual de un impacto, llevando a un comportamiento no lineal, cambios abruptos y no predecibles.

La **disturbancia ecológica** es la causante de la incidencia sobre la estabilidad e histéresis del sistema. Esta puede ser positiva cuando genera adaptaciones que favorecen la estabilidad, o negativa cuando son represivos y destructivos sobre el sistema. Esto a menudo depende de las características de la perturbancia, como frecuencia, intensidad o duración, y de características del propio sistema.

La estabilidad del sistema es descrita, inicialmente, por el paradigma de los sistemas en equilibrio aplicado en la ecología. Describe un equilibrio constante y único que el sistema es capaz de mantener indefinidamente. Implica un sistema cerrado, libres de modificaciones e influencias humanas. En esta descripción el equilibrio es definido por la cantidad de biomasa, estructuras y heterogeneidad conformando una **resistencia**; acompañado de oscilaciones regulares causadas por el régimen de perturbancia local frente a la **resiliencia**, ambos determinados por la

retroalimentación negativa. Para una descripción más profunda y acorde con la realidad y el comportamiento dinámico, se desarrolla el paradigma de sistemas sin equilibrio. Describe sistemas ecológicos abiertos, estables y dinámicos, con una resiliencia y regulación emergentes y limitadas, con múltiples estados estables separados por umbrales y regulados por factores externos e internos.

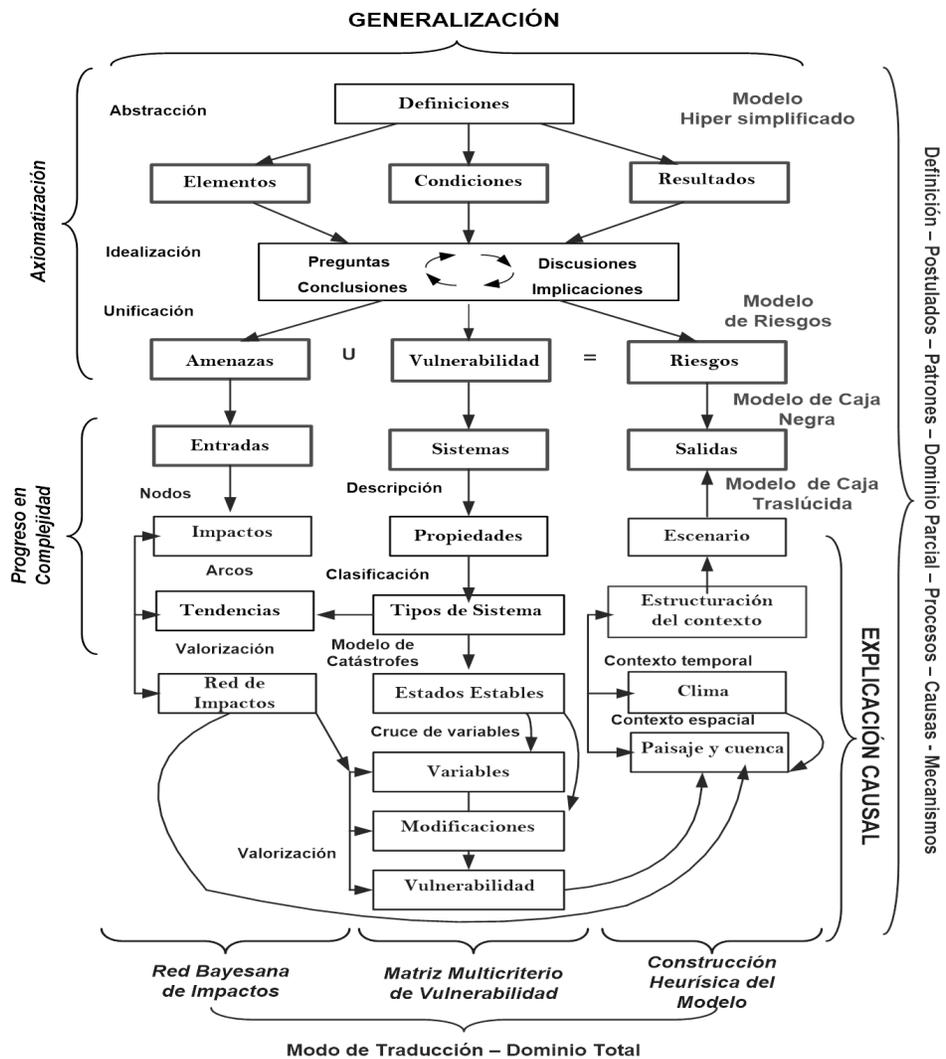
Dentro del contexto que describe el comportamiento de los sistemas y su estabilidad, la **Teoría del Caos** (Lorenz, 1963) permite argumentar el origen del comportamiento caótico. Esta teoría explica que los fenómenos pueden ser extremadamente complejos pero deterministas en su mayor parte, y pueden exhibir un comportamiento caótico cuando la variabilidad se acumula exponencialmente, impidiendo la predicción (Nijkamp y Reggiani, 1995). En un sistema el estado inicial ejerce una influencia importante en la acumulación de la variabilidad y en el comportamiento caótico resultante, definiendo una **sensibilidad a las condiciones iniciales** (Eckmann y Ruelle, 1985).

