

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA  
<<ING. JORGE L. TAMAYO>>, A.C. CentroGeo**

**Centro Público de Investigación CONACYT**

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas. Una aproximación  
desde los Sistemas Socioecológicos Complejos**

**Tesis**

Que para obtener el grado de:  
Maestro en Geomática

**Presenta**

René Vázquez Jiménez

Supervisor Principal:  
**Dra. María del Carmen Reyes Guerrero**

Examinador Externo:  
**Dr. Alejandro Toledo Ocampo**

Comité Supervisor:  
**M. en G. Enrique Muñoz Goncen**

México, D.F., Junio de 2011

© CentroGeo. Derechos reservados. El autor otorga a CentroGeo el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Resumen***

---

Una cuenca en una primera aproximación y desde un punto de vista tradicional, puede concebirse como un espacio delimitado por el relieve topográfico, el cual es drenado por un sistema fluvial bien definido; sin embargo, esta aproximación meramente estructural, puede complementarse si se consideran los elementos que aloja la cuenca y además las interacciones que existen entre ellos, conformando un sistema.

Desde esta perspectiva, una cuenca es un espacio delimitado y ocupado por poblaciones de especies vegetales y animales (sistemas naturales), incluyendo al ser humano (sistemas sociales), acoplados, en interacción y en una dinámica permanente de cambio y adaptación. Se trata pues de un espacio ecológico y social resultado de las relaciones e interacciones entre procesos biofísicos y sociales de apropiación y uso de los recursos contenidos en el espacio territorial de la cuenca.

Esta dinámica de interacciones entre sistemas de características distintas; difíciles de entender desde disciplinas convencionales, ha ocasionado una degradación del ecosistema natural; hoy es común la tala inmoderada, la extracción excesiva de agua del subsuelo, la presión social sobre las reservas naturales, la contaminación ambiental; y por si fuera poco, la falta de planes y programas de ordenamiento y protección ambiental; por mencionar algunos. Toda esta problemática genera una presión cada vez mayor sobre el sistema natural que sin duda pone en riesgo el equilibrio ecológico del cual también dependemos.

En la actualidad, la manipulación e interpretación de datos geográficos mediante el uso de distintas tecnologías, ha mejorado notablemente la percepción de nuestro mundo. Los datos geográficos debidamente organizados, procesados y analizados propician una base consistente para la evaluación e implementación de acciones de planeación y gestión de recursos.

La geomática se concibe como una conjugación de ciencia y tecnología; aplicadas en el análisis multidisciplinario de problemáticas que relacionan al ser humano con su espacio. La parte tecnológica de la geomática, se orienta hacia

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Resumen***

---

procesos de adquisición, almacenamiento, manipulación y gestión de información geo-espacial. Desde el CentroGeo, se busca colaborar con propuestas y acciones; apoyando la toma de decisiones basadas en información geo-espacial y marcos de conocimiento territoriales. El carácter multidisciplinario de la geomática permite la construcción de conocimiento colectivo, el cual puede servir como soporte en la resolución de problemáticas geo-espaciales o para implementar políticas públicas territoriales, incorporando una visión holística en beneficio de la sociedad.

***A Ely. Mi gran Amor...***

***A René y Dayi. Mi gran Motivación...***

***A Rodo y Vira. Mi gran Inspiración...***

El presente trabajo, representa un esfuerzo compartido en el cual de manera directa o indirecta muchas personas han participado; ya sea leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo y acompañándome en los buenos momentos y en otros no tan buenos.

Agradezco profundamente a mi directora, la Dra. Ma. del Carmen Reyes por su confianza, su paciencia y sus valiosas enseñanzas que resultaron fundamentales para concretar satisfactoriamente el presente trabajo.

Al Dr. Alejandro Toledo por compartir conmigo su amplio conocimiento y experiencia; por sus pertinentes observaciones para mejorar y lograr cumplir esta meta; y sobre todo por su invaluable amistad.

Al Maestro Enrique Muñoz, por su apoyo incondicional y compartir conmigo sus conocimientos los cuales sin duda se ven reflejados en este trabajo.

Al Maestro Javier Aldabe, por su invaluable apoyo desde el primer día de mi presencia en el CentroGeo, sin el cual no hubiera sido posible este importante logro.

A mi alma mater la Universidad Autónoma de Guerrero y la Unidad Académica de Ingeniería, por su valioso apoyo.

A mi familia.

A mis compañeros.

## Tabla de contenido

Resumen .....	<i>ii</i>
Lista de tablas.....	<i>viii</i>
Lista de figuras.....	<i>viii</i>
Introducción.....	2
1. La Cuenca como un Sistema Socioecológico Complejo.....	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Los Sistemas Socioecológicos Complejos: Un nuevo marco conceptual.....	16
1.3 Complejidad, Resiliencia, Ciclos Adaptativos y Panarquías.....	23
1.4 La Cuenca Hidrológica: Un sistema estructural, funcional y socialmente complejo.....	38
1.5 Paisajes Hidrológicos.....	48
2. La Modelación del Espacio.....	58
2.1 Modelando la Cuenca como Sistema Complejo.....	64
2.2 El Método de Modelación Bottom-Up.....	67
3. Un Camino hacia la Solución Geomática.....	75
3.1 La Cibercartografía. Nuevo paradigma de la Geomática.....	76
3.2 Desarrollo de Soluciones Geomáticas. Proceso metodológico. CentroGeo.....	80
3.2.1 La metodología estructural.....	81
3.2.2 El marco de contenido.....	83
3.3 Los Sistemas de Información Geográfica.....	85
3.4 Planeación Territorial y Sistemas de Información Geográfica.....	87

## Tabla de contenido

3.5 Diseño del Modelo Geo-Espacial.....	90
3.5.1 El Meta Sistema.....	91
3.5.2 El Sistema de Información.....	94
3.5.3 El Sistema Geo-Computacional.....	97
3.5.4 Interacción del Modelo Geo-Espacial con los usuarios.....	98
4. Conclusiones.....	103
Bibliografía.....	105

## Lista de Tablas

Tabla 1.1: Programas representativos de estudios sobre sistemas acoplados Hombre-Naturaleza.....	18
Tabla 1.2: Inventario de principales factores de la cuenca.....	41
Tabla 1.3: Actividades humanas y principales efectos en una cuenca.....	46

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Interacciones entre los grandes subsistemas naturales de la Tierra.....	12
Figura 1.2: Cambios en factores ecológicos y sociales en los últimos 150 años...	15
Figura 1.3: Esquema básico de un sistema socioecológico complejo.....	16
Figura 1.4: Sistemas acoplados Hombre-Naturaleza. 6 casos de estudio.....	19
Figura 1.5: Etapas del ciclo adaptativo en los sistemas complejos.....	27
Figura 1.6: Dimensiones del ciclo adaptativo en los sistemas complejos.....	29
Figura 1.7: Evolución de la Resiliencia, Potencialidad y Conectividad en un sistema complejo a través de las etapas del ciclo adaptativo.....	29
Figura 1.8: Panarquía.....	31
Figura 1.9: Conexiones panárquicas.....	32
Figura 1.10: La cuenca como panarquía.....	33
Figura 1.11: Latitud, Precariedad y Resiliencia de un sistema complejo.....	37
Figura 1.12: Pérdida de resiliencia y cambio de régimen de un sistema.....	38
Figura 1.13: Cuenca.....	39
Figura 1.14: La jerarquía de una cuenca.....	39
Figura 1.15: Area Hierarchy: Nested Holons.....	40
Figura 1.16: La cuenca como un espacio ecológico y social.....	42



## Lista de Figuras

Figura 1.17: Representación de la cuenca como un sistema socioecológico complejo.....	43
Figura 1.18: Unidad fundamental de paisaje hidrológico.....	51
Figura 1.19. Ejemplos de paisajes hidrológicos.....	54
Figura 2.1: Esquema básico de un modelo de paisaje.....	65
Figura 2.2: Representación de patrones y procesos en un paisaje, desde el enfoque Bottom-Up.....	68
Figura 2.3: Vinculación del modelo conceptual, representacional y geo-computacional incorporado al enfoque Bottom-Up .....	69
Figura 2.4: Modelo conceptual de la solución geomática desde un enfoque Bottom-Up.....	70
Figura 3.1: Marco científico de la Cibercartografía.....	77
Figura 3.2: Ejes de comunicación en los Atlas Cibercartográficos.....	78
Figura 3.3: Virtual Helix.....	79
Figura 3.4: Componentes de un Sistema de Información Geográfica.....	87
Figura 3.5: El proceso de toma de decisiones.....	88
Figura 3.6: Esquema conceptual de un Sistema de Información Geográfica.....	90
Figura 3.7: El Meta Sistema.....	93
Figura 3.8: Representación del sistema de información e incorporación de un Sistema de Información Geográfica al desarrollo del Modelo Geo-Espacial.....	96
Figura 3.9: Representación del diseño conceptual del Modelo Geo-Espacial.....	100

# **Introducción**

## **Introducción**

La visión del estudio de la geomática desde el CentroGeo, involucra no solo la descripción física del espacio, sino que incide en tomar en cuenta a todos los elementos, ya sean biofísicos o humanos, como actores de las diversas realidades que conforman el territorio; considerándolo como un sistema conformado de recursos y agentes territoriales en constante interacción, que dan a éste características especiales de fondo, más allá de las formas. Este es un aspecto fundamental que marca la diferencia entre el espacio como contexto geográfico y el territorio como un agente integrador y transformador esencial para el desarrollo (Albuquerque y Dini, 2008:5-6).

El análisis del presente trabajo se centra en las áreas de captación; pensando en principio en una cuenca como un espacio delimitado por las formas topográficas del terreno, cuya característica principal es la captación y conducción de agua; líquido vital para la presencia y subsistencia de la vida. Una cuenca presenta diferentes características fisiográficas o hidrológicas que la definen, tales como tamaño, forma, pendiente, escurrimientos, precipitación, etc. Pero además de éstas, existen otras características poco exploradas que también tienen que ver con su definición y para intentar comprenderlas, partimos por reconocer que al interior del espacio ocupado por la cuenca, existen múltiples elementos que de alguna forma están interconectados entre sí; de igual manera, ocurren en la cuenca múltiples eventos que también de algún modo están relacionados. Estas características dan a la propia cuenca una tipología compleja estructural y funcionalmente.

Desde una perspectiva sistémica, cada cuenca aloja conjuntos de distintos elementos (sistemas o subsistemas); relacionados y colaborando entre sí para lograr un fin específico. El ciclo hidrológico presente en sus distintas manifestaciones, es un ejemplo de un sistema el cual interactúa con todos los distintos elementos de la cuenca, repercutiendo sin duda en todos ellos. Si pensamos en la cuenca como un ecosistema será posible identificar varios subsistemas naturales entrelazados (flora, fauna, aire, suelo, agua, etc.), compartiendo además del espacio físico; materia, energía e

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Introducción***

---

información, bajo una dinámica de constante cambio y adaptación para la supervivencia. Es evidente también dentro de este marco referencial la presencia del ser humano, extendida en nuestros días hacia prácticamente todos los sitios de nuestro planeta; conformado también en sistemas sociales. De modo pues que de pronto el sistema natural, compuesto de múltiples y distintos elementos, cuya interacción y dinámica son difíciles de entender, se encuentra compartiendo un espacio común con un sistema social totalmente distinto; conformando un territorio con un mayor número de elementos diferentes y además con una mayor y más complicada red de interacciones, incrementando así la dificultad para comprender la dinámica global del sistema.

Este tipo de convivencia de sistemas de características y fines muy distintos, ha causado a lo largo del tiempo una degradación permanente de la naturaleza, pues la concepción humana acerca de su superioridad se ha traducido en una separación entre el ser humano y su ambiente; con el hombre siempre en primer lugar y por encima del ecosistema natural. En las cuencas en las que existan sistemas acoplados hombre-naturaleza, es común que existan problemáticas como la predación sin control del hombre sobre los recursos naturales, extracción de agua del subsuelo, tala inmoderada, extracción de materiales para construcción, desmonte, presión sobre el suelo de reserva ecológico a causa del crecimiento urbano; presión que muchas veces se da sobre las zonas aluviales de los cuerpos de agua de la cuenca que poco a poco se pierden; dando lugar a asentamientos irregulares, los cuales a su vez son vulnerables a ser afectados severamente por inundaciones en temporadas de precipitación irregular.

Si a este fenómeno le sumamos la falta de planes locales de ordenamiento territorial, programas de protección ambiental o normatividad que regule el uso de suelo; la situación se hace mas crítica; pues en los últimos años se ha registrado un crecimiento urbano desordenado imperando solo los intereses económicos sobre el medio ambiente. Esta situación ha detonado otras problemáticas, como la contaminación de afluentes de los cuerpos de agua por descargas de aguas negras y de la cuenca en general por deficiencias en la recolección y disposición de desechos sólidos; afectando la biosfera de la cuenca. Todos estos problemas y otros más,

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Introducción***

---

derivados de la misma situación; ejercen una presión cada vez mayor sobre el sistema cuenca, generando severos cambios estructurales y funcionales que sin duda ponen en riesgo el equilibrio ecológico del cual como seres humanos, también dependemos.

Bajo el enfoque que se pretende, una cuenca puede ser vista como un gran sistema acoplado por dos grandes subsistemas: el humano y el natural, interconectados tanto estructural como funcionalmente, conformando lo que hoy se reconoce como un sistema acoplado hombre-naturaleza o sistema socioecológico complejo y que han dado lugar a un nuevo paradigma de conocimiento aún en construcción (Liu et al. 2007a:639-645).

Es de mi interés desarrollar un trabajo en torno al marco de referencia biofísico determinado territorialmente por el espacio definido por una cuenca, a través de los recursos teóricos e instrumentales que ofrece la geomática con el fin de proponer una solución que permita abordar la problemática descrita para integrar, estructurar, organizar, representar, comunicar y retroalimentar información y conocimiento geoespacial, que a la vez pueda servir eventualmente como soporte en la integración de planes y acciones de gestión territorial.

En el desarrollo de soluciones geomáticas, es indispensable el abordaje de la problemática con el soporte de modelos de conocimiento y la participación de diferentes especialistas con distintos marcos teóricos apropiados dependiendo del fenómeno o problemática estudiada. Para este caso, se pretende abordar el trabajo desde el marco de la teoría general de sistemas, la teoría de la complejidad la cual se encuentra implícita en el modelo de conocimiento de los sistemas socioecológicos complejos.

El enfoque transdisciplinario de la geomática, hace necesario encontrar puntos de coincidencia y de interés sobre los que se pueda dialogar en torno a alguna problemática; entre los puntos de coincidencia más importantes, si no es que el más; debe distinguirse el territorio; y en torno a él deben discutirse las distintas perspectivas de los participantes; es decir, se pretende dar a nuestro análisis un enfoque territorial.

De este modo, será posible construir un puente de comunicación e interconectar los modelos de conocimiento de la teoría general de sistemas, de la teoría de la complejidad y de los sistemas socioecológicos complejos con la geomática; bajo un enfoque territorial.

## **Hipótesis**

Bajo los antecedentes descritos, el planteamiento de la investigación pretende abordar cuestiones como las siguientes:

- La cuenca como meta-sistema, es decir vista como un sistema socioecológico complejo conformada a su vez por sistemas;
- Cambio, adaptación y resiliencia del sistema natural ante perturbaciones antropogénicas;
- El papel del espacio en la integración estructural y funcional de una cuenca;
- Manejo y orientación de la dinámica de adaptación de una cuenca como sistema;
- Aportación de herramientas desde el ámbito de la ciencia geomática, orientadas a la gestión de recursos dentro de una cuenca.

Podemos integrar los planteamientos anteriores y resumir una hipótesis de investigación como sigue:

***Es posible construir una solución geomática orientada a cuencas hidrográficas desde la perspectiva de los sistemas socioecológicos complejos y bajo un enfoque territorial, que sirva como base para establecer acciones de control y gestión de sus recursos.***

La solución mencionada, se vislumbra desde una perspectiva empírica, es decir que se percibe operando a través de una herramienta geo-tecnológica o artefacto geomático, desarrollado bajo el modelo de conocimiento de los sistemas socioecológicos complejos; desde una perspectiva territorial y a la vez aplicando los

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Introducción***

---

recursos teóricos e instrumentales del ámbito de la ciencia geomática y cuyo fin puede ser descriptivo, predictivo, prospectivo, de planeación, etc. de una problemática o fenómeno particular de interés que se presente al interior de una cuenca. Bajo este nivel de operación empírica, estaremos creando un vínculo entre este modelo de conocimiento y la geomática; con la sociedad; representada a través de instituciones, gobierno, políticas, población, cultura, etc., con todas las condiciones contextuales que condicionan la situación particular de una cuenca; es decir, con el territorio como integrador.

Proponer una solución geomática no es fácil, pues se requiere del desarrollo de una serie de etapas preliminares muy bien planteadas; esto significa que no es posible partir desde la geomática y vincular ésta de manera directa hasta la sociedad; aun a pesar de que el punto de partida sea un planteamiento empírico. Un análisis de este tipo, debe iniciar por identificar un modelo de conocimiento; que para nuestro caso se pretende que sea el de los sistemas socioecológicos complejos; el cual pueda de algún modo asociarse con la geomática a través de un enfoque territorial; ambas partes; el modelo de conocimiento y el enfoque territorial, se pretende que nos sirvan para establecer puentes de comunicación y así poder llegar a la integración de una solución geomática de la problemática planteada.

Otro aspecto importante es que debe reconocerse también que no es posible realizar todo el proceso de construcción de una solución geomática de manera aislada; se entiende que en algún punto del recorrido se requiere de la participación de grupos multidisciplinarios con la orientación adecuada según la problemática, una solución geomática también implica involucrar a la sociedad y a las autoridades; además de requerirse de un despliegue importante de recursos materiales, humanos y de tiempo. Esto claramente va mas allá de una tesis de maestría; de modo que el presente trabajo se plantea solo dar los primeros pasos, como parte de una metodología que desde una perspectiva de aplicación de la geomática, pueda conducirnos hacia la construcción de un modelo y a partir de éste pueda desarrollarse una herramienta geo-tecnológica y que además eventualmente en el futuro pueda ser un insumo más de expresión que sirva

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Introducción***

---

para construir un marco teórico mucho más completo. Es claro por la experiencia transmitida en el CentroGeo, que en el desarrollo de un proyecto geomático, estos primeros pasos son siempre necesarios, pues sin ellos no es posible llegar a una herramienta vinculada directamente con la sociedad.

Para abordar nuestra hipótesis, en primer lugar intentamos establecer un marco referencial sobre la cuenca y un marco conceptual que contemple argumentos, principios y conceptos fundamentales de ese enfoque innovador sobre la dinámica de los sistemas socioecológicos complejos; enfoque que a la vez está fundamentado en la teoría general de sistemas, teoría de la complejidad y cibernética tanto de primer como de segundo orden.

Enseguida se profundiza sobre procesos de cambio y adaptación en sistemas sociales y sistemas naturales acoplados; se vincula el marco referencial al modelo de conocimiento, haciendo una discusión sobre líneas de investigación como la construcción de los paisajes hidrológicos.

Posteriormente se analiza sobre el modelo conceptual de la solución geomática, estableciendo un engranaje que busca hacer explícito el modelo geográfico desde un enfoque de análisis espacial y a través de la modelación de la cuenca como un sistema socioecológico complejo.

Finalmente, con el modelo de conocimiento explícito, se intenta vislumbrar las alternativas que pudiera abordar la posible solución geomática apoyándonos en los planteamientos de la escuela de pensamiento del CentroGeo.

A lo largo del documento se involucran muchos conceptos de distintas áreas de conocimiento, los cuales pretenden servir como soporte en las explicaciones desarrolladas; sin embargo, es pertinente mencionar que no todos se abordan con el mismo nivel de profundidad; se discuten con mayor detalle aquellos conceptos que nos permiten seguir de cerca el hilo conductor del trabajo y otros que se mencionan, solo



***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Introducción***

---

nos permiten tener un punto de contacto con otras disciplinas de conocimiento, pero no es la finalidad su discusión con profundidad.

