



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y POSGRADO
CENTRO DE INVESTIGACIONES INTERDISCIPLINARIAS
SOBRE DESARROLLO REGIONAL



MAESTRÍA EN ANÁLISIS REGIONAL

**El proceso de restauración del suelo: un análisis desde los Sistemas
Alejados del Equilibrio**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN ANÁLISIS REGIONAL**

P R E S E N T A:

Miguel Angel Medel Rivera

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Francisco Gómez Rábago

TLAXCALA, TLAX; DICIEMBRE 2019.

Mis agradecimientos al:



ya que a través del apoyo económico que me brindó, pude realizar la Maestría en Análisis Regional en el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias Sobre Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, al estar registrado su postgrado en el PNPC.

Con la publicación del presente trabajo de investigación, además de la presentación del examen de grado correspondiente, sean la mejor muestra de mi gratitud hacia el CONACYT.

Diciembre 2019.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma de Tlaxcala**, en especial al personal docente y administrativo del **Centro de Investigaciones Interdisciplinarias Sobre Desarrollo Regional** (CIISDER), por darme la oportunidad de realizar mis estudios brindándome todas las herramientas necesarias.

Al Dr. **Francisco Gómez Rábago**, por su dirección y apoyo para la elaboración de la presente tesis, por su tiempo dedicado, sus correcciones, enseñanzas, conocimientos compartidos, consejos y por su amistad.

A los integrantes del comité revisor, al Dr. **Pedro Antonio Ortiz Báez**, al Dr. **Alfredo Delgado Rodríguez**, al Dr. **Gustavo Casas Álvarez** y al Dr. **Leonardo Tyrtania G.**, por sus acertadas observaciones, por su invaluable tiempo, por sus recomendaciones y dedicación para que la presente tesis concluyera.

A **María Alejandra Caballero Cervantes**, por todas las facilidades otorgadas para poder realizar este trabajo.

A mis **compañeros y amigos de la generación 2017 – 2019**, por todo el tiempo compartido, les deseo una vida llena de éxitos.

Con admiración y respeto mi más sincera gratitud.

Miguel Angel Medel Rivera.

Para mis padres ***Miguel Angel y María Eugenia***, gracias por apoyarme en todo momento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1. CRÍTICAS AL PARADIGMA	14
1.1 Orden, simetría, reversibilidad y equilibrio: Newton, Descartes y la primera ley de la termodinámica	14
1.2 Segmentación entre natura y cultura	16
1.3 La dinámica newtoniana	18
1.4 Los elementos heterogéneos: el paradigma de la complejidad	23
1.5 El segundo principio de la termodinámica, el eje rector para el análisis de la complejidad.....	26
1.6 Sistema complejo alejado del equilibrio	29
1.7 El pensamiento complejo y el estudio de los ecosistemas	29
1.8 El abordaje sistémico del ecosistema.....	37
1.9 La emergía.....	38
1.10 Autopoiesis y autoorganización	40
CAPÍTULO 2. LOS LÍMITES DEL ECOSISTEMA.....	44
2.1 La región.....	44
2.2 El ecosistema	45
2.3 Espacio ecosistémico	47
2.4 La clausura operativa: los límites del ecosistema.....	51
2.5 Flecha del tiempo	54
2.6 Mecanismos detonadores (trigger mechanism)	54
2.7 El ecosistema como un sistema autopoietico	55
2.8 Estructura disipativa	57
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	59
3.1 Objetivos.....	59

3.2 Localización y Descripción del Área de Estudio	60
3.3 Selección del sitio	62
3.4 La restauración del área	63
3.5 Metodología	69
3.6 Método de la síntesis emergética	73
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
4.1 Historia narrativa del lugar, la gente y los recursos naturales del lugar	81
4.2 Identificación de los límites del sistema	88
4.3 Modelado del sistema	88
4.4 Tabla de análisis emergético	92
CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
El momento de la autopoiesis	97
Reservorios	100
El suelo como elemento vivo	100
Mecanismos disparadores	100
CONCLUSIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	104

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Figura 1. El municipio de Tlaxco en azul dentro del estado de Tlaxcala, el polígono rojo es el límite de la cuenca del río Zahuapan. Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 2. Paisaje característico de erosión severa en la zona.	64
Figura 3. Evidencia de los cambios ocurridos en un paraje cercano a la zona de estudio.....	64
Figura 4. El sitio en donde se ha llevado a cabo la restauración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.	65
Figura 5. Trazo de curvas de nivel. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.	66
Figura 6. Zanjas de infiltración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.	66
Figura 7. Fracturación de capa superficial. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.	66
Figura 8. Colocación de barreras de pacas de paca a nivel en barrancas y zonas de escorrentía. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.....	67
Figura 9. Incorporación de materia orgánica. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.....	67
Figura 10. Técnica conocida como “sándwich”. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.....	67
Figura 11. Técnica conocida como “sándwich”. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.....	67
Figura 12. Área sometida a trabajos de restauración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.	68
Figura 13. Área sometida a trabajos de restauración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.	68
Figura 14. Símbolos utilizados para los diagramas de sistemas de energía elaborados por Odum (1996).	77
Figura 15. Paisaje característico de erosión severa en la zona. Fuente: propia. ..	82
Figura 16. Evidencia de los cambios ocurridos en un paraje cercano a la zona de estudio. Fuente: Archivo de los encargados del proyecto de restauración.	83

Figura 17. Área de estudio en el año 2007. Fuente Google Earth.	85
Figura 18. Área de estudio en el año 2010. Fuente Google Earth.	85
Figura 19. Área de estudio en el año 2016. Fuente Google Earth.	86
Figura 20. Área de estudio en el año 2018. Fuente Google Earth.	86
Figura 21. Área de estudio en el año 2018. Fuente elaboración propia.	87
Figura 22. Diagrama agregado del sistema.....	89

INTRODUCCIÓN

En la presente tesis se argumenta cómo fue posible la restauración del suelo de un área degradada ubicada en el municipio de Tlaxco, en el estado de Tlaxcala. La zona en cuestión atravesó una serie de procesos (tala, cambio de uso de suelo, erosión) que la llevaron a perder sus propiedades ecosistémicas.

Esta zona es de particular importancia,

(pues como resultado de flujos de materia energía e información que se intercambian dentro del sistema), se pudieron vislumbrar una serie de acciones llevadas a cabo para recuperar las propiedades ecosistémicas.

Dichas acciones están funcionando a tal grado que en algunas zonas el ingreso de recursos antrópicos se ha eliminado, dejando que el ecosistema trabaje por sí solo y se constituyan procesos de autoproducción y autoorganización.

Para poder medir estos resultados fue necesario una aproximación que pudiera relacionar los flujos de energía del ambiente natural y los flujos del sistema socioeconómico, para lo cual se empleó la Síntesis Emergética¹, una metodología que mide los flujos de materia, energía e información, pudiendo cuantificar estos valores dentro de un marco de referencia que integra todos esos flujos y permite hacer comparaciones entre ellos.

Esta metodología permite comprender cómo funcionan la biosfera, los ecosistemas naturales, los ecosistemas antrópicos y sus interrelaciones.

Con tal intención, la investigación se orientó a evaluar la dinámica de la recuperación del suelo en términos de cómo se desarrollan en esa área los procesos para la restauración de los procesos ecosistémicos de dicho recurso; y por lo tanto el aseguramiento de la recuperación de su vocación forestal, para lo cual se utilizó

¹ La síntesis emergética se refiere a un método de valoración de los servicios de los ecosistemas con bases termodinámicas, fue el ecologista Howard T. Odum quien introdujo el concepto de emergía a partir de sus trabajos de ecología y energética de sistemas.

la modelación de la estrategia de recuperación de esos suelos, a partir de sus costos energéticos.

A fin de lograr el objetivo se utilizaron herramientas teórico-metodológicas que tomasen en cuenta la complejidad de las relaciones sistémicas que se dan en ese ecosistema en particular. Para identificar las variables involucradas en dicho proceso, el presente estudio se abordó desde la complejidad y los sistemas alejados del equilibrio; base teórica que permitió explicar y exponer los procesos socioambientales que se han desarrollado en la interacción sociedad-naturaleza en el ecosistema. De esta forma, la visión termodinámica de los sistemas disipativos aplicada al ecosistema ubicado en la zona de Tlaxco ofrece argumentos sólidos que permitirán explicar el fenómeno de la autoorganización.

El plan de argumentación para poder alcanzar los objetivos propuestos siguió la lógica siguiente:

El capítulo 1 se estructura en tres partes. En la primera se hace una crítica al paradigma cientificista que por muchos años orientó la forma de hacer ciencia y de abordar el estudio y manejo de los ecosistemas. En él se da cuenta que a pesar de que el estudio del ambiente tiene una marcada conexión con distintas áreas del conocimiento y que gira en torno a múltiples relaciones y fenómenos, ha estado enmarcado en los dogmas de la ciencia clásica, heredada del desarrollo de la ciencia occidental, particularmente del método científico que fue fundamentado por los pensamientos de Bacon y Descartes. Se muestra que es gracias a este paradigma dominante que el estudio de los ecosistemas ha estado marcado por una tradicional manera de estudiar los sistemas y sus elementos; predominando el análisis sobre la síntesis. Es decir que para entender el sistema ecológico se ha mantenido una visión lineal y, a veces, meramente descriptiva de muchos fenómenos que corresponden a una realidad compleja, teniendo como consecuencia los problemas que se enfrentan hoy en día, particularmente en el campo de los sistemas ecológicos, interés particular de esta investigación.

En una segunda parte de este mismo capítulo, se presentan los elementos heterogéneos que deja fuera el paradigma cientificista, presentando herramientas

que toman en cuenta la complejidad de las relaciones sistémicas que tienen lugar en los ecosistemas. En esta parte del capítulo se muestra la importancia de las interacciones y, por consiguiente, que el reduccionismo no es adecuado para estudiar fenómenos complejos y, por lo tanto, que los sistemas complejos se comportan de formas que no obedecen las reglas de la cosmovisión newtoniana, la cual enfatiza el equilibrio y la certeza. Por lo tanto, los sistemas complejos se proponen como un cambio de paradigma en la ciencia, proponiendo métodos novedosos que tienen en cuenta las interacciones relevantes. Paradigma que nos ayudará a entender cómo es que funciona nuestro ecosistema en particular.

En la tercera parte de este primer capítulo se introduce el concepto de autopoiesis; concepto propuesto por los chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela, el cual se refiere a un principio de autoproducción de los seres vivos, permitiendo entender su proceso vital y, por ende, el de los ecosistemas: la producción de relaciones constitutivas (que determinan los límites físicos), de especificidad (que determinan la identidad de los componentes) y de orden (que determinan la dinámica de la organización), procesos que definen al sistema en su totalidad y no solamente su estructura.

La razón de introducir el concepto de autopoiesis es porque éste posibilita el análisis de la dinámica establecida entre los componentes del sistema y permite pasar de la visión de objetos a la de relaciones de procesos.

En el capítulo 2, se responde a la pregunta: *¿en dónde poner los límites del ecosistema?* En una primera se justifica el por qué usar la escala de espacio ecosistémico como unidad de análisis. Lo cual responde a la lógica de que la razón de estudiar este sistema como un sistema ecológico es debido a que las partes de este son inseparables y, por lo tanto, desde el punto de vista funcional, el ecosistema es el nivel de organización biológica más apropiado para la aplicación de las técnicas de análisis de sistemas. De esta manera, los ecosistemas no son sólo un conjunto de poblaciones, ni éstas un conjunto de individuos, sino que entre ellos existen relaciones entre lo vivo y lo no vivo que aseguran su permanencia.

En la segunda parte del capítulo se propone el concepto de clausura operativa para resolver el problema de la escala analítica y el de establecer en donde se encuentran los límites del ecosistema, puesto que para nuestros propósitos es necesario contar con una escala que no exceda la capacidad de asimilación del sistema en estudio. El cierre operacional se utiliza en el contexto de la teoría de sistemas. Según Humberto Maturana y Francisco Varela, un sistema está cerrado operativamente cuando sus operadores no reciben instrucciones de su entorno, sino que están determinados por su propia estructura y organización. Como característica, un sistema autopoietico tiene límites autodefinidos, se diferencia de un entorno por su modo específico de organización; esto indica que su identidad emerge de su red de procesos dinámicos en un espacio clausurado de transformaciones. Si tomamos esto como punto de partida, se vuelve inevitable el concepto de clausura operacional.

En el capítulo 3 se presenta la metodología propuesta para poder abordar el problema de investigación; la cual consistió en aplicar la metodología de la Síntesis Emergética propuesta por Odum. La razón de abordar el problema con esta metodología fue porque el ecosistema es un sistema complejo, en el cual ocurren procesos de autoorganización y, por lo tanto, su análisis debe ser abordado desde una perspectiva integradora. Esto es posible con la Síntesis Emergética, un método de valoración de los servicios de los ecosistemas con bases termodinámicas, el cual permitió tener una visión general del ecosistema. La metodología se basa en la conversión a unidades comunes de los flujos de energía, masa y dinero utilizados en un sistema socio-ecológico con el objetivo de estudiar la organización de sistemas termodinámicamente abiertos, es decir, que intercambian materia y energía con su ambiente; a través del uso de una perspectiva sistémica y energética. Uno de los principales objetivos de su aplicación es la caracterización de las principales fuentes de energía externas al sistema y que dirigen su evolución.

En el **capítulo 4** se presentan los resultados, los cuales muestran que para que el sistema estudiado pueda funcionar se requiere de una gran cantidad de flujos de

materia y energía, tanto del medio natural como de fuentes externas proporcionadas por fuentes antrópicas.

CAPÍTULO 1. CRÍTICAS AL PARADIGMA

1.1 Orden, simetría, reversibilidad y equilibrio: Newton, Descartes y la primera ley de la termodinámica

Por casi un siglo, la visión predominante que se tenía de la ciencia en el mundo occidental estuvo regida por una visión de tipo determinista; basada en un modelo newtoniano que se caracterizaba por dictar “leyes” naturales cuyo fin era el establecer verdades y afirmaciones universales e imposibles de poner a prueba.

Entre los años 1500-1700 hubo un importante cambio en la forma en que la gente de Europa percibía y entendía el mundo. Fue a través de pensadores como Bacon, Galileo, Kepler, Descartes y Newton que el mundo occidental sufrió una revolución científica.

Fue precisamente con la herencia de pensadores como Newton, Descartes y los postulantes de la primera ley de la termodinámica que los principios epistemológicos de orden, simetría, reversibilidad, equilibrio y segmentación entre natura y cultura facilitaron la fragmentación del conocimiento científico en disciplinas, cada vez más específicas.

Aquellos principios surgieron históricamente de la confluencia de la mecánica gravitacional de Newton, con la primera ley de la termodinámica. Sin embargo, es necesario hacer un repaso histórico del surgimiento de este paradigma de la ciencia.

La ciencia que surgió en el siglo XVII se ha clasificado como determinista. El determinismo es un paradigma científico que considera que, a pesar de la complejidad del mundo y su impredecibilidad práctica, el mundo físico evoluciona en el tiempo según principios o reglas totalmente predeterminadas.

Para los seguidores de esta corriente, el universo se rige por leyes deterministas; un ejemplo por excelencia para ellos es la ley de Newton, que vincula fuerza y aceleración: es determinista y a la vez reversible en el tiempo; es decir que si conocemos las condiciones iniciales de un sistema sometido a esta ley, o en otras

palabras su estado en un instante cualquiera, podemos calcular todos los estados siguientes así como todos los estados anteriores. Como podemos observar es una ley que pugna por el orden, la simetría, la reversibilidad y el equilibrio de un sistema.

Desde el siglo XVII hasta los 70's esas premisas newtonianas y cartesianas fueron fundamentales para toda la actividad científica, dando como resultado una estabilidad en la forma de hacer ciencia (Wallerstein, 1996).

Wallerstein (1999) menciona que la llamada visión clásica de la ciencia, predominante desde hace varios siglos, fue constituida sobre dos premisas: una era el modelo newtoniano en el cual hay una simetría entre pasado y futuro y de esta forma no hay distinciones porque todo coexiste en un presente eterno, esta visión, menciona Wallerstein es casi teológica, lo que quiere decir que tal como Dios, es posible alcanzar certezas; la segunda premisa fue el dualismo cartesiano, la suposición de que existe una distinción fundamental entre la naturaleza y los humanos, entre la materia y la mente, entre el mundo físico y el mundo social (Wallerstein, 1999).

La dinámica newtoniana fue formulada en un paradigma atomista y reduccionista. Enfatizándose el análisis y la abstracción, tratando a los individuos como autosuficientes e independientes (Earley 1990).

Es a partir del trabajo del filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626) que el ser humano comienza a ver de forma distinta su papel con respecto a la naturaleza. Para Bacon, el punto de partida para que el ser humano pudiese mejorar su condición en la tierra era la necesidad de conocer detalladamente a la naturaleza; pues afirmaba que nuestro entorno natural había sido creado y puesto al servicio de la humanidad para explotarlo, dominarlo y someterlo a sus necesidades.

Para Bacon el objetivo fundamental de la humanidad no tenía que ver con la adoración pasiva de la naturaleza o de Dios, sino que, por el contrario, la humanidad

debía apropiarse de la oportunidad de expandir su imperio sobre la Tierra (Worster, 2008).

Para que el hombre pudiese ejercer este dominio y utilizarlo para su beneficio, convirtiéndose en creador de poder y riqueza, Bacon proclamaba que la técnica del materialismo científico (observación y experimentación) sería el instrumento idóneo para lograrlo y, con ello, el hombre podría mejorar su situación. Para Bacon el dominio de la naturaleza y el universo solo sería posible con el descubrimiento de leyes.

Francis Bacon llama la atención hacia la observación, la experiencia, hacia el contacto con la naturaleza como único punto de partida para su penetración. Sólo con el método inductivo se llegará a comprender la naturaleza y a servirse de ella para dominarla.

Bacon sólo admitía la experiencia como poder operativo de la ciencia, que aísla fenómenos y se sirve de instrumentos; para él se trata de "... dominar la naturaleza por el arte" (Bacon, citado en Hottois, 1991: 25). Esta postura hace del mundo un campo de operación y acción. Bacon proclamaba la era en la que la humanidad debía, progresivamente, adquirir el poder de conquistar y someter la naturaleza, para encontrar en ella la verdad oculta.

1.2 Segmentación entre natura y cultura

Dentro de esta forma de ver el mundo, destaca un instrumento conceptual que condujo a la creencia de que el mundo material podía ser descrito objetivamente, limitando al hombre como simple observador y descriptor del mundo que lo rodea; se trata de la posición dualista de corte cartesiano de la realidad, producto del trabajo del filósofo francés Rene Descartes (1596–1650).

El dualismo cartesiano nos hizo pensable y hasta natural la separación radical entre el mundo social y el mundo de la naturaleza. El método de Descartes consistía en

descomponer analíticamente los problemas en componentes más pequeños y resolverlos y organizarlos de manera lógica, lo que se convertiría en una característica esencial del pensamiento científico moderno, permitiendo el desarrollo de la ciencia moderna en la forma como se le conoce en el mundo occidental. Descartes creía que el universo podía describirse y entenderse en términos de leyes y relaciones matemáticas exactas. Esta visión se reflejó en su desarrollo histórico de la geometría analítica o el uso del álgebra para describir formas geométricas (Capra y Luisi, 2014).

Najmanovich (2007) plantea que Descartes estableció un dualismo absoluto entre mente y materia, que condujo a la creencia de que el mundo material puede ser descrito objetivamente, sin referencia alguna al observador, consideraba al universo material incluyendo los organismos vivos, como una máquina que podía ser comprendida analizándola en términos de sus partes más pequeñas, con lo cual creó el método reduccionista, consistente en desmenuzar los fenómenos en unidades más simples, para comprender desde las propiedades de éstas el funcionamiento del todo, justificándose en el hecho de que el todo es tan sólo una yuxtaposición de elementos.

El método cartesiano pugnaba por la simplicidad, por dividir al máximo el objeto a estudiar y analizar esos componentes con la finalidad de poder obtener una mejor solución. Según Descartes la simplicidad es una característica esencial de la verdad. Este método también propone el orden, por lo cual el análisis de los problemas debe comenzar por los objetos más simples e ir escalando gradualmente hacia los más complejos. Con este “orden” es que la realidad comienza a estudiarse en fragmentos. Con lo anterior es que se fue configurando lo que se conocería posteriormente como el método actual del método científico.

Espina (2007) sostiene que el modelo cartesiano se fundó bajo el signo de la objetividad, es decir, de un universo constituido por objetos aislados sometidos a leyes objetivamente universales. Bajo esta premisa, todo objeto puede ser definido a partir de leyes generales a las que está sometido y de las unidades elementales

de las que está constituido; es decir, su misma naturaleza material puede y debe ser analizada descomponiéndola en partes más simples, y definiéndola independientemente de su entorno. Sin embargo, como veremos más adelante, el método cartesiano de estudiar las partes antes que el todo no es aplicable a sistemas complejos.