La **Teoría de Catástrofes** (Thom 1969) permite describir en profundidad el estado inicial del sistema en relación al proceso que podría llevarlo a un comportamiento caótico, determinado como una catástrofe. Esta teoría establece la estabilidad y sus umbrales sistema como variables fundamentales que determinan la sensibilidad del fenómeno al proceso de desestabilización hacia un comportamiento caótico. Permitiendo establecer variables en función a la estabilidad y sus umbrales para describir el estado de sensibilidad del sistema.

## 5 Metodología

### 5.1 Construcción de la teoría

Para el desarrollo de la metodología, la teoría es planteada como una teoría conceptual-sistémica, para obtener una teoría representacional adecuada (Bunge 1975), pues se enfoca en la aclaración conceptual del fenómeno para una visión más consistente, y una sistematización del comportamiento de manera que facilite su aplicación en la práctica. Esta teoría se obtuvo mediante dos procesos explicativos: la Generalización y Explicación Causal (PICKETT *et al.*, 1994), que corresponden con las preguntas fundamentales de qué es la sinergia y cómo funciona. Dentro del desarrollo de ambas explicaciones se construye una sucesión de modelos como una aproximación hacia el fenómeno real. La estructura de la metodología es descrita a continuación, por la siguiente Figura:



**Figura 1:** Diagrama de la Metodología para la construcción teórica.

En la Figura 1 se desarrollan dos procesos explicativos perpendiculares, la generalización y la explicación causal, cada uno con sus fases y etapas correspondientes, dentro de las cuales se describe la relación entre los modelos construidos y sus elementos, cumpliendo progresivamente con los componentes propuestos por la teoría. El proceso explicativo de la Generalización trata de la conceptualización teórica del fenómeno, es decir, conciliar lo que sabemos, lo que no sabemos y lo que creemos saber, y finalmente obtener los siguientes componentes teóricos: definición, postulados y patrones. Este proceso está conformado por dos fases: 1) la *axiomatización* (Bunge 1975), partiendo de las diferentes definiciones encontradas que son analizadas por abstracción, idealización

y unificación, para corregir y aclarar en entendimiento del fenómeno y su funcionamiento, dentro del contexto de un modelo hipersimplificado y un modelo de riesgos y 2) el *progreso en complejidad* (Bunge 1975), donde el modelo es desarrollado hacia un modelo de caja negra donde se expande y profundiza el funcionamiento y comportamiento del fenómeno.

El proceso de la Explicación Causal tiene el objetivo de sistematizar el fenómeno y estructurar el comportamiento causal y funcional de la sinergia, para obtener los siguientes componentes teóricos: procesos, causas, mecanismos, dominio y modo de traducción. Conformado por tres fases donde se construyen tres herramientas que permiten desarrollar el modelo de caja negra hacia una caja translúcida, 1) una Red Bayesiana de Impactos donde se describe la causalidad de los impactos, 2) una Matriz Multicriterio de Vulnerabilidad para caracterizar al sistema y 3) una Construcción del Contexto Espacial y Temporal para establecer los escenarios de sinergia. Obteniendo finalmente un modelo funcional del fenómeno, capaz de ser aplicado en la práctica.

## **5.2 Aplicación del modo de traducción**

La metodología de la aplicación del modo de traducción, parte del establecimiento del modelo construido con las herramientas correspondientes, dentro de la estructura de evaluación ambiental, permitiendo analizar en campo el funcionamiento del fenómeno descrito por la teoría. El modo de traducción junto con los lineamientos metodológicos puede constituir un Método de Análisis de Sinergia de Impactos Ambientales. En este caso solamente aplicado como una simulación, basada en el planteamiento de dos actividades para dos ecosistemas hipotéticos pero descritos en relación a ecosistemas reales en Bolivia y actividades frecuentes. Podemos resumir el procedimiento en tres secuencias: 1) Análisis de la amenaza: Aplicación de la Red Bayesiana de Impactos a las dos actividades propuestas, 2) Análisis de la vulnerabilidad: Caracterización de la vulnerabilidad de los sitios de estudio, y 3) Análisis del contexto: Descripción de la influencia del contexto sobre los escenarios de sinergia.

# **6 Resultados**

## **6.1 Construcción de la teoría**

En la Axiomatización dentro del proceso de Generalización, para la conceptualización teórica del fenómeno, las diferentes definiciones de la sinergia de impactos fueron utilizadas para construir un Modelo Hipersimplificado donde se reconocen tres componentes: los elementos que interactúan, las condiciones necesarias, y el resultado sinérgico que es generado. Se identificaron dos condiciones importantes para que los impactos, interacciones y efectos puedan ser

considerados sinérgicos: 1) coincidir en espacialidad y, 2) coincidir en temporalidad. Se identificó la insuficiencia de las condiciones y se propuso la condición de causalidad como un tercer requerimiento donde los impactos deben coincidir en un comportamiento en común. El resultado de sinergia generado debe ser relacionado a la capacidad de causar un Desequilibrio Ecológico Grave (Bolivia, Ley N° 1333, 1995).

Este Modelo Hipersimplificado es modificado para adecuarse a un Modelo de Riesgos, donde el comportamiento común que comparten los impactos es caracterizado como una amenaza al sistema; el sistema es determinado por la vulnerabilidad que posea para dicha amenaza; y el resultado es un escenario de riesgos de sinergia de impactos ambientales. De esta manera, la coincidencia de causalidad es descrita como la intersección entre una amenaza constituida por el conjunto de impactos, efectos e interacciones que coinciden en espacialidad y temporalidad, a la cual, el sistema afectado es vulnerable.