# **Capitulo 1**

## **La Cuenca como un Sistema Socioecológico Complejo**

## **1. La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo**

### **1.1 Antecedentes**

Vivimos una época sin precedente. La población mundial podría alcanzar los 10 mil millones de habitantes en el año 2050 lo cual significaría una demanda muy grande sobre los recursos naturales y a la vez se causarían graves perturbaciones en un corto plazo sobre los sistemas de la Tierra (Steffen et al. 2004:1-15). Los desafíos medioambientales que encara la humanidad demandan soluciones que involucran cubrir necesidades sociales, pero también necesitan implementarse acciones esenciales de protección a los ecosistemas. Ante tal escenario, es necesario un nuevo esfuerzo transdisciplinario para encarar los cambios, para comprender los impactos en los sistemas naturales y sociales, y para emprender el desarrollo de posibles alternativas de solución. Para ello se requiere de colaboración y cooperación entre las distintas ciencias, de redes de investigación bien coordinadas que permitan el intercambio de conocimiento, de avanzados sistemas de información y nuevas técnicas de investigación y síntesis y un nuevo paradigma innovador en la educación.

La naturaleza y alcance de la ciencia en el ámbito de las ciencias geológicas, ecológicas y sociales ha cambiado dramáticamente durante los últimos 100 años. Desde 1957-1958, periodo correspondiente al Año Geofísico Internacional, la comunidad científica reconoció la necesidad de implementar programas integrados para abordar cuestionamientos a nivel de sistemas y a gran escala (National Academy of Sciences, 2007). Los aportes del Año Geofísico Internacional permitieron a las geociencias desarrollar programas experimentales, integrando las infraestructuras necesarias con el fin de realizar mediciones globales sobre la superficie terrestre, el océano y la atmósfera; lo cual representó un notable esfuerzo, ya que el enfoque fue geográfico y no disciplinario. Desde entonces se han desarrollado de manera permanente diferentes mediciones, aplicando de manera integral: equipos de medición directa, sensores terrestres, sensores marinos, sondas atmosféricas, sensores aéreos y espaciales, etc. Esta línea de investigación ha llevado al desarrollo de modelos que

buscan describir las condiciones actuales y los futuros escenarios de nuestro planeta a escalas local, regional y global.

El estudio de la ecología también ha cambiado considerablemente durante los últimos años; antes de los 60, las investigaciones se enfocaban en observaciones de corto plazo y en ecosistemas relativamente prístinos. Durante los años 60, el programa biológico internacional llevó la investigación ecológica a un ámbito de “*gran ciencia*”; dando lugar al cambio conceptual del paradigma del “*equilibrio absoluto*” al paradigma del “*equilibrio dinámico*” de la naturaleza (McIntosh, 1985:1-4). Durante esta transición, las ciencias ecológicas se conformaron más integradoras, multidisciplinarias y colaborativas; enfocándose a cuestiones más complejas y olvidando la visión de los sistemas prístinos (McIntosh, 1985:213-217). Esfuerzos mayores motivados por la comunidad científica, como el programa **Long-Term Ecological Research**<sup>1</sup> (LTER) o el **National Center for Ecological Analysis and Synthesis**<sup>2</sup> (NCEAS), juegan un importante rol en la transición de este paradigma de “*investigador aislado*” o “*sitio único y aislado*” hacia la colaboración, integración y síntesis de las ciencias ecológicas.

Por otro lado, las ciencias sociales representan un amplio conjunto de diversas disciplinas: antropología, economía, geografía, demografía, sociología, etc. Y también han sufrido transiciones importantes en los últimos años, han contribuido a la colección y análisis de información social a largo plazo, como los censos de población, censos agrícolas y económicos (Singleton y Straits, citado por Research Initiatives Subcommittee of the LTER planning process, 2010:3); logrando hoy estudios multidisciplinarios con una mayor integración y colaboración. Otras iniciativas, como la

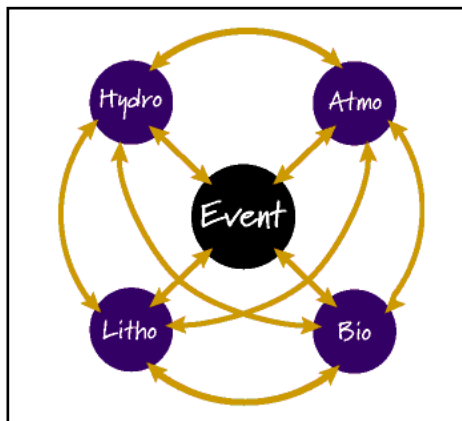
---

<sup>1</sup> **LTER**, se trata de un esfuerzo colaborativo que involucra a más de 1100 científicos y estudiantes investigando procesos ecológicos a lo largo plazo y a gran escala espacial. Fuente: <http://www.lternet.edu/> (consulta marzo 2011).

<sup>2</sup> Los científicos de **NCEAS** usan información existente para retomar importantes asuntos de ecología y disciplinas relacionadas. Fuente: <http://www.nceas.ucsb.edu/> (consulta marzo 2011).

creación del *Inter University Consortium for Political and Social Research*<sup>3</sup> (ICPSR), han reorientado la investigación hacia la sociología sintética. Cada vez más este centro se ha enfocado en el hombre como organismos biológicos y culturales alojados en sistemas socioecológicos (Haberl et al. 2006:1-5).

Un sistema es una colección de partes interdependientes adjuntada dentro de un límite definido (Lawton, 2001:1). Analizando al planeta Tierra como un gran sistema natural, encontramos que dentro de sus límites existe una colección de cuatro importantes partes interdependientes, esferas o dominios: La Litosfera; la Hidrosfera, la Biosfera y la Atmosfera (Fig. 1.1).



**Figura 1.1:** Interacciones entre los grandes Subsistemas naturales de la Tierra.

Reproducida de *Introduction to Earth Systems Science*. Awad et al.

Fuente:

<http://serc.carleton.edu/quantskills/courses/14007.html>

Estas esferas están interconectadas; pues elementos de una dimensión se relacionan de manera natural con elementos de otra dimensión; por ejemplo, la fauna (biosfera), vive o se desplaza a través del aire (atmosfera), tierra (litosfera) o agua (hidrosfera); el agua (hidrosfera); está contenida en, o fluye a través de la tierra (litosfera); etc. La interconexión de las partes es tal que un evento que genere un cambio en una dimensión, produce como consecuencia un cambio en las otras partes; estos cambios pueden ser causados por eventos de la propia naturaleza o bien por la actividad del hombre y dependiendo de la magnitud y origen, el efecto hacia las otras dimensiones

<sup>3</sup> **ICPSR** Proporciona a la comunidad de científicos sociales, la conducción, rumbo y capacitación sobre acceso a información, mediación, autenticación y métodos de análisis. Fuente <http://www.icpsr.umich.edu/icpsrweb/ICPSR/> (consulta marzo 2011)

puede ser local (como un huracán o un incendio forestal) o global (como el fenómeno del niño o el hueco en la capa de ozono).

Por otro lado, cada uno de estos dominios conforma un gran sistema, integrado a su vez por subsistemas y una gran cantidad de elementos que se interconectan con otros para realizar distintos procesos. La biosfera por ejemplo, está conformada por toda la “*materia viviente*” del planeta; el total de organismos vivos, entre ellos el hombre. La humanidad como materia viviente está permanentemente conectada a los procesos de materia y energía (subsistencia) específicos de la Tierra, lo cual representa su propia biosfera (Vernadsky, 2005:30-31). Según Vernadsky, la tierra ha evolucionado de la geosfera (materia inanimada) a la biosfera (vida biológica), y con la emergencia del hombre como parte de la biosfera, se evoluciona hacia la **Noosfera**<sup>4</sup> (evolución de la conciencia); es decir, una nueva esfera o dominio que abarca las ideologías, los mitos, la cultura, el conocimiento; que emergen como producto de la interrelación de los individuos dentro de una sociedad. La noosfera es un fenómeno nuevo en nuestro planeta, en el cual por primera vez el hombre se convierte en una fuerza geológica a gran escala. De acuerdo a Vernadsky, la cara de nuestro planeta, está siendo bruscamente modificada por el hombre y lo hace en la mayoría de los casos de manera inconsciente (Vernadsky, 2005:33).

En el siglo XX pasamos de un mundo vacío a un mundo lleno, lo que implica una mutación histórica que provoca que se hable de la entrada en una nueva era geológica: el **Antropoceno**. En opinión de Fernández y Davis, la etapa del holoceno que coincide con el inicio de la agricultura y la evolución de las distintas civilizaciones humanas, ha llegado a su fin después de 12,000 años y el trecho interglaciar que define el holoceno, inusualmente estable en términos de temperatura global, también ha concluido con la entrada en “*un nuevo intervalo estratigráfico sin precedentes en los últimos millones de años*”. Estaríamos por tanto en una nueva era histórica caracterizada por el dominio de

---

<sup>4</sup> Del griego **noos**, inteligencia y esfera – El diccionario de la Real Academia Española lo define como: Conjunto de los seres inteligentes con el medio en que viven. Diccionario de la Real Academia Española. 22ª edición. Versión Digital. <http://buscon.rae.es/drae/> (Consulta diciembre de 2010.)

la especie humana sobre los recursos vitales del planeta. El sistema económico dominante, ha logrado alterar por primera vez en la historia el sistema ecológico y geomorfológico global; afectando no sólo el funcionamiento del clima del planeta o la composición de ríos, mares, lagos y océanos; o la magnitud, diversidad y complejidad de la biodiversidad planetaria, sino hasta el propio paisaje y territorio, convirtiéndose el sistema urbano-agro-industrial en la principal fuerza geomorfológica de carácter antropogénico, activada y amplificada por un sistema basado en el crecimiento económico sin límite y cuyo impacto durará siglos o milenios y condicionarán cualquier evolución futura (Fernández, 2008:4; Davis, 2008; Foley et al. 2005:570-571).

La concepción del hombre moderno respecto a su superioridad sobre la naturaleza, ha sido una constante de la civilización tecno-industrial occidental en los últimos siglos; esta concepción se tradujo en la separación entre el ser humano y su medio ambiente, el hombre se lanzó a la conquista de la naturaleza, perdiendo la percepción de su ubicación como parte integral del ambiente y como el más importante agente transformador de su medio. El ser humano se asumió como regulador del ecosistema, modificándolo para su propio beneficio, pero ignorando que como sistema orgánico, el medio ambiente puede responder a las perturbaciones introducidas con cambios frecuentemente no previsibles (Matteucci y Buzai, 1998:19).

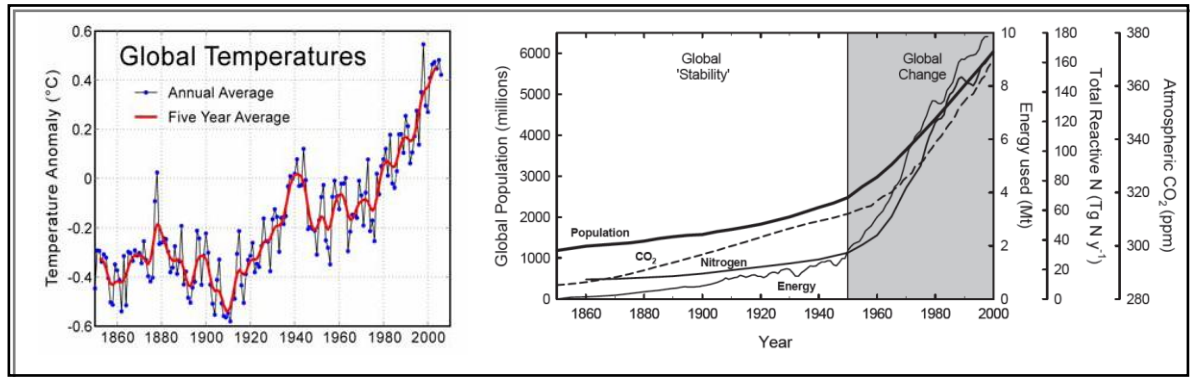
Aunque los humanos hemos interactuado con el ambiente biofísico desde el principio mismo de la historia, el alcance e intensidad de estas interacciones ha aumentado dramáticamente desde la revolución industrial. Gracias a investigaciones ecológicas hoy nos damos cuenta de las graves consecuencias medioambientales derivadas del crecimiento de la población y de las demandas que este fenómeno impondrá sobre los bienes y **servicios ecosistémicos**<sup>5</sup> en el futuro (Daily et al. 2000:1-7; Millenium Ecosystem Assessment, 2005:1-8).

---

<sup>5</sup> Por **servicios ecosistémicos** se entiende aquellas funciones que desarrollan los ecosistemas y que se traducen en beneficios para la calidad de vida de las sociedades humanas, tales como: disponibilidad de agua, producción de comida y otros bienes, regulación del clima, regulación de gases de efecto invernadero, reciclaje de nutrientes, turismo, cultura, etc. (Sabater y Elosegui, 2009:20-21).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

Uno de los desafíos medioambientales más urgentes es el cambio climático causado por los altos niveles de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo cual ha ocasionado que la temperatura global se haya incrementado dramáticamente durante las últimas dos décadas (Fig. 1.2).



**Figura 1.2:** Cambios en factores ecológicos y sociales clave en los últimos 150 años. Reproducida de: *Integrative Science for Society and Environment: A Strategic Research Initiative*. (Research Initiatives Subcommittee of the LTER Planning Process. 2010:5).

(Izquierda). Representación de los cambios en el promedio de temperatura global basada en registros instrumentales compilados por la Unidad de Investigación Climática de la Universidad East Anglia y el centro Hadley de la oficina meteorológica del Reino Unido.

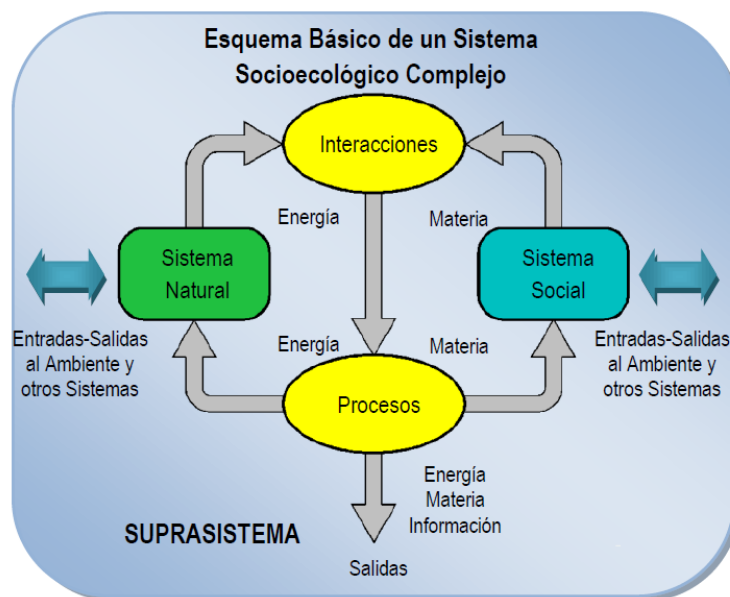
(Derecha). Representación de los cambios en: Población mundial (US Census bureau); Consumo de energía (US Department of Energy Information Administration); Concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Carbon Dioxide Information Analysis Center – CIDAC); y disponibilidad de Nitrógeno (Galloway et al. 2003:342) en los últimos 150 años.

El cambio climático, es solo una de las muchas preocupaciones medioambientales a escala global y regional; de hecho el cambio global es el resultado de las interacciones entre múltiples factores, incluyendo variables sociales y ecológicas relacionados con el crecimiento de la población y el consumo de recursos naturales. Los altos niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y el aumento de la temperatura en combinación con el crecimiento de la población, incrementan la disponibilidad de nitrógeno e incrementan el consumo; lo cual genera un tremendo impacto sobre los sistemas naturales (Tilman et al. 2001:281-282). La verdad aún estamos lejos de comprender las consecuencias y hacia qué futuro nos conducen las interacciones entre estos factores sociales y naturales integrados en sistemas socioecológicos complejos.



## 1.2 Los Sistemas Socioecológicos Complejos: Un nuevo marco conceptual

Los sistemas acoplados hombre-naturaleza o sistemas socioecológicos complejos, son sistemas en los que los componentes humano y natural se encuentran anidados de manera jerárquica e íntimamente interconectados (Liu et al. 2007a:639-645). Por su naturaleza de sistemas abiertos obtienen materia, energía e información de su entorno, a partir de la cual interactúan internamente realizando procesos de distinta naturaleza, los cuales a su vez generan salidas también en forma de materia, energía e información que son puestas a disposición del medio ambiente o supra sistema que los contiene (Liu et al. 2007a:639-645; Liu et al. 2007b: 1513; Pontifica Universidad Javeriana, Colombia:6-11), (Fig. 1.3).



**Figura 1.3:** Esquema básico de un sistema socioecológico complejo. Fuente: Elaboración propia.

Cabe hacer notar, que todo el flujo de materia, energía e información en los sistemas socioecológico complejos generan ciclos de retroalimentación, a través de los cuales el sistema es capaz de generar aprendizaje y usarlo en su beneficio para adaptarse; aunque en la figura pareciera que este ciclo es circular y que el proceso siempre ocurre en un mismo espacio-tiempo; la verdad es que al llegar aparentemente al mismo punto, éste se encuentra en otro nivel superior, siendo esta diferencia de niveles del punto de

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.***

---

partida y llegada precisamente la representación del cambio por el aprendizaje; es decir, que el ciclo de retroalimentación es más bien una espiral.

La distinción entre sistemas sociales y sistemas ecológicos y la visión de ellos como sistemas socioecológicos, es una simplificación útil para intentar comprender problemáticas complejas relacionadas. Dado que como especie interactuamos con otras y con el paisaje en el espacio en el que vivimos, somos seres ecológicos; consumimos nutrientes, usamos energía, procesamos y generamos materia, es decir, somos parte de un ecosistema. Un paisaje urbano conforma un sistema social; sin embargo, es también un ecosistema como cualquier paisaje rural o salvaje; la estructuración del paisaje con mamíferos o arrecifes de coral; no cambia el marco científico de describirlos en términos ecosistémicos; de modo que una estructuración urbana con gente como especie dominante, tampoco cambia la naturaleza esencial ecológica de una ciudad (Toewls et al. 2008:ix).

La existencia de los sistemas acoplados hombre-naturaleza se reconoce desde hace tiempo, sin embargo, no ha sido posible la caracterización y comprensión total de los patrones complejos y procesos involucrados en las interacciones mutuas que se dan entre ellos (Liu et al. 2007b:1513-1516). La investigación desde las ciencias normales tanto las sociales como las naturales, muestra el interés actual por el estudio de los sistemas socioecológicos complejos; sin embargo, los científicos sociales tradicionalmente han enfocado sus investigaciones en las interacciones humanas, minimizando el papel del contexto medioambiental o considerando las influencias medioambientales como constantes; mientras que los ecologistas han enfocado sus estudios en ambientes prístinos en donde a los humanos los consideran como agentes externos y raramente como agentes participantes y dominantes (Liu et al. 2007a:639).

La importancia de desarrollar un nuevo marco conceptual integrado para estudiar los sistemas socioecológicos complejos se ha venido reconociendo de manera creciente y se han integrado varios programas de investigación multidisciplinaria,

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

conjuntando ciencias sociales y ecológicas; con diferentes enfoques (Tabla 1.1) y en diferentes partes del mundo, (Fig. 1.4).

**Tabla 1.1:** Programas representativos de estudios sobre sistemas acoplados Hombre-Naturaleza. Adaptado de: *Coupled Human and Natural Systems*. Jianguo Liu et al. *Ambio*. 2007a: 640.