1.3 La dinámica newtoniana

Este marco conceptual desarrollado por Descartes y consolidado en los siglos XVII y XVIII, fue completado por Isaac Newton (1642-1727), quien desarrolló un sistema integral de matemáticas que sintetizaría y validaría las obras de Copérnico, Kepler, Galileo y Descartes. La cosmovisión newtoniana, presentada en 1687 en *Mathematical Principles of Natural Philosophy or The Principia*, sintetizó tanto la observación sistemática de los fenómenos naturales enfatizada por Bacon, como su análisis matemático (Aboites, 2011).

Esa cosmovisión de la física newtoniana se aplicó con éxito a una amplia variedad de esfuerzos científicos y tecnológicos a lo largo de los siglos XVIII y XIX, y generando un enorme entusiasmo por parte de los científicos y el público en general.

También sentó las bases para la revolución industrial. Con la visión del universo como un sistema mecánico inanimado, ahora existía una justificación "científica" para la manipulación y explotación de la naturaleza. Esta revolución tuvo un profundo impacto en la cultura y el desarrollo occidentales durante los próximos 300 años, y hasta el día de hoy, incluso cuando gran parte de la física newtoniana ha sido desarreglada con la teoría de la relatividad y la teoría cuántica, los supuestos y las perspectivas de la cosmovisión newtoniana aún dominan nuestras metáforas y modelos mentales en todos los dominios (Capra y Luisi, 2014).

Para el siglo XIX bajo esta misma línea, surge una corriente filosófica conocida como positivismo en donde destaca el francés Auguste Comte (1798-1857) quien plantea los elementos fundamentales para el positivismo y cuya postura estaba en línea con las ideas de Descartes y Bacon.

El positivismo es una doctrina que admite sin crítica alguna el valor de la ciencia como tal, y por tanto afirma que el conocimiento auténtico es el conocimiento científico; lo que aún hoy es base del modelo de investigación en ciencias empíricas. (Ramírez, 2009).

Desde la postura positivista se planteaba a la ciencia y a los científicos como buscadores de la “verdad” y a los hechos empíricos como la única base del verdadero conocimiento.

Las posturas expuestas anteriormente dieron lugar a la organización en disciplinas de los conocimientos científicos, construyendo una organización institucional validante y legitimante de la producción y distribución de la investigación científica; lo que terminaría en la aplicación de un único método para analizar la ciencia, ya fuera esta empírica o social.

Lo anterior trajo como resultado el encasillamiento de las ciencias en tres grupos principales, los cuales clasifica Massé (2001) como sigue: el primero, las ciencias naturales, divididas en ciencias físicas, químicas y biológicas; el segundo, el de las ciencias humanas subdivididas en filosofía, literatura y arte; y, por último, las ciencias sociales en economía, ciencia política, sociología e historia. Es esa división precisamente lo que dio lugar a que los métodos, conceptos y teorías estén separados en cada disciplina.

Dicha especialización desembocaría en una disciplinarización y reducción que hoy en día nos impide responder a los graves problemas que se presentan en la sociedad debido a que la especialización ha influido no sólo en la ciencia, sino también la sociedad hacia enfoques reduccionistas de los problemas, ya que al elegir solo un pequeño grupo de entre las múltiples escalas y dimensiones posibles

se genera, inevitablemente, una dramática reducción de los análisis que pueden realizarse perdiéndose la posibilidad de una visión integradora del sistema.

De igual manera, a partir de estas diferentes concepciones fue que se comenzó a forjar un cambio en la concepción del hombre con la naturaleza que lo rodea, y fue así como poco a poco se fue configurando la percepción de un planeta donde los recursos eran inagotables, por lo cual no había razón para interesarse en su conservación y como señala Silvia Matteucci:

“La sociedad se lanzó a la conquista de la naturaleza, perdiendo la percepción de su ubicación como parte integrante del ambiente y como factor modificador de peso, dado su poderío tecnológico. El ser humano se asumió como regulador del ecosistema, con la meta en su transformación para su propio beneficio, olvidando o ignorando que, como sistema orgánico, el ambiente puede responder con cambios frecuentemente no previsibles”. (Matteucci, 1998).

De este modo, el cientificismo monopolizó la manera en que se tenía que hacer ciencia, dejando como lastre una serie de dogmas que pugnan por que el conocimiento científico era una garantía de la “verdad”.

Sin embargo, fueron estos mismos principios epistemológicos de orden, simetría, reversibilidad, equilibrio y segmentación entre natura y cultura, heredados de Newton, Descartes y la primera ley de la termodinámica, los mismos que facilitaron la fragmentación del conocimiento científico en disciplinas cada vez más específicas e inconmensurables.

La disciplinarización y una excesiva dependencia del reduccionismo en el método cartesiano generó una debilidad en los análisis, trayendo como consecuencia la especialización, lo cual nos ha hecho incapaces de responder a los problemas de gran escala que hoy en día requieren nuestra atención como son aquellos referentes al análisis y al estudio del ambiente y del ecosistema.

Lo anterior propició que la ecología, una ciencia de suma importancia para el estudio de la dinámica global de los ecosistemas, mantuviera un análisis basado en el método reduccionista ya que, a pesar de la evidente conexión con distintas áreas del conocimiento y a su papel en la producción de un cuerpo de conocimientos en torno a múltiples relaciones y fenómenos, la ecología ha estado marcada por una

tradicional manera de estudiar los sistemas y sus elementos, predominando el análisis sobre la síntesis es decir, que se ha examinado al sistema dividiéndolo en cada una de sus partes a diferencias de la síntesis, la cual propone examinar al sistema combinando y comparando sus partes.

Lo anterior se enmarca en los dogmas de la ciencia clásica, heredada del desarrollo de la ciencia occidental, particularmente del método científico que fue fundamentado por los pensamientos de Bacon y Descartes, como presenta Herrero (2008).

Todo esto ha propiciado la permanencia de una visión lineal por parte de la ecología, y, a veces, meramente descriptiva de muchos fenómenos que corresponden a una realidad no aditiva y compleja; obteniéndose así, un conocimiento ecológico cargado de una relativa objetividad y dominado por leyes; además de caracterizarse por ser una ecología antropocéntrica, que separa al ser humano de la naturaleza y le quita a ésta su valor propio, adjudicándole un valor instrumental (Capra, 1998).

Sin embargo, la realidad es que los ecosistemas son sistemas complejos. Por ello, la ecología y el estudio de los ecosistemas no pueden realizarse de una manera reduccionista, limitándose a los enfoques de la ciencia clásica en la que sus partes queden desarticuladas, puesto que su objeto mismo está asociado al pensamiento holístico y sistémico.

Por lo anterior, es necesaria una ecología que mantenga una visión holística de los ecosistemas, cuyo principal fundamento radique en el análisis del todo (sin olvidar las partes), a diferencia de la visión clásica la cual está centrada en las partes (olvidando el todo); y que además incorpore conceptos poco considerados, con el fin de hacer aportes significativos para su estudio (Di Salvo *et al.* 2009). Es decir, una ecología pensada desde la complejidad. Por lo tanto, es necesario primeramente reconocer esa complejidad. Lo anterior nos lleva a la necesidad de tener una visión más holista, que tome en cuenta al panorama general de la realidad

y teniendo como objetivo el entender el funcionamiento total del sistema, para lo cual es necesario considerar teorías orientadas a caminar en sentido contrario a la visión tradicional de la llamada ciencia clásica.

Es necesario comprender que no es posible predecir el futuro del mundo debido a la gran cantidad de interacciones que existen en un sistema como este. Por lo tanto, para abordar los retos actuales en relación con la sociedad y la naturaleza, es necesaria la búsqueda de datos, soluciones, miradas y metodologías que permitan un entendimiento más abarcador de los problemas de la sociedad y su ambiente. Con un entendimiento más abarcador de los componentes múltiples, complejos y heterogéneos característicos de la relación naturaleza-sociedad. En otras palabras, para poder abordar los problemas actuales de la relación sociedad-naturaleza es indispensable un cambio de paradigma.

Y si se desea entender un sistema tan complejo, como lo es un sistema ecológico, es necesario primeramente reconocer que esa complejidad, así como la incertidumbre y la indeterminación, lo circundan.

1.4 Los elementos heterogéneos: el paradigma de la complejidad

Como se expuso anteriormente, la ciencia clásica ha utilizado una metodología reduccionista, separando y simplificando los fenómenos para predecir su futuro, lo cual ocasionó el predominio de una visión determinista durante muchos años en el mundo de la ciencia, enfoque que fue aplicado a una gran variedad de dominios, del que no escaparon la ecología y el estudio de los sistemas ecológicos.

Con la herencia newtoniana, la imagen de la naturaleza era la de una realidad aprehensible, que estudiaba sistemas en equilibrio, reversibles y explicables conforme a una causalidad lineal. La ciencia clásica privilegiaba el orden y la estabilidad, fue así como el paradigma de la simplicidad pugnó por encontrar orden en el universo y reduciendo el desorden a una ley o a un principio.

El paradigma dominante ignora los principios físicos fundamentales. Sin embargo, hoy es más que evidente que los sistemas no funcionan de esta manera y por el contrario, en todos los niveles de observación se reconoce hoy el papel primordial de las fluctuaciones y la inestabilidad. Surge así la necesidad de un cambio de paradigma. El paradigma de la complejidad, a diferencia del mencionado anteriormente, parte de un pensamiento sistémico. Esto quiere decir reconoce la interdependencia de cada uno de los elementos del sistema.

Una de las premisas del reduccionismo es la separación, lo que dio como resultado en la ciencia clásica el ignorar las interacciones que se dan entre los componentes del sistema; interacciones que en la realidad son de gran relevancia y, por lo tanto, el reduccionismo no es adecuado para estudiar fenómenos complejos como los que se dan en un sistema ecológico.

En las últimas décadas, los límites del reduccionismo se han hecho evidentes en fenómenos en los que las interacciones son relevantes, por ejemplo, en el abordaje del estudio de los ecosistemas, en donde la realidad apunta a relaciones complejas y, por lo tanto, son cada vez más las propuestas que cuestionan a la forma tradicional de hacer ciencia.

En sistemas complejos, tener las "leyes", más las condiciones iniciales y de contorno, no es suficiente para hacer predicciones. Dado que los sistemas complejos se comportan de formas que no obedecen las reglas y además las interacciones generan constantemente información nueva que no está presente en las condiciones iniciales, por lo tanto, la previsibilidad se ve limitada.

Actualmente el mundo atraviesa una serie de problemas que ponen en riesgo la permanencia del ser humano en éste, nos enfrentamos a una complejidad que va más allá de las condiciones de laboratorio; por lo tanto, es necesario asumir el reto de la complejidad y que la ciencia de un giro hacia las estructuras disipativas, los sistemas alejados del equilibrio, los sistemas históricos, etc.

Cada vez son más autores los cuales consideran al viejo marco de referencia como inadecuado (Prigogine y Stengers 1984, Koestler 1967, Ulanowicz 1986).

I. Wallerstein en su obra "Abrir las Ciencias Sociales" menciona que las anteriores visiones deterministas, reduccionistas, disciplinares y científicas de producir y transmitir conocimiento entraron en crisis desde la segunda mitad del siglo XX; y que actualmente son insostenibles. Wallerstein señala también la existencia de una crisis de los paradigmas newtonianos y cartesianos de la ciencia aludiendo que, lo que ha propiciado este escenario son una serie de factores como las emancipaciones frente al colonialismo, políticas culturales y educativas, la globalización, que convergen en la generación de una ruptura profunda y duradera en las formas de valorar y en prácticas de saberes y de epistemes.

Se han presentado varias propuestas novedosas en los últimos años, como por ejemplo los postulados de la ciencia Post-Normal (Funtowicz y Ravetz, 1992, 1993, 1994; Ravetz, 1999a, 1999b, 2001, 2005) y de la Economía Ecológica. Según Funtowicz y Ravetz (1993), la Ciencia Post -Normal plantea un "diálogo interactivo" donde los sistemas son considerados como dinámicos y complejos, con un alto grado de incertidumbre, y están abiertos a sufrir una interacción constante para proveer una guía en la elección de estrategias apropiadas para resolver problemas.

Entre los movimientos y tendencias científicas actuales orientadas a romper con el paradigma de la ciencia clásica, se puede citar la teoría de sistemas y el surgimiento del así llamado “paradigma de la complejidad”.

La teoría de la complejidad y los conceptos relacionados surgieron a mediados del siglo XX a través de múltiples disciplinas, incluido el trabajo de Prigogine y su estudio sobre las estructuras disipativas en la termodinámica del no equilibrio.

La complejidad es una forma de analizar, de reflexionar sobre determinados aspectos de la naturaleza, la sociedad y el pensamiento, los cuales presentan ciertas características que los clasifican como sistemas de comportamiento complejo.

De tal suerte, tanto los estudios culturales como las ciencias de la complejidad se constituyen para atacar la cultura de la fragmentación, de la reducción, de la inteligencia ciega (como lo dice Edgar Morin) y simplificadora.

La teoría de la complejidad también puede entenderse en general como el estudio de sistemas adaptativos complejos (CAS). La palabra "complejo" implica diversidad, a través de un gran número y una gran variedad de partes interdependientes, pero autónomas. "Adaptable" se refiere a la capacidad del sistema para alterar, cambiar y aprender de experiencias pasadas. La parte del "sistema" se refiere a un conjunto de partes conectadas e interdependientes, una red. Si bien existe una gran cantidad de CAS a diferentes escalas, la teoría de la complejidad revela que hay principios comunes e interrelacionados que pueden observarse en todos los CAS (Zimmerman, Lindberg y Plsek, 2001).

Esta nueva propuesta de cómo tratar estas realidades pueden encuadrarse en lo que Adams denomina “energética social”, que resulta de ubicar al segundo principio de la termodinámica y sus derivaciones epistemológicas.

1.5 El segundo principio de la termodinámica, el eje rector para el análisis de la complejidad.

El eje rector fundamental para el análisis de la complejidad y los procesos de articulación sistémica es la noción biofísica del segundo principio de la termodinámica, un principio que establece que la entropía total de un sistema aislado nunca puede disminuir con el tiempo. El aumento de la entropía explica la irreversibilidad de los procesos naturales y la asimetría entre el futuro y el pasado (Zohuri, 2016).

Su primera formulación se atribuye al científico francés Sadi Carnot , quien en 1824 demostró que existe un límite superior para la eficiencia de la conversión de calor al trabajo, en una máquina de calor, también conocida como la regla o límite de Carnot

La principal derivación epistémica de la segunda ley es aquella que nos lleva a deslindarnos de la centralidad analítica del orden, la simetría, la reversibilidad y el equilibrio, como atributos esenciales de los procesos de organicidad y estructuración sistémica. Sin embargo, para entender mejor este principio es necesario que repasemos su origen y la llamada primera ley de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica surgió de los esfuerzos para comprender la relación entre calor y trabajo. La primera ley dice que la energía no se crea ni se destruye, y que la energía total dentro de un sistema aislado permanece invariable. Sin embargo, la calidad de la energía (es decir, el contenido de exergía) puede variar. La segunda ley de la termodinámica establece que, si en el sistema tiene lugar cualquier tipo de proceso, la calidad de la energía (la exergía) dentro del sistema tiene que degradarse.

Esta primera Ley llamada también ley de la conservación de la energía, se ocupa exclusivamente de la cantidad de energía y según la cual la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. De acuerdo a esta ley la generación de residuos es algo inherente a los procesos de producción y consumo.

Los principios antes reseñados se aplican a sistemas aislados. Hay, sin embargo, una tercera clase de fenómenos propios de los sistemas abiertos a flujos de energía y/o materia, los cuales residen en estados cuasiestables a cierta distancia del equilibrio (Nicolis y Prigogine, 1977, 1989).

Los sistemas organizados no vivos y los sistemas vivos (como lo es un ecosistema) dependen de flujos de energía externa para mantener su organización y para la disipación de gradientes energéticos asociada a los procesos autoorganizativos. Esta organización se mantiene al precio de un incremento de la entropía del sistema «global» en el que está inmersa la estructura. En estos sistemas disipativos el cambio de entropía total es la suma de la producción interna de entropía (que siempre es positiva o nula) más el intercambio de entropía con el entorno, que puede ser positivo, negativo o cero. Para que el sistema se mantenga en un estado estacionario de no equilibrio, el intercambio de entropía debe ser negativo e igual a la entropía producida por procesos internos tales como el metabolismo.

La termodinámica, refinada por Boltzmann, contemplaba una naturaleza en constante degradación hacia una muerte en forma de desorden aleatorio, surgiendo así el segundo principio de la termodinámica.

El segundo principio llamado también principio de la entropía: se refiere a la calidad de la energía, es decir, su convertibilidad en otras formas de energía o trabajo mecánico. Otra forma de enunciar esta segunda Ley es la siguiente: La entropía de un sistema aislado que no está en equilibrio tenderá a aumentar en el tiempo, siendo la entropía una medida de la incapacidad de la energía del sistema de transformarse en trabajo. Esto implica que la materia y la energía se degradan continua e irrevocablemente desde una forma disponible a una forma no disponible, o de una forma ordenada a una desordenada. Así, desde el punto de vista de la termodinámica lo que confiere valor económico a la materia y energía es su disponibilidad para ser utilizada.

La segunda ley puede formularse también en términos de entropía, la medida cuantitativa de la irreversibilidad, cuyo incremento es siempre mayor que cero en

cualquier proceso real. La segunda ley también puede enunciarse así: cualquier proceso real sólo puede proceder en una dirección que conduce a un incremento de entropía.

Aunque según las leyes de la termodinámica, toda la energía puede convertirse en calor, de acuerdo también a dichas leyes una forma de energía no es reemplazable por otra en todas las situaciones. Esto quiere decir que es importante hacer una diferencia entre la calidad y la cantidad de energía.

La primera ley plantea que la cantidad de energía se mantiene constante a través de las diversas transformaciones, mientras que la segunda ley se refiere a que la calidad de ésta va disminuyendo a medida que ocurren las transformaciones. En resumen, ocurre una pérdida de energía en términos de calidad y no de cantidad. Todos los procesos de transformación de la energía comprenden una cierta degradación de su calidad. Un ejemplo de esto puede observarse en las cadenas tróficas presentes en los ecosistemas: los organismos productores o autótrofos aprovechan la luz solar, que llega a la superficie terrestre en gran cantidad, pero bastante diluida. Una parte es utilizada a través de la fotosíntesis para la vida del organismo, y otra se pierde en forma de calor. Cuando un consumidor herbívoro consume una planta, otra porción de energía se degrada como calor, por lo tanto, aunque la energía esté más concentrada posee menor capacidad de realizar “trabajo”. A medida que se avanza a través de los eslabones de la cadena, la energía se va concentrando y disminuyendo su calidad, por lo tanto, esto explica por qué dichas cadenas tienen una cantidad acotada de eslabones.

Según Kapp, “la destrucción ambiental y la creciente escasez de los recursos por fin nos han hecho tomar conciencia del hecho que la producción, la asignación, la elección de insumos y su colocación, no están ocurriendo en los sistemas cerrados o semi cerrados que la ciencia económica ha usado tradicionalmente como modelos teóricos para explicar los procesos económicos, sino que básicamente esto ocurre en sistemas abiertos” (Kapp, 1976).

1.6 Sistema complejo alejado del equilibrio

Como vimos anteriormente, para poder entender todo proceso que se desarrolle en un sistema ya sea social o natural es necesario el reconocimiento de que se trata de sistemas complejos. Sin embargo, cuando estos sistemas complejos los relacionamos con la segunda ley de la termodinámica podemos tratarlos como sistema termodinámicamente abiertos alejados del equilibrio.

La característica de un sistema complejo es que el conjunto de elementos que forman parte de él, al relacionarse constituyen y emergen propiedades que no estarían presentes si sus elementos permanecieran separados. Ahora bien, ese sistema complejo puede ser visto como un sistema termodinámico, lo cual es de gran ayuda al describir el comportamiento de sistemas complejos, pues nos permite entender cómo es que estos ya sea el caso se mantienen o perecen.

1.7 El pensamiento complejo y el estudio de los ecosistemas

Durante la última mitad del siglo XX, como consecuencia del avance de la ciencia ocurrió un cambio en nuestra visión del mundo, un gran número de investigadores de distintos campos comenzaron a reconocer que muchos sistemas no pueden ser entendidos al examinar sus partes de manera aislada. Dando como resultado un nuevo conocimiento que desafía las premisas de la ciencia clásica, y que marca un alejamiento de la cosmovisión newtoniana que enfatiza el equilibrio y la certeza.

A este movimiento, se le conoce como estudios de la complejidad. En las últimas décadas, el estudio científico de la complejidad y los sistemas complejos ha propuesto un cambio de paradigma en la ciencia y la filosofía, proponiendo métodos y herramientas que tienen en cuenta las interacciones relevantes en un sistema para entender procesos cuyo estudio no puede reducirse al de sus componentes.