Para el Progreso en Complejidad, el modelo fue transformado en un Modelo de Caja Negra, donde se describe una entrada a un sistema, donde es transformada para generar una salida. Para esto, la entrada representa una amenaza, a la cual, el sistema es vulnerable, resultando en una salida de un escenario de sinergia donde el resultado es mayor a las entradas. La estabilidad es propuesta como condicionante para la vulnerabilidad del sistema en la caja negra, y las entradas representan una amenaza de desestabilización para el sistema para generar un Desequilibrio Ecológico Grave.

A partir de una descripción más profunda del sistema y su vulnerabilidad frente a las amenazas, permite la transición del Modelo de Caja Negra hacia una Caja Translúcida, donde existe un entendimiento propuesto del comportamiento interno y los mecanismos involucrados. Esta descripción del sistema fue realizada en función a una clasificación de tipos de sistemas permitiendo identificar los diferentes patrones del fenómeno, definidos como tendencias. Las diferentes amenazas a la estabilidad del sistema son descritas como Tendencias Sinérgicas y constituyen patrones de comportamiento del fenómeno. Para identificar las diferentes tendencias se realizó una clasificación de Tipos de Sistemas, en función a aspectos estructurales y funcionales importantes, como el nivel freático, flujos geoquímicos, vegetación, estado potencial, sustrato, nutrientes, etc. Con respecto a la formación, desarrollo y diferenciación de ambientes, estructuración espacial y los sistemas ecológicos específicos. Donde diferentes sistemas poseen diferentes estabildades y, por lo tanto, diferentes tendencias son capaces de desestabilizarlos. Los Tipos de Sistemas fueron definidos como: edafoxerófilo (en la parte árida de altura), climatófilo (sobre la pendiente de una ladera bajo condiciones de suelo propicias), freatófíco (en la zona de recarga de acuíferos), estágnico (llanura de inundación) y ripario (junto a los cuerpos de agua).

Las tendencias fueron definidas como: degradación del suelo (por vías estructurales o químicas), destrucción del régimen hídrico (por vías de sequía o anegamiento), destrucción de la vegetación y destrucción de la estructura y biodiversidad. La **degradación de suelos** por vías estructurales de pérdida de suelo por erosión y pérdida de energía química y nutrientes. Por otro lado, por vías químicas, sus propiedades químicas y físicas pueden ser alteradas de manera que impida la capacidad de sistema de mantener la producción y estructura para mantener un equilibrio. La **destrucción del balance hídrico** por vías de anegamiento por una baja salida de agua o alta entrada, o ambos. La vía de sequía se puede dar si la entrada disminuye y/o la salida aumenta. **Destrucción de la vegetación** por limitaciones o excesos de agua, oxígeno y trofia pueden causar el estrés de la vegetación que impide la producción, sumado a la disminución por depredación o desplazamiento del nicho a causa de especies invasoras. Finalmente, la **destrucción de la estructura y biodiversidad** que pueden ser afectados por los cambios en el suelo, vegetación o balance hídrico, pudiendo ser una causa directa o indirectamente un desequilibrio ecológico para el sistema.

Para la construcción de las herramientas de análisis, la Explicación Causal es realizada perpendicularmente a la Generalización, expandiendo cada uno de los elementos establecidos en el modelo. Las entradas son expandidas para construir redes causales, desde los impactos, efectos, interacciones, estresores y disturbancias, sobre los mecanismos de retroalimentación, hacia los patrones que corresponden con las tendencias sinérgicas generando un proceso de desestabilización. El sistema es expandido para caracterizar el estado del sistema y su relación sobre las entradas para potenciar o disminuir la sinergia. Las salidas, donde coincide la amenaza con la vulnerabilidad, son construidas para describir la influencia del contexto espacial y temporal para determinar el escenario de sinergia. El resultado es un modelo funcional de caja translúcida donde el fenómeno teórico puede ser cuantificado o representado en la práctica.

Para construir una Matriz Multicriterio de Vulnerabilidad, la Teoría del Caos (Lorenz, 1963) fue utilizada para caracterizar el estado inicial del sistema y su vulnerabilidad para un comportamiento sinérgico. La Teoría de Catástrofes (Thom 1969) permitió establecer la estabilidad como la variable fundamental para el estado inicial frente al proceso de desestabilización. La desestabilización del sistema es el proceso fundamental de la sinergia, permitiendo la aplicación de una descripción de la estabilidad en sistemas dinámicos y los modelos de catástrofes como base para la caracterización de la estabilidad del sistema en función al proceso de desestabilización.

La estabilidad en sistemas dinámicos es encontrada en diferentes cuencas de atracción delimitadas por la resiliencia y resistencia específica, dentro de un eje de desarrollo del sistema. En cada estado estable el sistema posee una estabilidad

específica que depende de capacidades de resistencia y resiliencia, que están determinadas por variables, factores y controles, y modificadas por eventos pasados en el sistema. En este caso los estados estables corresponden con los estados de sucesión del ecosistema. Las variables, factores y controles están compuestos por las siguientes variables: ombrotipo, termotipo, bioclima, piso ecológico, trofía, tipo de suelo, drenaje, clase de humedal, biodiversidad y grado de estenoicidad, estructura vertical y cobertura, y estado sucesional real sobre el potencial. Diferenciando variables para sistemas de zonas altas, bajas y húmedales. El régimen de perturbaciones está compuesto por el anegamiento, sequía, escorrentía y erosión hídrica, viento y erosión eólica, fuego, invasión de especies, y presión e interferencia humana.