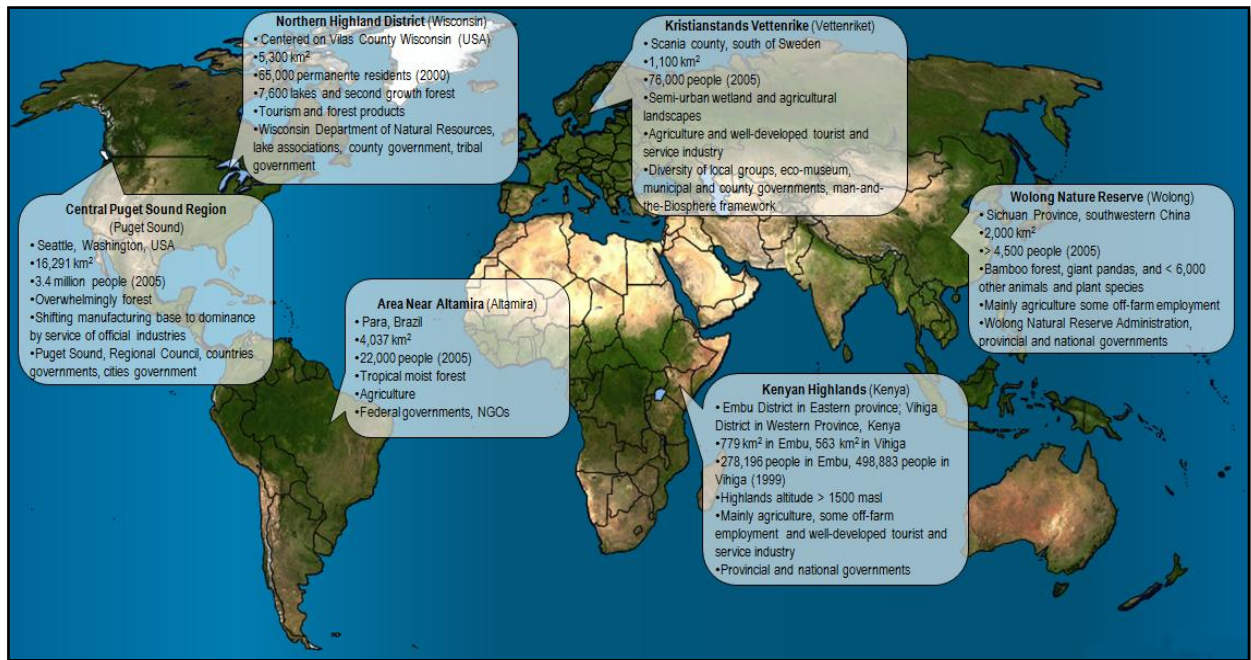
Table 1. Representative programs on studies of coupled human and natural systems*					
Program Name	Dynamics of Coupled Natural and Human Systems	Beijer International Institute for Ecological Economics	Resilience Alliance	Intergovernmental Panel on Climate Change	Millennium Ecosystem Assessment
<b>Focus</b>	Complex interactions among human and natural systems at diverse spatial, temporal and organizational scales	Ecological economics	Research on the dynamic of complex adaptive systems in order to discover foundations for sustainability	Assessment of scientific, technical and socioeconomic information to understand climate change, its impacts and choices for adaptation and mitigation	An international program assessing conditions and consequences of ecosystem change for human well being and options for responding to those changes
<b>Mayor funding source</b>	U.S. National Science Foundation	Kjell and Märta Beijer Foundation	Diverse grants from private foundations	World Meteorological Organization and United Nations Environment program	Multiple Sources
<b>Duration</b>	2000 – present	1991 – present	1999 – present	1988 – present	2001 – 2005
<b>Source of information</b>	<a href="http://www.nsf.gov/geofere/ereweb/fund-bicomplex.cfm">http://www.nsf.gov/geofere/ereweb/fund-bicomplex.cfm</a>	<a href="http://www.beijer.kva.se">http://www.beijer.kva.se</a>	<a href="http://www.resalliance.org">http://www.resalliance.org</a>	<a href="http://www.ipcc.ch">http://www.ipcc.ch</a>	<a href="http://www.MAweb.org">http://www.MAweb.org</a>
* This omits an enormous number of local, regional and global projects (e.g. ozone hole, melting Greenland; shutting off Gulf Stream, worldwide shifts in phenology of rivers, ice, plants and animals) that are making significant contributions to the understanding of coupled human and natural systems					

Como puede observarse en la Tabla 1.1, los alcances de estos proyectos van más allá de las líneas comunes de investigación desde las ciencias normales de la ecología o sociología característicos de hace una o dos décadas. En estos ejemplos de nuevas líneas de investigación, los dominios humano y natural no se ven de manera aislada sino como entidades interconectadas e incluidas en redes de interacciones.

El estudio de los sistemas socioecológicos complejos se comprende como una ciencia post normal emergente y aún en construcción, pero sustentada en trabajos y logros previos desde ciencias como la ecología humana, la antropología, la ecología, la geografía medioambiental, la ecología del paisaje y otras ciencias de la tierra. Dicho estudio, se enfoca en los patrones y procesos que ligan los sistemas humanos y naturales, y pretende enfatizar las interacciones recíprocas de retroalimentación y los efectos de los humanos en el ambiente, pero también los efectos del ambiente en los humanos; a la vez se busca comprender las interacciones que se dan tanto a escala interna en los propios sistemas hombre-naturaleza, como las que se dan a escala

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

externa o cruzada, es decir aquellas interacciones que se dan en los umbrales de los propios sistemas hombre-naturaleza (Stern, 1993:1897-1899).



**Figura 1.4:** Sistemas acoplados Hombre-Naturaleza. 6 casos de estudio. Adaptado de: *Complexity of Coupled Human and Natural Systems*. Jiangou Liu et al. *Science* 2007b:1514.

La figura anterior representa un mapa que resalta las principales características de seis sistemas acoplados hombre-naturaleza (ubicación, extensión, tamaño de la población y atributos ecológicos, económicos y administrativos) en distintas partes del mundo.

La degradación ambiental es un tema de conflicto, pues los efectos negativos de la pérdida de biodiversidad se trasladan en el tiempo y el espacio, a menudo de manera imprevisible y terminan por afectar la estabilidad de otros sistemas ecológicos y sociales. Las causas aceptadas de degradación ecológica son la transformación y pérdida de hábitat, la sobre-explotación de recursos naturales, la contaminación y la introducción de especies. Sin embargo, los procesos que definen estas grandes causas o motores de transformación rara vez operan de manera independiente y además, tienden a operar sistémicamente (Constanza, 1993:545-555; Pontificia Universidad Javeriana - Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2009:28).

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.***

---

Como consecuencia del incremento de la población mundial y del mejoramiento de las condiciones de vida de la humanidad, se ha originado un aumento extraordinario en la demanda de agua; por desgracia no siempre es posible disponer de la cantidad necesaria para satisfacer las necesidades básicas originando con frecuencia gran escasez; sin embargo, otras veces se dispone de agua en tal cantidad que su exceso produce inundaciones, lo que también causa graves daños. La irregular distribución espacial y temporal de las aguas dulces en el planeta, ha llevado tradicionalmente al hombre a construir grandes obras de protección, de drenaje y de regulación, a través de las cuales se intenta compensar tanto la escasez como el exceso del agua. El desarrollo de tales proyectos tradicionalmente han sido determinados, desarrollados y controlados desde marcos conceptuales que provienen de las ciencias normales y bien puede constatarse que estas experiencias han tenido resultados limitados, y esto se debe en parte, por no armonizar las metas sociales con los procesos ecológicos. Como ejemplos pueden mencionarse la generación de electricidad o la intención de mejorar la agricultura, en ambos casos mediante la creación de embalses o el desvío de los flujos de los ríos; estas acciones tradicionalmente han ignorado al medio ambiente y no han contribuido a conservar los ecosistemas, al contrario los han afectado gravemente; además de que las condiciones de la sociedades locales, tampoco se han visto mejoradas sustancialmente.

El estudio de los sistemas socioecológicos complejos se prevé como una manera de afrontar el creciente deterioro de los sistemas ambientales y tratar de prevenir consecuencias graves causadas por la magnitud, extensión y proporción de los cambios inducidos en los sistemas acoplados hombre-naturaleza que en las últimas décadas no tiene precedente.

Todo ello requiere de un nuevo paradigma que enfatice los acoplamientos de sistemas naturales y humanos de manera jerárquica y anidada a través del cruce y la consideración de escalas organizacionales, espaciales y temporales. El objetivo no es simplemente un análisis a gran escala, tal como esfuerzos anteriores realizados respecto a modelajes globales, tal como el modelo de la dinámica mundial (Forrester,

1971:114), o el modelo de límites del crecimiento (Meadows, 1972:86). Más bien en este sentido, el nuevo paradigma o marco conceptual buscado, requiere enfatizar:

- i) Cómo los Sistemas Locales se encuentran anidados jerárquicamente dentro de los Sistemas Regionales y Globales;
- ii) Cómo los procesos locales y globales tienen efectos recursivos de retroalimentación;
- iii) La diferencia que existe en los acoplamientos de los Sistemas Naturales y Humanos a diferentes escalas;
- iv) El engranaje que se da de los procesos a pequeña escala sobre los procesos a gran escala; y
- v) Las influencias de los procesos a gran escala sobre los procesos a pequeña escala.

A pesar de que se logre un entendimiento de las interacciones básicas locales de un sistema socioecológico acoplado, es necesaria una contextualización, donde las acciones locales se identifiquen y comprendan en función del paisaje, de factores regionales o nacionales que a su vez dependen de fuerzas globales (Dietz et al. 2003:1908); para dar un ejemplo de tal aseveración, se puede afirmar que la vulnerabilidad de una comunidad ante riesgos naturales no sólo depende de variables como la topografía o el tipo de vegetación del lugar o de las posibles acciones locales de contingencia ante alguna catástrofe, sino que también depende del estado que guarda la economía regional o nacional; es decir, son diferentes los factores y también de diferente naturaleza los que intervienen en estas interacciones; de modo que ello justifica el estudio sobre acoplamientos simultáneos entre el hombre y los sistemas naturales a múltiples escalas tanto espacial como de organización. El mismo problema también ocurre respecto a las escalas de tiempo; es esencial no sólo entender las interacciones diarias entre los humanos y sus ambientes sino también la dinámica e interacción de los procesos más lentos a escalas de tiempo; durante décadas o incluso siglos.

El nuevo marco conceptual debe contemplar que los investigadores sean capaces de comprender los planteamientos de múltiples disciplinas afines a la línea de investigación, pero además, deberán preferentemente complementar su formación en áreas como la integración de equipos de trabajo; liderazgo; la apreciación de múltiples paradigmas y diferentes maneras de tomar, asumir y gestionar la retroalimentación disciplinaria; especialmente en las ciencias sociales y naturales (Liu et al. 2007a:646).

Es también importante que los investigadores de sistemas socioecológicos acoplados cuenten con las herramientas adecuadas de comunicación que les permitan transmitir de manera directa y eficaz su conocimiento a la diversa variedad de públicos posibles, tales como el sector privado, los medios de comunicación, políticos, los gerentes tomadores de decisiones y público general (Millennium Ecosystem Assessment, 2005:22). Esta necesidad ha sido ya identificada y para ello existen programas de entrenamiento específico al respecto, como el **Aldo Leopold Leadership Program**<sup>6</sup>.

El marco conceptual integrador que permita el entendimiento de la complejidad de las interacciones entre el hombre y la naturaleza, se ha convertido en una prioridad creciente y urgente. Esta necesidad tiene varios desafíos y a la vez oportunidades. Según McDonnell, el hombre es un componente íntegro de los ecosistemas (McDonnell, 1993:364), sin embargo en opinión de Hixon, éste todavía no se representa de una manera totalmente clara en la ciencia ecológica (Hixon, et al. 2002:1490-1508). A pesar de que existen marcos teóricos que integran los sistemas sociales en los estudios ecológicos, no son suficientes y no se aplican de manera satisfactoria (Alberti, 2003:1169-1179). De modo que es crucial revisar y corregir si es necesario, la teoría actual al respecto para sustentar investigaciones sobre sistemas socioecológicos acoplados; de igual manera, es también esencial revisar, y modificar si es necesario, la

---

<sup>6</sup> El "**Aldo Leopold Leadership Program**" del instituto Woods de la Universidad de Stanford, apoya en la construcción de toma de decisiones ambientales sustentadas en investigaciones académicas. Fuente: <http://leopoldleadership.stanford.edu/> (consulta marzo de 2011).

teoría social existente a fin de poder reconocer el rol creciente que los sistemas naturales juegan en los modelos y procesos sociales.

Afrontar este reto es fundamental para un mejor entendimiento de los sistemas socioecológicos acoplados y es necesario también que todo este marco teórico de alguna manera se ponga a disposición de los tomadores de decisiones para que sirva de sustento para la construcción e implementación de políticas gubernamentales y programas de gestión y conservación que aseguren contar con sistemas sociales y ecológicos saludables en el futuro.

### **1.3 Complejidad, Resiliencia, Ciclos Adaptativos y Panarquías**

En general, la mayoría de los sistemas que se describen como vivos o inteligentes se consideran como sistemas complejos. Un **Sistema Complejo** puede ser definido como un sistema formado por un gran número de elementos simples que interactúan entre sí, capaces de intercambiar energía, materia e información entre ellos y el entorno que los contiene; y a su vez son capaces de adaptar su estructura interna como consecuencia de tales interacciones. La propiedad fundamental de estos sistemas que atrae la atención de investigadores, es la no linealidad de las interacciones entre sus constituyentes, que 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. Debe destacarse que el carácter no lineal de las interacciones no implica que estas sean complicadas; pues reglas de interacción muy simples pueden dar lugar a comportamientos globales muy complejos y muy distintos del que posee cada elemento constitutivo; es decir que los comportamientos emergentes resultantes no pueden ser atribuidos a cada componente por sí solo, sino que son consecuencia de la acción cooperativa entre todos ellos. La no linealidad impide pensar al sistema en términos del principio de agregación, en consecuencia surge el nuevo paradigma en el que “**El todo es más que la suma de las partes**” (Matteucci y Buzai, 1998:33-34).



Una colonia de hormigas vista como un todo, es capaz de llevar a cabo tareas de gran complejidad que requieren una verdadera organización social; que si se consideran individualmente, ninguna hormiga puede por sí sola realizarlas. Es en este sentido que el comportamiento social emerge a partir de las interacciones entre los individuos considerados como elementos simples; es decir, esta emergencia no es reductible a las propiedades de un individuo. Las redes genéticas, la mente y las sociedades humanas son ejemplos típicos de sistemas complejos y su estudio teórico se ha enfocado principalmente en su **organización**<sup>7</sup> y en los arreglos que contribuyen al desarrollo y persistencia de tal organización. Bajo este sentido, lo más importante son las relaciones entre los componentes (su estructura), en lugar de los componentes y sus propiedades (su composición). Este énfasis en la estructura por encima de la composición es lo que ha generado la aproximación analítica del estudio de los sistemas complejos mediante lo cual se han logrado importantes acercamientos al modelado de diferentes sistemas en múltiples disciplinas.

Hoy es común considerar a un sistema complejo como una red de un gran número de componentes que agregan un comportamiento específico ocasionado por los patrones multiescalares dinámicos y estructurales, pero también tal comportamiento produce tales patrones multiescalares los cuales no se deducen de la descripción de un sistema que abarca solo un conjunto estrecho de opciones de resolución (New England Complex Systems Institute, citado por Parrot y Kok, 2000:2).

El estudio de la **Resiliencia**<sup>8</sup> como una característica de aquellos sistemas capaces de crear procesos de transformación; ha encontrado en la ecología y en las

---

<sup>7</sup> Definida como: El conjunto de relaciones que determinan los tipos de interacciones y transformaciones dentro de un sistema (Maturana y Varela, 1980:xix-xx).

<sup>8</sup> La **Resiliencia** enfatiza aquellas condiciones que van más allá de cualquier equilibrio o estado estable de un sistema, donde las inestabilidades pueden repentinamente llevar al sistema hacia otro régimen totalmente distinto de comportamiento y a otro dominio de “estabilidad”. En este caso la **Resiliencia** se refiere a la magnitud de perturbación que puede ser absorbida por un sistema antes de que éste cambie su estructura, cambiando también las variables y los procesos que controlan su comportamiento. (Holling y Gunderson, 2002:27-28).

ciencias ambientales un campo fértil para su desarrollo. Se trata de un ámbito que se encuentra aun en construcción y difusión a través de una red multidisciplinaria para la divulgación científica denominada **Resilience Alliance**<sup>9</sup> y que engloba a un importante número de centros de estudio distribuidos por todo el mundo; entre las instituciones más renombradas se encuentra el **Instituto Santa Fe**<sup>10</sup> de Nuevo México, E. U.

Para abordar el estudio del territorio, es necesario abandonar enfoques reduccionistas, mecanicistas y lineales y sustituirlos por enfoques holísticos, sistémicos, complejos y recursivos. En palabras de Morin; “...*toda visión unidimensional, toda visión especializada y parcial es pobre; asumir la complejidad de cualquier objeto de estudio requiere contemplarlo como un tejido de constituyentes heterogéneos inseparablemente asociados*” (Morin, 2005:27-32). En consecuencia el enfoque de la complejidad requiere una reelaboración de nuestras ideas y categorías alrededor del objeto que se estudia.

La estructura de un sistema complejo es heterogénea, pero existe una gran interdependencia entre sus componentes; toda alteración de una parte del sistema, se propaga hacia el resto por medio de relaciones e influencias que definen la estructura del sistema. La complejidad en un sistema se caracteriza por la no-linealidad de los procesos y el carácter evolutivo que debe garantizar su persistencia (Holling, 2001:392). La heterogeneidad e interdependencia de los elementos de un sistema complejo generan comportamientos que trascienden a los que resultarían de la simple adición. Estos comportamientos no son propiedades específicas de sus elementos, sino nuevas características funcionales y únicas del objeto agregado, es decir, del propio sistema

---

<sup>9</sup> **Resilience Alliance**, es una organización de investigación conformado por científicos y profesionales de diversas disciplinas que colaboran para explorar la dinámica de los sistemas socio-ecológicos. El cuerpo de conocimientos desarrollados por **Resilience Alliance**, engloba conceptos clave sobre resiliencia, adaptación y capacidad de transformación y proporciona una base para el desarrollo e implementación de políticas de desarrollo sostenible. Fuente: [http://www.resalliance.org/index.php/about\\_ra](http://www.resalliance.org/index.php/about_ra) (Consulta marzo 2011).

<sup>10</sup> El **Instituto Santa Fe**, es un centro de educación e investigación privado independiente sin fines de lucro, que desarrolla colaboraciones multidisciplinarias en ámbitos de las ciencias físicas, biológicas, computacionales y sociales; buscando comprender los sistemas complejos adaptativos para abordar retos ambientales, tecnológicos, biológicos, económicos y políticos desde otra perspectiva. Fuente: <http://www.santafe.edu/> (Consulta marzo 2011).

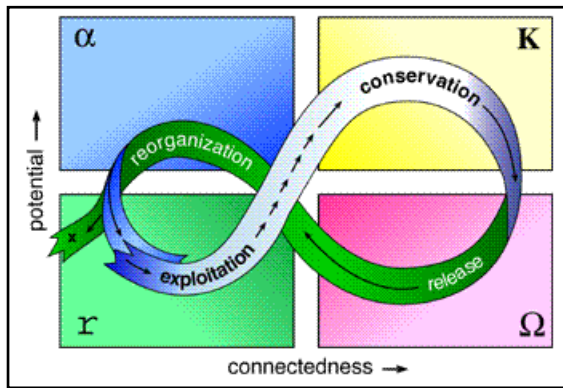
complejo; que **emergen** de las interacciones entre los componentes. A estas características se les conoce como propiedades emergentes; la inflación o el desempleo son propiedades emergentes del un sistema complejo económico; la extinción o sobrepoblación de una especie, lo son de un sistema complejo ecológico.

Holling propone tres propiedades emergentes básicas de un sistema complejo: la riqueza o potencial, el control interno o conectividad y su resiliencia, (Holling, 2001:393-394):

- **La riqueza o potencial.** Entendida como el abanico de las opciones futuras disponibles para el sistema; integra los recursos y los activos disponibles. El beneficio fundamental de estos recursos son las opciones futuras de bienestar, equilibrio y mejora que le ofrecen al sistema.
- **El control interno o conectividad.** Se refiere al grado de conexión entre las variables internas controladoras y los procesos del sistema; representa el grado en que un sistema puede controlar su propio destino y es un indicador de la cohesión interna.
- **La resiliencia.** Se refiere de algún modo al grado de vulnerabilidad que el sistema presenta ante perturbaciones inesperadas e impredecibles en sentido inverso; es decir  $Resiliencia = k / Vulnerabilidad$ . Esto significa que cuanto más resiliente sea un sistema, menos vulnerable será a las turbulencias y factores que le amenacen.