Su desarrollo ha dado lugar a la teoría de los sistemas complejos. Fue Von Bertalanffy (1972) quien puso las bases para esta nueva visión, al definir un sistema

como un conjunto de elementos interrelacionados que interactúan entre ellos y con el ambiente externo al sistema.

La innovación más importante del pensamiento sistémico es el cambio de un enfoque en el que para entender el sistema es necesario el rompimiento de este en sus componentes o partes (reduccionismo) por un enfoque que ve al sistema como un todo.

Esta aproximación dio lugar a un entendimiento más grande de los sistemas como totalidades integradas, con propiedades que no pueden ser entendidas únicamente al examinar las partes que los componen. La teoría de sistemas se enfoca en la complejidad, interdependencia, y en la integración, (H. T. Odum 1994)

La teoría de sistemas evolucionó como un intento para unificar los enfoques de las ciencias que anteriormente habían trabajado de forma aislada, combinando así sus puntos fuertes y sus ideas únicas para proporcionar una visión más holística de un sistema.

Una definición acorde para nuestros propósitos es la que Edgar Morin presenta, la cual dice que: Complejidad significa la emergencia de procesos, hechos u objetos multidimensionales, multirreferenciales, interactivos (retroactivos y recursivos) y con componentes de aleatoriedad, azar e indeterminación, que conforman necesariamente en su aprehensión grados irreductibles de incertidumbre. (IIPC, 2008).

Las fuentes principales desde donde emerge el paradigma de la complejidad son según Gómez (1996): la genética y la biología molecular; la etología y la sociedad contra natura de Serge Moscovici; la teoría microfísica y la termodinámica; la teoría de sistemas de Ludwig Von Bertalanffy; la cibernética de Norbert Wiener, Gregory Bateson y William R. Ashby; la teoría de la información, de Claude Shannon, Warren Weaver y Leon Brillouin; la teoría de los autómatas autorreproductores, de John Von Neumann.

El mismo Gómez también menciona como fuentes desde donde emerge el paradigma de la complejidad el principio de orden a partir del ruido y el azar

organizador, de Heinz Von Foerster y las teorías de la autoorganización, de Henri Atlan; las estructuras disipativas de Ilya Prigogine; las obras de Michel Serres y de René Thom; las teorías cognitivas de Humberto Maturana y Francisco J. Valera; la tesis sobre los límites del formalismo, de Jean Ladrière; la teoría de fractales de Benoit Mandelbrot; las reflexiones filosóficas sobre la ciencia y la técnica, de Edmund Husserl y Martin Heidegger.

Como puede apreciarse, el paradigma de la complejidad surge desde una gran cantidad de aportaciones, sin embargo, para efectos de la presente tesis, el enfoque principal es la Teoría de Sistemas.

Hizmeri (2010) menciona que antes de los años cuarenta del siglo pasado, los términos 'sistema' y 'pensamiento sistémico' ya se utilizaban en la comunidad científica, sin embargo, fueron los conceptos de Bertalanffy de sistema abierto y la teoría general de sistemas los que establecieron el pensamiento sistémico como movimiento científico mayor.

Fue Bertalanffy quien planteó la necesidad de construir una teoría general de los sistemas con el propósito de resolver las dificultades que encontraban las ciencias biológicas para explicar los fenómenos biológicos mediante un método reduccionista (Rodríguez y Arnold, 2007).

Por lo anterior, se argumenta que fenómenos como los incluidos en esta investigación —como el funcionamiento de un ecosistema— se describen mejor desde una perspectiva no reduccionista o compleja, puesto que el comportamiento de un sistema ecológico no se puede determinar ni predecir a partir de reglas individuales. Por lo tanto, el reduccionismo no es adecuado para tratar problemas como los ambientales, debido a que los problemas aparecen como resultado de la interacción de los componentes del sistema, y ellos sólo pueden ser entendidos examinando el mismo nivel jerárquico en el que aparecen. Con el reduccionismo, el comportamiento colectivo no puede ser explicado, por el contrario, es a través de las interacciones, que el comportamiento grupal puede ser bien entendido. Un claro ejemplo de lo anterior es el comportamiento del ecosistema y la biosfera.

Los planteamientos anteriores representan un enfoque sintético en oposición a uno reduccionista. Una ciencia de la complejidad ofrece la posibilidad de representar un cambio o de "describir nuestra realidad colectiva como un proceso", sin volver al reduccionismo (Casti 1994: 273).

En lo que respecta a los sistemas ecológicos, Sotolongo (2007) citado por Di Salvo et al. (2009) considera que "los ecosistemas abordados por la ecología deben estudiarse con una visión sistémica, la cual permitirá asumirlos como una totalidad que se establece a partir de la dinámica de muchos y diferentes elementos, múltiples interacciones y multitud de conductas".

Di Salvo et al. (2009) menciona que la ciencia ecológica no corresponde con la ciencia tradicional y debe responder a los principios básicos de los sistemas ecológicos entre los que se encuentran:

1. La interdependencia, que se establece entre todos los miembros de una comunidad ecológica, cuyas relaciones determinan sus propiedades esenciales y la propia existencia de la comunidad.
2. La alta cooperatividad que se establece entre sus miembros y permite la coevolución de los mismos, enfatizando la asociación y cooperación.
3. La flexibilidad y diversidad que capacitan a los ecosistemas para la supervivencia a las perturbaciones y para la adaptabilidad a las condiciones cambiantes. (Di Salvo et al. 2009).

Es importante que al analizar un sistema ecológico se comprendan los principios mencionados anteriormente, pues estos principios de organización de los sistemas ecológicos y las múltiples interrelaciones entre sus elementos, requiere los cambios de percepción característicos del pensamiento sistémico: de las partes al todo, de objetos a relaciones. La descomposición reduccionista en elementos desintegra también al sistema, cuyas reglas de composición no son aditivas, sino que se derivan de una multitud de interconexiones.

Si se toma en cuenta que en el pensamiento holístico la visión del mundo se basa en un todo integrado más que como una continua colección de partes y que el pensamiento ecológico parte de esta visión reconociendo la interdependencia fundamental entre todos los fenómenos, se comprenderá que la complejidad, constituye un enfoque adecuado para abordar el estudio de los ecosistemas.

Todas las características mencionadas obligan a pensar que los sistemas ecológicos no son sistemas simples y que exhiben un comportamiento complejo. Nicolis y Prigogine (1991) caracterizan este comportamiento por la sensibilidad del sistema ante las perturbaciones, la posibilidad de acceso a múltiples estados, la habilidad para escoger entre diferentes caminos dependiendo de las condiciones iniciales y el aumento de la sensibilidad para percibir el ambiente y responder al cambio; ergo, la evolución del sistema en el tiempo dependerá de su sensibilidad a la menor perturbación.

Dado que la Ecología se configura a partir de la integración de diversos saberes y éstos han evolucionado a través del tiempo, se hace necesario que esta ciencia de síntesis se reformule o reconstituya a partir de los nuevos conocimientos emergentes. En este sentido, la complejidad representa todo un paradigma que permite la reformulación de la ciencia ecológica desde una postura con mayor pertinencia que la desarrollada hasta ahora.

Para esta investigación, la concepción de los sistemas complejos es apropiada, puesto que los ecosistemas son sistemas complejos. Por tal motivo no pueden ser estudiados de una manera reduccionista, pues sus partes quedan desarticuladas y las relaciones existentes, que son las que finalmente determinan la esencia del sistema, no pueden estudiarse de manera adecuada. Por ello, es necesaria una visión holística de los ecosistemas, que además incorpore conceptos poco considerados hasta ahora, con el fin de hacer aportes significativos para su estudio. Entonces, abordar el estudio de los ecosistemas se debe hacer desde una postura compleja, ya que realidades tan complejas como lo son los ecosistemas nos obligan a incorporar en el análisis elementos heterogéneos. Así se tiene un enfoque más holista al ver al medio ambiente en su totalidad, es decir, como un sistema cuyos

componentes humanos, no humanos, orgánicos e inorgánicos son interdependientes y en los cuales hay propiedades emergentes.

Una vez reconocida la necesidad de superar las restricciones que impone la visión utilitarista de los humanos, surgieron enfoques de valuación alternativa, como el esquema de valoración energética propuesto por Odum y Odum (2000), o aquellos basados en aspectos biológicos y/o sociales (Kremen y Ostfeld 2005).

Teniendo en cuenta la creciente necesidad de remover subjetividades, se está generando una demanda creciente de enfoques y métodos basados en datos biofísicos objetivos. De esta manera se procura lograr estimaciones confiables y creíbles que reflejen el valor funcional de los ecosistemas, más allá de una percepción ocasional u oportunista de utilidad económica.

Como se mencionó anteriormente, fue indispensable que el ecosistema estudiado se entendiera como un sistema complejo, pues en él existe una gran diversidad de interacciones entre una gran cantidad de variables y son precisamente esas interacciones las que permiten al sistema complejo autoorganizarse, lo cual surge de manera espontánea. Y como menciona Odum (1984):

“La estructura y las funciones de los ecosistemas dependen del tipo de especies de plantas y animales que los componen (estructura biológica) y de variables abióticas que regulan la manera en que recircula la materia y la energía dentro y fuera de sus límites”.

El cuestionamiento central de la investigación se refiere a identificar y entender el momento ecosistémico² en que ocurre la autoorganización del ecosistema y con lo cual logra mantenerse por sí solo, es decir, sin la adición de elementos de origen externo a él.

A pesar de que el ecosistema es una totalidad de relaciones y elementos, el análisis de este se ha enfocado en ciertas áreas, ya sea en la vegetación, en el suelo, en los animales etc., bajo la idea de que hacerlo de esta forma se nos facilita entender

² En este trabajo nos referiremos al momento ecosistémico como aquel instante en que el ecosistema recupera sus propiedades, siendo posible retirar los ingresos antrópicos al mismo y que el ecosistema funcione por sí solo.

el ecosistema. Sin embargo, el ecosistema debe ser visto como un todo con el fin de promover su entendimiento integral y con ello determinar cual debe ser el conjunto de cualidades relevantes a ser consideradas cuando se modela un sistema natural.

Es difícil obtener una visión integral de los problemas ambientales, pero aún así es necesario. Por lo tanto, se requiere el marco transdisciplinario para comprender la relación fundamental entre la naturaleza y la sociedad.

Para poder analizar un ecosistema será necesario primeramente reconocer que estamos tratando con sistemas complejos. Una definición de sistema complejo es la que nos proporciona Schuschny (1998) el cual menciona que:

“un Sistema Complejo puede ser definido como un sistema formado por un gran número de elementos simples, que interactúan entre sí, capaces de intercambiar información entre ellos y el entorno y, a su vez, capaces de adaptar su estructura interna como consecuencia de tales interacciones (...) La propiedad de no linealidad de las interacciones entre los constituyentes del sistema es responsable, bajo ciertas circunstancias, de una gran riqueza de comportamientos emergentes coherentes que se manifiestan bajo la forma de interesantes estructuras macroscópicas dignas de ser estudiadas. En consecuencia, surge un nuevo paradigma en el que el todo es más que la suma de las partes”.

Una de las principales características de los sistemas complejos es que la riqueza y diversidad de interacciones entre una gran cantidad de variables dependientes permite a los sistemas complejos autoorganizarse, y este proceso de auto organización sucede espontáneamente. Otra característica relevante es su naturaleza adaptativa, ya que los sistemas complejos no son pasivos, sino que responden activamente a lo que ocurre a su alrededor, transformándolo para su propia ventaja (Sardar y Abrams, 1999).

Dado que los sistemas vivos (sociales y ecológicos) son dinámicos porque están continuamente coevolucionando con su entorno, poseen la característica de estar siempre transformándose en “algo más”. Este “devenir” (becoming) fue propuesto por Ilya Prigogine (1980) para señalar el problema que surge al intentar modelar dichos sistemas. Esto implica la necesidad de una continua actualización de las variables y sus interrelaciones cuando se describe su comportamiento.

Quizás el intento más difundido de utilizar un indicador biofísico para valuar servicios ecosistémicos sea, como mencionamos antes, el Análisis Emergético propuesto por Odum (1996). La valuación energética, descrita por Odum y Odum (2000), es una propuesta basada en utilizar un común denominador (la energía solar) como elemento básico de cálculo a partir del cual se estiman las transformaciones de esa base energética antes de convertirse (“transformidad”) en un bien o servicio natural esencial para la vida.

Es necesario representar en forma adecuada este sistema ecológico-socio-económico complejo, evitando el paradigma dominante con que se ha visto el medio ambiente, es decir como algo cuantificable en términos económicos y de insumos.

Por lo anterior; el sistema objeto de la investigación se consideró como un sistema abierto, lejos del equilibrio termodinámico, puesto que en el existen intercambios de materia y energía con el ambiente, de los cuales se depende para establecer las estructuras y funciones que actualmente presenta, lo anterior permitió describir con mayor precisión el sistema evaluado.

Para analizar el sistema de esta manera, se aplicaron herramientas teórico-metodológicas que toman en cuenta la complejidad de las relaciones sistémicas existentes y así identificar las variables involucradas en dichos procesos.

Resulta evidente que el análisis del ecosistema no puede limitarse a paradigmas de la ciencia clásica, puesto que si se desean identificar los elementos del ecosistema y tener una visión acertada de cómo es que éstos surgen, se componen y funcionan, se debe tener en cuenta al pensamiento holístico (el todo) y sistémico para su correcto abordaje.

El pensamiento complejo brinda un conjunto de herramientas que permiten estudiar los ecosistemas a partir de una nueva visión y no desde la perspectiva tradicional de la ciencia clásica. La teoría de la complejidad permite comprender mejor los sistemas tan diversos existentes en la vida real como las células, los seres humanos, las organizaciones —y para el caso que nos ocupa en esta tesis el de los

ecosistemas forestales— es decir, sistemas complejos que sólo se entienden parcialmente por los métodos científicos tradicionales.

Siguiendo con una base conceptual que nos permitirá obtener la aplicabilidad del pensamiento complejo y la termodinámica al estudio de los ecosistemas, a continuación, se introduce el concepto de autopoiesis.

1.8 El abordaje sistémico del ecosistema

Los ecosistemas tienen entradas y salidas, son sistemas vivos que interactúan con el medio donde se reproducen. Por lo anterior los ecosistemas se consideran sistemas abiertos que reciben flujos energéticos de una gran variedad de fuentes, estos flujos, al llegar y entrar al sistema constituyen un insumo que lo obliga a autoorganizarse.

La razón por la cual se decidió abordar al ecosistema bajo esta postura es debido a que debido a las propiedades del mismo, sus elementos e interacciones es necesaria una postura que tome en cuenta todos estos elementos.

Leonardo Tyrtania menciona que “el objeto de estudio que postula el paradigma de la complejidad es el sistema, concretamente, el sistema disipativo, que es un sistema termodinámicamente fluido, abierto a los intercambios del medio” (Tyrtania, 2008: 45)

Un sistema no puede mantenerse aislado, según Tyrtania, “desde la perspectiva de la teoría de sistemas disipativos solo puede perdurar en interacción continua con los sistemas adyacentes, de ahí la importancia del análisis de los flujos energéticos” (Tyrtania, 1992: 239).

Adams menciona que “el sistema termodinámicamente abierto se refiere a que nuestro universo muestra la tendencia a organizarse en sistemas interdependientes y a que las reglas básicas de esa autoorganización deben buscarse en la dinámica de los flujos de materia, energía e información” (Adams, 2001:14).

Lo anterior lo refuerza Prigogine al sostener que “una característica que comparten las estructuras sociales con las biológicas es que ambas se dan en sistemas abiertos y su organización depende del vital intercambio de materia y energía con el medio” (Prigogine Ilya, et al. 1999:67).

1.9 La emergía

Todos los procesos de autoorganización de sistemas están regidos por la segunda ley de la termodinámica, pues la energía que pasa de un nivel inferior a otro superior de la autoorganización es menor en cada escalón, dado que no existe una eficiencia del cien por ciento en el proceso de transformación; pero la energía necesaria para la construcción de niveles más altos de la autoorganización es cada vez mayor conforme el sistema se hace más complejo, es decir, conforme avanza en la cadena de organización (Odum, Brown & Brandt-Williams, 2000). De esta manera, la energía se concentra a medida que se avanza en los niveles de autoorganización

Disímiles esfuerzos se han hecho por buscar herramientas que puedan evaluar de forma objetiva e integral los posibles impactos de las actividades desarrolladas por el hombre y su interrelación con el medio donde las realiza. La evolución de las mismas ha estado condicionada a la propia evolución de la concepción que el hombre ha adquirido de su modelo de desarrollo.

El ecosistema es un concepto fundamental. Ecosistema es el sistema biológico constituido por una comunidad de seres vivos y el medio natural en que viven y las funciones ecosistémicas útiles para alguna actividad humana, se les conoce como servicios de los ecosistemas. Uno de los desafíos actuales, en términos de manejo y estudio de los ecosistemas, es cuantificar la provisión de estos servicios. Una aproximación habitual desde la economía clásica es usar valores monetarios para calcular el costo de reemplazo de los servicios provistos por cada sistema. Sin embargo, a menudo este enfoque económico de la valoración ambiental resulta insuficiente para predecir características ecosistémicas, tales como la estabilidad a

largo plazo o la degradación de bienes naturales. Una aproximación alternativa a la monetaria es la valoración física a través de la cuantificación de los flujos de energía en un sistema manejado.

Los ecosistemas reciclan la energía y el material a través de una intrincada red de interacciones entre sus componentes. Los procesos que resultan de estas interacciones son únicos y definen las condiciones que apoyan la comunidad biótica del ecosistema e impulsan el cambio (Zarbá & Brown, 2015).

La emergía es una cantidad contable que tiene la propiedad de expresar todas las formas de energía, en términos de su capacidad equivalente de hacer el trabajo, utilizada para la obtención de un producto en un socio-ecosistema del que forma parte. La contabilidad ambiental utilizando la emergía ha demostrado ser un método que puede utilizarse para valorar objetivamente el trabajo del medio ambiente, la economía y la sociedad.

Mide la calidad de las diferentes formas de energía como: la luz del sol, agua, combustibles fósiles, y minerales. El reconocimiento de esas diferencias son las bases teóricas de la metodología emergética las cuales encuentran en la termodinámica, la teoría general de sistema y la ecología de sistemas, sus bases conceptuales.

Existe un creciente interés en reincorporar el papel de los ecosistemas a la toma de decisiones económicas, puesto que se considera que el divorcio entre el crecimiento, que ha sido el foco de debate dentro de la ciencia económica, y los ecosistemas, que son el objeto de la mayoría de los esfuerzos de conservación, es una de las causas primordiales de la pérdida de biodiversidad que vivimos actualmente en el marco del cambio global. El método emergético es una metodología que se inscribe en este intento, partiendo de una base ecológica y termodinámica (Lomas, et al., 2007).

Este método toma en cuenta todas las entradas ambientalmente gratuitas (sol, viento, lluvia, etc.) así como también el soporte ambiental indirecto acumulado en trabajo humano y servicios. Además, el cálculo se extiende hacia atrás en el tiempo

con el objetivo de incluir el trabajo ambiental necesario para la formación de recursos.

1.10 Autopoiesis y autoorganización

Un concepto que permite entender cómo es que los sistemas ecológicos se autoorganizan es el de organización autopoietica o autopoiesis, mismo que hace referencia a un principio de autoproducción de los seres vivos y por lo tanto también de los ecosistemas, el cual implica una serie de procesos conectados entre sí, los cuales “producen los componentes que constituyen y especifican al sistema como unidad” (Maturana y Varela, 2004).

Este concepto fue propuesto por los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela. Estos autores explican un sistema autopoietico como una unidad cuya organización está definida por una red particular de procesos de producción de elementos, no por los componentes mismos o sus relaciones estáticas. Este concepto es muy similar al enfoque dado en esta investigación a lo que es un sistema ecológico.

Según Arnold et al. (2011) las ideas originales de esta teoría de la autopoiesis surgen a fines de 1960, esto debido a la motivación de Maturana por responder a la pregunta sobre la naturaleza de lo viviente:

[...] me di cuenta de que lo que definía, y de hecho constituía a los seres vivos como entes autónomos que resultaban autorreferidos en su mero operar, fue que eran unidades discretas que existían como tales en la continua realización y conservación de la circularidad productiva de todos sus componentes, de modo que todo lo que ocurría con ellos ocurría en la realización y en la conservación de esa dinámica productiva, que lo definía y a la vez constituía en su autonomía (Maturana y Varela, 1994: 6).

En la obra de Maturana y Varela, *De Máquinas y seres vivos* (2004), Humberto Maturana y Francisco Varela definen a los sistemas vivientes como máquinas homeostáticas manteniendo constante su propia organización, es decir, los

procesos de producción de componentes. También mencionan que el hecho de que los sistemas vivos sean máquinas no puede demostrarse apelando a sus componentes, más bien se debe mostrar su organización mecanicista de manera tal, que sea obvio cómo todas sus propiedades surgen de ella.