Estas variables son cuantificadas en función a los dos componentes de la estabilidad, resistencia y resiliencia, donde cada variable se relaciona a la estabilidad total del sistema según su influencia sobre la capacidad del sistema a responder a una perturbación, diferenciando una respuesta inicial de resistencia y una respuesta posterior de resiliencia. Inicialmente se planteó la estabilidad en función a la capacidad de resistencia y resiliencia para posteriormente desarrollar una ecuación que planteé la vulnerabilidad como reemplazo (inverso) a la estabilidad, que es el resultado del conjunto de todas las variables propuestas, según capacidades específicas de resistencia y resiliencia, en función a una tendencia (amenaza) específica.

$$\mathbf{Vulnerabilidad}_i = \sum X_i(\mathbf{Rst}_i \mathbf{Rsl}_i)$$

Donde  $X_i$  es una variable de clasificación del estado del sistema, ya sea un controlador, variable o factor ambiental,  $\mathbf{Rst}(i)$  el grado de resistencia que ese criterio específico representa para el escenario  $i$  en cuestión, y  $\mathbf{Rsl}(i)$  es la resiliencia que dicho criterio representa para la tendencia de sinergia  $i$  en cuestión. El valor total de la vulnerabilidad a la tendencia, es la sumatoria del aporte a la resistencia y resiliencia de todos los niveles de clasificación del sistema. La valorización de la resistencia y resiliencia responden a una transición semicuantitativa simple del 1 al 5 [1-5] entre dos extremos del umbral. En un extremo la vulnerabilidad a una tendencia es máxima y la estabilidad es mínima, por lo cual el riesgo es máximo (con respecto solo al sistema), en el otro extremo la vulnerabilidad es mínima al igual que es riesgo lo cual implica una máxima estabilidad. Esta valorización fue realizada tentativamente con base en la revisión de diversos autores como sustento lógico y teórico.

La herramienta de la Matriz Multicriterio describe el estado del ecosistema afectado según su vulnerabilidad y la herramienta de Redes Bayesianas, en cambio, describe la causalidad de los impactos generados capaces de constituir una amenaza de desestabilización del ecosistema. Las redes están constituidas por nodos, que

representan las diferentes causas que influyen sobre las tendencias. Estas causas pueden provenir de los impactos, efectos e interacciones generadas, los estresores involucrados y las perturbancias propias del sistema y actividades humanas presentes. Para establecer las causas se recurrió al análisis de Redes de Impactos y Matrices de Leopold en diversos estudios de caso, además del estudio sobre perturbancias y estresores para establecer causas e interacciones de nodos, permitiendo una amplia construcción causal sustentada por diversos autores. Se construyeron tres redes para la tendencia de degradación del suelo para distinguir las vías de degradación estructural de zonas bajas y zonas altas, y vía de degradación química. Igualmente para la tendencia de destrucción del régimen hídrico se construyeron tres redes distinguiendo las vías de sequía de zonas bajas y zonas altas, y vía del anegamiento. Las dos últimas redes corresponden con las tendencias de destrucción de la vegetación, y destrucción de la estructura y biodiversidad.

Dentro de las redes, los nodos son valorados con 1 o 0, es decir, ocurrencia o ausencia del nodo. El valor de un nodo es transmitido al siguiente nodo en función a tres diferentes relaciones de influencia jerárquica: (a) causar (transmisión del total del nodo inicial), (b) potenciar (transmisión de 1/2 del nodo inicial) y (c) posibilitar (transmisión de un 1/3 del nodo inicial). Con base en esta relación es posible establecer una valorización simple que permita una cuantificación de las interacciones y una medición del aporte de las actividades sobre las tendencias. Las siguientes ecuaciones describen las diferentes relaciones entre nodos propuestas.

Para la relación de causa:

$$\begin{aligned} \text{Nodo}_a &\rightarrow \text{causa} \rightarrow \text{Nodo}_b \\ (1)\text{Nodo}_a &= (1)\text{Nodo}_b \\ \text{Arco}_{\text{causar}} &= x \end{aligned}$$

Para la relación de potenciamiento:

$$\begin{aligned} \text{Nodo}_a &\rightarrow \text{potencia} \rightarrow \text{Nodo}_b \\ (1)\text{Nodo}_a &= (1/2)\text{Nodo}_b \\ \text{Arco}_{\text{potenciar}} &= \frac{1}{2}x \end{aligned}$$

Para la relación de posibilitar:

$$\begin{aligned} \text{Nodo}_a &\rightarrow \text{posibilita} \rightarrow \text{Nodo}_b \\ (1)\text{Nodo}_a &= (1/3)\text{Nodo}_b \\ \text{Arco}_{\text{posibilitar}} &= \frac{1}{3}x \end{aligned}$$

Donde  $x$  es el valor del nodo, atribuido por la presencia de un impacto y su acumulación por las relaciones causales.