El estudio de las dinámicas evolutivas de los sistemas complejos, ha permitido vislumbrar los estados recurrentes que presentan en su evolución (Beisner et al. 2003:376-382). Esta recurrencia sugiere que un sistema complejo necesita del cambio para subsistir; el dinamismo es inherente a ellos y para incorporar este carácter dinámico y evolutivo, según Holling; es necesario introducir el concepto de **Ciclo Adaptativo**, a través del cual se da esta dinámica de evolución. Este ciclo adaptativo está conformado por cuatro diferentes etapas y cada una de ellas corresponde a un estado diferente en la configuración de las características del sistema (mayor o menor potencial, control interno y resiliencia), (Holling, 2001:393-395) (Fig. 1.5).

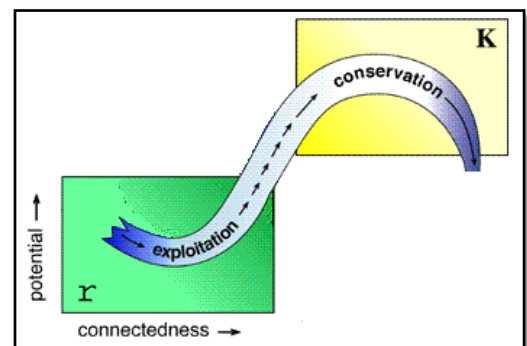
**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**



**Figura 1.5:** Etapas del ciclo adaptativo en los sistemas complejos ( $r$ ,  $K$ ,  $\Omega$ ,  $\alpha$ ).  
 Reproducida de: Understanding the Complexity of Economic, Ecological and Social Systems. *Ecosystems*. (Holling, 2001:394).

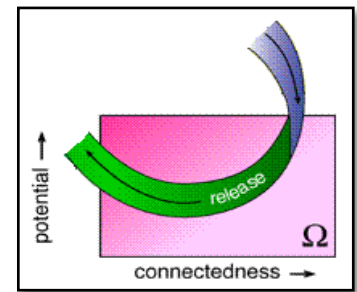
Las flechas en la figura anterior indican la velocidad del flujo en el ciclo de configuración del sistema: flechas cortas indican un cambio lento; flechas largas indican un cambio rápido. El ciclo refleja cambios en dos propiedades emergentes: el potencial, representado en el eje Y que se refiere a las fuentes de materia, energía o información acumuladas; y la conectividad representada en el eje X que indica el grado de conectividad entre las variables de control del sistema. La salida del ciclo indicada a la izquierda en la figura, sugiere una etapa donde el potencial puede perderse y entonces dar un cambio total hacia otro sistema diferente (Holling, 2001:394).

La primera fase se refiere a un rápido crecimiento y explotación del potencial del sistema, identificado como  $r$ . Posteriormente sigue una prolongada fase de acumulación de potencial y recursos; y una conservación y monopolización de la estructura; esta se identifica como  $K$ . En estas dos primeras etapas, se observa una tendencia a conservar la estructura del sistema lo cual permite un rápido crecimiento; de este modo, se causa una acumulación de rigidez, lo que hace al sistema más vulnerable a cualquier alteración. Esta trayectoria inicial desde la explotación a la conservación, (desde  $r$  a  $K$ ); alterna entre largos periodos de lenta acumulación de potencial y la transformación de sus fuentes.

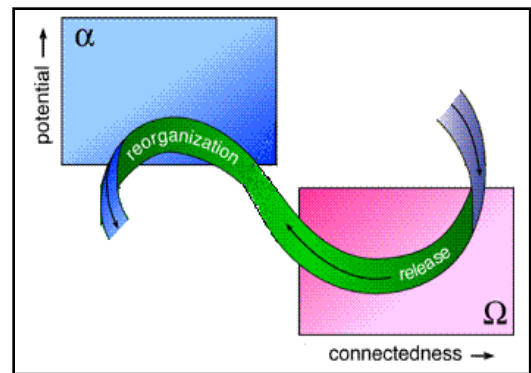


**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

El siguiente estado es el de liberación, identificado como  $\Omega$  (Omega) y se caracteriza por una repentina ruptura en el ciclo de crecimiento, acumulación y conservación, la cual se traduce en una abrupta liberación del potencial acumulado; esta etapa se conoce como “destrucción creativa” (Schumpeter, 1943:81-86).



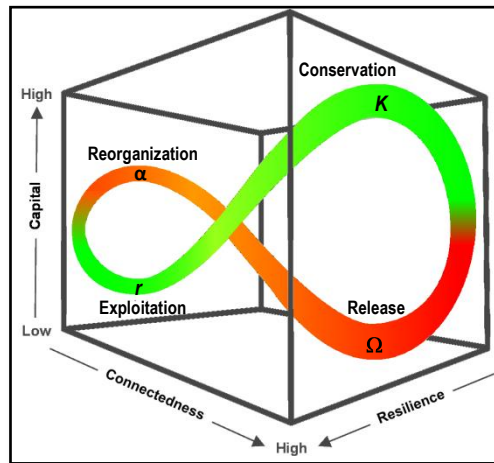
El ciclo concluye con una etapa relativamente corta de renovación y reorganización del sistema identificado como estado  $\alpha$  (Alfa) que da paso a un nuevo ciclo adaptativo y una nueva etapa de acumulación o estado  $r$  distinta. La trayectoria desde la liberación a la reorganización; (desde  $\Omega$  a  $\alpha$ ), es un periodo de rápida reorganización durante el cual pueden presentarse nuevas recombinaciones entre los elementos que pueden generar innovaciones inesperadas en el sistema en el siguiente ciclo.



Al parecer el ciclo adaptativo cumple dos funciones objetivas separadas y secuenciales: Maximiza la producción y acumulación; y Maximiza el reajuste y la innovación. No pueden cumplirse ambas al mismo tiempo; tienen que desarrollarse secuencialmente y el éxito alcanzado en el primer objetivo, inexorablemente establecerá las condiciones para lograr el segundo adoptando posiciones contrarias; crecimiento y estabilidad por un lado; cambio y variedad por otro (Holling, 2001:395).

Hasta aquí se han analizado las etapas del ciclo adaptativo desde dos dimensiones: el potencial y la conectividad; sin embargo se mencionó que son tres las propiedades emergentes en un sistema complejo que dan lugar a las dimensiones contempladas en un ciclo adaptativo: potencialidad, conectividad y resiliencia. Si agregamos la resiliencia, obtenemos un esquema del ciclo adaptativo en tres dimensiones (Fig. 1.6).

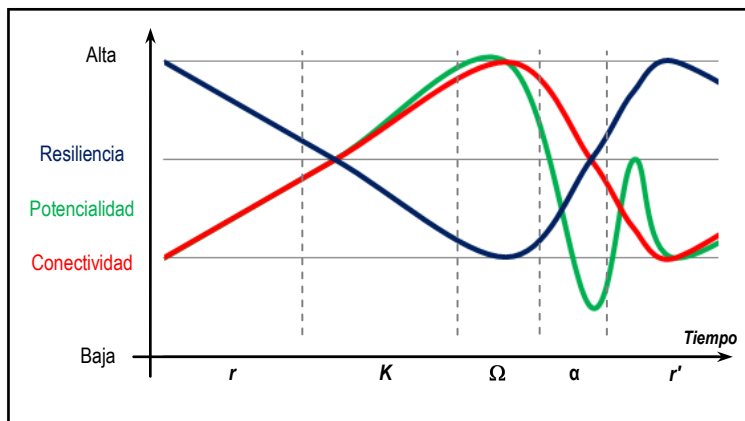
**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**



**Figura 1.6:** Dimensiones del ciclo adaptativo en los sistemas complejos. Reproducida de: *From Hierarchy to Panarchy: Hybrid Thinking's Resilient Network of Renewal*. (Gall, Nicholas. 2010:9). Gartner Research. Fuente: [http://www.gartner.com/resources/209700/209754/from\\_hierarchy\\_to\\_panarchy\\_h\\_209754.pdf](http://www.gartner.com/resources/209700/209754/from_hierarchy_to_panarchy_h_209754.pdf)

Como puede apreciarse, la resiliencia de un sistema se expande y contrae a medida que avanzan las etapas del ciclo adaptativo. Las condiciones que provocan innovación ocurren cuando la conectividad es baja y la resiliencia es alta (fase  $\alpha$ ). La baja conectividad permite que los elementos que antes estuvieron fuertemente conectados ahora se reajusten a otros en interacciones aisladas; la alta resiliencia permite probar sin mucho problema, como resultan estas nuevas combinaciones; ya que el costo de una falla sería bajo a lo largo de todo el sistema; el fruto de esto, es la condición necesaria para experimentar la creatividad. El reconocimiento de cómo la resiliencia varía a lo largo del ciclo adaptativo, genera la paradoja de conservación vs. creatividad; o lo que es lo mismo: sustentabilidad vs. cambio creativo (Holling, 2001:395).

La siguiente gráfica representa el comportamiento de las variables: potencial, conectividad y resiliencia a lo largo de las etapas del ciclo adaptativo y pretende esquematizar de una mejor manera su evolución (Fig. 1.7)



**Figura 1.7:** Evolución de la Resiliencia, Potencialidad y Conectividad en un sistema complejo a través de las etapas del ciclo adaptativo. Adaptación de: *Los territorios rurales como sistemas complejos en transición: resiliencia y capacidad adaptativa*. (Albala, 2007:137-140).

Las cuatro etapas del ciclo adaptativo se pueden relacionar a las dos grandes dinámicas de un sistema complejo: la dinámica “hacia adelante”, que es expansiva y proactiva (de la fase *r* a la fase *K*), y la dinámica “hacia atrás”, que es recesiva y retroactiva (de la fase  $\Omega$  a la fase  $\alpha$ ), (Albalá, 2007:139).

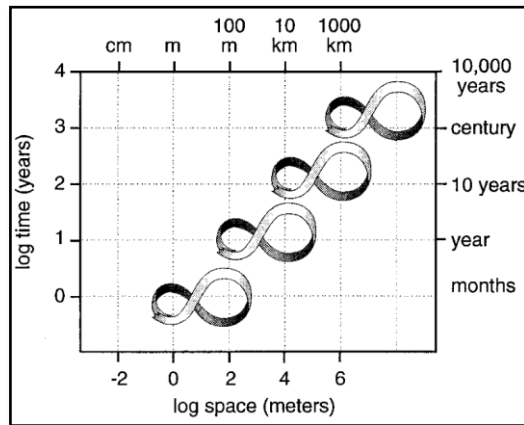
Con la discusión anterior, se ha incorporado una dimensión dinámica y temporal al marco de los sistemas complejos, sean éstos sociales, naturales o acoplados; sin embargo, para reconocer la existencia de ciclos adaptativos a diferentes escalas temporales y espaciales, es necesario complementar la discusión agregando la dimensión espacial y las interrelaciones que existen entre éstas. Holling introduce el término **Panarquía**<sup>11</sup> con el fin de considerar la naturaleza evolutiva de los sistemas complejos a través del tiempo, pero entrelazada a la vez en el espacio que ocupan.

Una panarquía es la representación de una jerarquía como un conjunto anidado de ciclos adaptativos. La función de estos ciclos y la comunicación entre ellos determinan la sustentabilidad de un sistema (Holling, 2001:394). A diferencia de la concepción tradicional de jerarquías con una línea de autoridad, al hablar de panarquías el término jerárquico se aplica a un conjunto de niveles semi-autónomos mutuamente influyentes, que comparten ciertos atributos espaciales y que evolucionan a velocidades similares (Fig. 1.8).

---

<sup>11</sup> El término **Panarquía** intenta capturar la naturaleza evolutiva de los ciclos adaptativos anidados unos a otros a través de escalas de tiempo y espacio; intenta razonar la interacción entre cambio y persistencia, entre predecible e impredecible. El termino parte de unir la imagen del Dios griego **Pan** como el arquetipo del cambio impredecible, con la noción de jerarquías a través de escalas (Holling, 2001:396).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**



**Figura 1.8:** Panarquía.  
Reproducida de:  
Understanding the Complexity  
of Economic, Ecological and  
Social Systems. *Ecosystems*  
(Holling 2001:397).

En la figura se representan tanto la escala espacial como la temporal; de modo que para cada ciclo adaptativo puede determinarse el cuándo y el dónde ocurren las etapas de cambio y adaptación. Es probable que al mismo tiempo se estén desarrollando distintos ciclos en diferentes etapas al interior del mismo sistema. Puede también observarse que los niveles superiores en la panarquía, están conformados por ciclos más lentos; que requieren siglos para concretarse; y además con un ámbito espacial mayor; de miles de kilómetros; mientras que en los niveles inferiores, los ciclos suceden más rápido, en termino de meses y se dan en ámbitos espaciales más reducidos.

Para ejemplificar; la estructura de *Individuos – Poblaciones – Comunidad biótica*, representa una panarquía en sistemas ecológicos. De manera análoga una estructura de *Individuos – Comunidades – Sociedad Local – Nación – Comunidad Internacional*; representa una panarquía en sistemas sociales; otra estructura de sistemas legales panárquicos: *Normas Administrativas – Leyes – Constitución – Tratados Internacionales*, (Cátedra de Ecología del Paisaje, 2010).

La idea de panarquía en contraposición al concepto clásico de jerarquía, es que en una panarquía la influencia es bidireccional; es decir, los procesos pequeños y rápidos que se desarrollan a una escala espacial menor, (individuos, o normas administrativas en los ejemplos anteriores) son influenciados por procesos grandes y lentos y que se desarrollan en una escala espacial mayor, (comunidad o constitución política en los ejemplos anteriores); sin embargo también los procesos pequeños

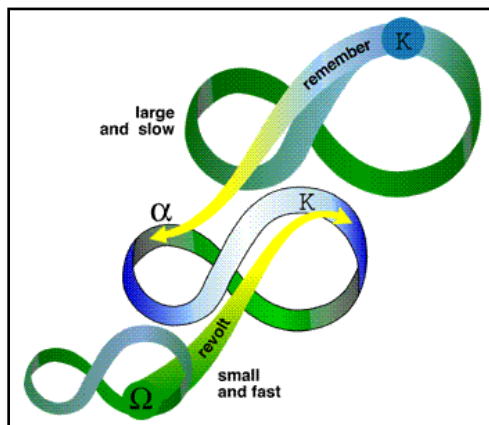


**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

---

influyen sobre los grandes haciéndolos cambiar eventualmente, (Cátedra de Ecología del Paisaje, 2010).

Existen múltiples conexiones potenciales entre las fases de un ciclo de un nivel y las fases de otro ciclo de otro nivel; pero dos de esas conexiones tienen un particular significado para la sustentabilidad; son conocidas como **revolt** (revuelta, sublevación) y **remember** (remembranza, memoria). Estas conexiones son importantes cuando se intercambia de un ciclo adaptativo a otro dentro de la panarquía (Holling, 2001:397) (Fig. 1.9).



**Figura 1.9:** Conexiones panárquicas. Reproducida de: *Panarchy. The Sustainable Scale Project. 2003.* Santa Barbara Family Foundation. Fuente: <http://www.sustainablescale.org/ConceptualFramework/UnderstandingScale/MeasuringScale/Panarchy.aspx>

La figura muestra una panarquía que incluye ciclos adaptativos en tres niveles, y se observan las dos conexiones críticas en la creación y el mantenimiento de la capacidad adaptativa del sistema. Cuando un nivel de la panarquía entra en la etapa  $\Omega$  (de liberación o destrucción creativa), el colapso puede contagiarse a un nivel superior provocando una crisis; esta situación será más probable si ese nivel mayor y más lento se encuentra en la etapa  $K$  (de conservación), porque la resiliencia es mínima y entonces el sistema es vulnerable. Este efecto **revolt** (Fig. 1.9) sugiere que eventos repentinos y a pequeña escala que suceden en un ciclo, abruma eventos más lentos y a una escala mayor que suceden en otro ciclo a otro nivel; particularmente si ese otro nivel es vulnerable.

La otra conexión relevante a través de diferentes escalas en momentos de cambio y renovación, es la remembranza o **remember** (Fig. 1.9). En el inicio de una

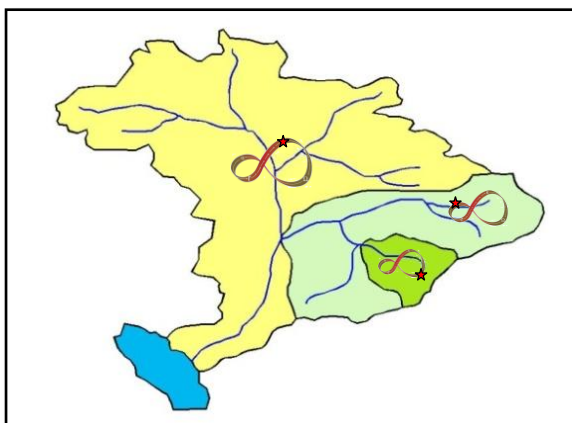
**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

---

etapa  $\alpha$ , una vez que la situación de crisis ya se ha producido, las oportunidades y las restricciones para renovar el ciclo adaptativo están fuertemente influenciadas por la etapa  $K$  de un nivel superior, más grande y más lento. Esta interacción se origina por la influencia del conocimiento previo y de las experiencias acumuladas e institucionalizadas en cada nivel de la panarquía del sistema complejo.

La panarquía representa las formas en que los sistemas, tales como los socioecológicos complejos, pueden inventar y experimentar; creando oportunidades mientras se mantienen seguros de aquellos agentes desestabilizadores. Cada ciclo en su nivel opera a su propio ritmo, protegido de un nivel superior mayor y más lento; pero vigorizado desde niveles inferiores por ciclos de innovación menores y más ágiles. La panarquía en su totalidad es creativa y conservadora y las interacciones entre los ciclos combinan aprendizaje y continuidad. Puede decirse entonces que los sistemas socioecológicos complejos existen como panarquías o conjuntos de ciclos adaptativos, interactuando a través de múltiples escalas y los efectos de estas escalas cruzadas tienen un gran significado en su dinámica.

Si consideramos una cuenca como un sistema complejo, conformada a su vez de manera jerárquica por sub-cuencas y micro cuencas, que también son sistemas complejos, podemos entonces bajo este enfoque, considerarla como una panarquía conformada de distintos ciclos adaptativos en diferentes etapas de adaptación e interconectados entre sí, y conformando entre todos la configuración global de la cuenca como un todo (Fig. 1.10).



**Figura 1.10:** La cuenca como panarquía.  
Adaptación propia de:  
*Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems.* (Gunderson y Holling, 2002:137)

En una cuenca confluyen distintos agentes de distinta naturaleza entre ellos el ser humano y por tanto la cuenca tiene una peculiaridad importante: existe una gran heterogeneidad en los intereses que tienen los agentes endógenos en el contexto del propio sistema (Lebel et al. 2006:2). Según Holling, la presencia del componente humano le confiere cualidades específicas a los sistemas socioecológicos complejos según las siguientes características (Holling, 2001:401):

- **Previsión:** La capacidad prospectiva, de anticipación y la intencionalidad en las acciones de los humanos puede reducir considerablemente e incluso eliminar el impacto de eventos dramáticos en los ciclos adaptativos de un sistema. Un rasgo característico de los sistemas complejos adaptativos, es la **auto-organización**<sup>12</sup> sin intención; y aunque los sistemas socioecológicos complejos están dominados por agentes humanos individuales quienes si tienen intención, el sistema como un todo, no la tiene (Walker et al. 2002:3).
- **Comunicación:** Herramienta fundamental que permite la transferencia ágil de ideas y experiencias, las cuales una vez validadas se almacenan en el acervo cultural, normativo y cognitivo de la panarquía que le corresponde, permitiendo su recuperación, reelaboración y aplicación en momentos críticos (conexión **remember**) (Fig. 1.9).
- **Tecnología:** Aporta un nivel de influencia importante en la acción de los seres humanos que no es comparable a la ejercida por otros animales. A lo largo de la historia de la humanidad, es clara la influencia de la tecnología en la resiliencia de los sistemas sociales; pues a medida que se ha desarrollado la tecnología en los últimos miles de años, también se ha acelerado progresivamente el cambio en las reglas y el contexto de las panarquías.