Si lo anterior se traslada al ecosistema, es posible decir que, si bien es cierto que la estructura de cualquier ecosistema es importante, ésta por sí sola no es suficiente para entender la organización del sistema; así, para entender cómo funciona el ecosistema y su organización es necesario tomar en cuenta las relaciones existentes, tanto en el medio biótico como en el medio físico, lo cual determinara la verdadera esencia del sistema, y son esas relaciones las que definirán e identificarán el sentido del mismo.

En los ecosistemas, el intrincado conjunto de relaciones no sólo organiza al propio sistema, sino que además permite la producción de más elementos que lo conformarán. Un ejemplo lo representan las relaciones tróficas de un ecosistema, que estructuran al ecosistema desde el punto de vista alimentario y, además, permiten la producción de más elementos que formarán parte del mismo.

El manejar este concepto nos permitirá el análisis del ecosistema y como es que se relacionan todos sus componentes trabajando en conjunto para poder mantenerse por sí solos.

La autopoiesis, principio de autoproducción de los seres vivos, implica una serie de procesos concatenados que "...producen los componentes que constituyen y especifican al sistema como unidad" (Maturana y Varela, 2004: 70); por tanto, es la organización (autopoiética), la estructura (circular) y la operación (producción de sí mismo) lo que caracteriza a un ser vivo. El introducir el concepto de autopoiesis posibilita el análisis de la dinámica que se establece entre los componentes del sistema y permite pasar de la visión de objetos a la de relaciones, de procesos.

Maturana y Varela argumentan que la reproducción requiere una unidad que se reproduzca; por esto es que la reproducción es una operación posterior al establecimiento de la unidad y no puede entrar como rasgo definitorio en la organización de los sistemas vivientes.

Además, al utilizar este concepto fue posible delimitar el espacio ecosistémico para la investigación, al ser un principio que permite entender cómo es que se producen una serie de relaciones constituyentes del ecosistema, las cuales Maturana y Varela (2004), enumeran de la siguiente manera:

1) La producción de las relaciones constitutivas, las cuales son relaciones que determinan la topología de la organización autopoietica y, por ende, determinan sus límites físicos. La producción de relaciones constitutivas mediante la producción de los componentes que mantienen esas relaciones es una de las dimensiones definitorias de un sistema autopoietico.

2) La producción de relaciones de especificidad: las relaciones de especificidad son relaciones que determinan la identidad de los componentes del sistema (las propiedades) de los componentes de la organización autopoietica y, por lo tanto, su factibilidad material. La producción de relaciones de especificidad mediante la producción de componentes que puedan mantener esas relaciones, es otra de las dimensiones definitorias de un sistema autopoietico.

3) La producción de relaciones de orden: que son aquellas que determinan la dinámica de la organización autopoietica determinando la concatenación de las relaciones constitutivas, de especificidad y de orden y, por consiguiente, su realización efectiva. El establecimiento de relaciones de orden mediante la producción de componentes que controlan la producción de relaciones (constitutivas, de especificidad y de orden), representa la tercera dimensión del espacio autopoietico. Son estas las que definen todo sistema y no su estructura, premisa que tradicionalmente orientó el estudio de los seres vivos.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los términos de autopoiesis, autoorganización no son sinónimos. Etxeberria y Bich, (2017) mencionan que el prefijo “auto” en autoorganización y autopoiesis se refiere a la existencia de una identidad o agencialidad implicada en el orden, organización o producción de un sistema que se corresponde con el sistema mismo, en contraste con el diseño o la influencia de carácter externo. De igual manera menciona que la autoorganización estudia la manera en la que los procesos de un sistema alcanzan de forma espontánea un orden u organización complejo.

La noción de autopoiesis, por su parte, trata de explicar la organización individual de los seres vivos como un proceso dinámico que genera una identidad desde las operaciones del sistema (Maturana y Varela 1973).

CAPÍTULO 2. LOS LÍMITES DEL ECOSISTEMA

2.1 La región

Como muchos otros conceptos pertenecientes a las ciencias sociales no existe una definición universalmente aceptada para el concepto de región. Para poder definirla es común que se conjuguen diversas visiones teóricas para construir una idea interdisciplinaria de la región. Lo cierto es que las regiones no existen realmente; sino que son meros artificios elaborados por los investigadores para estudiar los diversos fenómenos que ocurren en la sociedad y su relación con su entorno y dependen más bien del pensamiento humano.

Sin embargo, se ha generado una visión que se apoya en características homogeneizadoras y que sean fáciles de dimensionar, como por ejemplo la naturaleza. La naturaleza tiene una serie de rasgos que la ligan con la cultura local y le imprimen un carácter de identidad, además de una serie de diversas relaciones de uso en las cuales se puede identificar que la región no sólo es un lugar geográfico, es una forma de clasificar diferente información que se puede analizar mediante métodos y modelos aplicables a un espacio que se puede concebir como abstracto, donde muchas fronteras ya sean materiales, políticas, económicas, culturales, o naturales convergen.

Para propósitos de análisis ambientales, generalmente se considera a la región como una superficie grande y continua dentro de un área definida aún más grande.

Para el caso que nos ocupa, la región puede ser considerada como un sistema regional donde redes complejas compuestas por componentes y procesos como por ejemplo clima, fisiografía, procesos biogeoquímicos, socioeconómicos, y culturales se relacionan entre sí, y que al mirarlos a través de una ventana espacio temporal es necesario ver a los subsistemas sociales y naturales como partes del mismo todo

Cuando se habla de región, generalmente se asocia a una particularidad que puede ser de índole económica, social, histórica, etc., sin embargo para el caso de estudio nuestra región será nuestro sistema en el cual se observan los intercambios de materia energía e información que han hecho posible la restauración del ecosistema.

2.2 El ecosistema

A pesar de que el estudio de la ecología y sus diversas definiciones pugnan por el análisis del sistema y por el pensamiento sistémico, los investigadores y sus trabajos relacionados a los ecosistemas han adoptado una visión orientada hacia los componentes individuales del sistema, muchas veces justificando lo anterior debido a la dificultad tanto económica como de tiempo al realizar trabajos que tomen en cuenta la complejidad de los ecosistemas; por lo cual es necesario contar con herramientas que nos permitan trabajar con los ecosistemas con una perspectiva integradora y que tome en cuenta todos los elementos que se relacionan en ellos, ya sean sus componentes bióticos, abióticos o sociales.

Odum fue un pionero en el desarrollo de una nueva aproximación para el estudio de los sistemas ecológicos o ecosistemas; definió a la ecología de sistemas (Odum 1994) como el estudio de todo un ecosistema midiendo su comportamiento general y estudiando los detalles de cómo ese comportamiento surge de las interacciones entre los componentes del mismo. Como podemos ver, Odum pugnaba por una visión más holística de los ecosistemas.

Como se vio anteriormente, el tratar al ecosistema con una perspectiva de sistema complejo nos ayudará a entender mejor las relaciones que se desarrollan en él, pues a fin de cuentas es el resultado de una serie de flujos de materia energía e información que se llevan a cabo dentro de sus límites, como lo menciona Margalef (1968) cuando define al ecosistema como la ruta material que sigue la energía, la cual entra generalmente en forma de fotones y sale a un sumidero de energía (Margalef, 1968).

Otro autor que propone ver a los ecosistemas bajo estas consideraciones es Adams (1978), el cual menciona que el ecosistema presenta las características de una estructura disipativa; su dimensión última depende del volumen de energía que logra incorporar; tiene una trayectoria vital que, bajo condiciones más o menos constantes, llegará a manifestar un estado estable. Se constituye por una combinación de estructuras en equilibrio y estructuras disipativas.

El término de estructura disipativa se refiere a una estructura que emerge en el proceso de la selección termodinámica. Estructura se refiere a la permanencia y estabilidad, y disipación, al flujo y al cambio. Estructuras de no equilibrio que se mantienen sólo mediante una perseverante disipación de energía (Prigogine, 1967).

Para Prigogine las estructuras disipativas son una manifestación de la autoorganización que opera en una secuencia de tres fases: función-estructura-fluctuación. En una fase (en la de función-estructura) el sistema se comporta de manera determinística, fluctuando alrededor del promedio de los valores de variables implicadas, mientras que en la otra fase una fluctuación se amplifica hasta el punto de cambiar la estructura misma, después de lo cual la fase anterior se reinicia, pero en circunstancias diferentes. La estructura disipativa puede considerarse como una gran fluctuación estabilizada mediante intercambios de materia y energía.

Otra condición básica para la aparición de estructuras disipativas es la presencia de cierto tipo de mecanismos de interacción no lineal que se da entre las partes del sistema. Las estructuras disipativas son "totalidades" cuyas dimensiones y estado estable muestran una relación tamaño/volumen (Prigogine *et al.*, 1977).

La estructura disipativa es una estructura autoorganizada que contiene en sí misma los elementos necesarios para mantenerse durante cierto periodo del tiempo (Adams, 1978). Las estructuras disipativas son agregados complejos que se

mantienen en el régimen de no equilibrio mediante un constante insumo de energía (Adams 1978).

2.3 Espacio ecosistémico

El sistema está compuesto de una organización o configuración relacional entre todos sus elementos, esto quiere decir que identificando los componentes de esa organización es posible establecer los límites de un ecosistema.

El sistema fue estudiado como un sistema ecológico o ecosistema, porque interesaba hacer una síntesis de su funcionamiento, en este sentido las partes no deben ser separadas, y por lo tanto desde el punto de vista funcional del todo, el ecosistema es el nivel de organización biológica más apropiado para la aplicación de las técnicas de análisis de sistemas. Se considera necesario enfatizar que, en el pensamiento holístico y sistémico, el principal fundamento radica en el análisis del todo (sin olvidar las partes), a diferencia de la visión clásica la cual está centrada en las partes (olvidandose el todo).

DeLeo & Levin (1997), citado por Fontúrbel, mencionan que los ecosistemas no son sólo un conjunto de poblaciones, ni éstas un conjunto de individuos, sino que entre ellos existen relaciones inter e intraespecíficas y relaciones con el medio abiótico, que garantizan su funcionamiento (DeLeo & Levin 1997). Un sistema sumamente complejo, por lo que su estudio apropiado no debe reducirse a describir la relaciones entre los elementos que lo conforman. Se hace necesario también, dilucidar la dinámica de su comportamiento y evolución.

Cuando se habla de ecosistemas es necesario tomar en cuenta que el todo es mayor a la suma de las partes, y si se considera al ecosistema como un “superorganismo” o una “macroespecie” la variabilidad podría extrapolarse a la diversidad biológica, y por ello es que DeLeo & Levin (1997) plantean que un ecosistema diverso es más estable.

Los ecosistemas son el producto de cientos o miles de años de evolución conjunta y adaptación, por medio de procesos de sucesión ecológica (Washitani, 2001). Al perderse una o más especies, se interrumpen parcial o totalmente uno o más de los procesos naturales que mantienen el flujo de materia y energía del cual depende el funcionamiento “saludable” (DeLeo & Levin 1997) del ecosistema, ocasionando una perturbación en las redes tróficas y en los mecanismos de control de la diversidad de las comunidades (Achá & Fontúrbel 2003).

Como se mencionó anteriormente, los ecosistemas en su totalidad son más que la suma de sus partes, porque las diferentes relaciones existentes entre ellas tienen un papel fundamental en su funcionamiento. Parece más sencillo concebir al ecosistema como un “superorganismo”, pero esta concepción deja de lado la complejidad, obviando los diferentes gradientes entre los componentes del mismo y de éste con los ecosistemas vecinos, así como la evolución a esa escala (DeLeo & Levin 1997).

El término de ecosistema fue propuesto inicialmente por el ecólogo inglés Arthur Tansley en 1935, haciendo referencia a un complejo de organismos vivos y de factores físicos. Sin embargo, no fue hasta fines del siglo XIX que empezaron a aparecer definiciones más formales.

Rincón (2011) menciona que el término ecosistema abrió el camino para el debate de dos paradigmas en ecología los cuales son el reduccionismo y el holismo. La diferencia entre estas dos posturas radica en que el primero se intenta conocer una realidad a partir del estudio de sus componentes más elementales. Por otro lado, los holistas consideran que el análisis de los componentes no puede explicar toda la realidad; en otras palabras, que el todo es más que la suma de sus partes.

Bajo la lógica anterior, es necesario que al estudiar los ecosistemas se tenga un pensamiento ecológico que tome en cuenta esas relaciones forzosas que se dan entre todos los elementos que lo constituyen.

En Fundamentos de la Ecología, Odum define al ecosistema de la siguiente manera:

«cualquier unidad que incluya a todos los organismos (es decir: la “comunidad”) de una área determinada, que interactúan en reciprocidad con el medio físico de tal forma que un flujo de energía conduzca a estructuras tróficas, a una diversidad biótica y a ciclos de materiales (es decir, un intercambio de materiales entre las partes vivientes y las inertes) claramente definidas dentro del sistema».

Desde la teoría de sistemas es posible definir a estos sistemas ecológicos o ecosistemas como un complejo de elementos vivos y no vivos que interaccionan entre sí y con el entorno, delimitado en un tiempo y un espacio, donde la interacción entre sus componentes resulta más importante que la suma de sus partes.

Los ecosistemas, en sus distintas caracterizaciones, dimensiones y tamaños, han sido establecidos como unidades de estudio. De esta forma, como sistemas delimitados se derivan ciertas generalizaciones en torno a su relevancia.

La primera es que los ecosistemas son los reservorios de la enorme diversidad de especies que se encuentran en el planeta. La diversidad de los ecosistemas puede ser definida como la diversidad genética, la diversidad de las especies, la diversidad de los hábitats y la diversidad de los procesos funcionales que mantienen a estos sistemas complejos. La confluencia de determinada cantidad de especies en los ecosistemas es con la finalidad de mantenerse. Esta confluencia se debe a que dentro del ecosistema es más fácil la sobrevivencia de las especies en interacción, que cada especie por separado, a menos que la especie al salir del ecosistema presente algunas mutaciones que le permitan evolucionar y vivir con éxito en el nuevo ecosistema. Cada especie animal se adapta al ecosistema en el que vive y entre más se extienda una especie hacia los límites de su ecosistema, menos son los sobrevivientes (Moore, 1980:166).

La diversidad de ecosistemas, a su vez, es resultado de la heterogeneidad del medio físico y de los diferentes factores que se conjugan para generar las características particulares de cada ecosistema. Las temperaturas, por ejemplo, tienen un comportamiento correlacionado con la elevación del terreno sobre el nivel del mar. La latitud, altitud y humedad son factores que favorecen el clima y éste a su vez se considera con influencia decisiva en los procesos de formación del suelo y moldeamiento de la topografía y por ende en la distribución de microorganismos

y animales. Así mismo, el patrón de distribución de la vegetación es resultado del clima sobre un relieve de constitución geológica determinada.

La segunda generalización es que un ecosistema con mayor diversidad biológica es más estable. El nuevo paradigma de la conservación de especies a través de la conservación de ecosistemas toma en cuenta la capacidad de resiliencia ambiental. Este paradigma hace referencia a la teoría de sistemas y considera al ecosistema como un “superorganismo” o una “macroespecie”, que cuanto contenga mayor diversidad biológica es más estable.

La tercera generalización indica que los ecosistemas, además de la biodiversidad que mantienen, integran grupos funcionales. Un grupo funcional es un conjunto de especies que poseen atributos (morfológicos, fisiológicos, conductuales, o de historia de vida) que son semejantes y que desempeñan papeles ecológicos equivalentes. Así, cada grupo funcional afecta de manera diferente la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Los grupos funcionales difieren en los distintos tipos de ecosistemas, asimismo, una misma especie puede ser incluida en diferentes grupos. Ejemplo de los grupos funcionales lo constituyen las especies de pinos y encinos que manifiestan una conducta al producir su semilla, que a su vez produce algunos cambios en sus depredadores.

Finalmente, la relevancia de los ecosistemas también radica en los elementos naturales que lo conforman (recursos bióticos y abióticos) así como las interacciones que ocurren entre estos (procesos ecológicos). Estos procesos ecológicos son un factor determinante para el establecimiento de cualquier sociedad humana. Cada grupo cultural aprovecha de manera directa e indirecta la gama de funciones ecológicas presentes en su entorno natural (Scott et al., 1998).

Las sociedades dependen de los servicios aportados por los ecosistemas y que son básicos para el desarrollo de las sociedades humanas.

Entre las propiedades de un ecosistema se encuentran:

- Autoorganización
- Emergencia

- Complejidad
- Autopoiesis

2.4 La clausura operativa: los límites del ecosistema

Para poder entender cómo es que funciona el ecosistema es necesario reunir la información necesaria para definir los límites del sistema, sus componentes, influencias externas y procesos.

Siguiendo la lógica que se ha manejado a lo largo de este trabajo y de definiciones anteriores, es posible estudiar al ecosistema como un sistema complejo; por lo tanto, la escala a manejar podría ser tan grande como la misma biosfera, sin embargo, esta aproximación sería imposible de manejar a un nivel analítico. Lo anterior nos obliga a considerar una escala analítica que reduzca lo estudiado a niveles operables, siendo necesario contar con una escala que no exceda la capacidad de asimilación de nuestro sistema.

El concepto que nos ayudará a realizar esto es lo que Maturana y Varela denominan “Clausura Operativa”, un concepto que se utiliza en el contexto de la teoría de sistemas. Según Humberto Maturana y Francisco Varela, un sistema está cerrado operativamente cuando sus operadores no reciben instrucciones de su entorno, sino que están determinados por su propia estructura y organización (Maturana y Varela, 1980).

Por lo anterior podemos establecer que si queremos entender cómo es que funciona nuestro sistema tenemos que considerar a todos aquellos elementos que permiten al mismo auto mantenerse.

Como característica, un sistema autopoietico tiene límites autodefinidos. La autopoiesis es una teoría que sugiere que los sistemas vivos poseen la capacidad de autoproducirse, automantenerse y autorenovarse. Esta capacidad requiere la regulación de su composición y la conservación de sus límites; es decir, el mantenimiento de una forma particular a pesar de la entrada y salida de materiales,

en este último punto es importante mencionar que un ecosistema tiene la capacidad de mantener una estabilidad estructural a pesar de no estar en equilibrio.

El concepto de autopoiesis identifica un tipo de organización o sistema cuyos componentes están dinámicamente relacionados en una red continua de interacciones de tal manera que se producen en ella, establecen los límites dentro de los cuales se dan esas interacciones y, en un mismo y unitario proceso, se distinguen, constituyéndose así como unidades autónomas que especifican un dominio de existencia y a la vez son específicas de éste (Maturana y Varela, 1984).

Lo central en un sistema de este tipo es que su identidad proviene de un espacio clausurado de transformaciones, donde lo que les ocurre se determina internamente y donde todas sus operaciones se subordinan a la conservación de su organización, aunque experimenten cambios para compensar perturbaciones (Maturana y Varela, 1995).

El mero hecho de que las operaciones se conecten entre sí produciendo una continuidad en el operar, tiene como consecuencia el surgimiento de una diferencia entre el sistema y el entorno. Las operaciones que pueden conectarse entre sí conforman el sistema. Aquello que queda excluido pasa a ser el entorno del sistema. Dicho de otro modo, las operaciones condensan una diferencia entre el sistema y el entorno. Producen una forma que tiene dos lados: un lado interior que es el sistema y un lado exterior que es el entorno. Si no se llega a esa separación entre sistema y entorno, la forma que es el sistema no puede surgir. Lo central en un sistema autopoietico es que se diferencia de un entorno por su modo específico de organización; esto indica que su identidad emerge de su red de procesos dinámicos en un espacio clausurado de transformaciones. Si se toma esto como punto de partida, se vuelve inevitable el concepto de clausura operacional. En efecto, si se pregunta cómo un sistema produce su propia unidad, cabe una sola respuesta: en virtud de sus propias operaciones.

Los sistemas autopoéticos (autopoiesis) a menudo se denominan sistemas cerrados operativamente. Según Niklas Luhmann el cierre operacional de cualquier sistema es necesario para operar por su cuenta. Se puede entender como un acto de establecer "límites" durante el proceso de autopoiesis

Todos los sistemas autopoéticos se caracterizan por la clausura operativa. Con este concepto se indica el hecho de que las operaciones que llevan a la producción de elementos nuevos de un sistema dependen de las operaciones anteriores del mismo sistema y constituyen el presupuesto para las operaciones ulteriores: esta clausura constituye la base de la autonomía del sistema en cuestión y permite distinguirlo de su entorno (...)