Las influencias externas e internas que modifican el resultado de la sinergia son descritas mediante la construcción del contexto espacial y temporal. En primer nivel se puede describir la causalidad que existe entre las tendencias, donde las tendencias que afectan al régimen hídrico favorecen la degradación del suelo y éste a la destrucción de la vegetación, llevando finalmente a la destrucción de la estructura y biodiversidad. En el contexto espacial se puede describir, para un nivel de cuenca, la jerarquía de influencias que existe entre un sistema de zonas altas hacia un sistema de zonas bajas adyacente, transmitiendo las perturbaciones y sus efectos. Otra influencia puede ser descrita en el nivel de paisaje, la influencia que ejerce la fragmentación y el aislamiento del sistema sobre su estabilidad. En relación al contexto temporal se pueden describir las variaciones climáticas directas sobre los sistemas, e indirectas por la influencia de ecosistemas acuáticos adyacentes.

## 6.2 Aplicación del modo de traducción

La utilidad de la teoría es vista a través de su capacidad para generar un modelo aplicable a la realidad, este modelo, descrito como un modo de traducción, es el que podrá ser desarrollado posteriormente para el análisis de impacto sinérgico en la evaluación ambiental. El modelo funcional es que permite traducir la teoría a la práctica y es constituido por las herramientas construidas para la amenaza, vulnerabilidad y contexto. En este caso la utilización del modo de traducción se lleva a cabo mediante una simulación que permita analizar la funcionalidad del modelo y no el caso propuesto.

La simulación del Modelo Funcional (previamente el Modelo de Caja Translúcida, ahora cuantificable) construido y sus herramientas fue realizada sobre dos escenarios, donde se analizaron dos actividades propuestas para definir la amenaza específica, dos sitios propuestos para definir la vulnerabilidad, y una descripción del contexto espacial y temporal para establecer los escenarios. Se describieron dos actividades ficticias, la primera basada en la explotación de hidrocarburos (Actividad A) y la segunda en la construcción de embalses (Actividad B); a partir de estas actividades se analizaron respectivamente cada una de las tendencias sinérgicas mediante las Redes Bayesianas de Impactos y establecer las amenazas de sinergia más importantes para cada actividad. Se propusieron dos sitios de estudio ficticios, basados en un ecosistema de zonas altas (Sitio 1; como Cochabamba) y uno de zonas bajas (Sitio 2; como el Beni), donde se dividió el sitio para incluir un ecosistema de humedal (Sitio 2 (humedal)). Los tres sitios fueron analizados, mediante la Matriz Multicriterio de Vulnerabilidad para identificar las tendencias de mayor importancia para cada sitio.

El análisis semicuantitativo se realiza de dos maneras diferentes: para la Red Bayesiana de Impactos se identifican los nodos causales que son incididos por la actividad y el aporte transmitido causalmente es acumulado hacia la tendencia para

obtener un valor total del efecto de la actividad sobre la tendencia; el análisis de la Matriz de Vulnerabilidades parte de la clasificación específica del sitio y la comparación de cada uno de los criterios de clasificación con la valorización que tiene esa variable con respecto a su resistencia y resiliencia para cada una de las tendencias sinérgicas. A partir de esta valorización se identifican las tendencias y vulnerabilidades de mayor valor como los resultados más probables y estos son analizados en conjunto para establecer el contexto espacial y temporal que pueda favorecerles.

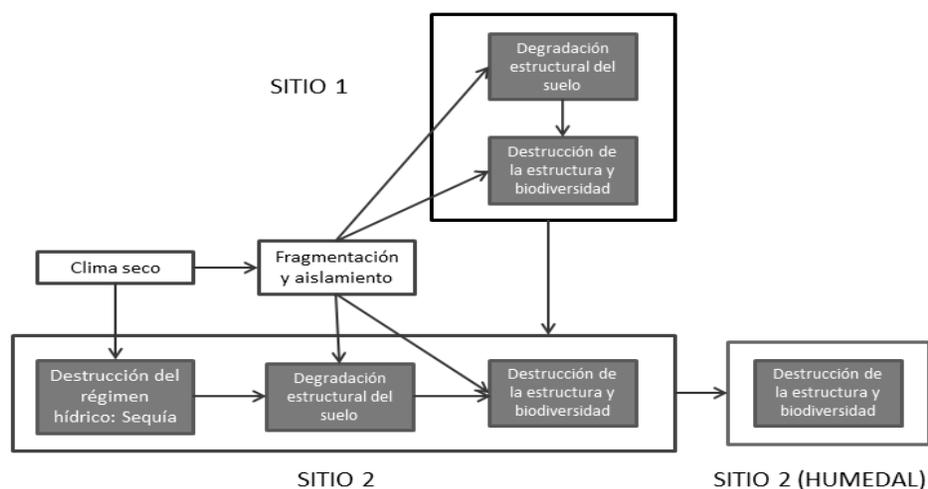
Se pudo observar que las actividades de explotación de hidrocarburos generan impactos que se refuerzan más sobre las tendencias de degradación del suelo y destrucción de la estructura y biodiversidad muy por encima de las otras tendencias para las zonas altas (sitio 1), y también incide sobre la sequía para las zonas altas (sitio 2). La actividad 2 sin embargo, genera impactos que inciden sobre la degradación estructural del suelo pero más importante aún, sobre el anegamiento y la degradación química del suelo, que en conjunto actúan sobre la destrucción de la vegetación, casi exclusivamente sobre ecosistemas de zonas bajas (sitio 2 y humedal).