La capacidad humana para incidir en el desempeño de un sistema puede no ser intencional, pero como se indicó, estas características sin duda amplían el potencial de

---

<sup>12</sup> Los **sistemas auto-organizados**, son sistemas físicos y biológicos en los cuales los patrones y la estructura a nivel global surge exclusivamente de las interacciones entre los componentes de niveles inferiores. Las reglas que especifican las interacciones entre los componentes del sistema se ejecuta utilizando sólo la información local, sin hacer referencia a patrones globales (Camazine et al. 2003:7-8).

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.***

---

incidencia; sin embargo, esto no significa que agentes específicos dentro de un sistema puedan llegar a controlar la panarquía completa; pero la capacidad de un sistema socioecológico complejo; en este caso de una cuenca, para sobreponerse y reaccionar a las perturbaciones; depende en buena medida de la gestión que el componente social haga de los recursos al interior de la cuenca vista como sistema.

Los cambios de estado en un sistema son el resultado de una escabrosa combinación de procesos internos y de fuerzas externas. En gran medida los cambios de régimen en los sistemas naturales son causados por acciones antropogénicas que destruyen la resiliencia de los ecosistemas (Folke et al. 2004:568-569); estos cambios pueden darse por:

- a) La intensidad de la influencia ejercida; (por ejemplo la extinción de especies animales o vegetales que alteran el equilibrio de la cadena alimenticia);
- b) La transformación en el sistema (como la conversión de un ecosistema forestal natural en sistemas de pastizales y agrícolas);
- c) La adición de nuevos recursos (como la eutrofización o la invasión de nuevas especies).

El sistema natural también puede inducir perturbaciones al sistema social a través de la propia dependencia de los recursos naturales en la forma de vida y de producción de la población que habita las cuencas. La dependencia de un único recurso natural, por ejemplo, ya sea monocultivo, mineral, alimenticio, etc.; puede verse afectado por fluctuaciones en los mercados o por efecto de la contaminación o catástrofes naturales en el ecosistema. Podemos mencionar como ejemplo de esta situación, el decaimiento de la industria del henequén en el estado de Yucatán ocasionado por el advenimiento de las fibras sintéticas, además del surgimiento de cultivos de ésta planta en países como Brasil, Madagascar y Tanzania; teniendo incluso que importarse en 1989 de Brasil; cuando en 1880, el 90% de sogas y bolsas que se usaban en el mundo, eran producidas en Yucatán (Enlaces y Comunicaciones del Sureste).

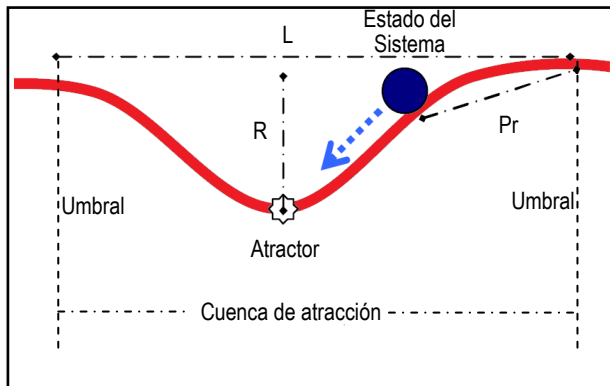
El colapso del sistema natural en un sistema socioecológico complejo, no implica necesariamente la pérdida de la resiliencia total del sistema ni la del sistema social; si bien la resiliencia del sistema social y natural están muy relacionadas, debe distinguirse entre el colapso de un sistema natural y el colapso de un sistema socioecológico, es decir, entre la extinción del recurso natural (por agotamiento o desaparición) y la extinción del sistema socioecológico en su conjunto. La extinción de un sistema socioecológico complejo implica el colapso de ambos sistemas: el social y el natural; entonces ante la amenaza de extinción del sistema natural; según el grado de dependencia, el sistema social se verá obligado a modificar sus variables clave y sus procesos internos para subsistir (Anderies et al. 2004:7).

La adaptabilidad refleja la capacidad del sistema de provocar cambios en su estado o estructura de variables y procesos con el objeto de mantener o regenerar su resiliencia. La adaptabilidad implica la transición a un nuevo estado de variables pero dentro de la misma configuración, representa la habilidad del sistema para reorganizarse como reacción ante cambios en el entorno, su capacidad de aprendizaje, su flexibilidad para experimentar y adoptar soluciones innovadoras, así como para desarrollar una multiplicidad de respuestas (Walker et al. 2002:6).

Un sistema resiliente será aquél que pueda resistir las perturbaciones recibidas, y si fuera necesario, reconstruirse a sí mismo para evitar el colapso. De acuerdo a la orientación que se pretende en nuestro trabajo, cabe preguntarse: ¿Es posible gestionar la resiliencia para determinar el futuro de un sistema?. Un sistema socioecológico complejo será resiliente si el sistema social puede prevenir el tránsito del sistema natural hacia un nuevo estado incapaz de soportar la presión extractiva de la población (Anderies et al. 2004:7). Planteado de esta manera, el énfasis para incidir en

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

la resiliencia del sistema natural se sitúa en dos aspectos: la **latitud**<sup>13</sup> y la **precariedad**<sup>14</sup> (Fig. 1.11).



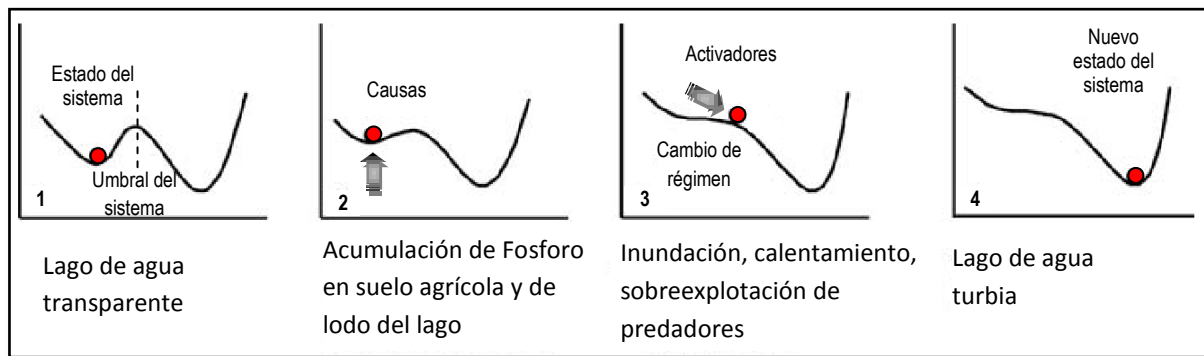
**Figura 1.11:** Latitud (L), Precariedad (Pr) y Resiliencia (R) de un sistema complejo. Adaptado de: *Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems*. (Walker et al. 2004:4,7-9).

La misión entonces del sistema social con el ser humano como el elemento principal de todo el sistema socioecológico y que se diferencia de todos los demás por su capacidad de impactar directamente con sus acciones; parece que debe ser enfocada a corregir los umbrales o límites ecológicos del sistema natural o bien alejarlo de tales umbrales. Si se toma en cuenta la capacidad de los sistemas sociales para prever eventuales amenazas y corregir su acción, entonces las variables sociales (como la “presión extractiva” mencionada anteriormente), deberían considerarse como aspectos clave sobre los que se debe incidir (Fig. 1.12).

<sup>13</sup> La **Latitud** se refiere a la cantidad máxima de perturbaciones que un sistema socioecológico complejo puede soportar antes de perder por completo su capacidad para recuperarse; es decir, la variación de los umbrales o límites del sistema, (Walker et al. 2004:7-8).

<sup>14</sup> La **Precariedad** se refiere a la proximidad del sistema, en su configuración actual, a un determinado umbral o límite. Cuanto mayor sea la precariedad del sistema, estará más próximo a un determinado umbral que lo lleve a colapsar y mayor será la urgencia para introducir cambios en el sistema que lo estabilicen dinámicamente, (Ibídem).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**



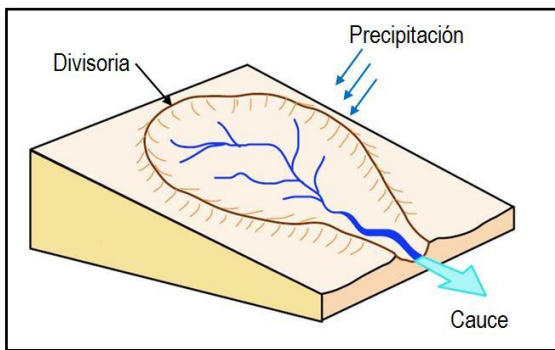
**Figura 1.12:** Pérdida de resiliencia y cambio de régimen de un sistema. Adaptado de: *Regime Shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management*. Annual Reviews. Ecology Evolution Systems. (Folke et al. 2004:568)

Para asegurar su supervivencia un sistema socioecológico complejo necesita evolucionar; esta evolución está determinada por la capacidad para resistir las perturbaciones y ajustar los valores de sus variables. Cada estado que adopta un sistema no se trata de una situación de equilibrio, sino de una configuración de valores específicos en sus variables que le brinda un estado estable temporal dinámico. El sistema transita a lo largo de distintos estados y esta transición es parte del devenir natural en cualquier sistema socioecológico complejo como parte de su subsistencia.

### **1.4 La Cuenca Hidrológica: Un sistema estructural, funcional y socialmente complejo**

Una cuenca es un concepto geográfico e hidrológico que en una primera aproximación, puede definirse como el área de la superficie terrestre drenada por un sistema fluvial bien definido proveniente de agua de lluvia, nieve o deshielo que fluye hacia una corriente principal y por ésta hacia un punto común de salida que puede ser otro sistema fluvial u otros cuerpos de agua; y sus límites están generalmente determinados por las divisorias según el relieve topográfico. (Fondo para la comunicación y educación ambiental, 2010), (Fig. 1.13).

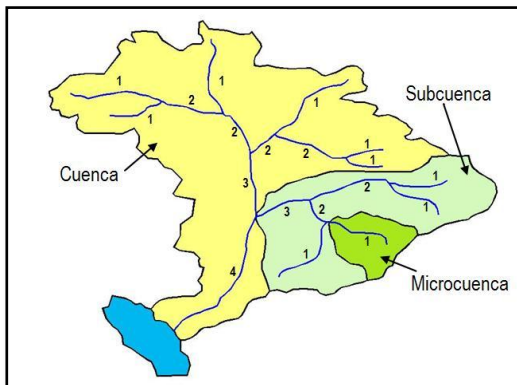
**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**



**Figura 1.13:** Cuenca. Adaptada de: *El Ciclo Hidrológico*. (Sánchez, 2004:6).  
Fuente:  
[http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Ciclo\\_hidrol.pdf](http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Ciclo_hidrol.pdf)

Existen cuencas de todos tamaños, desde unas cuantas hectáreas a miles de kilómetros cuadrados y todo punto sobre la superficie terrestre, se encuentra contenido en una cuenca.

Las cuencas son estructuras jerárquicas, es decir, territorialmente pueden dividirse en subcuencas o microcuencas, y a la vez su sistema de drenaje también está conformado por afluentes de distinto orden jerárquico, (Fig. 1.14).

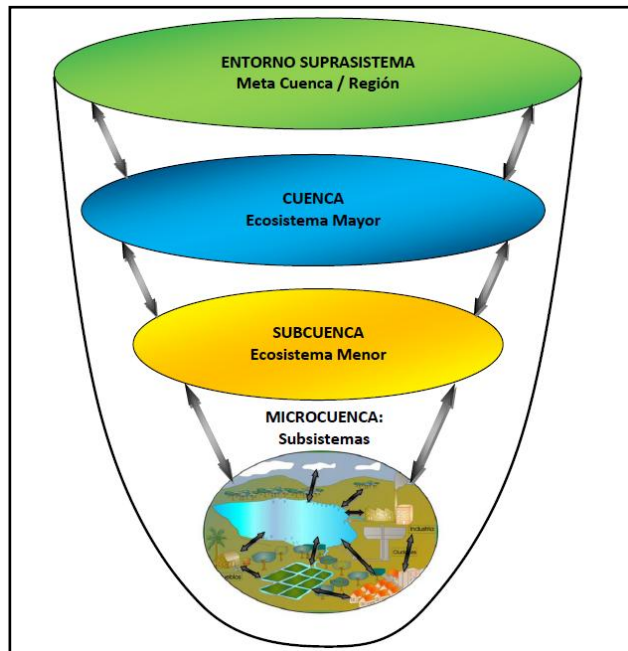


**Figura 1.14:** La jerarquía de una cuenca.  
Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de un sistema se debe a las interacciones de sus componentes, los cuales también son sistemas; en el contexto del supra-sistema mayor del cual forma parte. Kay afirma que podemos entender los sistemas desde una perspectiva **holárquica**<sup>15</sup> anidada (Kay, 2000:13) (Fig. 1.15)

<sup>15</sup> Una **Holarquía** se refiere a una versión generalizada del concepto de jerarquía tradicional; sin embargo en este caso, existe un potencial mayor de relaciones entre diferentes niveles y en ambos sentidos, a diferencia del preponderante poder ejercido de arriba hacia abajo en la jerarquía tradicional (Kay, 2000:13).





**Figura 1.15:** Area Holarchy: Nested Holons. Adaptado de: *Framing the Situation: Developing a System Description.* (Kay, 2008:23).

Bajo este contexto de **Holarquía**, la cuenca considerada como un sistema abierto es a la vez un gran **Holón**<sup>16</sup>; el cual está compuesto por holones menores contenidos en otro mayor; es decir, cada holón existe y es equivalente a un sistema que es dependiente de uno y a la vez contiene y es el contexto de otro. Con esto, cada holón limita de alguna manera el comportamiento de los holones que contiene y del holón que lo contiene, que viene siendo la misma idea de lo que se explicó del funcionamiento de una panarquía. Un ejemplo familiar de este enfoque de Kay, es el anidamiento biológico en holones de células dentro de órganos que están dentro de individuos, y estos a la vez son parte de poblaciones, dentro de especies formando comunidades, etc. (Kay, 2008:21-22).

La estructura y el funcionamiento de una cuenca son reflejo de un amplio conjunto de factores y procesos tanto topográficos, como geológicos, climáticos y bióticos. Heathcote integró una descripción de cuencas, la que denominó “*inventario de la cuenca*” (Heathcote, 1998); el cual se anexa en la Tabla 1.2.

<sup>16</sup> La palabra **Holón** fue acuñada por Arthur Koestler se refiere a algo que es un “todo” y al mismo tiempo “una parte” de algo mayor. Koestler percibe las características de la unidad/elemento de los sistemas y que plantea el término “holón” (derivado etimológicamente de “todo/parte”); como una entidad que existe en el contexto de una red anidada de los holones la cual se conoce como “holarquía” (Kay et al. 1999:724).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

**Tabla 1.2:** Inventario de factores de la cuenca que tienen especial relevancia sobre sistemas fluviales. Reproducida de: *Conceptos y técnicas de ecología fluvial*. (Pozo, J., Elosegui, A. 2009:41)

<b>Factor</b>	<b>Significado o repercusión</b>
<b>Clima</b>	Disponibilidad de agua y tipo de vegetación, escorrentía, erosión y modelado del paisaje
<b>Geología</b>	La litología determina el tipo de suelo y la composición química del agua. La estructura (fallas, pliegues,...) condiciona la distribución del agua (superficial, subterránea)
<b>Vegetación</b>	Junto con el Sustrato y el clima definen el tipo de suelo. Depende de, e influye en la cantidad de agua. Estabiliza los márgenes, favorece la diversidad de hábitats y alimenta a los ríos con materia orgánica
<b>Caudal</b>	El régimen hidrológico y la diversidad hidráulica influye sobre las comunidades acuáticas
<b>Agua subterránea</b>	Contribuye al mantenimiento de un caudal basal, la pérdida y la contaminación de los acuíferos son los problemas mas graves del agua
<b>Estética y características singulares</b>	La estética de una cuenca puede producir impactos económicos por su pérdida de interés para el turismo o recreación. También son importantes aspectos singulares como elementos geológicos o históricos
<b>Sistemas sociales y económicos</b>	Son parte integral del ecosistema cuenca, que afectan y son afectados por la salud de los ríos. Comprenden acciones económicas y actitudes a la hora de gestionar la cuenca

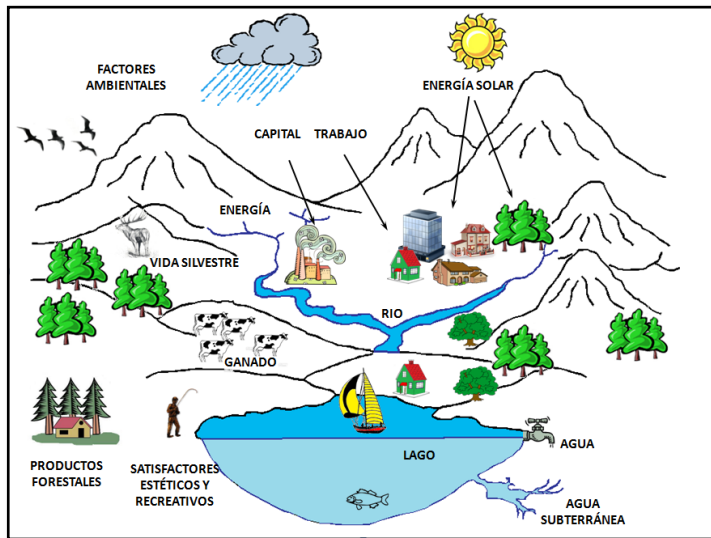
Como se observa en la tabla anterior, Heathcote no solo toma aspectos tradicionales estudiados desde distintas disciplinas, incluyendo a la geomática; tales como clima, geología, vegetación, etc., sino que va mas allá, incluyendo la estética y características de las cuencas que tiene que ver con el paisaje; y principalmente incluye en su clasificación a los sistemas sociales y económicos lo abre una nueva ventana con nuevas posibilidades de encontrar nuevas conexiones y nuevas líneas de investigación que pueden llegar muy lejos en su estudio desde la geomática.

La primera aproximación estructural sobre la definición de una cuenca que fue explicada anteriormente, puede complementarse si ahora consideramos todos los elementos que se encuentra al interior de la misma y además considerando las interacciones y flujos continuos de energía, materia e información que existen entre ellos y que mantienen a la propia cuenca como sistema, en un estado de equilibrio dinámico. Desde esta perspectiva puede entonces decirse que una cuenca es un área de drenaje de la superficie terrestre, limitada por las líneas divisorias según la topografía del territorio, ocupada por poblaciones de especies vegetales y animales (sistemas naturales), incluyendo al ser humano (sistemas sociales), acoplados y en constante interacción entre sí, compartiendo recursos, agua, suelo y aire. (FAO, 2007).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

---

La cuenca es desde este punto de vista, un espacio ecológico y social producto del conjunto de relaciones e interacciones entre procesos biofísicos y sociales de apropiación y uso de los recursos naturales contenidos dentro del espacio territorial de la cuenca, (Fig. 1.16).



**Figura 1.16:** La cuenca como un espacio ecológico y social resultado de múltiples interacciones.  
Fuente: Elaboración propia.

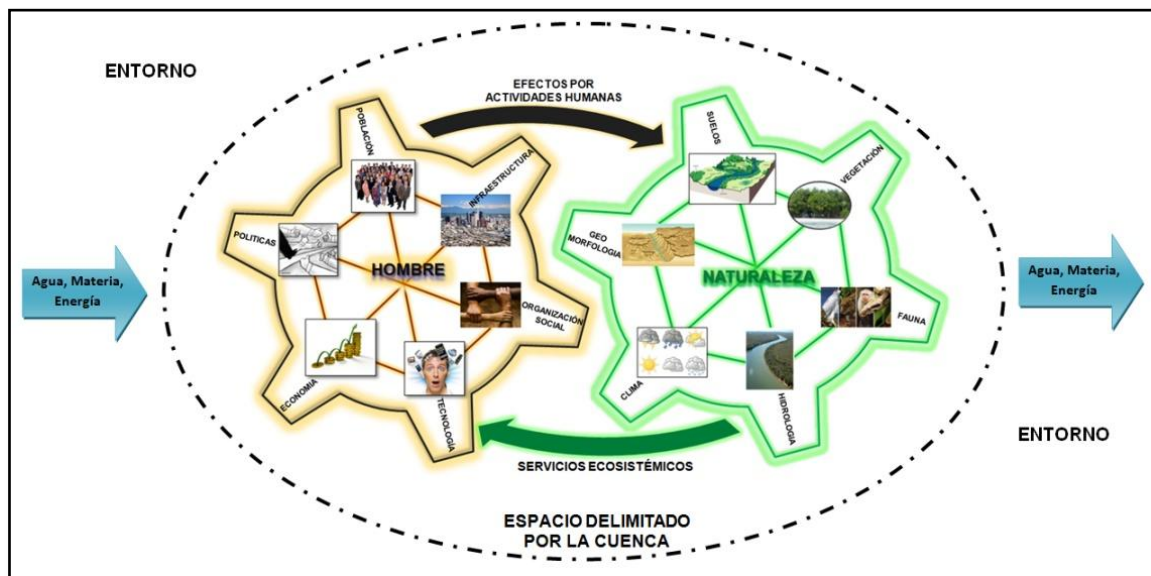
La cuenca es pues, un sistema de captación y concentración de aguas superficiales en el que interactúan los recursos naturales y los asentamientos humanos dentro de un complejo de relaciones, donde los recursos hídricos aparecen como factor determinante. Como territorio, la cuenca facilita la relación entre sus habitantes, independientemente de si éstos se agrupan allí en comunidades delimitadas por razones político-administrativas, o debido a su dependencia común a un sistema hídrico compartido, o por aprovechamiento de las vías de comunicación, etc. (García, 2002:1).