Un sistema autopoético es operacionalmente cerrado y determinado estructuralmente. Característica definitoria de los seres vivos. Todos los procesos de los sistemas autopoéticos son producidos por el propio sistema. En este sentido, se puede decir que los sistemas autopoéticos están cerrados operativamente: no hay operaciones que entren al sistema desde el exterior ni viceversa. Se considera operativamente cerrado porque las reacciones de auto mantenimiento se llevan a cabo únicamente en el interior del sistema

Los sistemas autopoéticos están delimitados por un material dinámico creado por el propio sistema. Sin embargo, los sistemas autopoéticos son abiertos a la interacción, el cierre operativo de un sistema no implica que este sea completamente cerrado. Los sistemas autopoéticos son sistemas abiertos a la interacción; es decir, todos los sistemas autopoéticos tienen contacto con su entorno: las células vivas dependen de un intercambio constante de energía y materia necesaria para su existencia. No obstante, la interacción con el medio ambiente está regulada por el sistema autopoético. Es el sistema el que determina cuándo, qué y a través de qué canales se intercambia la energía o la materia con el medio ambiente.

Aunque todo lo que le ocurre a un sistema vivo depende exclusivamente de lo que experimenta en su clausura operacional y determinismo estructural, esto no significa que operen en la nada, siempre requieren de algún tipo de disponibilidades que no pueden auto-garantizar y de las cuales dependen para su existencia. Por ejemplo, temperaturas o fuentes energéticas.

2.5 Flecha del tiempo

Término acuñado por Eddington en 1925 para indicar la dirección irreversible de los procesos energéticos debida al aumento de entropía exigido por la segunda ley de la termodinámica.

La flecha del tiempo apunta hacia el equilibrio termodinámico, pero el proceso no necesariamente es un descenso inmediato hacia el desorden, sino mediante "retardos" escalonados.

2.6 Mecanismos detonadores (trigger mechanism)

Este término se refiere a mecanismos de liberación/ inhibición de energía. Principio elemental del dispositivo regulador mediante el cual se realiza el proceso de conversión energética, el trabajo. Opera *"cuando la energía de un sistema se aplica en el ambiente del otro, de modo que el otro se vea obligado a buscar un nuevo estado de equilibrio"* (Adams, 1983:138).

Se habla de "mecanismo" porque siempre hay "algún grado de *regularidad* en el factor de conversión" (Lotka, 1925:194); esto es, hay una proporción entre la cantidad de energía liberada y la cantidad de energía utilizada para accionar el mecanismo, que en el ámbito de la economía humana es la que indica el costo de producción.

Las variaciones que experimentan los sistemas de propiedades complejas pueden llegar a situaciones en que no sean predecibles y que muy pequeñas variaciones en las condiciones iniciales provoquen grandes cambios irregulares, no periódicos, en las propiedades

2.7 El ecosistema como un sistema autopoietico

Los sistemas autopoieticos generan sus propios procesos de producción de componentes y relaciones entre ellos a través de continuas interacciones y transformaciones, constituyéndose de esta manera como unidad en un espacio físico determinado.

Los sistemas autopoieticos –de acuerdo con Maturana y Varela- se producen a sí mismos, se levantan por sus propios medios, constituyéndose como algo diferente a su medio por su propia dinámica, crean desde sí mismo su propia estructura y los elementos que lo componen.

Estos sistemas son red de producciones de componentes cerrados en sí mismo porque estos mismos componentes generan las propias dinámicas de producciones que los produce. Pero este dominio cerrado de relaciones especificado lo es solamente con respecto a la organización que ellos componen. No lo es en el sentido de que es autorreferencial. La autopoiesis surge en un sistema cuando esta organización tiene como característica la posibilidad de cierta interacción, porque es en esa interacción donde se producen las relaciones que energizan el sistema.

El origen de un sistema autopoietico está definido por las condiciones que deben cumplirse para la localización del espacio autopoietico, es decir, qué relaciones deben satisfacer los elementos u órganos para generar una unidad de esas características en dicho espacio.

La unidad del sistema autopoietico, entonces, está determinada porque las relaciones de producción tienen una forma de concatenarse de tal manera –señalan Maturana y Varela- produciendo los suficientes elementos para hacer del sistema una unidad que genera permanentemente su carácter unitario. No son los

componentes los que definen la autopoiesis de un sistema, sino las relaciones de éstos, los procesos en que entran. Estos procesos concatenados no sólo producen los componentes que constituyen un sistema de esas características, sino que lo especifican además como una determinada unidad.

Los sistemas autopoieticos poseen también relaciones de especificidad, las cuales determinan que los componentes producidos sean justamente aquellos componentes definidos por su participación en la autopoiesis, es decir aquellos que definen al sistema como autopoietico. Estas relaciones determinan la identidad (propiedad) de los componentes de una organización, y por ello, su factibilidad material. Por último, en los sistemas autopoieticos existen las relaciones de orden que determinan las concatenaciones de los componentes, estableciendo los procesos que aseguran que la organización sea autopoietica. Estas relaciones determinan la dinámica de la organización, permitiendo la realización efectiva, la materialización tanto de las relaciones constitutivas, de especificidad, así como las de orden.

La autopoiesis es un dominio cerrado de relaciones específicas, sólo un sistema de estas características, clausurado en sí mismo podrá constituirse como un conjunto de operaciones específicas, como un proceso de constitución de su propia identidad entendida como cualidad unitaria, un tipo de coherencia emergente, un tipo de organización. Pero no lo es en el sentido que queda encerrado en sí mismo sin reaccionar a lo externo, encapsulada. No es el cierre operacional en el sentido de encierro o aislamiento de la interacción con respecto a su entorno. Sino que por el contrario, este cierre es condición de la apertura del sistema, para que desarrolle su propio dominio de interacciones.

El sistema debe diferenciarse de su entorno, pero al mismo tiempo debe mantenerse vinculado a él, porque emerge desde él pero se debe a sí mismo. Entre sistema y entorno hay un límite y éste mantiene el sistema, porque la diferencia es la premisa fundamental del sentido autorrefencial de un sistema autopoietico.

Los sistemas autopoieticos tienen existencia topológica en el espacio físico donde existen como unidades interactuando. Este tipo de organización se transforma en

una unidad topológica cuando se materializa en un sistema autopoietico concreto. Estas relaciones que constituyen la topología de una unidad se denominan relaciones constitutivas de los sistemas autopoieticos y determinan sus límites físicos.

Si bien es cierto que abordar el ecosistema como un sistema autopoietico permite responder a la pregunta de cómo es que éste alcanza el punto en que puede trabajar por sí solo, al analizar el sistema como producto de su autoorganización surge el problema de establecer en donde se encuentran los límites del ecosistema o qué nivel del sistema es el todo. Para poder responder a esa pregunta es necesario considerar cómo surge un sistema

Para Maturana y Varela (1974) un sistema surge cuando un conjunto de elementos comienza a conservar una dinámica de interacciones y de relaciones, dando origen a un “clivaje” operacional que separa a un subconjunto (sistema) de otros elementos (entorno).

2.8 Estructura disipativa

Otro concepto que nos ayuda a poder establecer los límites del ecosistema es el de estructura disipativa. Los ecosistemas, al igual que una célula, una planta, un ser humano o una sociedad humana, son estructuras disipativas. Como cualquier otro sistema abierto, se encuentran en un intercambio constante de materia, energía e información con el entorno. Son sistemas que mantienen un orden a partir de fluctuaciones en su interior, que se producen como respuesta a las perturbaciones del entorno, esto es, mantienen un orden a partir del desorden Kay (1984).

A partir de la definición de ecosistema actuando como proceso disipativo propuesta por Kay (1984), de la anotación de Duval sobre la integración de la naturaleza y sociedad (2008), y de conocer los aspectos que caracterizan a una estructura disipativa, se llevó a cabo el reconocimiento de un ecosistema forestal como un sistema disipativo, identificando sus procesos principales.

Los sistemas son dinámicos, pero ellos también mantienen cierto orden con respecto al número de sus características esenciales. Esta constancia es esencial para permitirnos delimitar los límites del ecosistema.

Una estructura disipativa es un orden visible en una macroescala que puede intercambiar energía con el mundo exterior. En particular, si el sistema está lejos del estado de equilibrio, esto puede suceder. En condiciones muy diferentes de las de equilibrio, pueden ocurrir diversos tipos de procesos de autoorganización. La desventaja de tener una aproximación de este tipo es que ofrece pocas pistas sobre cuál de los infinitos arreglos jerárquicos posibles se deben elegir para los propósitos de análisis, comprensión y manejo.

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Objetivos

- Determinar el costo energético de la estrategia empleada para la recuperación del suelo con vocación forestal realizada en el área de estudio, aplicando la perspectiva de la Teoría de los Sistemas Alejados del Equilibrio y el método de medición de la energía; para comprender el proceso de recuperación de dicho ecosistema.
- Identificar los elementos sistémicos naturales y antrópicos que intervienen en el proceso de restauración del suelo en el área de estudio.
- Establecer la diferencia entre los insumos incorporados en dos zonas de trabajo, una donde aparentemente se han reestablecido las relaciones que han permitido al ecosistema trabajar por sí solo y otra donde los insumos aún son suministrados.
- Establecer el momento sistémico, identificando cuáles son las condiciones sistémicas que aseguran la autopoiesis del ecosistema, siendo posible retirar los ingresos antrópicos al mismo y que el ecosistema funcione por sí solo.

Para poder analizar lo anterior y cumplir con los objetivos, la investigación se abordó desde el pensamiento complejo, el cual brinda un conjunto de herramientas que nos permitieron estudiar los ecosistemas a partir de una visión diferente y más apegada a la realidad y no desde la perspectiva tradicional de la ciencia clásica.

Una metodología que nos permite aplicar el pensamiento complejo en el análisis del ecosistema es la Síntesis Emergética, metodología propuesta por Odum. La razón de abordar nuestro problema con esta metodología fue debido a que el ecosistema es un sistema complejo en el cual ocurren procesos de autoorganización, y por lo tanto su análisis debe ser abordado desde una perspectiva integradora; esto es posible con la Síntesis Emergética, un método de valoración de los servicios de los ecosistemas con bases termodinámicas, el cual permitió tener una visión general del ecosistema. La metodología se basa en la conversión a unidades comunes de los flujos de energía, masa y dinero utilizados en un sistema socio-ecológico con el objetivo de estudiar la organización de sistemas termodinámicamente abiertos, es

decir, que intercambian materia y energía con su ambiente; a través del uso de una perspectiva sistémica y energética. Uno de los principales objetivos de su aplicación es la caracterización de las principales fuentes de energía externas al sistema y que dirigen su evolución.

3.2 Localización y Descripción del Área de Estudio

El área de estudio se ubica en el noreste del Estado de Tlaxcala, específicamente en el municipio de Tlaxco; el cual se sitúa en gran parte de la cuenca alta del Río Zahuapan; una de las fuentes más importantes para la recarga del manto freático de la región. (INEGI 1999). En la figura 1 podemos ver marcada dentro de un círculo el área exacta en donde se encuentra el área bajo estudio.

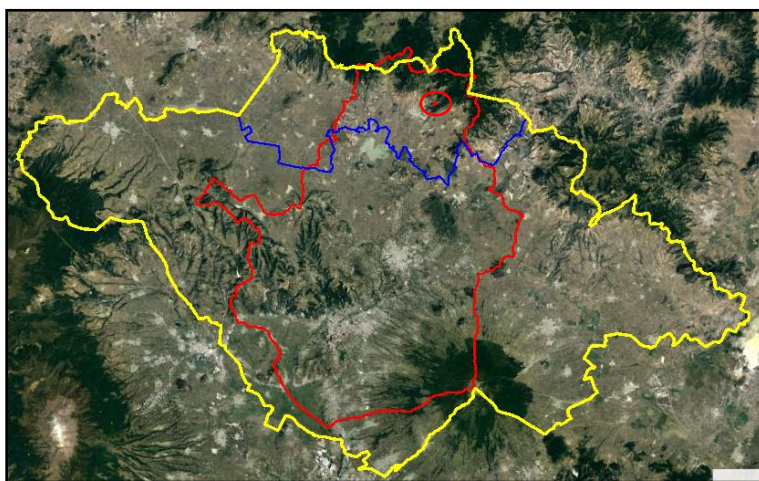


Figura 1. El municipio de Tlaxco en azul dentro del estado de Tlaxcala, el polígono rojo es el límite de la cuenca del río Zahuapan. Fuente: elaboración propia.

La Cuenca Alta del Río Zahuapan ofrece significativos beneficios para sus habitantes, ya que constituyen una de las principales fuentes de recarga hidrológica y de generación de recursos hídricos de la región (Caballero, 2010). El municipio está conformado por cuatro subcuencas: la cuenca del río Zahuapan (44%), la del lago Tochac y Tecocomulco (39%), la del río Apulco (11%) y la cuenca del río Laxaxalpan (6%). A su vez, resguarda el nacimiento del Balsas, el tercer río en

importancia entre los sistemas hidrológicos del país y principal afluente del Estado de Tlaxcala (González Villarreal, 2011).

A lo anterior también debemos agregar que en el municipio las zonas forestales representan un elemento importante, ya que son una fuente significativa de recursos y servicios ambientales como madera, medicamentos, alimentos, agua, aire limpio, trabajo; los cuales conservan la biodiversidad y estabilizan el medio ambiente.

No obstante, a consecuencia de la deforestación y del cambio de uso de suelo, (prácticas que se remontan a la colonización), se han presentado graves problemas de erosión y por consiguiente, una serie de problemas ambientales como la disminución de la cobertura vegetal, un aumento en la escorrentía y la disminución de la recarga hídrica; problemas que han dado como resultado la alteración de los ciclos naturales de la flora, la fauna, el paisaje y la desestabilización del ciclo hidrológico de la región.

Lo anterior sumado a otros problemas ha ocasionado que Tlaxcala ocupe el primer lugar en toda la república mexicana en lo que respecta a deterioro ambiental, principalmente en la pérdida de zonas boscosas, contaminación y erosión de suelos, esto según el Consejo Estatal de Población (COESPO), presentado en su programa estatal 2011-2016.

La elección de esta área se debió a que la naturaleza forestal de la cuenca alta del Río Zahuapan permite contar con un contexto particular para el estudio de la región, en la cual se pueden evidenciar daños causados por la deforestación, la erosión, y la extracción de recursos maderables. Pues como se dijo anteriormente, el municipio de Tlaxco se enfrenta a una fuerte presión dada la inapropiada gestión de sus recursos como la sobreexplotación de la madera, así como el incremento de espacios para la producción agropecuaria (Caballero, 2010). Esto ha generado un proceso de deforestación y degradación ambiental que pone en riesgo la producción hídrica de la región (Muñoz Fernández, 2010). Según cifras del Colegio de Tlaxcala la tasa de deforestación estatal es de 1% anual, lo que supera al promedio nacional que es de 0.6% (El Colegio de Tlaxcala AC, 2010).

La investigación realizada para la elaboración de la presente tesis se realizó en el municipio de Tlaxco, ubicado al norte del estado de Tlaxcala. La razón para llevar a cabo el estudio en esa parte fue a que se trata de una zona en que se lleva a cabo un proyecto de restauración del suelo en una área en donde las relaciones sistémicas entre el medio físico y los organismos vivos habían desaparecido por completo, lo que trajo como consecuencia la desaparición del suelo y por consiguiente la de todo el ecosistema que antiguamente constituía un suelo de vocación forestal.

3.3 Selección del sitio

En lo que respecta al sitio en donde se estableció el área de estudio, se trata de un área que por muchos años se vio afectada por la erosión del suelo, producto de la deforestación y cambio de uso de suelo, actividades que se remontan a la época de la colonia, cuando los españoles extrajeron grandes cantidades de madera del nuevo mundo, intentando hacer frente a la escasez regional de madera que se presentaba en la península ibérica en donde la madera representaba un recurso crucial para la minería, la construcción de barcos y edificaciones.

Aunado a lo anterior, en esta área también se tiene registro de que al cambiar el uso de suelo e introducir el arado para la agricultura y, posteriormente, ganado, se exacerbó el problema de la erosión en las regiones que los pobladores aprovechaban. Este patrón de cambio de uso de suelo aunado a la falta de control en relación con las restricciones de su uso, el mal manejo de las actividades agropecuarias y silvícolas; la tala inmoderada y el crecimiento urbano no planificado se ha venido repitiendo con el paso de los años; provocando que el Estado de Tlaxcala sea una de las entidades más erosionadas del país.

En todo el estado, más del 97% de la superficie presenta diversos grados de erosión debido al manejo inadecuado de los suelos (Alvarado, 2000). Particularmente, en el

municipio de Tlaxco se observan áreas con riesgo a procesos de erosión intensos, lo cual altera el clima, la vegetación, la retención del agua, el aire y la calidad del suelo (Guerra y Buendía, 2010). A su vez, ocasiona la acumulación de sedimentos en ríos, lagos o presas lo cual contamina y deteriora la calidad del agua (Alvarado, 2007).

La deforestación y degradación de suelos forestales, trae como consecuencia la erosión y sedimentación en lagos, lagunas y ríos, disminución en la captación de agua y recarga de acuíferos, inundaciones, reducción del potencial productivo por la pérdida paulatina de la fertilidad de suelos y los impactos negativos a la biodiversidad, impactando también en la pobreza y migración de la población rural.

El suelo es un recurso natural no renovable por lo complejo y costoso que resulta recuperarlo o mejorar sus propiedades después de haber sido erosionado o deteriorado física o químicamente. La falta de atención y regulación de su uso se refleja, en los altos niveles de degradación y las repercusiones sociales, económicas y ambientales.

3.4 La restauración del área

Como resultado de extracción de madera, las prácticas agrícolas y la introducción del ganado en esta área en específico conocida como “El Pardo”, gran parte de las zonas que anteriormente se consideraban de vocación forestal se encuentran con diversos grados de erosión de acuerdo con su ubicación; siendo la parte alta o de cerro en donde se concentra la erosión severa. A continuación, se puede apreciar el paisaje característico de la zona figura 2.



Figura 2. Paisaje característico de erosión severa en la zona.

Debido a lo anterior, en todo el Municipio de Tlaxco se han realizado diversas acciones para mejorar las condiciones de conservación, restauración y producción de las áreas forestales. En particular una de ellas corresponde a la restauración del sitio conocido como “El Pardo”, en donde se tiene registro que desde los años 50 el señor Carlos Caballero Zamora desarrolló un trabajo pionero en restauración de suelos y manejo sustentable del bosque. Dando como resultado 50 hectáreas deforestadas y erosionadas convertidas en bosque después de 40 años figura 3.

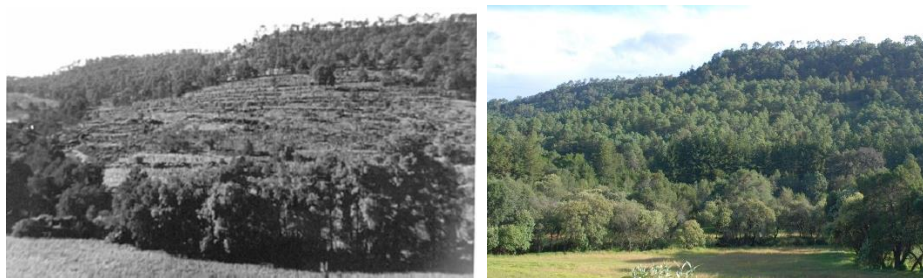


Figura 3. Evidencia de los cambios ocurridos en un paraje cercano a la zona de estudio.

Sin embargo, en nuestra área de estudio figura 4, debido a su ubicación y a las condiciones climáticas particulares esta sufrió de un impacto más severo, haciendo

necesarias acciones que involucrasen mayor complejidad; de igual forma se tiene registro que desde el año 2000 se inició probando diversos métodos para promover la regeneración del suelo en esta área en específico. En la figura 4 se aprecia la ubicación del área bajo estudio marcada con un polígono de color rojo.

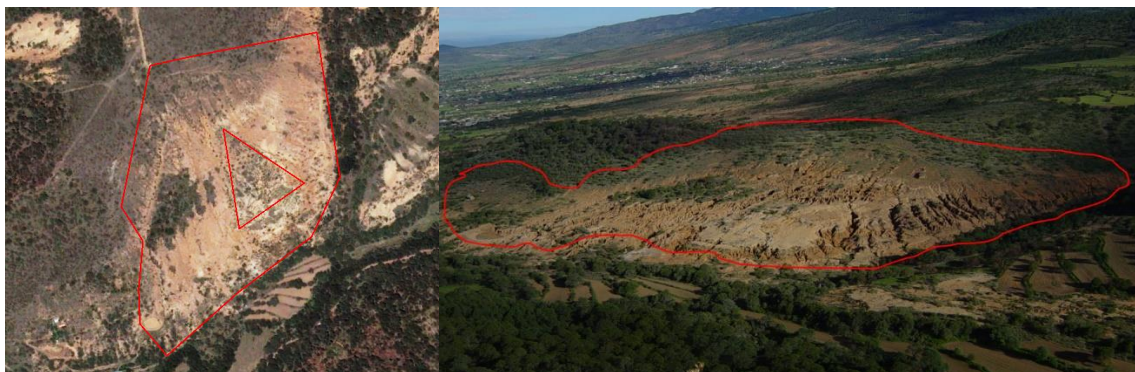


Figura 4. El sitio en donde se ha llevado a cabo la restauración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.