Para la vulnerabilidad se pudo observar que el sitio 1 es más resistente a las tendencias de degradación química y anegamiento pero vulnerable a la sequía, degradación física, destrucción de la vegetación y de la estructura y biodiversidad. El sitio 2 puede ser caracterizado como vulnerable a las vías de sequía y degradación física pero muy vulnerable a las vías de anegamiento y degradación química y en especial a la pérdida de la vegetación y la estructura y biodiversidad, siendo ecosistemas de gran fragilidad. Se puede observar también que un ecosistema de humedal aumenta la estabilidad frente a la pérdida de la vegetación y a la degradación química.

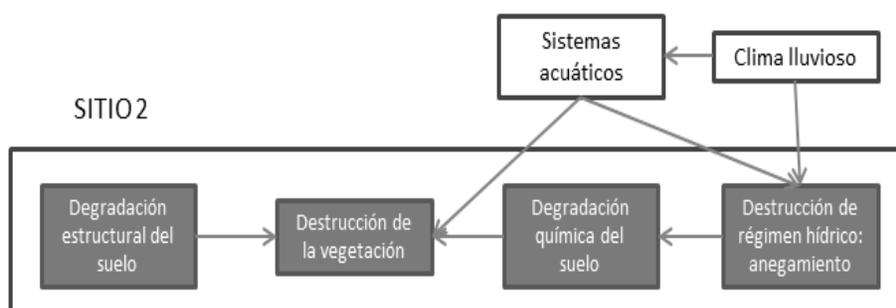
Ambas actividades fueron cruzadas con los tres sitios para combinar las tendencias generadas con las vulnerabilidades específicas, contextualizadas causalmente mediante la influencia de una tendencia sobre otra y describiendo la incidencia del paisaje y el clima sobre las combinaciones. De esta manera se puede tener una actividad sobre un sitio donde se puede observar las tendencias importantes sobre las vulnerabilidades, junto con los factores espaciales y temporales que puedan favorecer el resultado, describiendo en conjunto un escenario de sinergia de impactos ambientales.

Al analizar en conjunto las amenazas de sinergia que constituyen las actividades propuestas con las vulnerabilidades respectivas para cada sitio de estudio, se identificaron combinaciones importantes, ya sea por una amenaza muy alta o una vulnerabilidad alta o ambos. Estas combinaciones fueron contextualizadas, espacial y temporalmente, para describir la influencia que tendría la cuenca, el paisaje, el

clima y las tendencias mismas, para generar un escenario donde el sistema es posiblemente desestabilizado.



**Figura 2:**Contextualización de los escenarios sinérgicos para la Actividad A.

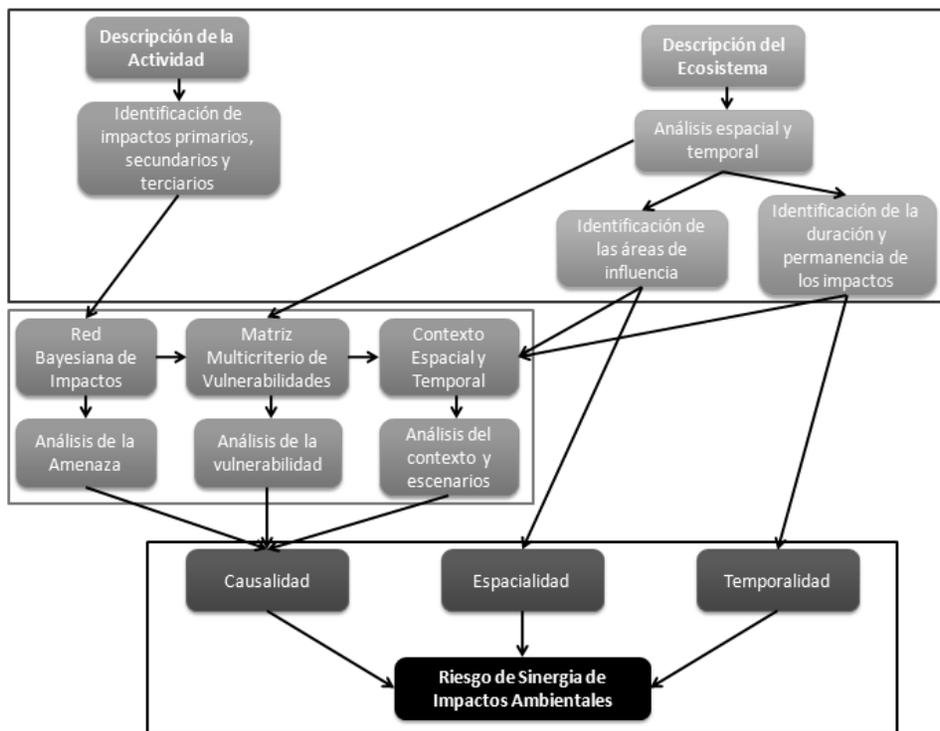


**Figura 3:**Contextualización de los escenarios sinérgicos para la Actividad B.

Estos escenarios se describen según la actividad generadora (Figura 2 y 3), sobre todos los sitios propuestos, contextualizados para describir aspectos temporales y espaciales capaces de favorecer el escenario. El primer escenario, está constituido por la actividad A (Figura 2), de hidrocarburos, generando tendencias de sequía y degradación estructural de suelos, llevando a una tendencia importante de destrucción de la estructura y biodiversidad, tanto para el sitio 1, de zonas altas, como para el sitio 2, de zonas bajas y humedal, que pueden ser influenciados por los sitios de zonas altas adyacentes. Estas tendencias son favorecidas por una

fragmentación y aislamiento del paisaje, además de un clima seco. El segundo escenario corresponde con la actividad B (Figura 3), de embalses, restringido para el sitio 2, de zonas bajas, debido a la falta de pendiente que favorece el anegamiento. En este escenario se favorece una tendencia tanto de degradación estructural como química del suelo, que llevan a la destrucción de la vegetación, favorecidos por un clima lluvioso y la influencia de ecosistemas acuáticos adyacentes.