La cuenca, sus recursos naturales y sus habitantes, poseen connotaciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que le confieren características peculiares. En zonas cordilleras y de altas montañas, las cuencas son ejes naturales de comunicación y de intercambio económico ya sea a lo largo de los ríos, o a lo largo de las cumbres; en las cuencas de valles y de grandes descargas de agua, el eje fluvial

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

funge también como una zona de articulación entre sus habitantes (Dourojeanni et al. 2002).

En la cuenca se estructuran múltiples relaciones entre factores naturales y humanos en un espacio que es históricamente delimitado por el poblamiento y la utilización social del espacio; es un sistema organizado de relaciones complejas tanto internas como externas (Arias y Duque 1992, citados por García, 2002:2). Desde este punto de vista, la cuenca es un sistema contenido dentro de otro sistema (entorno o ambiente) constituido también por las interacciones entre otros subsistemas (biofísico, social, económico, etc.), (Fig. 1.17).



**Figura 1.17:** Representación de la cuenca como un sistema socioecológico complejo.  
Fuente: Elaboración propia.

Bajo este enfoque, es un reto explorar las ligas entre ecosistemas y sociedad en el contexto del espacio físico de la cuenca; definidas por el movimiento del agua sobre y a través del suelo. La definición de los límites de una cuenca puede ser a conveniencia y a distintas escalas de modo que se cubra la organización social y los procesos ecológicos que se dan al interior de la cuenca (Parkes et al. 2008:11).

De manera tradicional, los estudios y planes relativos a la gestión de recursos o al desarrollo regional, están relacionados con marcos espaciales establecidos por la

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

---

forma de administración humana, organizados en municipios, zonas, regiones, estados, etc.; sin embargo estos límites político-administrativos adecuados para la gestión de aspectos como el urbanismo o la economía, por lo regular no coinciden con la estructura de los ecosistemas naturales y cuando se pretende gestionar el medio ambiente a partir de estos límites, se crea una ruptura entre el objeto de gestión y los procesos biofísicos que se desarrollan en los ecosistemas. En consecuencia, no será esta definición político-administrativa de espacios territoriales, la manera óptima de gestionar el medio ambiente y sus recursos naturales.

Una mejor manera de afrontar la gestión de recursos naturales, sería reconocer a las cuencas como las unidades espaciales idóneas para organizar la gestión de los recursos naturales; pues bajo este enfoque sistémico, será posible ver a una cuenca como un todo integrado en un paisaje complejo; sin embargo, es muy pertinente reconocer que esto no siempre es posible; pues en proyectos multidisciplinarios, casi siempre, -si no es que siempre-; se requiere de la aportación de recursos por parte de autoridades, las cuales operan bajo marcos espaciales distintos a los de una cuenca y están limitadas a éstos para la gestión del recurso. No obstante lo anterior, considero que es posible que especialistas, sociedad y autoridades involucrados en proyectos de este tipo, sean capaces y estén dispuestos a aportar distintos elementos desde distintas disciplinas y distintos marcos de conocimiento; a fin de conformar un nuevo marco espacial referencial construido de manera colectiva por todos los participantes, lo cual sería un verdadero ejercicio de transdisciplina.

Para Delgado, “...el territorio ha de ser considerado como un ‘todo’ aglutinador de los diferentes recursos existentes y se debe tratar de implementar estrategias de calidad e innovación para valorizar estos recursos...” (Delgado, 2004: 79). Esta idea enfoca al territorio como un “todo”; sin embargo la percepción de Delgado del espacio pareciera ser mas bien como un “contenedor”; esta definición excluye las interacciones entre los elementos; por lo que podemos partir de tal referencia del territorio, pero complementarla e intentar proponer una idea de territorio; si como un “todo”; un espacio físico delimitado de algún modo; pero cuya función no se limita a contener los distintos

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.***

---

elementos; sino que debe reconocerse su participación en la integración e interacción de los distintos elementos; creando redes de múltiples conexiones y dando lugar a distintos procesos, flujos de materia y energía y nuevas combinaciones que dan lugar a emergencias. Esta idea de territorio nos brinda la posibilidad de concebir a las cuencas como sistemas integrados por agentes, recursos y procesos resultantes de las interrelaciones entre ellos; cuyo desempeño como partes de un sistema, se dan bajo la Teoría General de Sistemas, la Teoría de la complejidad y la Cibernética de primer y segundo orden.

Cabe resaltar que el factor humano conformado como un sistema social es a la vez uno de los más importantes agentes que introduce perturbaciones al sistema natural de cuenca. Con esta aproximación de una cuenca como un sistema, dos aspectos resultan fundamentales: las interrelaciones entre agentes y recursos, y las reglas (de cualquier tipo que éstas sean), que gobiernan estas interrelaciones.

La mayoría de las aguas en circulación está muy lejana de encontrarse en situación prístina, por lo que los procesos que ocurren en los cauces están condicionados por las modificaciones que introduce el hombre en la cuenca. Como es obvio, el grado de alteración depende del nivel de actividad humana a través de las acciones ligadas a la agricultura, la ganadería, la explotación forestal y sobre todo, al desarrollo urbano e industrial. Estos usos del territorio modifican las características físicas y químicas, tanto de los cauces como de las aguas, influyendo fuertemente en la biota y en el funcionamiento de los sistemas fluviales, (Tabla 1.3). Las perturbaciones generadas en las zonas altas de una cuenca repercuten invariablemente río abajo, lo cual reafirma la idea de la cuenca como un Sistema integral, y además reafirma también la necesidad de estudiar el río en el marco de su cuenca (Hynes, 1975:1-15).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

**Tabla 1.3:** Actividades humanas y principales efectos en una cuenca. Reproducida de: *Conceptos y técnicas de ecología fluvial*. Pozo, J. Elosegui, A. 2009:43

Actividad	Efecto
<b>Empleo de fertilizantes</b>	Eutrofización
<b>Fuego y pastoreo</b>	Erosión, aumento de sedimentos
<b>Residuos ganaderos y agrícolas</b>	Elevada demanda de oxígeno
<b>Construcción de pistas</b>	Aumento de materiales en suspensión tras las lluvias
<b>Tala y extracción de madera</b>	Cambios en escorrentía, sólidos en suspensión, luz incidente, temperatura de agua, nutrientes, entradas de hojarasca...
<b>Plantaciones forestales</b>	Cambios en cantidad y calidad de entradas de hojarasca y en productividad Cambio en estructuras retentivas y en disponibilidad de hábitats
<b>Vertidos urbanos e industriales</b>	Pérdida de calidad de agua y disminución de la biodiversidad
<b>Embalses</b>	Cambios en los regímenes hidrológico y térmico, características químicas y sedimentos, barreras a la dispersión
<b>Canalizaciones</b>	Pérdida de hábitats

Como puede observarse, todos estos procesos han incrementado sustancialmente la erosión y la pérdida de capacidad de regulación hidrológica de las cuencas y con ello se ha propiciado la desestabilización geológica, acelerada por el calentamiento global y los eventos pluviales más drásticos que se derivan de éste y que acaban acumulando en un corto periodo de tiempo una cantidad importante de **entropía**<sup>17</sup> en las zonas bajas, ocasionando que el sistema socioecológico total reaccione, buscando nuevamente restablecer un estado estable a través de su propia adaptación y regulación. Muchas veces estas reacciones del sistema natural son impredecibles como por ejemplo inundaciones que afectan a la población (sistema social).

En respuesta a estas situaciones adversas, generalmente se opta por soluciones parciales mediante obras de ingeniería, con lo cual se generan mayores tensiones sobre el sistema, ya que en lugar de estabilizarse, éste se ve inmerso en fases aún más caóticas de funcionamiento, cuyos efectos permanecen imperceptibles por cierto

<sup>17</sup> El segundo principio de la Termodinámica afirma que: Todos los cambios físicos o químicos tienden a evolucionar en la dirección en la que la energía útil experimenta una degradación irreversible hacia una forma de energía al azar y desordenada (Melo y Cuamatzi, 2007:11). La **entropía**, es una medida de la forma en que la energía útil del sistema se disipa en formas inútiles. El término aquí se usa bajo el contexto de que los ecosistemas siguen las leyes de la termodinámica de los sistemas abiertos las cuales especifican que pueden aumentar la entropía negativa y evolucionar hacia un estado de organización más complejo (Dajoz, 2001:280).

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.***

---

tiempo; creando solo la ilusión de que se ha logrado controlar el problema. Este es el caso típico de la construcción de presas en los ríos, que al final no logran evitar las inundaciones que motivaron su construcción inicial; pero además los procesos de transformación de hábitat que convergen en los sistemas acuáticos, causan el colapso de sistemas pesqueros en los ríos y al final en las áreas marinas. Tal es el caso de la monumental obra de las tres gargantas en China, el mayor proyecto hidroeléctrico del mundo; donde en 2007 se reconoció por primera vez un efecto “adverso” en un área de 600 kilómetros cuadrados que rodea a la presa con contaminación y corrimientos de tierra ocasionados por el enorme peso del agua junto con las fluctuaciones del nivel hídrico que erosionan las riberas del río Yangtsé (adnmundo - EFE, 2007).

La degradación de estos sistemas hidrobiológicos implica un grave incremento de los costos en la prestación de servicios públicos, en la seguridad alimentaria de las poblaciones ribereñas y como consecuencia adicional de los desastres ambientales asociados a la inestabilidad sedimentaria, graves implicaciones en la prevención y tratamiento de epidemias.

Esta tipificación de la conectividad transescalar de los sistemas socioecológicos complejos es difícil de entender mediante investigaciones o datos aislados, ya que requiere de una visión extensa tanto en tiempo como en espacio para vincular los numerosos factores involucrados y las formas en que éstos se relacionan; si bien es posible tener una visión de cuenca como un escenario complejo donde el uso sostenible, la conservación y el conocimiento deberían jugar un papel fundamental para su gestión; no se ha tenido la capacidad de construir una interpretación integrada de los fenómenos naturales y sociales que se manifiestan al interior de la misma. Ante esta situación se hace indispensable un cambio de visión en el estudio de cuencas, retomando un enfoque sistémico; y más aún, considerando a una cuenca como un sistema socioecológico complejo, como un sistema hombre-naturaleza acoplado; en el cual se presenta una dinámica que pasa por fases de ciclos adaptativos. Tenemos pues la necesidad de abandonar la idea de gestión del medio ambiente como objeto exclusivamente biológico y patrimonio de las ciencias naturales, y reconocer que tanto



la producción de conocimiento como las decisiones de preservación, uso o restauración se producen por los más diversos actores de la sociedad, quienes deben ser integrados explícitamente como interlocutores legítimos en la gestión de la biodiversidad en general y para el caso del presente trabajo, de las cuencas en particular; puede aseverarse pues, al igual que en el medio ambiente en general; en una cuenca, bajo un enfoque sistémico, todo de alguna manera está relacionado con todo y todo depende a la vez de todo.

## **1.5 Paisajes Hidrológicos**

El paisaje desde la visión de la ciencia moderna, es una entidad creada por el trabajo mutuo de la organización viviente (incluidos los seres humanos) y no viviente (procesos físico-químicos) de la naturaleza sobre una parte reconocible de la superficie terrestre. El patrón de un paisaje es una mezcla de factores naturales y antropogénicos en un espacio dado y es el resultado de complejas interacciones de procesos físicos, biológicos y humanos (Farina, citado por Toledo, 2006:160).

Los paisajes son sistemas integrados por múltiples componentes en mutua interacción cuya dinámica no puede entenderse estudiando las partes de manera aislada; los paisajes son sistemas complejos conformados por subsistemas que a la vez son complejos. Un enfoque moderno del estudio de paisajes debe considerar no solo las características físicas como la topografía o la cobertura de suelo, sino también los componentes humanos y biofísicos que interactúan mutuamente, además de los procesos que en conjunto dan lugar al estado presente, pasado y futuro del paisaje. De acuerdo a la perspectiva de complejidad, los patrones y procesos a escala de paisajes surgen a partir de dinámicas colectivas y ciclos de retroalimentación entre estos muchos componentes; de modo que un paisaje puede ser visto como un sistema complejo de múltiples entidades en constante interacción cuyas dinámicas están acopladas a través de múltiples escalas espaciales, temporales y organizacionales. Los paisajes exhiben emergencia, auto-organización, heterogeneidad, adaptabilidad e incertidumbre; es decir

***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.***

---

características típicas de todos los sistemas complejos (Parrot, 2009:2). Sus trayectorias son dinámicas y dependen de eventos históricos que influyen de manera importante en la definición del futuro como sistema. Muchos paisajes son altamente susceptibles a cambios de régimen, reorganización estructural o espacial, como una respuesta a cambios internos o factores externos (Folke et al, 2004:559).

El énfasis de la ecología del paisaje está claramente enfocado a paisajes terrestres; sin embargo la ecología del paisaje tiene mucho que ofrecer y quizás más aun por aprender de los sistemas acuáticos; especialmente de los ríos. Los sistemas ribereños están gobernados por flujos de agua y debido a su densidad y viscosidad, el agua es un agente mucho más efectivo integrando los elementos del paisaje hidrológico a diferentes escalas; lo que en el caso de los paisajes terrestres es el aire; por consiguiente, los ríos y arroyos deben ser escenarios de estudio ideales para los ecologistas del paisaje (Wiens 2002:502).

El estudio de Paisajes Hidrológicos, se refiere a un marco teórico que parte por reconocer que los resultados obtenidos en estudios medioambientales de gestión de recursos hídricos, aplicando los marcos conceptuales conocidos y usando la información espacial disponible, podrían tener mejores resultados y mayores aplicaciones, si como parte de la información utilizada pudiera considerarse: la localización, el movimiento y las características químicas del agua. Winter establece que es necesario contar con un marco que considere el sistema hidrológico completo; que permita considerar el movimiento del agua tanto superficial como subterránea; y permita saber cómo interactúan entre ellas y cómo son afectadas por el clima (Winter, 2001:335). En suma: se trata de saber cómo funciona el sistema hidrológico en los distintos paisajes de una cuenca y cómo dicho sistema define los rasgos que caracterizan sus distintos paisajes (Toledo, 2006:194).

Los paisajes hidrológicos representan distintas unidades estructurales y procesos de un sistema fluvial y expresan la distribución heterogénea en el espacio y el tiempo, de los múltiples bienes y servicios ambientales de los ecosistemas de una cuenca. Esta

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.**  
**Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.**  
**Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

---

visión holística que abarca en un todo, las aguas superficiales, subterráneas y los corredores fluviales como componentes en interacción de los paisajes de una cuenca hidrológica, ha sido crucial para el desarrollo de un marco conceptual de los ríos como hidrosistemas (Ward y Tockner 2001:807). Si a esto consideramos que en el espacio cubierto por una cuenca, además del sistema fluvial se consideran todos los ambientes naturales tanto acuáticos como terrestres y además se incorporan los aspectos culturales existentes al interior; se concluye entonces que los paisajes de una cuenca son auténticos integradores y centros de organización de todos los paisajes terrestres (Naiman y Bilby 1998:1-3).

Una cuenca hidrológica es una de las más eficientes formas de organización de la naturaleza; es una porción de la superficie terrestre que capta agua de las precipitaciones, la retiene en los componentes acuáticos y terrestres de sus paisajes, la libera a la atmósfera a través de la evapotranspiración de sus biomas terrestres, y la distribuye a través de su red de drenaje. (Petts y Amoros 1996:13); en este sentido, la estructura de la cuenca determina los patrones de sus paisajes, determinados especialmente por dos componentes que tienen una influencia decisiva sobre los movimientos y la calidad del agua: la distribución y variaciones de la cubierta vegetal, y los usos del suelo. Adicionalmente, los patrones de vegetación están influenciados por factores bio-geográficos como el clima, la topografía, los suelos y la geología; mientras que los patrones de uso de suelo los determinan las apropiaciones humanas del espacio al interior de la cuenca, tales como: usos urbanos, usos agrícolas, comunicaciones, ganadería, silvicultura, actividades extractivas, etc.; mismas que a la vez definen sus paisajes culturales (Toledo, 2006:176-177).

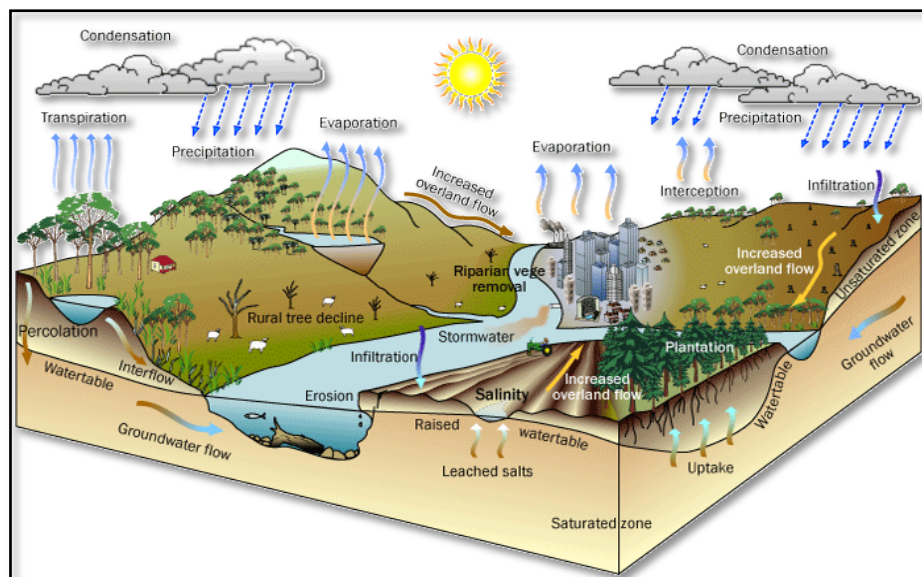
El concepto de paisaje hidrológico se basa en la idea de que el hidrosistema fluvial interactúa con un único rasgo fisiográfico simple; el cual llega a ser el bloque básico de construcción de todos los paisajes hidrológicos. Este rasgo fisiográfico se denomina **unidad fundamental del paisaje hidrológico**; y está definido por:

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**

1. Su superficie de suelo; desde una zona de tierras altas hasta una zona de tierras bajas adyacentes separadas por una zona intermedia de pendiente;
2. Su marco geológico y;
3. Su marco climático establecido.

El sistema hidrológico de una unidad fundamental de paisaje hidrológico consiste en:

1. El movimiento de aguas superficiales, el cual es controlado por las pendientes y permeabilidad de las superficies de la unidad hidrológica de paisaje;
2. El movimiento de aguas subterráneas, el cual es controlado por las características hidráulicas del marco geológico de la unidad hidrológica de paisaje y;
3. El movimiento de aguas atmosféricas, con intercambios entre la unidad hidrológica de paisaje y su clima controlado, (Winter 2001:336) (Fig. 1.18).



**Figura 1.18:** Unidad fundamental de paisaje hidrológico. Ilustración del movimiento general de aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas atmosféricas.

Reproducido de: *Hydrological cycle and land use impacts*. State of Tasmania 2009. Catchment Land Use Activities.