Entre las acciones llevadas a cabo en el lugar para promover la restauración del suelo se encuentran: el trazo de curvas de nivel figura 5, zanjas de infiltración figura 6, fracturación de capa superficial figura 7, colocación de barreras de pacas de paca a nivel en barrancas y zonas de escorrentía figura 8. Otra importante práctica que se lleva a cabo es la incorporación de materia orgánica en el lugar donde se busca el establecimiento de vegetación figura 9. Entre las practicas más recientes se encuentra la implementación de la técnica conocida en el sitio como “sándwich”, la cual consiste en colocar material fracturado de tepetate en las zanjas donde se pretende parar la escorrentía, seguido de una capa de paca de paja y materia orgánica y, por último, otra capa de material fracturado o tepetate figura 10 y 11.



Figura 5. Trazo de curvas de nivel. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.



Figura 6. Zanjas de infiltración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.



Figura 7. Fracturación de capa superficial. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.



Figura 8. Colocación de barreras de pacas de paca a nivel en barrancas y zonas de escorrentía. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.



Figura 9. Incorporación de materia orgánica. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.



Figura 10. Técnica conocida como “sándwich”. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.



Figura 11. Técnica conocida como “sándwich”. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.

Como podemos observar, todas estas prácticas involucraron la incorporación de fuentes externas de materia y energía al ecosistema con la finalidad de crear depósitos o almacenamientos de energía y con ello evitar su rápida disipación.

Esas acciones llevadas a cabo desde el año 2000 parecen haber funcionado, como evidencia se cuenta con un gran archivo fotográfico de la recuperación de la zona. Por ejemplo, en las figuras 12 y 13 se muestra el antes y el después de la misma área al incorporar estos flujos de materia y energía.



Figura 12. Área sometida a trabajos de restauración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.



Figura 13. Área sometida a trabajos de restauración. Fuente: Archivo encargados del Rancho San Isidro.

Como resultado de esos flujos de materia, energía e información que se intercambiaron dentro del sistema, se han podido recuperar las propiedades ecosistémicas del área restaurada. Dichas acciones han funcionado a tal grado que en algunas zonas el ingreso de recursos antrópicos se ha eliminado, dejando que el ecosistema trabaje por sí solo y se constituyan procesos de autoproducción y autoorganización; lo que ha dado lugar al establecimiento de vegetación, infiltración de agua, y el avistamiento de algunas especies animales.

Sin embargo, para poder entender cómo es que esta restauración ocurrió es necesario contar con criterios que nos permitan entender bajo qué condiciones del sistema ocurre la autoorganización del mismo, por lo que se hace necesaria una metodología que nos permita primeramente tener una visión general de todos los elementos que intervienen en él y posteriormente hacer mediciones de estos con el objetivo de encontrar bajo qué condiciones es posible que ocurra la auto producción del ecosistema y que se pueda mantener por sí solo.

El método emergético usa la base termodinámica de todas las formas de energía, recursos y servicios humanos, y los convierte en equivalentes de una forma de energía: la emergía solar. La Emergía es definida como la energía útil de un determinado tipo que se ha usado directa o indirectamente en las transformaciones necesarias para generar un producto o servicio (Odum, 1994).

Con la síntesis emergética es posible medir la calidad de las diferentes formas de energía como: luz del sol, agua, combustibles fósiles y minerales.

3.5 Metodología

La investigación se orientó a evaluar la dinámica de la recuperación del suelo en términos de cómo se desarrollan en esa área los procesos para la restauración de los procesos ecosistémicos de dicho recurso; y por lo tanto el aseguramiento de la recuperación de su vocación forestal a partir de los costos energéticos que implicaron dichas prácticas de recuperación.

Para poder medir estos resultados y para satisfacer los objetivos de este trabajo fue necesaria una aproximación que pudiera relacionar los flujos de energía que interaccionan en el sistema; es decir, los flujos del ambiente natural y los flujos del sistema socioeconómico, por lo cual se consideró adecuado abordar su análisis desde una perspectiva integradora. Lo anterior fue posible al utilizar la metodología de la Síntesis Emergética, la cual permite la valoración de los servicios de los ecosistemas con bases termodinámicas (Lomas *et al.*, 2007). La metodología mide los flujos de materia, energía e información pudiendo cuantificar estos valores dentro de un marco de referencia que integra todos esos flujos permitiendo hacer comparaciones entre ellos.

Fue el ecologista Howard T. Odum quien introdujo el concepto de Emergía a partir de sus trabajos de ecología y energética de sistemas. Odum observaba que en procesos de autoorganización de sistemas complejos como lo es un ecosistema, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, a medida que en el sistema la energía pasa al siguiente nivel jerárquico es menor en cada escalón, pero la energía necesaria para la construcción de niveles más altos de la autoorganización es cada vez mayor a medida que aumenta la complejidad del sistema. En otras palabras, la energía se concentra conforme se avanza en niveles de auto-organización y complejidad. (Lomas *et al.*, 2007).

Odum, (1996) menciona que la metodología de la síntesis emergética consiste en describir, medir y convertir en unidades comunes la circulación de los flujos de materia y energía que atraviesan el sistema socio-ecológico (entradas y salidas que circulan en el sistema analizado) convirtiendo la energía que proviene de diferentes fuentes a una única unidad; pudiendo medir el trabajo requerido previamente, tanto de la naturaleza como de los humanos para la generación de productos y servicios. Las bases teóricas y conceptuales para la metodología de la Emergía se fundamentan en la termodinámica, la teoría general de sistemas y la ecología de sistemas. Esta metodología es una perspectiva integradora la cual permite la valoración de los servicios de los ecosistemas con bases termodinámicas (Lomas *et al.*, 2007).

Su objetivo es estudiar la organización de sistemas termodinámicamente abiertos, es decir, que intercambian materia y energía con su ambiente (Franzese et al., 2003), a través del uso de una perspectiva sistémica y energética teniendo como objetivo la comprensión del funcionamiento del ecosistema a través de índices de desempeño.

Lomas et al., 2007 menciona algunos de los principales elementos de su aplicación entre los cuales se encuentran: la caracterización de las principales fuentes de energía externas al sistema y que dirigen su evolución; la estimación de la contribución de los servicios de los ecosistemas al sistema socioeconómico, como capital natural; la estimación del trabajo de la ecosfera en la dinámica global de los sistemas antrópicos; la realización de una contabilidad ambiental económico-ecológica integrada sobre bases termodinámicas, con el objetivo de servir a la toma de decisiones políticas y el cálculo de indicadores termodinámicos de rendimiento, impacto y sostenibilidad, entre otros (Lomas et al., 2007).

A fin de comprender adecuadamente la propuesta de la Síntesis Emergética, se hace necesario recurrir a dos conceptos: energía y transformidad, los cuales Odum ejemplifica a través de la generación de un tronco forestal. La riqueza real de un producto, como por ejemplo el tronco de un árbol, contiene energía disponible conocida como energía potencial, la cual puede realizar un trabajo. Al quemar el tronco, esa energía puede ser liberada y degradada en calor. La energía disponible puede así ser medida en calorías. La caloría fue originalmente definida como la cantidad de calor necesaria para elevar un grado Celsius (1°C) la temperatura de un gramo de agua destilada a la presión atmosférica normal.

En contraste, la Emergía es una medida de la energía disponible que ya ha sido utilizada (degradada durante las transformaciones) para hacer el tronco. La Emergía es un registro de la energía disponible que se utilizó anteriormente, es por ello que también se refieren a esta como “Memoria Emergética”. David Scienceman (1987)

fue quien sugirió a Odum el nombre de Emergía, quien la definió como la cantidad de energía útil (exergía) poco concentrada, necesaria para generar una cantidad de energía más concentrada (Odum, 1996).

Con la Emergía, bienes, servicios y trabajo ambiental de diferentes tipos, son puestos en una base común; esta base común sería la energía solar. La razón de elegir la energía solar como referencia es debido a que esta es la principal entrada de energía poco concentrada a la ecosfera. Así, la Emergía solar sería la cantidad de energía de calidad igual a la del sol que se necesitaría para generar un determinado producto. Por tanto, las unidades de la Emergía serían los julios equivalentes solares (seJ). Cabe mencionar que no se trata de energía de origen solar, sino de una cantidad de energía (cualquiera que sea su origen) con calidad referida a la de la energía solar.

Para poder transformar las diferentes calidades de energía o materia a la calidad de energía solar correspondiente (o Emergía), se usa un factor de equivalencia, la transformicidad o la energía específica, respectivamente, que informan sobre la cantidad de energía, con calidad equivalente a la solar, es necesaria para generar una unidad de energía o materia de mayor calidad (Odum, 1988). Por tanto, la transformicidad tendrá unidades de seJ/unidad de energía, y la energía específica de seJ/unidad de masa.

Con la finalidad de poder hacer comparaciones entre el sistema restaurado y uno en el cual los procesos de deterioro y disipación de la energía aún continúan; se establecieron dos áreas de estudio: el ecosistema restaurado y una zona adyacente a éste, la cual no ha tenido manejo de ningún tipo. Estos fueron los sistemas analizados y los flujos estudiados fueron los ingresos (inputs) de los servicios de la naturaleza y aquellos externos que hicieron posible la restauración. Por otra parte, las salidas (outputs) del sistema se consideraron como los servicios ecosistémicos que el área restaurada presta al ambiente, así como también las pérdidas de calor.

3.6 Método de la síntesis emergética

Los siguientes puntos son las principales fases que caracterizan la Síntesis Emergética resumidas por Brown y Ulgiati (2004) basándose en los trabajos de Odum (1996), mismas que fueron las que se siguieron en este trabajo:

1. Definición de los límites espacio-temporales del sistema investigado. Posiblemente todo en el universo esté conectado entre sí directa o indirectamente. Sin embargo, representar todo el universo en un diagrama que muestre todas las interacciones que ocurren en él no sería posible. Por lo tanto, es necesario concentrar la atención en una “ventana”, en una determinada escala de tiempo y espacio (Odum, 1996).

El análisis emergético se puede utilizar para evaluar sistemas ambientales en cualquier escala de la organización (Odum 1996).

Un análisis efectivo depende del grado en que se entienda el sistema a analizar. Por esta razón, un estudio exhaustivo del sistema que se analizará es un requisito previo para un análisis exitoso.

Para obtener los datos utilizados en el análisis es necesario realizar trabajo de campo entrevistando a los propietarios y trabajadores del área, los cuales brindaran la información con la finalidad de conocer en detalle los flujos del sistema. En los casos en que ciertos datos no sean provistos, es necesario buscarlos en bibliografía adecuada.

Esta investigación se realizó a escala local, por lo tanto, se hizo trabajo de campo entrevistando a los responsables de la restauración, así como a los propietarios del sitio, lo anterior se realizó con la finalidad de conocer en detalle los flujos del sistema y establecer cuales fueron todas las entradas o inputs al sistema que fueron necesarios para que se llevara a cabo la restauración, como por ejemplo

combustibles, insumos, trabajo, etc. En los casos en que ciertos datos no eran provistos se buscó en bibliografía aquellas investigaciones con un modelo similar.

Los sistemas ambientales incluyen la infraestructura económica y social y las actividades realizadas por el hombre, así como los almacenes, flujos y procesos de los ecosistemas. El conocimiento adquirido a través de esta revisión se captura en la historia narrativa del sistema. La historia narrativa es un vehículo para comprender cómo los recursos renovables y no renovables han dado forma al sistema actual. Establecer la historia ayuda a trazar caminos causales desde el pasado hasta el presente y establece el contexto histórico de las relaciones cambiantes.

El conocimiento adquirido a través de esta revisión sirve como base para crear un diagrama detallado de los sistemas de energía, lo cual se explica en el paso siguiente.

2. Modelado del sistema. Los ecosistemas se autoorganizan y autorregulan, poseen una organización jerárquica y son termodinámicamente abiertos (Campbell, et al., 2005; Pulselli, et al, 2011, Brown, et al., 2001). Esto significa que intercambian materia y energía con su entorno, lo cual se refleja en una gran cantidad de flujos que circulan continuamente dentro y a través del sistema. De esta variedad de flujos se eligen aquellos que resulten relevantes para el análisis y los objetivos planteados, y pueden representarse esquemáticamente por medio de un diagrama de flujos, utilizando el lenguaje sistémico desarrollado por Odum (1986, 1988, 1996, 2000).

Como se ha comentado, la Ecología de Sistemas (Odum, 1994) es una aplicación de la Teoría General de Sistemas a los sistemas ecológicos y considera que éstos pueden subdividirse en diversos componentes conectados entre sí por flujos de energía. Bajo este concepto, un paso fundamental es la elaboración de modelos conceptuales sobre los sistemas estudiados, estableciendo sus componentes y los flujos entre ellos. Para llevar a cabo este paso, se emplea un lenguaje propio,

denominado lenguaje energético, con toda una serie de símbolos para los distintos componentes de un sistema. Mediante estos símbolos se construyen los denominados diagramas de flujo.

La confección de un diagrama es un paso previo indispensable para la metodología emergética y es muy importante definir los límites del sistema, ya que de esta manera se establece qué entra y qué sale del mismo, además de las circulaciones internas.

Construir el diagrama del sistema servirá como un medio para organizar el pensamiento y las relaciones entre los componentes y las vías de intercambio y flujo de recursos. Consiste en la representación, a través de diagramas de flujos de materia y energía, utilizando la simbología energética (Odum, 1994), de la interacción entre las fuentes externas e internas del sistema, y los sistemas productivos naturales y antrópicos, así como los flujos de salida del sistema y la retroalimentación del mismo.

La evaluación comienza con el Diagrama del Sistema energético que interesa en donde se busca obtener una visión general del sistema, sus partes y sus procesos y con ello poder entender, evaluar y simular. En el diagrama se identifican los recursos y los flujos que serán evaluados. El diagrama es como un inventario en el que se definen los límites del sistema y además, se incluye lo que entra y sale del mismo. Los diagramas de flujos muestran las interacciones del sistema pudiendo generar hipótesis sobre qué pasaría si es que aumentan o disminuyen los recursos que ingresan al ecosistema, ya sean naturales o introducidos por el hombre. Los diagramas permiten ver las partes y el todo juntos, por ello, son un paso necesario para evaluar la Emergía.

Los caminos o flujos de la visión general del sistema determinan los ítems considerados posteriormente en la tabla de evaluación de la Emergía. Los elementos que se observen en el diagrama final serán aquellos a ser evaluados en la tabla de análisis de la Emergía.

De acuerdo con Odum (1996), para realizar el diagrama es necesario:

- Definir los límites de la “ventana” del sistema en general, y así separar los componentes y procesos internos de las influencias desde fuera de ese límite.

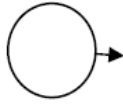
- Hacer una lista de las fuentes más importantes que ingresan al sistema enumerando los componentes principales (flujos, relaciones, interacciones, procesos de producción y consumo, entre otros) tomando en cuenta la escala del sistema definido.

- Dibujar el diagrama del sistema, comenzando con los recursos externos dispuestos alrededor de un marco rectangular que marcará el límite. Dentro se dibujarán los símbolos de los componentes en orden de su transformidad de izquierda a derecha. Después se conectan los caminos entre los símbolos.

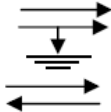
Los símbolos utilizados para dibujar los diagramas de sistemas de energía fueron elaborados por Odum (1996); cada uno de los símbolos tiene un significado diferente. Como cualquier lenguaje, el de sistemas posee símbolos que representan las distintas partes que conforman el sistema estudiado. Los símbolos utilizados aquí son los que se muestran en la siguiente figura (figura14):



Fronteras del sistema. Representadas por una caja rectangular.



Fuente de Energía. Se entiende como tales los “focos” ubicados fuera de los límites del sistema y de los cuales parten flujos de energía al interior del mismo. Se ordenan en el sistema de izquierda a derecha en orden creciente de transformicidad o calidad energética (ver más adelante). Las fuentes de tipo ambiental se ubican en la zona izquierda (sol, viento, mareas, olas, semillas transportadas por las aves, etc.) y las socioeconómicas (servicios, información, etc.) en la parte derecha.



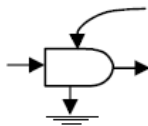
Rutas de flujo. Conecta los diversos componentes del sistema. Refleja las transferencias de energía, materiales o información entre los mismo. Si se trata de una línea discontinua representa flujos de dinero.



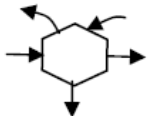
Sumidero de calor. Representa la disipación de energía en calor que acompaña todos los procesos de transformación o acumulación (consecuencia de la segunda ley de la termodinámica). Estas dispersiones están asociadas a depósitos, interacciones, productores, consumidores y símbolos de interruptores.



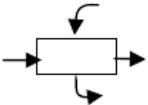
Deposito. Se trata de un almacenamiento de materia, energía, dinero, servicios, información.



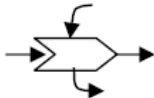
Productor. Componente que, a través de determinados procesos, recoge y transforma energía de baja calidad concentrándola. Hace productos. Pueden representar productores de tipo biótico (plantas) o antrópicos (fábricas). Suelen ubicarse en la parte izquierda de los diagramas.



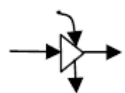
Consumidor. Componentes que consumen más energía de la que producen, aunque contribuyen o aportan servicios con mayor Energía. Usa los productos de los Productores Pueden representarse así desde poblaciones de animales consumidores hasta núcleos urbanos.



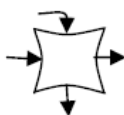
Caja. Símbolo misceláneo. Se suele emplear para delimitar un subsistema de interés dentro de un sistema mayor.



Interacción. Convergencia de flujos de varios tipos que, mediante la actuación de diversos procesos da lugar a flujos de mayor calidad.



Amplificador: interacción especial, en el que el flujo de salida se controla por otro flujo de menor intensidad



Activación (interruptor o desvío). Indica la puesta en marcha o la finalización de un proceso de un proceso como un incendio o la polinización de las flores.

Figura 14. Símbolos utilizados para los diagramas de sistemas de energía elaborados por Odum (1996).

3. A efectos de simplificar la contabilidad, los modelos complejos se suelen resumir para capturar las principales entradas y salidas al sistema, así como otros flujos que explican, en gran medida, el funcionamiento interno del mismo.

4. Balances del sistema. Implica la construcción de una tabla con los principales flujos de Emergía clasificados. Después de haber diseñado el diagrama, el paso siguiente es construir la tabla del análisis emergético, la cual consta de seis columnas (Odum 1996):

-En la columna 1 se enumeran los ítems a ser evaluados, para cada ítem evaluado se citan las fuentes de los datos sin procesar (raw data) y se muestran los cálculos.

-En la columna 2 se escribe el nombre del ítem y las unidades en que se encuentra el dato de la columna 3, ya sea gramos, Joules o dólares.

-En la columna 3 se coloca el dato del flujo energético en unidades en crudo (raw data). Para cada ítem, los datos en bruto (raw data) se dan en joules, gramos, dólares o alguna otra unidad.

Posteriormente en la tabla los datos en crudo (raw data) se convierten en energía y luego en unidades de emergía. La metodología menciona que en aquellos materiales donde el valor del potencial energético no sea fácilmente calculable, los datos pueden ser expresados en gramos en lugar de Joules y los datos de los servicios y labores pueden ser expresados en dólares pagados o tiempo invertido.

-La columna 4 corresponde a la transformidad o emergía solar por unidad (Solar Emery per Unit). Las transformidades o transformidades correspondientes a los distintos flujos del sistema generalmente se toman de investigaciones previas.

El verdadero consumo energético debe considerar los costes energéticos de producción de todos los recursos empleados, los de la naturaleza y los de la

economía humana. Y para obtener el costo energético de un recurso utilizamos la transformidad.

-En la columna 5 se escribe la Emergía, este valor es calculado multiplicando el dato de la columna 3 por el dato de la columna 4.

5. Cálculo de una serie de indicadores emergéticos. A partir de los datos de la tabla, se pueden calcular toda una serie de relaciones.

En el presente trabajo se analizaron algunos de los índices utilizados en la metodología emergética. En primer lugar, es importante mencionar la ecuación de la Emergía, la cual es:

$$\text{EMERGÍA} = (R + N) + (M + S) = I + F$$

Donde:

I = contribución de la naturaleza, compuesta por recursos naturales renovables (sol, lluvia, viento, nutrientes de la atmósfera, procesos geoquímicos, entre otros) representados por la letra R y los recursos naturales no renovables (N), los cuales incluyen suelos, biodiversidad y personas.

F = es la contribución de la economía, compuesta por M (materiales tales como semillas transgénicas y comerciales, herbicidas, insecticidas, combustibles, entre otros.) y S (servicios tales como trabajo humano, asistencia técnica y profesional, cobertura médica, entre otros).