Este resultado de escenarios de sinergia de impactos ambientales permite una descripción amplia y a la vez detallada de los resultados que pueden ser generados de manera sinergia por actividades que se desarrollan en un ecosistema. A través de esto se puede dar una conclusión sustentable para un resultado sinérgico de una manera que se pueda aproximar desde las actividades, las condiciones del ecosistema, la influencia del paisaje o la influencia del clima, facilitando así su control y mitigación.



**Figura 4:** Desarrollo del Análisis en el EIA y la inclusión del modo de traducción.

Para traducir las herramientas construidas y aplicadas en una metodología capaz de evaluar la sinergia de los impactos ambientales, se aplican los lineamientos que son establecidos por los postulados. La Figura 4, describe la inclusión del

modelo como una herramienta y metodología dentro de la estructura de la evaluación de impactos ambientales.

La Figura 2 plantea la descripción de la actividad y del ambiente afectado como las fuentes de información de las cuales se identifican los diferentes impactos, las áreas de influencia y duración, además de aspectos importantes sobre el ecosistema. A partir de esto, los lineamientos metodológicos de los postulados en la teoría, sugieren la determinación de la Temporalidad de los impactos para definir cuáles coinciden en el tiempo, la determinación de la Espacialidad para establecer el área en la cual coinciden las influencias de dichos impactos y determinar el ecosistema específico afectado. Dentro de esta estructura se puede aplicar el modelo, como un modo de traducción de la teoría, y analizar, respectivamente, la amenaza que representan dichos impactos y la vulnerabilidad del ambiente afectado, dentro del contexto espacial y temporal para identificar escenarios de sinergia de impactos ambientales.

Finalmente es necesaria la validación de la teoría construida, inicialmente por las fuentes bibliográficas utilizadas (sustento teórico y conceptual), la metodología construida (sustento lógico) que sugieren la confirmación de la construcción teórica (PICKETT *et al.*, 1994). La misma que es confirmada posteriormente por la revisión de los criterios de Bunge (1975), donde se identifican solamente dos criterios que no son cumplidos por la teoría, la capacidad predictiva y la Falsabilidad, ambos relacionados con la inmadurez de la teoría y en general con el paradigma científico utilizado. Los criterios de capacidad predictiva y Falsabilidad están relacionados a un desarrollo posterior de la teoría que permita una aplicación empírica y análisis estadístico, para obtener una teoría madura.

## 7 Discusiones

La construcción teórica que incluyen las herramientas y lineamientos metodológicos presentan algunas ventajas importantes, como la descripción detallada e inclusión de los ecosistemas afectados dentro del análisis, la capacidad de analizar todos los impactos, dentro de una relación espacial y temporal, para múltiples actividades en diversas escalas. Esta herramienta facilitaría el monitoreo ambiental, medidas de mitigación, toma de decisiones y ayudaría a cumplir con la legislación. Las redes pueden ser utilizadas para cuantificar las medidas de mitigación, la matriz puede ser utilizada para clasificar ecosistemas según sus vulnerabilidades permitiendo establecer una zonificación para la planificación de actividades humanas, y finalmente el contexto puede ser utilizado para encontrar el lugar y momento óptimos para el desarrollo de la actividad. Idealmente también, podría ser desarrollado posteriormente, abriendo nuevas investigaciones, para construir modelos computacionales para obtener índices de sinergia y facilitar la

predicción. Entre las desventajas que pueden encontrarse, está la complejidad requerida por el análisis, la inclusión de un análisis espacial, además del conocimiento y destreza por parte del evaluador. Un análisis de sinergia podría incrementar costos y tiempo, además de la posibilidad de que argumente en contra del proyecto. Otras limitaciones importantes son que: no contempla sinergias positivas, no es posible establecer comparaciones claras entre tendencias, el contexto es aplicado de modo descriptivo solamente, y aún no posee una conclusión cuantitativa.

## **8 Conclusiones**

En conclusión, la metodología seguida para entender el fenómeno de la sinergia permitió desarrollar una teoría conceptual-sistémica: esta teoría define la sinergia de impactos ambientales como un escenario en cual los impactos simultáneos comparten una tendencia capaz de una desestabilización del sistema, a la cual es vulnerable, ya sea por resistencia o resiliencia. Dicha alteración de la estabilidad permite la generación de efectos mayores a los previstos por solo los impactos aislados y es capaz de generar un desequilibrio ecológico grave hacia una degradación irreversible de su estado de desarrollo y equilibrio inicial, previos a la intervención.

Los postulados sugieren que, para que exista la posibilidad de que los impactos sean sinérgicos, deben coincidir en temporalidad, espacialidad y causalidad, entre los impactos sobre una tendencia y la vulnerabilidad del sistema. La tendencia coincide con el tipo de sistema y es condicionado por su estado que describe la vulnerabilidad del ecosistema a dicha tendencia.