Fuente: <http://soer.justice.tas.gov.au/2009/wat/3/issue/92/index.php>

Luego entonces, una unidad fundamental de paisaje hidrológico está determinada por tres factores críticos:

1. La fisiografía, que permite cuantificar los efectos de la gravedad sobre el movimiento del agua a través de un paisaje;
2. La geología, que permite estimar la permeabilidad del suelo y del sustrato geológico, y los procesos que afectan a los flujos superficiales, la infiltración y los flujos subterráneos y;
3. El escenario climático.

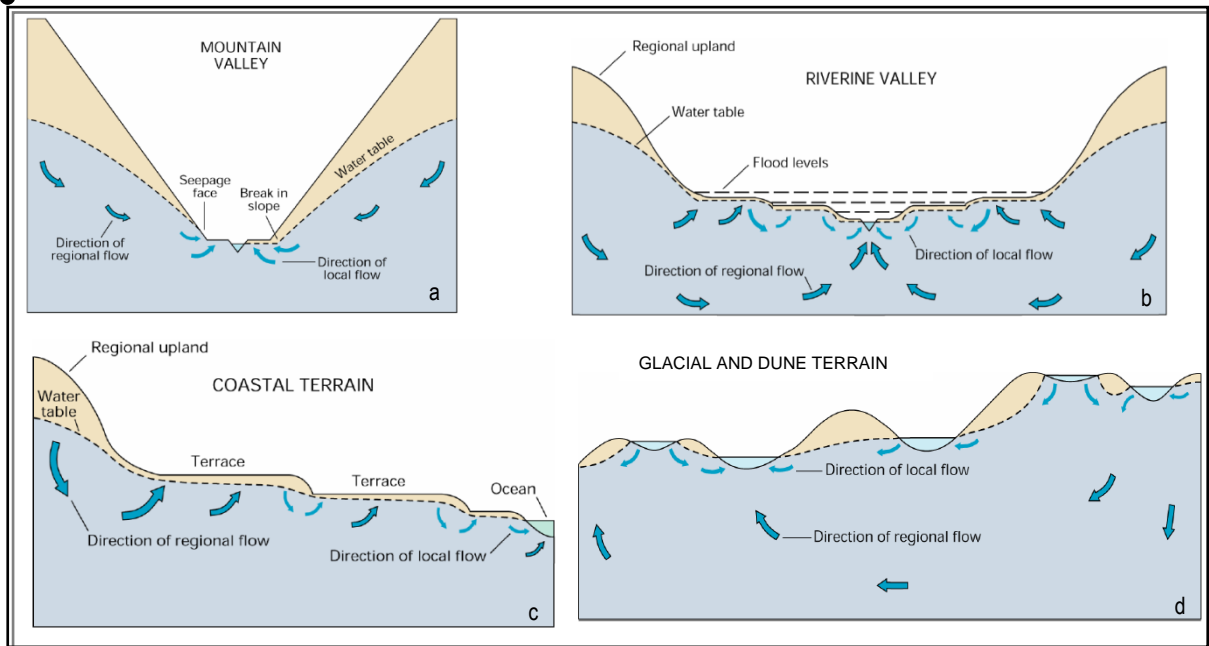
Estos tres factores determinan los movimientos del agua en un paisaje hidrológico: sus flujos superficiales, subterráneos y atmosféricos; y el intercambio del agua entre el subsuelo y la superficie con la atmósfera, afecta el movimiento del agua. La precipitación y la evapotranspiración controlan la distribución, tiempo y magnitud de los flujos superficiales y subterráneos, además de la recarga y descarga de los acuíferos. Estos procesos de precipitación y evapotranspiración en combinación con los controles geológicos en la distribución de la infiltración, pueden causar condiciones diferentes de flujos haciéndolos extremadamente variables (Toledo, 2006:194-196).

Los flujos superficiales de una unidad de paisaje dependen de la pendiente del terreno; estos serán más rápidos en zonas de mayor pendiente y sus tasas con respecto a la infiltración dependerán de la permeabilidad de los suelos y de los sustratos rocosos superficiales. Las características geológicas de un paisaje hidrológico representan otro factor que afecta las dimensiones y rutas de los flujos del agua subterránea. El movimiento del agua y los procesos geoquímicos interactúan en el suelo y el sustrato rocoso y difieren sustancialmente entre diferentes tipos de unidades geológicas; las variaciones en el sustrato se manifiestan en diferentes permeabilidades que actúan sobre la distribución de la filtración hacia las áreas de recarga. El agua subterránea interactúa con la superficial en prácticamente todos los paisajes, desde pequeños torrentes hasta grandes valles fluviales (Winter 2001:337).

El concepto de paisaje hidrológico se basa en el supuesto de que ciertos patrones comunes de los flujos de aguas superficiales y subterráneos, de los intercambios entre ellos y con los flujos atmosféricos, pueden caracterizar diferentes paisajes hidrológicos a nivel de una cuenca o de una unidad fundamental de paisaje hidrológico. Paisajes con características fisiográficas, geológicas y climáticas similares tendrán comportamientos semejantes de sus flujos de agua. De modo que los paisajes hidrológicos pueden concebirse como una variación de múltiples unidades de paisajes hidrológicos individuales; entre las cuales las características de tamaño, pendientes, relieve topográfico, etc., pueden ser distintas; y sin embargo estar integradas en un solo paisaje o bien en una unidad de paisaje de mayor escala. Las distintas configuraciones posibles de paisaje pueden ser usadas para definir tipos generales de paisajes hidrológicos que describen la mayoría de los rasgos fisiográficos de la tierra (Winter, 2001:338-341):

1. Un paisaje hidrológico conformado por una zona angosta de tierras bajas, separada de las tierras altas por un valle elevado, es característico de un terreno montañoso (Fig. 1.19a).
2. Un paisaje hidrológico conformado por una o más unidades de paisaje en forma de terrazas anidadas dentro de una zona inferior amplia, es característico de valles ribereños y terrenos costeros (Fig. 1.19b y 1.19c).
3. Un paisaje hidrológico conformado por numerosas unidades de paisaje individuales superpuestas tanto en zonas altas como zonas bajas de unidades de paisaje de mayor escala, es característico de zonas de glaciares o dunas (Fig. 1.19d).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.**



**Figura 1.19.** Diferentes paisajes hidrológicos. Adaptado de: The concept of hydrologic landscapes. *Journal of the American water resources association*. (Winter, T.C. 2001:340).

- a) Terreno Montañoso.
- b) Grandes Valles ribereños con terrazas.
- c) Planicies Costeras con terrazas.
- d) Zona de glaciares y dunas.

En resumen; los flujos atmosféricos caracterizados por el escenario climático; los flujos superficiales caracterizados por la fisiografía (hypsometría, relieve y pendiente); y los flujos subterráneos caracterizado por la estructura geológica (propiedades hidráulicas de las diferentes unidades); constituyen los componentes básicos del sistema hidrológico que definen a la vez los paisajes hidrológicos complejos que se presentan en una cuenca (Toledo, 2006:196).

El concepto de paisajes hidrológicos nos brinda un marco teórico adecuado para establecer hipótesis relacionadas con el movimiento de aguas en una cuenca, el cual es un fenómeno fundamental en muchos de los temas ambientales que tienen que ver con el suministro y la calidad del agua; de manera que este marco puede apoyar en la evaluación de variables físicas, químicas o biológicas relacionadas con procesos ya sean naturales o inducidos por el ser humano, además puede apoyar en el diseño de estudios, recolección de datos, síntesis de información y comparaciones de resultados de distintas investigaciones (Winter, 2001:348).

Además de lo anterior, el estudio de los paisajes hidrológicos, puede aplicarse a la planificación del paisaje como un proceso orientado a regular las transformaciones que se dan en los espacios ocupados en la cuenca como sistema socioecológico complejo; procesos de generación y ejecución de estrategias de usos múltiples, basadas en la resiliencia de sus ecosistemas y en la armonización de las interrelaciones entre las poblaciones y su medio ambiente. El reto en esta planificación es diseñar estrategias que permitan la articulación óptima de patrones estructurales de los paisajes, capaces de mantener sus funciones ecológicas, y cuyos usos múltiples sean, a la vez, compatibles con estas estructuras y funciones. En esta planificación, el paisaje se reconoce como una interfaz entre los procesos biofísicos y sociales y su principal atributo es su dimensión espacial. La planificación, apoyada en la ecología de paisajes, los trata como entidades espaciales totales y como entidades funcionales de sistemas naturales y sociales (Van Langevelde, Lefebvre citado por Toledo, 2006:191-192).

En el contexto de los paisajes, la interrelación entre la sociedad y su medio ambiente toma en cuenta tres dimensiones espaciales: espacios físicos, espacios de representación y espacios imaginarios (Lefebvre citado por Toledo, 2006:192). El espacio físico es el lugar donde ocurren los procesos naturales y sociales y éstos pueden ser cuantificados por parámetros tales como superficie, volumen, dirección, patrón, forma, distancia, etc. Para el caso de una cuenca; esta caracterización de patrones, apoyados en la teoría de paisajes hidrológicos de Winter, debería considerar no solo los flujos superficiales; sino también los subterráneos y atmosféricos para determinar al paisaje realmente como un todo en el proceso de planificación.

Los espacios de representación e imaginación son los significados que la población da a sus paisajes. La representación del espacio comprende todos los signos, códigos, conocimientos y significados acumulados por una cultura; la propia planificación como ejercicio transdisciplinario, tiene distintas representaciones espaciales de los paisajes de acuerdo con cada disciplina. Los espacios imaginarios son invenciones de nuevas posibilidades de prácticas espaciales; de modo que la



***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 1 – La Cuenca como Sistema Socioecológico Complejo.***

---

imaginación de los espacios, es el dominio por esencia de la planificación de los paisajes (Van Langevelde, citado por Toledo 2006:192-193).

# **Capitulo 2**

## **La Modelación del Espacio**

## **2. La Modelación del Espacio**

La concepción de la geografía como la ciencia que busca explicar la variación espacial de los fenómenos que se dan sobre la superficie, (Stoddard, 1982 citado por Delgado, 2003:36), pone en claro que el ámbito de esta disciplina se reduce como espacio concreto a la superficie terrestre; y que los problemas que se deben afrontar tienen que ver con la distribución de todo tipo de fenómenos que se dan sobre dicho espacio. De esta forma, si la distribución espacial de un fenómeno puede cartografiarse, entonces es susceptible de ser estudiado geográficamente y su distribución espacial se puede explicar en relación con otras distribuciones espaciales de fenómenos relacionados, mediante la aplicación de teorías abstractas que reflejen su ocurrencia en el mundo real (Delgado, 2003:36).

Hoy existe especial interés en asuntos relacionados con la organización espacial, es decir, con la forma en que los individuos y las sociedades organizan el espacio para ajustarlo a sus necesidades (De Souza, 1992 citado por Delgado, 2003:42); esta situación provee un marco apropiado para analizar e interpretar las decisiones de localización y de movimiento, al igual que las estructuras espaciales relacionadas con patrones de apropiación y uso del suelo, localización de fuentes de trabajo, de asentamientos humanos, etc. Agencias encargadas de planificar o empresas interesadas en optimizar el rendimiento de capital, demandan conocimientos de esta naturaleza; y la geografía trata de responder con estudios que se apoyan en la recopilación, análisis y cuantificación de datos; experimentación y modelaje aplicando un amplio rango de técnicas (Delgado, 2003:42).

La mayoría si no es que todas las decisiones de gestión, están afectadas por la configuración del espacio en el entorno (paisaje) y además estas decisiones tienen casi siempre un impacto en el mismo. Autoridades toman decisiones sobre infraestructura y uso de suelo que afecta directamente al espacio; campesinos toman decisiones sobre qué, cómo, cuándo y dónde cultivar; que afectan y son afectadas por el paisaje; empresarios toman decisiones sobre conductas de negocios que afectan y son

afectadas también por el espacio. Entender y modelar los patrones y cambios que se dan en el espacio a través del tiempo a diferentes escalas, es un factor clave en el desarrollo de estudios territoriales. La dimensión espacial juega un papel clave en muchos fenómenos sociales; los elementos se distribuyen de manera desigual a través del espacio, creando heterogeneidad, segregación y discontinuidad espacial; sin embargo existe una relación directa entre la organización de una sociedad y la configuración de su espacio (Sanders, 2007:xv).

Esencialmente, un modelo es una representación de la realidad, éstos son simplificaciones y generalizaciones de las que parecen ser las más importantes características del mundo real. Son una abstracción de la realidad y como tal, es utilizada para tener una mayor claridad conceptual, para reducir la variedad y la complejidad del mundo real a un nivel que sea posible entender y explicar claramente. El valor de un modelo es que puede ser usado para mejorar nuestro entendimiento de la manera en que un sistema se comporta bajo ciertas condiciones en donde no es posible construir o experimentar con situaciones del mundo real (Lee, 1971:7).

Los modelos pueden ser una teoría, una ley, una hipótesis o una idea estructurada; pueden ser una función, una relación o una síntesis de datos. En todos los casos, deben servir para razonar sobre el mundo real y su aplicación obedece a una necesidad de idealización y de simplificación que facilite su entendimiento. Tales modelos se asumen como estructuraciones esquemáticas de la realidad que presentan en forma generalizada, facetas y relaciones simplificadas de la misma; son aproximaciones inexactas, altamente selectivas y subjetivas, pero realzan los aspectos fundamentales del fenómeno estudiado y desechan los detalles sin importancia. Por consecuencia, los modelos deben ser de carácter especulativo y sugestivo y lo bastante simples para que se puedan manejar y comprender con facilidad (Chorley y Hagget, citados por Delgado, 2003:40).

Modelar la dinámica espacial puede tener diferentes significados: puede consistir en simplemente describir cambios particulares del espacio tan claramente como sea

posible, o bien ante la evolución observada de algún fenómeno particular, el modelaje puede consistir en tratar de encontrar su causalidad subyacente, su tipología o predecir la celeridad de tal evolución en cada una de sus etapas. Estos enfoques, el primero usado para describir y el segundo para explicar, se dan uno tras otro y se complementan entre sí; sin embargo en la práctica, la línea entre ambos no siempre es clara. Para estudiar variaciones espaciales, el investigador debe construir un modelo basado en marcos teóricos que conoce y que resultan fundamentales; si se investiga por ejemplo la dinámica de crecimiento de la población, teorías sobre efectos de la competencia por el espacio, polarización urbana, efecto disuasivo de la distancia, etc., pueden usarse como soporte; por otro lado, si el estudio trata sobre evolución del uso del suelo, marcos como estructuras de cultivo especializado y calidad de suelos pueden servir como soporte (Sanders, 2007:xvi).

La información es un elemento determinante en tareas de modelaje, resulta fundamental identificar los elementos básicos que nos brindarán el nivel de representación requerido y bajo que marcos la información debe ser recolectada. Estos objetos de estudio pueden ser celdas o píxeles (análisis de imágenes), hogares o empresas (encuestas o resultados del censo) o entidades espaciales (unidades morfológicas o administrativas). Una vez que los objetos de estudio han sido identificados, debemos determinar la forma de medir los cambios que den sentido respecto al tópico investigado y que sean compatibles con la escala espacial que se desea representar. A través de este proceso de formalización de la información, estaremos ya tratando con modelos. Estos son por un lado, modelos conceptuales relacionados al significado de los indicadores elegidos, es decir, el enlace entre el fenómeno que se estudia (el cual se refiere a un marco teórico o modelo de conocimiento) y el conjunto de datos obtenido de sus mediciones (el cual se refiere a lo que es observable del fenómeno), dados los niveles de observación que fueron elegidos (escala temporal y espacial), (Sanders, 2007:xvi).

Dependiendo del estudio, del enfoque y la información disponible, se determinan las herramientas a utilizar, intentando ligar la información relacionada a los aspectos del

fenómeno estudiado y tratando de encontrar evidencia de posible regularidad espacial. Formalizar el modelo dentro del marco de las ciencias de la computación, y pretendiendo representar la distribución, interacción, regularidad o heterogeneidad espacial; nos llevara al uso de modelos particulares; tales como **autómatas celulares**<sup>1</sup> o **multi-agentes**<sup>2</sup>; los cuales se enfocan en la interacción de los elementos, las emergencias y sus propiedades. Tales modelos son útiles en casos donde se trata de establecer el efecto de las interacciones locales en la evolución de estructuras espaciales a un nivel superior. En muchos casos, la investigación de fenómenos complejos desarrollada bajo un enfoque territorial, nos conduce a la necesidad de implementar no uno, sino varios modelos:

- Un modelo cartográfico (que pudiera ser a través de un sistema de información geográfica -SIG-), que represente la distribución y relación espacial;
- Un modelo estadístico que represente las relaciones entre las variables utilizadas;
- Un modelo matemático para afrontar la evolución global del estado de un cierto número de variables,
- Probablemente un modelo de autómatas celulares para simular las interacciones espaciales;
- Probablemente un modelo multi-agente para explicar los efectos de la cooperación entre muchos agentes, etc.

Para que en conjunto se implemente un modelo temático final, conformado por el acoplamiento de todos los modelos individuales considerados; y donde cada uno de ellos además fue integrado desde diferentes disciplinas (White, 2004:235-246).

---

<sup>1</sup> Los **Modelos Autómatas Celulares** consisten en una simulación de un entorno espacial representado por una malla en forma ráster, en el cual se establece un estado inicial para cada una de las celdas que conforman el espacio y un conjunto de reglas de transición que a través del tiempo determina el atributo de cada celda para la siguiente generación tomando en cuenta los atributos de celdas vecinas (Nagaratna et al. 2007:1).

<sup>2</sup> Los **Modelos Multi-Agentes** consisten en agentes con propósito que interactúan en el espacio y en el tiempo, los cuales crean patrones de emergencia a través de interacciones en micro niveles. Estos modelos no consideran agentes reales sino objetos computacionales que actúan en base a reglas (Page, 2005:3).

Cada uno de estos métodos de modelaje mencionados, tiene sus ventajas específicas e integra de manera propia la dimensión espacial del fenómeno estudiado:

- El enfoque estadístico enfatiza los mecanismos de co-variación del fenómeno donde el espacio puede ser incluido en el análisis por medio del tipo de entidades espaciales individuales consideradas y por medio de variables, tales como distancias, coordenadas o formas y tipos de vecindad.
- En modelos dinámicos, el espacio interviene como un marco de las entidades espaciales estudiadas y también a través de la interacción; conectando la dinámica de las entidades una con otra a través de variables como la distancia entre entidades.
- Un modelo de autómatas celulares representa el espacio geográfico a través de celdas; y el principal impulsor del cambio del estado de una celda opera bajo condiciones espaciales, ya que cualquier cambio se determina en base a la configuración de vecindad.

Cada uno de estos marcos metodológicos puede ser usado con el objetivo de describir, explorar o explicar el espacio y su configuración. Las líneas que separan estos enfoques no son siempre claras y pueden incluso traslaparse y sus alcances dependen del diseño estratégico del investigador, más que de los métodos en sí (Sanders, 2007:xvii).

Es importante resaltar que el espacio geográfico juega un papel central en los métodos señalados y los estudios de fenómenos con la aplicación de tales métodos, se desarrollan siempre bajo un enfoque territorial; considerando al análisis espacial como el marco conceptual adecuado, en el cual los efectos de posición, vecindad y co-dependencia juegan un papel clave para ayudar a clarificar la interacción entre el espacio y la sociedad.

Cualquier fenómeno a ser modelado bajo un enfoque territorial, requiere entre otras cosas, de información geográfica básica y complementaria para ser formalizado; y como ya fue mencionado antes; a través del modelaje podemos ayudar a entender,

explicar y describir la organización espacial, la localización particular de elementos de interés, la emergencia de nuevos elementos o fenómenos derivados, pre-visualizar el escenario futuro en ciertos lugares. La interacción entre todos estos elementos mencionados; son cuestiones que hoy en día resultan de especial interés para dar soporte a la toma de decisiones en el diseño y ejecución de procesos en materia de **planeación, gestión y políticas territoriales**<sup>3</sup>, entre otros.

Es pertinente en este punto enfatizar que los procesos de planeación, la gestión de recursos y la construcción de políticas públicas territoriales a los cuales hacemos referencia se visualizan como una posible aplicación final en la cual la modelación espacial y la solución geomática en general, eventualmente pudieran dar soporte en su construcción y desarrollo; de tal manera que dentro de los alcances del presente trabajo, no está contemplado profundizar en ninguno de estos conceptos como parte del marco teórico desarrollado.