Los índices utilizados para el análisis fueron:

TASA DE CARGA AMBIENTAL (Emergy Loading Ratio): este índice mide la proporción entre recursos no renovables y renovables. Los procesos ecológicos presentan un valor bajo y los procesos que usan intensamente los recursos no renovables poseen valores altos. $\text{ELR} = (N + F)/R$

TASA DE RENDIMIENTO EMERGÉTICO (Emergy Yield Ratio): se calcula dividiendo la Emergía total (Y) por la Emergía de las entradas de la economía (F).

$$EYR = Y/F$$

La aplicación de este método en el sistema analizado permite entender bajo una visión termodinámica y ecológica las relaciones de interdependencia que existen entre el medio natural y el socioeconómico creando un sistema complejo.

Los indicadores permiten entender bajo un mismo marco de estudio los flujos de materia, energía, información y dinero ligados a ecosistemas, sistemas agrícolas, sistemas urbanos, o tratar aspectos referentes al desarrollo, al comercio, a la termodinámica, al modelado de sistemas, a la ingeniería ecológica, a la restauración ecológica (Brown y Ulgiati, 2004).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Historia narrativa del lugar, la gente y los recursos naturales del lugar

Para poder tener una visión de los elementos que hacen posible la restauración y por consiguiente la autoproducción del ecosistema estudiado es necesario contar con un conocimiento de la región y la historia de su uso, considerando las condiciones del lugar.

Del mismo modo, es necesario considerar que los sistemas ambientales están compuestos por la relación entre las personas y los recursos naturales, y es necesario no perder de vista esto, ya que el desarrollo de todos los aspectos del sistema será lo que nos permita interpretar con precisión cuales son todos aquellos elementos que hacen posible la autoorganización y por consiguiente la restauración del ecosistema.

Por lo anterior, primeramente, es importante señalar que la zona no estuvo siempre formada por tepetates. Muchas de las características del área fueron el resultado de procesos que llevaron cientos de años; en primer lugar, ocurrió una deforestación masiva del área, la cual ocurrió desde épocas de la conquista; inicialmente la madera fue el principal recurso que los nuevos pobladores aprovecharon para satisfacer sus necesidades, por lo cual los bosques pronto fueron talados. Estudios llevados a cabo en el área relacionados con la dendrocronología como los de Montiel (2007), nos permiten tener referentes de árboles de más de 170 años de antigüedad. Aunado a lo anterior, en esta área también se tiene registro de que al cambiar el uso de suelo e introducir el arado para la agricultura y posteriormente ganado, se exacerbó el problema de la erosión del suelo en las regiones que los pobladores aprovechaban. Este patrón de cambio de uso de suelo y la falta de control en relación con restricciones de su uso, así como un manejo carente de técnicas de producción de las actividades agropecuarias y silvícolas; la tala inmoderada y el crecimiento urbano no planificado se ha venido repitiendo con el paso de los años.

Como resultado de extracción de madera, las prácticas agrícolas y la introducción del ganado en esta área en específico conocida como “El Pardo”, gran parte de las zonas que anteriormente se consideraban de vocación forestal se encuentran con diversos grados de erosión siendo la parte alta o de cerro en donde se concentra la erosión más severa. A continuación, se puede apreciar el paisaje característico de la zona (figura 15).



Figura 15. Paisaje característico de erosión severa en la zona. Fuente: propia.

Debido a lo anterior en el Municipio de Tlaxco se han realizado diversas acciones para mejorar las condiciones de conservación, restauración y producción de las áreas forestales. En particular una de ellas corresponde a la restauración del sitio conocido como “El Pardo”, en donde se tiene registro que desde los años 50 el señor Carlos Caballero Zamora desarrolló trabajos para la restauración de suelos y manejo sustentable del bosque. Dando como resultado que un aproximado de 50 hectáreas deforestadas y erosionadas fueran convertidas en bosque después de 40 años figura 16.



Figura 16. Evidencia de los cambios ocurridos en un paraje cercano a la zona de estudio. Fuente: Archivo de los encargados del proyecto de restauración.

Sin embargo, en nuestra área de estudio debido a su ubicación y a las condiciones climáticas particulares sufrió de un impacto más severo, haciendo necesarias acciones que involucrasen mayor complejidad; de igual forma se tiene registro que desde el año 2000 se inició probando diversos métodos para promover la regeneración del suelo en esta área en específico.

Entre las acciones llevadas a cabo en el lugar para promover la restauración del suelo se encuentran: el trazo de curvas de nivel, zanjas de infiltración, fracturación de capa superficial, colocación de barreras de pacas de paja a nivel y en barrancas y zonas de escorrentía.

Es necesario mencionar también que no todas las practicas que se han realizado han tenido éxito, un ejemplo de lo anterior es la reforestación llevada a cabo con ayuda de la Comisión Nacional Forestal, en donde desafortunadamente el porcentaje de sobrevivencia de los árboles plantados fue apenas del 20%.

Fue a partir de todas estas pruebas de ensayo y error que los encargados de la restauración fueron adquiriendo información de aquellas prácticas que, si daban resultado, lo anterior valiéndose de registros fotográficos y un constante manejo del sitio.

Por lo anterior los encargados de la restauración pudieron observar que de las practicas que llevaban a cabo una obra medular para que la restauración se llevara a cabo fue el agregado de materia orgánica (abono) en el lugar donde se busca el

establecimiento de vegetación, lo anterior siguiendo la premisa del sr. Carlos Caballero de que solo la vida produce vida.

Una de las practicas que fueron combinadas con el agregado de materia orgánica fue la implementación de la técnica conocida en el sitio como “sándwich” la cual consiste en colocar material fracturado de tepetate y materia orgánica como paja a manera de que esto sirva como barrera en las zanjas donde se pretende parar la escorrentía, seguido de una capa de paca de paja y materia orgánica, y por último otra capa de material fracturado o tepetate. Cabe resaltar que todas estas actividades fueron involucraron el trabajo tanto de personal contratado, pero también de grupos de visitantes como por ejemplo estudiantes interesados en conocer el proyecto de restauración.

Todas estas prácticas involucraron la incorporación de fuentes externas de materia y energía al ecosistema con la finalidad de crear depósitos o almacenamientos de energía y con ello evitar su rápida disipación.

Esas acciones llevadas a cabo desde el año 2000 parecen haber funcionado, como evidencia se cuenta con un gran archivo fotográfico de la recuperación de la zona.

A continuación, se presentan una serie de imágenes (figuras 17, 18, 19, 20 y 21) en las cuales se puede observar el cambio que esta ha sufrido con el paso del tiempo, como resultado de la restauración a la que se ha visto sometida.



Figura 17. Área de estudio en el año 2007. Fuente Google Earth.



Figura 18. Área de estudio en el año 2010. Fuente Google Earth.



Figura 19.  rea de estudio en el año 2016. Fuente Google Earth.



Figura 20.  rea de estudio en el año 2018. Fuente Google Earth.



Figura 21. Área de estudio en el año 2018. Fuente elaboración propia.

Como resultado de esos flujos de materia, energía e información que se intercambiaron dentro del sistema, se han podido recuperar las propiedades ecosistémicas del área restaurada. Dichas acciones han funcionado a tal grado que en algunas zonas el ingreso de recursos antrópicos se ha eliminado, dejando que el ecosistema trabaje por sí solo y se constituyan procesos de autoproducción y autoorganización; lo que ha dado lugar al establecimiento de vegetación, infiltración de agua y el avistamiento de algunas especies animales.

Sin embargo, para poder entender cómo es que ocurrió esta restauración es necesario contar con criterios que nos permitan entender bajo qué condiciones del sistema ocurre la autoorganización del mismo. Por lo anterior, es necesaria una metodología que nos permita tener una visión general de todos los elementos que intervienen en él, para posteriormente hacer mediciones con el objetivo de encontrar bajo qué condiciones es posible que ocurra la auto producción del ecosistema y este se pueda mantener por sí solo.

4.2 Identificación de los límites del sistema

Para propósitos de análisis ambientales, generalmente se considera a la región como una área grande y continua dentro de un área definida aún más grande.

Los sistemas regionales son redes complejas compuestas por componentes y procesos como por ejemplo clima, fisiografía, procesos biogeoquímicos, socioeconómicos y culturales. Al mirar a través de una ventana espacio temporal todos estos sistemas nos forzamos a ver a los subsistemas ambiental y económico como partes del mismo todo.

Reunir la información necesaria para definir los límites del sistema, sus componentes, influencias externas y procesos.

Los patrones y procesos en cualquier escala pueden ser representados por diagramas que muestren las partes principales y las conexiones a través de las cuales se producen las interacciones entre sus componentes. Estas figuras de estructura y función se denominan diagramas de sistemas. Sin embargo, debido a la gran cantidad de elementos que intervienen es imposible realizar diagramas que representen la totalidad de interacciones que se producen en el universo, pero podemos concentrar nuestra atención en una “ventana” en determinada escala de tiempo y espacio (Odum, 1996).

4.3 Modelado del sistema

El diagrama del sistema muestra las principales funciones, componentes y conexiones que ocurren en el ecosistema estudiado, en otras palabras, se representan las energías impulsoras que hacen posible el funcionamiento del ecosistema estas están dispuestas a lo largo del exterior con flujos que cruzan los límites del sistema.

Tener este diagrama facilita la discusión acerca de cuáles son los principales componentes del sistema y como es que estos trabajan en conjunto. El tener este modelo nos permite tener una guía la cual nos sirvió como la base para desarrollar el análisis emergético que se muestra más adelante.

Debido a la complejidad de las relaciones que se llevan a cabo en un sistema como este, para fines prácticos se realizó un modelo agregado del ecosistema, en el cual se muestra una visión general de los flujos de materiales y energía que se dan en el área; en él se pueden observar las diversas fuentes tanto naturales y externas o antrópicas que entran al sistema, mostrando la interacción de estas.

Construir el diagrama del sistema con los componentes considerados como clave para la restauración del área ayuda a visualizar las interacciones que existen entre esos elementos. Para poder realizarlo se utilizó el lenguaje de los sistemas energéticos (Odum, 1994) el cual utiliza símbolos para representar la interacción de todos los elementos del sistema de manera gráfica.

El modelo energético de los componentes del sistema analizado se muestra en la figura 22.

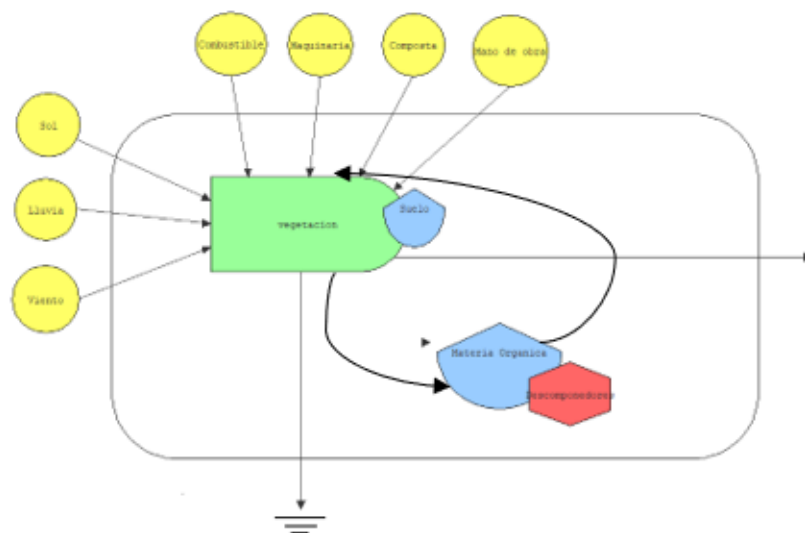


Figura 22. Diagrama agregado del sistema.

En el diagrama existen dos tipos de entradas al sistema: las correspondientes a energía y materia provenientes de la naturaleza (sol, lluvia, viento) y, por otro lado, se encuentran los insumos, bienes y servicios adquiridos desde fuera del sistema los cuales son considerados en este trabajo como esenciales para la restauración

del área, sin los cuales no habría sido posible la posterior autoorganización del sistema.

Como podemos observar, el sistema se compone del total de energía obtenida tanto del medio ambiente o aquellos recursos aportados por la naturaleza (círculos de la izquierda); como de fuentes externas o del medio socioeconómico (círculos de la derecha).

Fueron precisamente esas interacciones entre las fuentes de energía tanto del ambiente natural, como aquellas adquiridas por fuentes antrópicas como por ejemplo los combustibles, la materia orgánica o la mano de obra que hacen que el sistema funcione las que se representan en el diagrama. Todos los flujos de energía, material e información dentro, a través y fuera del sistema se identifican por las diversas vías (pathways).

El sistema que se analizó en este trabajo está compuesto de elementos que representan el ecosistema restaurado como producto de la relación de los componentes del sistema social humano y el sistema natural ecosistémico; todos estos elementos se muestran como círculos alrededor del límite del sistema, por otro lado, el rectángulo más grande muestra los límites del sistema.

Es importante observar que en este sistema los recursos que ingresan al sistema se convierten en energía o materia aprovechada por los productores primarios, misma que posteriormente se verá reflejada en los depósitos del ecosistema; como por ejemplo en la producción de biomasa del mismo. Sin embargo, otra gran cantidad de ellos es devuelta a la atmósfera en forma de calor dispersado, el cual no es aprovechable por el sistema.

Lo anterior se observa en el diagrama por una parte como la energía potencial capaz de realizar trabajo. Sin embargo, una parte de esa energía sale del sistema por el fondo o el sumidero de calor donde se dispersa la energía utilizada. Todos los

procesos se acompañan de tal dispersión de energía. Lo cual se puede explicar con la segunda ley de la termodinámica, referida a la depreciación.

La primera ley de la termodinámica establece que la energía que ingresa a un sistema no se crea ni se destruye, de ahí que en el ecosistema estudiado todos los flujos de energía que entran se quedan en uno de los tanques de almacenamiento o bien, salen del mismo como energía degradada, y una vez que ha sido utilizada pasa a través del sumidero de energía perdiendo su capacidad de realizar algún trabajo.

Esto último es otro aspecto que se representa en el diagrama del sistema, es decir el balance y reciclaje de materiales. Los límites termodinámicos de la eficiencia de la transformación de la energía se representan con los flujos de energía que se dirigen hacia el sumidero (parte inferior del diagrama). Es importante señalar que en todo sistema existe una parte de energía que no es aprovechada misma que en termodinámica se puede entender como pérdidas de calor.

Este último punto es posible representarlo viendo sus efectos en otro diagrama del sitio antes de que se llevara a cabo la restauración o incluso extrapolarlo a sitios adyacentes a nuestra área de estudio, en donde el tepetate es el único componente del sistema.

En áreas como las que se describen anteriormente es evidente que todos los flujos tanto de materia como de energía que se llegan a presentar se pierden, pues no hay depósitos que los fijen, como por ejemplo la radiación que se refleja del suelo desnudo a la atmósfera, el agua de lluvia que simplemente se arrastra de un sitio a otro o las mismas partículas de suelo que son arrastradas hacia la parte baja de la cuenca.

A partir de este diagrama se construyó una tabla con datos (tabla 1), la cual contiene todos los ingresos al sistema representados en el diagrama, posteriormente, con la

transformidad esos datos crudos se convirtieron a unidades emergéticas a continuación se presentan los detalles de esta.

4.4 Tabla de análisis emergético

Se utilizaron los conceptos y métodos de la ecología de sistemas (Odum, 1983) y la síntesis emergética (Odum 1996) para evaluar los ingresos al sistema que se necesitaron para realizar la restauración del suelo en el área de estudio.

Este punto Implica la construcción de una tabla con los principales flujos de emergía clasificados. Después de haber diseñado el diagrama, el paso siguiente es construir la tabla de análisis emergético, en donde las rutas en el diagrama se transfieren a las tablas de análisis de emergía, donde se realizan los cálculos necesarios para evaluar cuantitativamente estas rutas. La tabla consta de cinco columnas (Odum 1996).

La evaluación de emergía se realizó cuantificando todos los flujos de energía necesarios para crear un componente o flujo del sistema y colocándolo en una unidad común, el emjoule solar (sej).

A partir del diagrama de flujo (Figura x) se construyó una tabla de datos con todos los ingresos al sistema, y luego a través de la transformidad se convirtieron a unidades emergéticas (Tablas x). Al sumar estas últimas se obtuvo el flujo total de emergía del proceso estudiado. El último paso fue el cálculo de algunos índices emergéticos que aportan cierta información sobre la eficiencia del proceso, el aporte de los recursos renovables o la emergía por área, entre otros (Tabla x).

Nota	Item	Unidades en bruto	Unidades	Transformidad	Emergía solar	
		unidades/año		(sej/unit)	sej/año	
Recursos Renovables						
1	Sol	6.35E+13	j	1	6.35E+13	6.4
2	Lluvia	6.30E+10	j	3.02E+04	1.90E+15	190.3
3	Viento	6.51E+08	j	2.59E+04	1.69E+13	1.7
Fuentes no renovables						
5	Suelo	6.33E+08	j	1.24E+05	7.85E+13	7.8
Entradas adquiridas						
6	Combustible	1.49E+10	j	1.11E+05	1.66E+15	165.7
7	Maquinaria	1.09E+10	j	1.11E+05	1.21E+15	121.3
8	Composta	2.80E+04	j	4.05E+10	1.13E+15	113.4
9	Mano de obra (picar piedra, acomodar pacas)	2.71E+08	j	4.45E+06	1.20E+15	120.5
10	Llantas (transporte)	1.00E+10	j	1.11E+05	1.11E+15	111.4
11	Pacas de paja (transporte)	9.03E+09	j	1.11E+05	1.00E+15	100.3

Tabla 1. Flujos emergéticos del sistema estudiado.

Los resultados en la tabla 1 fueron calculados de dos maneras, por una parte se tomaron en cuenta las entradas externas o antrópicas y por otra parte sin tenerlas en cuenta. De esta manera los resultados incluyen el aporte de los esfuerzos hechos por recursos externos antrópicos, en el primer caso, y una contabilización puramente biofísica, en el segundo. Lo anterior con la finalidad de observar cómo es el cambio al estar presentes estos elementos o no.

A pesar de que la cantidad de energía que representan los elementos externos son entradas indispensables para que se pueda llevar a cabo la restauración del sitio, las fuentes naturales de energía son elementos sin los cuales el sistema no está correctamente representado y de igual forma sería imposible que este pudiera desarrollar sus propiedades ecosistémicas.

Los flujos emergéticos totales (Tabla 1) resultaron ser muy superiores con relación a los insumos externos antrópicos, lo que nos demuestra una gran dependencia del sistema a estos elementos, siendo que sin ellos sería imposible que la restauración del ecosistema se lleve a cabo.

Para el caso del área restaurada es evidente que el valor de emergía total es mayor que en el área que no recibe entradas de otro tipo más que las naturales, esto debido a las propiedades que emergen y a todos los elementos tanto naturales como adquiridos que se relacionan en el sitio.

Las Tabla x también muestra que los principales flujos que intervienen en el proceso de restauración son aquellos de origen externo o adquiridos, ya que representan una gran cantidad de energía en el área.

La principal contribución está dada por la energía que aporta la lluvia % seguida por una entrada de origen antrópico que son los combustibles (%). Entre los insumos que aportan una menor cantidad de energía para producir otro bien se encuentra la energía solar, esto debido a la poca concentración con que es aprovechada.

-En la columna 1 se enumeran los ítems a ser evaluados, para cada línea de ítem evaluado se indica el dato crudo y sus cálculos.

-En la columna 2, se escribe el nombre del ítem o los nombres de las diversas entradas del sistema y las unidades en que se encuentra el dato de la columna 3, ya sea gramos, Joules o dólares.

-En la columna 3 se coloca el dato del flujo energético en unidades en crudo (raw data), es decir los valores numéricos de cada flujo de entrada o los flujos necesarios para mantener las estructuras y almacenes internos de recursos. Estas entradas se colocan en sus unidades habituales de materiales (gramos o kilogramos) para la energía (Joules) por dinero en efectivo (\$), etc.

La metodología menciona que en aquellos materiales donde el valor del potencial energético no sea fácilmente calculable, los datos pueden ser expresados en gramos en lugar de Joules y los datos de los servicios y labores pueden ser expresados en dólares pagados o tiempo invertido.

-La columna 4 corresponde a la transformidad. Las transformidades correspondientes a los distintos flujos del sistema generalmente se toman de investigaciones previas.

Los coeficientes de transformidad solar representan la energía solar utilizada en el pasado para hacer un joule de energía disponible en el presente, se utilizan para convertir los flujos de energía en valores de emergía.

-En la columna 5 corresponde al valor de la emergía que es el producto de los flujos cuantificados del sistema en unidades de masa, energía o dinero por el valor de transformación correspondiente de esos flujos (multiplicación de la columna 3 por el dato de la columna 4) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Emergy (sej) = Available Energy (J) \times Transformity (sej/J)$$

El último paso fue el cálculo de algunos índices emergéticos que aportan información sobre la eficiencia del proceso, el aporte de los recursos renovables o la emergía por área, entre otros (Tabla x).