El modelo funcional de caja translúcida permitió describir el escenario por (a) los impactos, efectos y perturbaciones, actuando sobre una tendencia, analizado mediante las Redes Bayesianas de Impactos para determinar la amenaza (b) la estabilidad del sistema, específica para la tendencia, analizada mediante la Matriz Multicriterio constituyendo una vulnerabilidad, como (c) la influencia que tiene el contexto espacial; entre las tendencias, la cuenca y el paisaje; y el contexto temporal; por las variaciones climáticas directamente o indirectamente por la influencia de sistemas acuáticos adyacentes, determinando los escenarios de riesgos de sinergia. Junto con los lineamientos planteados por la teoría, se pueden establecer las bases para una metodología adecuada para la evaluación de la sinergia de impactos.

## **9 Recomendaciones**

Esta investigación deja pendiente una posterior profundización de la teoría y las herramientas para la asignación de valores y pesos a partir de talleres de

expertos, corregidos por la experimentación, permitiendo la validación por Falsabilidad y el establecimiento de índices de sinergia. Es importante también que la teoría sea expandida para la profundización sobre ambientes acuáticos, además de un análisis prospectivo en el que se descarten ciertas tendencias que no representan una amenaza considerable. Otra área importante para la profundización de la teoría de sinergia es la presencia de mecanismos de retroalimentación, umbrales y puntos de inflexión capaces de influir directamente sobre el comportamiento del sistema en estudio.

### Bibliografía

- [1] BROWN, L.H. (1981). Two decades of homage to Santa Rosalia: Toward a general theory of diversity. (s/l) *Systematic Zoology* 21: páginas 877-888.
- [2] BUNGE, M. (1975). *Teoría y realidad*. Barcelona, España. Editorial Ariel S.A.
- [3] Bolivia, Ley N° 1333 (1995). Ley del medio ambiente, promulgada EL 27 de Abril de 1992. Reglamentación de la ley n° 1333 del medio ambiente; reglamento de prevención y control ambiental.
- [4] CONTANT, C.K.; WIGGINS, L.L. (1993). *Toward defining and assessing cumulative impacts: Practical and Theoretical Considerations*. En HILDEBRAND, S.G. Y CANNON, J.B. (edit.) *Environmental Analysis: The NEPA Experience*. (s/l) Lewis Publishers. Páginas 336-356.
- [5] DEANGELIS, D.L.; WATERHOUSE, J.C. (1987). Equilibrium and nonequilibrium concepts in ecological models. (s/l) *Ecological Monographs* 57: páginas 1-21.
- [6] ECKMANN, J.P.; RUELLE, D. (1985). Ergodic theory of chaos and strange attractors. (s/l) *Review of Modern Physics* 57, no. 3, páginas 617-656.
- [7] FRAUME RESTREPO, N.J. (2007). *Diccionario ambiental*. Colombia. Ecoe Ediciones, página 242.
- [8] GERTSEV, V.I.; GERTSEVA V.V. (2004). Classification of mathematical models in ecology. (s/l) Elsevier B.V., *Ecological Modeling* 178: páginas 329-334.
- [9] GÓMEZ OREA, D. (1999). *Evaluación del impacto ambiental: un instrumento preventivo para la gestión ambiental*. España. Mundi-Prensa, 1ed. Página 206.
- [10] LORENZ, E.N. (1963). Deterministic non-periodic flow. (s/l) *Journal of the Atmospheric Sciences* 20, no. 2, páginas 130-141.

- [11] MARGALEF, R.I. (2002). Teoría de los sistemas ecológicos. Barcelona, España. Publicacions Universitat de Barcelona. 2da. Ed. Alfaomega grupo editor, S.A. de C.V. México D.F.
- [12] MILLER, R.W. (1987). Fact and method: Explanation, confirmation and reality in the natural and the social sciences. Princeton, NJ. Princeton University Press.
- [13] NIJKAMP, P.; REGGIANI, A. (1995). Non-linear evolution of dynamic spatial systems: The relevance of chaos and ecologically-based Models. (s/l) ELSEVIER Regional Science and Urban Economics 25: páginas 183-210.
- [14] PICKETT, S.T.A.; KOLASA, J.; JONES, C.G. (1994). Ecological understanding: The Nature of Theory and the Theory of Nature. San Diego CA. Academic Press, Inc.
- [15] RIECHMANN, J. (2008). Teoría de sistemas y “pensamiento complejo”.
- [16] [http://portal.uam.es/portal/page/profesor/epd2\\_profesores/prof5003/docencia/TEOR%CDA%20DE%20SISTEMAS%20Y%20PENSAMIENTO%20COMPLEJO.pdf](http://portal.uam.es/portal/page/profesor/epd2_profesores/prof5003/docencia/TEOR%CDA%20DE%20SISTEMAS%20Y%20PENSAMIENTO%20COMPLEJO.pdf) (01/10/2012).
- [17] ROSENBERG, A. (1985). The structure of biological science. Cambridge. Cambridge University Press.
- [18] SHEPARD, R.B. (2005). *Quantifying environmental impact assessments using fuzzy logic*. USA. Springer series on Environmental management.
- [19] SUPPE, F. (1977). Afterword. En SUPPE, F. (editor) The structure of scientific theories. Urbana. University of Illinois Press, páginas 617-730.
- [20] THOM, R. (1969). Topological models in biology. (s/l) Topology 8: páginas 313-335.
- [21] VON BERTALANFFY, L. (1968). General System Theory: Foundations, Development, Applications. New York. George Braziller.