ÍNDICE	FÓRMULA	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
Flujo de emergía renovable local	R	seJ/año	Entrada de emergía renovable al sistema
Flujo de emergía no renovable local	N	seJ/año	Entrada de emergía no renovable al sistema desde fuentes internas al mismo
Flujo de emergía importado	F	seJ/año	Entrada de emergía desde fuentes externas (generalmente con un intercambio monetario)
Trabajo y servicios de la economía humana	T&S	seJ/año	Entrada de emergía al sistema basada en los costos monetarios de trabajo y servicios
Costo emergético de producción (U)	R+N+F+T&S	seJ/año	Costo en emergía de la producción del sistema
Fracción renovable de la emergía usada (%R)	R/U	-	Qué porción de la emergía total que ingresa es renovable
Índice de apropiación y explotación de emergía (EYR)	U/F+ T&S	-	Mide la contribución potencial de un proceso al conjunto del sistema debida a la explotación de recursos locales
Índice de inversión de emergía (EIR)	(F+T&S)/(R+N)	-	Relaciona fuentes externas al sistema y fuentes internas al mismo. Mide la eficacia en el uso de la energía invertida en un proceso
Índice de carga ambiental (ELR)	(N+F+T&S)/R	-	Índice de stress ambiental debido a una producción. Indica la presión de un proceso de transformación sobre el medio ambiente.
Empower Density (ED)	U/área	-	Mide la cantidad de emergía por unidad de área en cierto tiempo.

Tabla 2. principales índices emergéticos.

	Indices	
	Flujo de emergía renovable	
R	198.3	
	Flujo de emergía no renovable local	
N	7.8	
	Flujo de emergía importada	
	732.6	
F		
	Costo emergético de produccion	
	938.7	
%R	% de Renovabilidad	
	21.12	

Tabla 3. Índices emergéticos calculados.

CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El momento de la autopoiesis

Un ser vivo es termodinámicamente, un sistema abierto (intercambia materia y energía con el exterior) y, al mismo tiempo, fuertemente disipativo, es decir, degrada la energía y materia que absorbe con producción de calor a través de procesos fuertemente irreversibles y, por lo tanto, muy alejados del equilibrio termodinámico. Al mismo tiempo, estructuralmente, es algo más que la simple suma de sus partes constitutivas. Esta diferencia (fenómeno de sinergesis o como si dice en física, cooperatividad) es la autoorganización, que diferencia a la calidad de la cantidad.

No obstante, aunque conceptualmente cabe admitir que las cosas se entiendan tal y como se describieron, el problema práctico del entendimiento de procesos biológicos concretos es un poco más delicado. En efecto, una dificultad aparece en el estudio de los seres vivos, así como en cualquier sistema altamente complejo. Es la dificultad de identificar las variables o las leyes relevantes de funcionamiento del sistema.

sin embargo, estas observaciones no deben en ningún modo restar validez conceptual a la teoría física que hemos expuesto y que proviene del análisis de ejemplos sencillos, sino que deben hacer extraer como conclusión que, debido a la complejidad de los fenómenos biológicos, conviene hacer su estudio pausadamente, a base de esclarecer casos concretos y funciones particulares con modelos simplificados, de los que podemos luego inferir leyes más generales.

Es importante señalar que la restauración no es cuestión de la cantidad de componentes, sino más bien de que ciertos elementos deben pasar por un umbral para poder generar la autoorganización.

La sucesión ecológica conlleva el desarrollo de los ecosistemas; el flujo de energía producido conduce a determinadas cadenas tróficas y ciclos de materiales característicos del sistema.

Por lo tanto, la respuesta a cuándo es que se produce la autopoiesis no debe ser cronológica, no es posible establecer un tiempo, la respuesta es sistémica.

La autoproducción es consecuencia de las interacciones que se producen en el ecosistema como las relaciones entre el medio físico, relaciones intraespecíficas y relaciones interespecíficas.

Para que la autoorganización ocurra si bien es cierto que se necesita de ciertos componentes clave, tampoco se trata de un asunto de cantidad de esos componentes; la complejidad no se refiere al número de variables existentes; sino más bien a que aparezcan con ciertas cualidades. Siguiendo esta lógica cuanto más complejo es un ecosistema un mayor número de interacciones se producirán en él y por lo tanto favorecerá a su estabilidad manteniendo su estructura y su composición.

Por ejemplo, en este caso todas las prácticas y actividades que se realizaron en la zona para promover la restauración tuvieron un costo energético y fue esa energía gastada la que generó microambientes que favorecieron que ciertas cualidades aparecieran, por ejemplo, gracias a la humedad, la temperatura y los nutrientes aportados por la materia orgánica fue posible que las semillas de especies pioneras germinaran y con el paso del tiempo se estableciera vegetación.

Lo anterior se vuelve fundamental cuando observamos las acciones que se llevaron a cabo en el pasado y no tuvieron éxito, como por ejemplo la reforestación que se llevó a cabo con *Pinus oaxacana*, en la cual el porcentaje de supervivencia fue menor al 20%.

Por lo anterior es evidente que la simple retención del sustrato no es el mecanismo disparador para la conformación del suelo vivo, puesto que se puede retener el sustrato pero el suelo vivo que es un elemento fundamental para la autoproducción del sistema no se producirá necesariamente.

Lo anterior nos da evidencia de que para que ocurra la autoproducción del ecosistema no es condición únicamente de juntar variables o elementos, sino más

bien la autoorganización del ecosistema responde a la forma en que esas variables se acomodan y las cualidades que surgen con tal acomodo.

Al ver todos los datos reunidos en la caracterización de los elementos utilizados en las practicas que si tuvieron éxito en la restauración de la zona, podemos observar que fue el acomodo y la aparición de ciertas cualidades de estos lo que causo un punto de inflexión, como por ejemplo al crearse esos microclimas permitieron la aparición de propiedades ecosistémicas que se fueron reproduciendo hasta abarcar una extensión mayor.

Fue también esa constitución y auto reproducción del ecosistema como una unidad viva lo que permitió que la necesidad de trabajo antrópico en el área ya restaurada disminuyera progresivamente

Es posible que en otros ecosistemas con características semejantes a nuestra área de estudio esta experiencia de éxito se pueda reproducir. Sin embargo, es necesario recalcar que todo sistema tiene sus particularidades, y por lo tanto es necesario estudiarlo a detalle antes de realizar cualquier acción que busque su modificación ya que el comportamiento del sistema es estocástico, no está determinado. Si bien es cierto que tal vez el estado del sistema se pueda predecir, los elementos aleatorios siempre estarán presentes.

Otro punto importante que recalcar es que, si bien la autoorganización aparece, en todo sistema es necesario que existan entradas constantes de energía que permitan al ecosistema mantenerse alejado del equilibrio termodinámico, por lo tanto, este no puede mantenerse y sus requerimientos tendrán que cambiar conforme evoluciona el sistema, por lo tanto, es necesario que el área siga manteniendo un manejo y una constante vigilancia, prestando atención a alteraciones y deficiencias en el mismo.

Reservorios

Al hacer estos reservorios o depósitos de energía, se establecen nuevos sistemas vivos que retienen energía y se disminuye la disipación; pues si bien la entropía continua, se puede disminuir la disipación y con ello aletargar el colapso por medio de estas trampas de energía, retrasando la imagen fatalista de un universo que se agota a medida que aumenta la entropía.

Lo que la restauración del área busca como objetivo es la mínima disipación; la cual solo es posible cambiando el destino de los flujos de energía, almacenándola en estos reservorios lo que ocasionara que una cantidad de energía cada vez mayor se dedique al mantenimiento o a la auto reproducción del mismo ecosistema.

El suelo como elemento vivo

Uno de los elementos que fue factor fundamental para la restauración fue el suelo, pues si bien no es el único; mientras no se retenga ese recurso la autoorganización de ecosistema no sucederá, por lo tanto, las acciones que se llevan a cabo para la retención de este en el sitio son fundamentales ya que esa retención da pauta para que después de un tiempo la reestructuración del suelo vivo ocurra.

Mecanismos disparadores

Si bien es cierto que es necesaria la retención del sustrato para que se conforme un suelo vivo, la retención no es el disparador ya que se puede retener suelo y no necesariamente ocurrirá la restauración del ecosistema; la respuesta a la autoorganización del ecosistema está más dirigida a la reconfiguración y reconstrucción del ecosistema.

Para que la restauración ocurra es necesario que se cuente con mecanismos que disparadores, elementos que mediante el ensayo y error se incorporan a la estructura del sistema.

Flujos de información

Un elemento identificado como imprescindible para el éxito de la restauración en la zona de trabajo fueron los flujos de información que circulan en el sistema.

Desafortunadamente los flujos de información no son tan fáciles de medir como ocurre con la materia o la energía, sin embargo, los flujos de información son importantes desde el momento en que se tiene que identificar las causas y procesos responsables de la degradación del ecosistema, afortunadamente en el área se contaba con un registro histórico y testimonios que nos permitieron conocer con mas detalle la zona.

Del mismo modo, los flujos de información han permitido que una gran cantidad de personas se vea involucrada en la restauración de la zona, como estudiantes, organizaciones, instituciones educativas etc., las cuales han tenido un gran aporte en el proceso de restauración del suelo; ya sea aportando trabajo, conocimientos o flujos económicos al sistema, lo cual ha ayudado de forma directa e indirecta a la autoorganización del ecosistema.

CONCLUSIONES

Al tener en cuenta a todos los elementos que intervienen para que la autoorganización del ecosistema pueda ocurrir es importante contar con metodologías que tomen en cuenta a todos los elementos tanto sociales como ecológicos y las relaciones que entre estos se forman.

La síntesis energética es uno de los métodos que permite contabilizar e interpretar los efectos de los flujos de materiales y energía de forma integradora en sistemas donde interactúan el ser humano y la naturaleza a todas las escalas. Este es un enfoque diferente al de las metodologías precedentes, donde predomina la valorización monetaria de las relaciones del ser humano y la naturaleza.

Las bases teóricas de la termodinámica, la teoría general de sistemas y la ecología de sistemas nos ayudan a tener un mayor entendimiento de estos tipos de sistemas ecológicos, pudiendo optimizar los recursos que en un futuro se empleen ya sea para este proyecto o proyectos similares de restauración.

Los cálculos energéticos muestran que la cantidad de energía que entra al área es mayor en cuanto a los recursos externos aportados por fuentes antrópicas que en relación con los recursos de la naturaleza, sin embargo, los beneficios que se obtienen a largo plazo son mayores a la opción de no realizar ninguna actividad, puesto que los flujos de materia y energía seguirían dispersándose como ocurrió anteriormente, teniendo repercusiones para la parte baja de la cuenca, ejemplo de lo anterior es el azolve de las presas cercanas.

A pesar de lo anterior, es necesario considerar el costo que tendría el no hacerlo y las consecuencias que traería no solo para el área sino también para los sistemas socioambientales que se ven afectados por este.

Al hacer este análisis debemos considerar por ejemplo las problemáticas ambientales globales que se están combatiendo puesto que, si bien es cierto que las acciones llevadas a cabo son a una escala regional, los beneficios que se buscan repercuten a nivel global, como, por ejemplo:

- Captura de carbono (calentamiento global)
- Erosión del suelo (volver a tener bosque)
- Infiltración del agua

Es decir, beneficios o servicios que obtenemos de los ecosistemas, ya sean de soporte como (bienes producidos por el mismo ecosistema y aquellos que mantienen las condiciones de vida), de regulación (servicios del ecosistema que regulan el ambiente) o culturales (beneficios no materiales). Como podemos ver los ecosistemas en este caso el ecosistema forestal tiene un gran significado para la vida humana.

BIBLIOGRAFÍA

- Aboites, V. (2011). Los Elementos de la filosofía de Newton, de Voltaire y su interpretación de la naturaleza de la luz. *Revista Mexicana de Física*. Centro de Investigaciones en Óptica. León, Gto., México.
- Adams N. Richard. (2001). El octavo día: la evolución social como autoorganización de la energía. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. México, D.F. Primera edición.
- Alvarado, M. (2000). Diagnóstico de la Erosión Hídrica en el Estado de Tlaxcala. Organización Panamericana de la Salud.
- Alvarado, M. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Brown M.T y S. Ulgiati, 2004. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*
- Brown M.T. y S. Ulgiat, 2004. Emergy analysis and environmental accounting. En: Cleveland C. (ed.) *Encyclopedia of energy*. Oxford, UK: Academic Press, Elsevier.
- Brown, M.T y S. Ulgiat, 1997. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering* 9:51–69
- Brown, M.T., Brandt -Williams S., Tilley D. y S. Ulgiati, 2001. Emergy Synthesis: An Introduction en: Brown, M.T. (ed). *Emergy Synthesis 1: Theory and Applications of the Emergy Methodology*. Proceedings of the 1st Biennial Emergy Conference. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.

- Caballero, J. C. (2010). Estudio Regional Forestal para la UMAFOR del Estado de Tlaxcala. Comisión Nacional Forestal; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Estudios y Asesoría Forestal Especializada de México SC.
- Campbell, D.E.; Brandt -Williams, S.L. y T. Cai, 2005. Current Technical Problems in Emergy Analysis en: Brown, M.T.E. Bardi, D.E. Campbell, V. Comar, S. Huang, T. Rydberg, D. Tilley and S. Ulgiati (eds). Emergy Synthesis 3: Theory and Applications of the Emergy Methodology. Proceedings of the 3rd Biennial Emergy Conference. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.
- Capra, F., & Luisi, P. (2014). The Newtonian world-machine. In *The Systems View of Life: A Unifying Vision* (pp. 19–34). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511895555.004
- Capra, Fritjof (1998) *La trama de la vida*. Barcelona: Editorial Anagrama, p. 359.
- CONAGUA. (2012). Planeación Hidráulica en México. Guías Esquemas para la conservación de suelo, bosque y agua. Comisión Nacional del Agua.
- De Leo, G. & S. Levin. (1997) The multifaceted aspects of ecosystem integrity. *Conservation ecology*, 1, art. 3.
- Di Salvo, Anunziata; Romero, Nick; Briceño, José (2009) Estudio de los ecosistemas desde la perspectiva de la complejidad *Multiciencias*, vol. 9, núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 242-248 Universidad del Zulia Punto Fijo, Venezuela
- El Colegio de Tlaxcala AC. (2010). Los grandes problemas de Tlaxcala. Reunión de intercambio entre grupos de investigación y candidatos al gobierno del Estado.
- Espina, Mayra (2007) Complejidad, transdisciplina y metodología de la investigación social. *Utopía y Praxis Latinoamericana*. Revista Internacional de Filosofía Iberoamericana y Teoría social. Año 12, número 38, pp. 29-43

- Etxeberria A., y Bich, L. (2017). "Auto-organización y autopoiesis". En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. URL=http://dia.austral.edu.ar/Auto-organización_y_autopoiesis
- Francisco Fontúrbel R. Conservación de ecosistemas: un nuevo paradigma en la conservación de la biodiversidad
- Franzese, P. P., Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2014). Environmental accounting: Energy, systems ecology, and ecological modelling. *Ecological Modelling*, 271, 1–3. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/283910642_Environmental_Accounting_in_Marine_Protected_Areas_the_EAMPA_Project
- Gómez, P. (1996) La construcción de la antropología compleja. Etapas y método. En <http://www.invenia.es/oai:dialnet.unirioja.es:ART0000047578>
- González Villarreal, F. (2011). Identificación de estudios y proyectos del sector hídrico: Oaxaca, Puebla y Tlaxcala 2005-2011. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guerra De la Cruz, V., & Buendía Rodríguez, E. (2010). Identificación de Suelos Erosionados en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala: Magnitud y Distribución. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Centro. Tlaxcala, México: INIFAP-Tlaxcala.
- Herrero, Libia (2008). Del mecanicismo a la complejidad en biología. *Revista de biología tropical*, volumen 56, número 1 pp. 399-407.
- Hizmeri Fernandez J. (2010) Paradigma de la complejidad, educación, curriculum y praxis docente. Universidad del Bío-Bío. Facultad de Educación y Humanidades. Departamento de Educación. Chile.
- Hottois, Gilbert (1991). El paradigma bioético. Una ética para la tecnociencia. Barcelona: Antrhopos Editorial del hombre, p. 245
- http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-45222003000100005

- INEGI. (1999). Cuaderno Estadístico Municipal, Tlaxco, Tlaxcala, Gobierno del Estado.
- INIFAP . (2010). Identificación de Suelos Erosionados en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala: Magnitud y Distribución. (A. y. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Ed.) Tlaxcala: inifap.
- Instituto Internacional para el Pensamiento Complejo (IIPC). (2007). Universidad del Salvador. Buenos Aires. En www.complejidad.org/cms/?q=node/3
- Kapp, W. (1976) The open system character of the economy and its implications en Kurt Dopfer (ed) Economics, in the Future: towards a new paradigm, London, MacMillan. Publicado en Aguilera F. y Alcántara (1994).
- Lomas, P. L., Donato, M. Di, & Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética: una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica, 16(3), 37–45.
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/91/88>
- Massé Narváez, Carlos Eduardo. (2001). Del Positivismo Disciplinario y el Racionalismo Crítico a la Epistemología Dialéctica Crítica con base en La Totalidad, como Método Alternativo de Investigación Científica. Cinta de Moebio, núm. 11, Universidad de Chile Santiago, Chile
- Matteucci D. Silvia y Gustavo D. Buzai (1998). Sistemas Ambientales complejos: herramientas de análisis espacial (Compiladores), Buenos Aires, EUDEBA, 476 páginas. Redes 9(18), 239-242.
- Maturana, M., y Varela, F. (1973). De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: La organización de lo vivo. Santiago de Chile: Editorial Universitaria. (Sexta edición, coedición editorial Lumen, 2004).
- Maturana, M., y Varela, F. (1994). "Prefacio" a la segunda edición de De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo, Editorial Universitaria, Santiago de Chile.

- Maturana, M., y Varela, F. (2004). De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: La organización de lo vivo. Argentina: Editorial Universitaria Lumen, p. 137.
- Najmanovich, Denise (2007). El desafío de la complejidad: redes, cartografías dinámicas y mundos implicados. Utopía y Praxis Latinoamericana. Revista Internacional de Filosofía Iberoamericana y Teoría social. Año 12, número 38, pp.71-82.
- Nicholis, G. & Prigogine, I. La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias. Madrid: Alianza, 1994.
- Odum, H T. (1998). Emergy Evaluation. Environmental Engineering Sciences Gainesville: University of Florida. Recuperado de <http://www.unicamp.br/fea/ortega/agroecol/emergy.htm>
- Prigogine, Ilya (1999). "Tendencias a largo plazo y evolución de la complejidad" en: Tyrtania L. (1999). Termodinámica de la supervivencia para las ciencias sociales. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa. México D.F. Primera impresión.
- Ramírez, Augusto V. (2009) La teoría del conocimiento en investigación científica: una visión actual. Anales de la facultad de medicina. v.70 n.3 Lima.
- Rincón María, E. (2011) El origen del concepto ecosistema. Bio-grafía Escritos sobre la Biología y su Enseñanza. Edición Extra-Ordinaria. Memorias del I Congreso Nacional de Investigación en Enseñanza de la Biología. VI Encuentro Nacional de Investigación en Enseñanza de la Biología y la Educación Ambiental. p. 342-350.
- Rodríguez, Darío y Marcelo Arnold. (1991). Sociedad y teoría de sistemas. Editorial Universitaria, Santiago.
- Sotolongo, Pedro. (2007). Complejidad no linealidad y redes distribuidas. Complexus Revista de Complejidad, Ciencia y Estética. Volumen 3, numero 1, pp. 1-15.

- Tyrtania L. (1999). Termodinámica de la supervivencia para las ciencias sociales. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. México D.F. Primera impresión.
- Tyrtania L. (2008). La indeterminación entrópica: notas sobre disipación de energía, evolución y complejidad, en: Revista Desacatos No. 28, septiembre-diciembre.
- Wallerstein, Immanuel. (1996). Abrir las ciencias sociales: informe de la Comisión Gulbenkian para la reestructuración de las ciencias sociales. México: Siglo XXI : UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, 1996. 114 p. El mundo del siglo XXI.
- White, Leslie (1943), "Energy and the Evolution of Culture". En American Anthropologist New Series, vol. 45, núm. 3, pp. 335-356.
- Worster, D., (2008). Transformaciones de la Tierra. Selección, traducción y presentación de Castro, G. Centro Latino Americano de Ecología Social (CLAES). Editorial Coscoroba, Montevideo, Uruguay.
- Zarbá, L., & Brown, M. T. (2015). Cycling emergy: Computing emergy in trophic networks. Ecological Modelling, 315, 37–45. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201700151817>
- Zimmerman, B., Lindberg, C. and Plsek, P. (2001). A Complexity Science Primer. In Edgware: Insights from Complexity Science for Health Care Leaders (pp.3–20). Irving, Tex.: VHA Inc.
- Zohuri, Bahman (2016). Análisis dimensional más allá del teorema de Pi . Saltador. pags. 111) ISBN 978-3-319-45726-0.