Bajo los antecedentes descritos en los capítulos anteriores, pretendemos orientar nuestro trabajo hacia un intento de describir los elementos y etapas que habrá que tomar en cuenta como los primeros pasos en la búsqueda de una modelación geo-espacial o solución geomática a desarrollar en un marco referencial definido por una cuenca y ante una problemática específica; aproximándonos al marco conceptual de los sistemas socioecológicos, la teoría de la complejidad y desde luego bajo un enfoque territorial.

---

<sup>3</sup> Estos conceptos envuelven un proceso de organización del territorio en sus aspectos sociales y económicos, que permita la incorporación de un mayor número de componentes endógenos en forma consensuada y que compatibilice las componentes ambientales del territorio, las aspiraciones sociales y la manutención de niveles de productividad crecientes en las actividades económicas. Se trata pues de procesos a través de los cuales, se busca distribuir la actividad humana de forma óptima y sustentable en el territorio, (Zervaas y Giordano, 2009:142).

A través de la planeación, gestión y construcción de políticas públicas territoriales, se pretende: Maximizar el potencial y uso de los recursos naturales (oferta); Minimizar la degradación e impacto de las actividades socioeconómicas (demanda); y Mantener el equilibrio ecológico, que tiene que ver con la configuración espacial, funcionamiento, dinámica y evolución de los subsistemas que conforman el territorio, (Silva et al. 2009:30).



## **2.1 Modelando la Cuenca como un Sistema Complejo**

El concepto de cuenca y el análisis de sus distintas dimensiones, ya sea en forma independiente o interconectada, parece ser un marco territorial adecuado para resolver cuestiones relacionadas con la gestión de recursos naturales y en particular el agua, en cuanto a disposición y calidad (Douroujeanni et al. 2002:7-9). La estructura del sistema de drenaje en una cuenca, organizado jerárquicamente por afluentes de diferente orden, permite hacer una división del espacio en sub-cuencas como unidad de gestión al nivel jerárquico y nivel de escala que se desee (Fig. 1.14 y 1.15 del capítulo anterior).

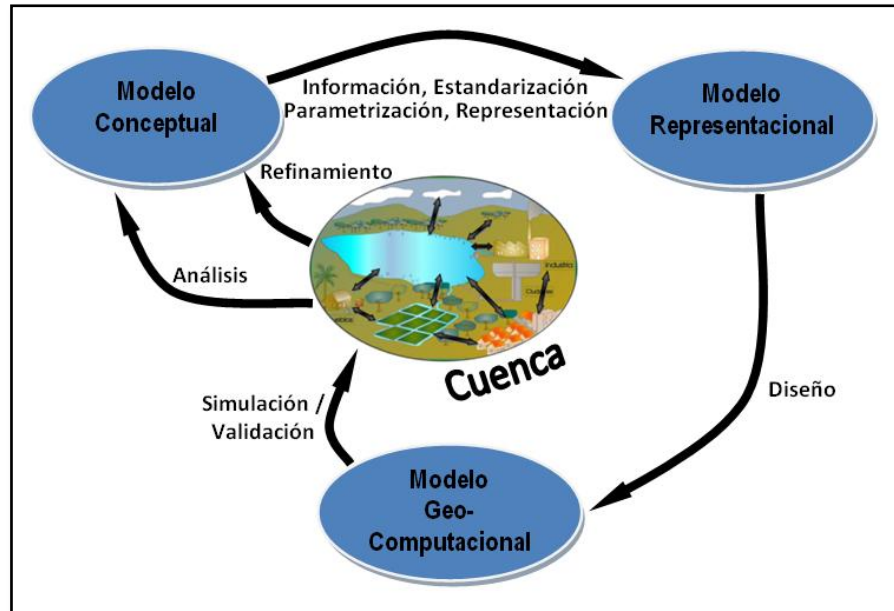
La base para la construcción de un modelo reside en la conceptualización de una problemática o de un fenómeno y tratar de representarlo como un sistema para responder a cuestionamientos de interés científico o social. Un modelo permite determinar la influencia de las variables en un proceso particular; para el caso de la geomática, el modelo debe ayudar a establecer y entender las relaciones espaciales entre los elementos del sistema a partir de simplificar la realidad, haciendo una abstracción de aquellas partes del mundo real que son esenciales en la definición y solución del problema y aplicando una serie de ideas estructuradas bajo un marco conceptual.

*“Es importante reconocer explícitamente el impacto que la teoría de la complejidad ha tenido en el proceso de modelaje; particularmente considerando que modelaje es una herramienta preferida para comprender los sistemas complejos”* (Parrot, 2009:3). *“El modelaje computacional es un componente epistemológico esencial de la ciencia de la complejidad, dada la necesidad de representar entidades y relaciones que definen sistemas complejos y resultados tales como la emergencia”* (Manson y O’Sullivan, 2006:16).

Haciendo un primer acercamiento propio, a partir de la visión de modelo de paisajes complejos de Lael Parrot, podemos describir un modelo del paisaje de la cuenca como la integración de varias etapas, iniciando con el modelo conceptual,

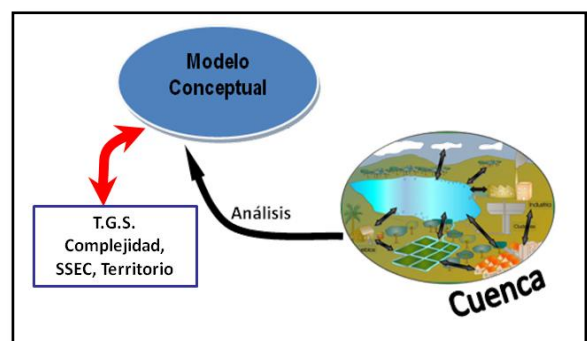
**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 2 – La Modelación del Espacio.**

pasando por un modelo representacional y concluyendo con un modelo geo-computacional; etapas que se dan en torno a la realidad observada desde un enfoque complejo (Parrot, 2009:2-3); para nuestro caso esta realidad es la cuenca (Fig. 2.1).



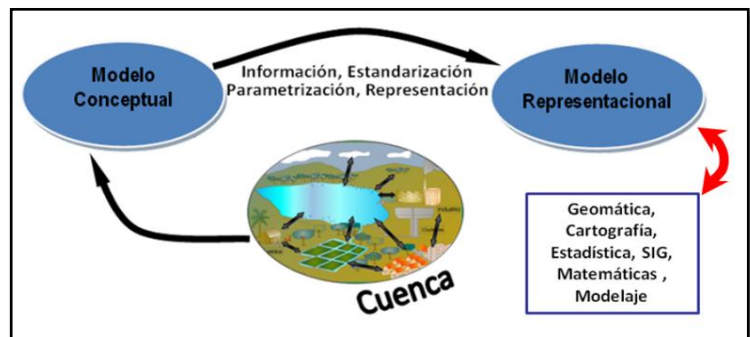
**Figura 2.1:** Esquema básico de un modelo de paisaje. Adaptación propia de: *Understanding and managing the landscape as a complex system: What can bottom-up modeling approaches contribute?*. Symposium of the Spatial Sciences Institute. Biennial International Conference. (Parrot, 2009:3).

En la figura anterior se observan las etapas consideradas y la interconexión que existe entre todas ellas que se da a través de distintos enfoques y disciplinas y también a través de ciertos procesos y herramientas. Partimos de un paisaje real: la cuenca; el cual lo consideramos bajo un enfoque sistémico, complejo, territorial y bajo la perspectiva de la teoría general de sistemas y el marco de conocimiento de los sistemas socioecológicos complejos como modelo de conocimiento; a partir de todo esto se construye el modelo conceptual del sistema.

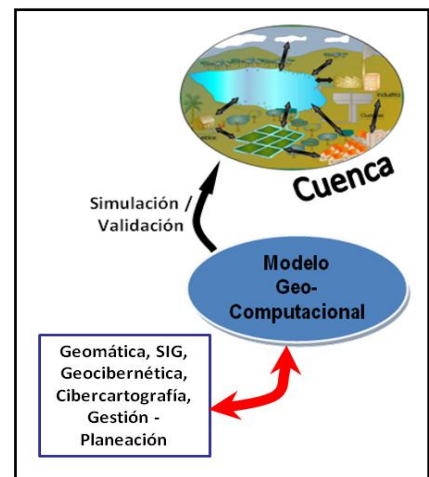


**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 2 – La Modelación del Espacio.**

En la figura puede apreciarse también un modelo representacional el cual se genera a partir de la información disponible sobre el sistema real y de acuerdo a la problemática o fenómeno analizado. Como su nombre lo indica, este modelo pretende representar de alguna manera al sistema modelado. Tales representaciones dependen de la información disponible y pueden ser esquemáticas, gráficas y por supuesto cartográficas; que para análisis bajo un enfoque territorial, será lo más apropiado. En la construcción del modelo representacional, también se aplican enfoques, disciplinas, procesos y herramientas; entre los cuales podemos mencionar a la propia Geomática, la Cartografía, el Modelaje, la Estadística y Matemática en la construcción de los modelos; los SIG como sistemas conceptuales pero también como herramientas informáticas. Las que se mencionan son solo algunos marcos, herramientas y procesos generales, es claro que puede haber otros.



Finalmente, también puede observarse en la figura la etapa del modelo geo-computacional, creada a partir de la aplicación de marcos como la propia Geomática, la Geocibernética, la Cibercartografía, planeación territorial, etc. El modelo geo-computacional corresponde a la organización, presentación, análisis y la comunicación (hacia y desde la sociedad), de información geo-espacial relativa a alguna problemática planteada inicialmente, la cual se presenta bajo distintos formatos multimedia, interactivos, dinámicos, multi-sensoriales; desarrollados bajo enfoques multidisciplinarios y que corresponde precisamente a la solución geomática que se busca como fin último y que puede servir como soporte a tareas de planeación.



Puede observarse en la fig. 2.1 original, que el ciclo completo inicia y termina en la propia cuenca; de modo que después de cerrar un ciclo completo a través de todos los sub-modelos será posible obtener conocimiento generado a través de la experiencia, llegando no al punto de partida, sino a un punto de nivel superior. En este sentido es posible retroalimentar el proceso general induciendo las modificaciones que se consideren pertinentes a fin de implementar el refinamiento del modelo general.

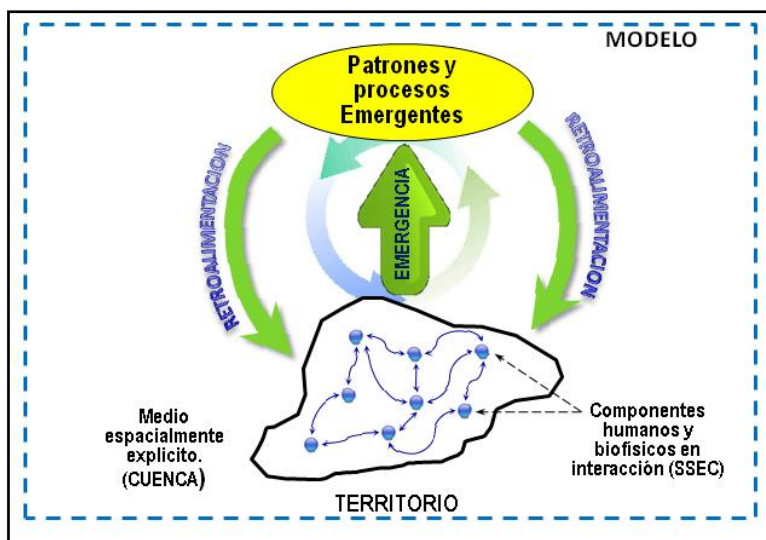
## **2.2 El Método de Modelación Bottom-Up**

Como ya fue mencionado, la teoría de la complejidad ha tenido un fuerte impacto en el desarrollo de modelos. Para el caso de sistemas acoplados hombre-naturaleza alojados en el espacio, la complejidad representa un nuevo marco transdisciplinario ofreciendo una gama de oportunidades para el estudio del espacio. Dada la necesidad de representar a los agentes y a las relaciones que definen un sistema complejo, se ha generalizado la adopción de métodos **bottom-up** en el desarrollo de modelos; los cuales permiten entender y simular el fenómeno de la emergencia como resultado de las múltiples interacciones de las entidades que forman parte de un sistema complejo a un nivel inferior, (Arthur, 1994; citado por Manson y O'Sullivan, 2006:12). La adopción de tales métodos bottom-up, es consecuencia directa del uso de la teoría de la complejidad como marco conceptual, es decir, cuando se intentar representar el mundo real como un sistema complejo (Parrot, 2009:2).

Uno de los principios básicos del modelaje de paisajes considerándolos como sistemas complejos, es que las interacciones combinadas de entidades simples dan origen a interesantes comportamientos a nivel macroscópico; de modo que la dinámica global de un sistema puede verse como una propiedad inherente de las partes que lo constituyen; es precisamente este el enfoque del modelaje bottom-up; donde el comportamiento global emerge desde las bases en lugar de ser impuesto de manera pre-establecida como parte de la definición del modelo. Tal comportamiento denominado emergencia es inesperado, esto es, no es predecible inmediatamente a

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 2 – La Modelación del Espacio.**

partir de la inspección de la especificación del sistema (Parrot, 1995:17); puede afirmarse entonces que la evolución de la dinámica global del sistema emerge como resultado de los eventos que suceden al nivel de objetos en interacción, imitando así al mundo real. Este hecho justifica el enfoque del método bottom-up como el adecuado para conceptualizar la dinámica que se presenta en una cuenca vista como un sistema complejo; ya que enfatiza la naturaleza generativa; en contraste con el modelaje top-down, en el cual la dinámica del sistema en niveles más altos es pre-establecida (Kawata y Toquenaga, 1996:3) (Fig. 2.2).



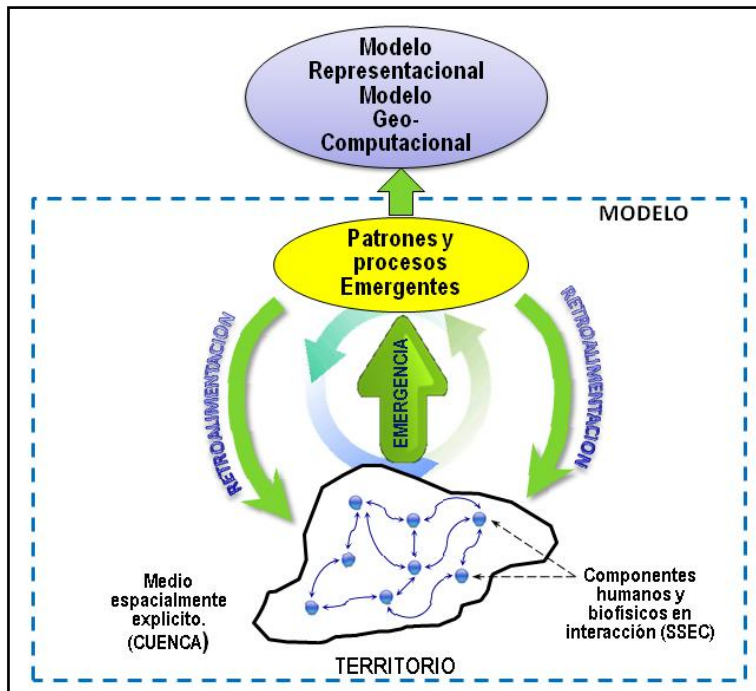
**Figura 2.2:** Representación de patrones y procesos en un paisaje, desde el enfoque Bottom-Up. Adaptación propia de: *Understanding and managing the landscape as a complex system: What can bottom-up modelling approaches contribute?*. Symposium of the Spatial Sciences Institute. Biennial International Conference. (Parrot, 2009:10)

En la figura, los elementos de la parte baja, representan los componentes humanos y biofísicos (sistema socioecológico complejo) interactuando en un ambiente real y espacialmente explícito; para nuestro caso, este medio que representa el acoplamiento del territorio en un sistema socioecológico, corresponde a la cuenca y a todos los elementos que en ella se encuentran. El comportamiento colectivo de los elementos da lugar a patrones y procesos emergentes los cuales a su vez retroalimentan el proceso y modifican el comportamiento individual, alterando y adaptando así el desempeño global del sistema (Parrot, 2009:10).

Factores como la teoría de la complejidad, el marco de conocimiento de los sistemas socioecológicos complejos y el enfoque territorial, deben servir como puentes explícitos para poder vincular las primeras etapas de nuestro análisis espacial inicial de

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 2 – La Modelación del Espacio.**

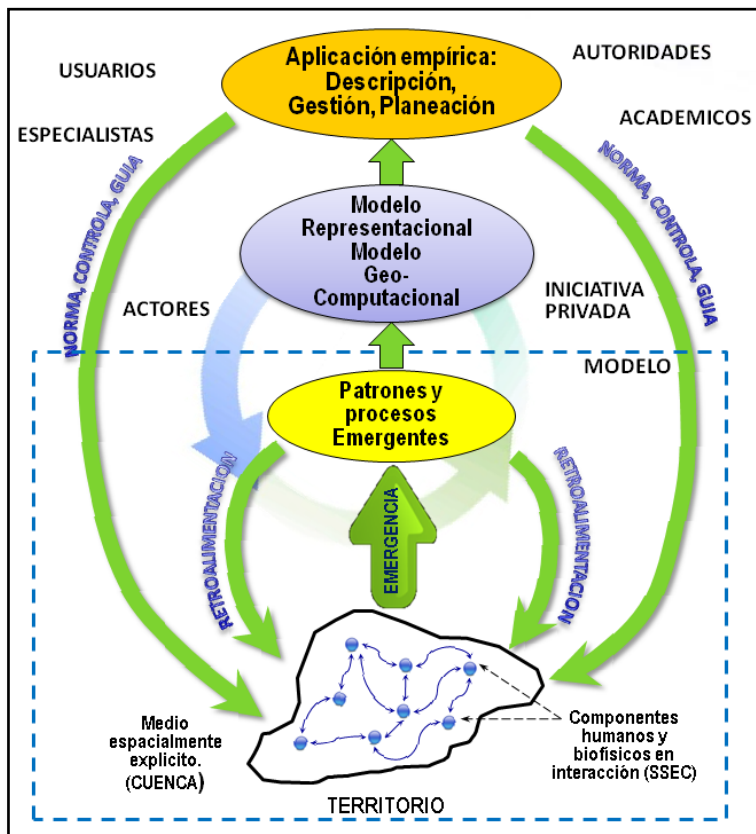
la problemática, con una solución geomática de aplicación empírica pasando desde luego por la etapa del modelaje descrito. (Fig. 2.3).



**Figura 2.3:** Vinculación del modelo conceptual, representacional y geo-computacional incorporado al enfoque Bottom-Up. Adaptación propia de: *Understanding and managing the landscape as a complex system: What can bottom-up modelling approaches contribute?*. Symposium of the Spatial Sciences Institute. Biennial International Conference. (Parrot, 2009:10)

Finalmente, podemos hablar de una última etapa ya en el ámbito de la Geomática, la cual nos dará posibilidad de crear un vínculo entre esta ciencia y la sociedad, donde se representan a los usuarios, a los actores y al gobierno, quienes eventualmente interactúan con el modelo a través de una interfaz de un modelo geo-computacional (herramienta geo-tecnológica o artefacto geomático); y es a través de esta interacción y bajo los fines específicos del desarrollo, cuando se inician procesos de comunicación y conversación entre el modelo geo-espacial y la sociedad, que retroalimentarán todo el proceso y que permitirán como fin último, guiar, limitar, controlar y gestionar a conveniencia, el comportamiento de los componentes individuales, afectando no solo su propio comportamiento, sino también afectando la naturaleza de los procesos y patrones que emergen a través de sus interacciones. Con esta posibilidad los usuarios pueden explorar cómo afectan diferentes intervenciones el comportamiento individual y cómo se manifiestan en los procesos y patrones emergentes. (Fig. 2.4)

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 2 – La Modelación del Espacio.**



**Figura 2.4:** Modelo conceptual de la solución geomática desde un enfoque Bottom-Up. Adaptación propia de: *Understanding and managing the landscape as a complex system: What can bottom-up modelling approaches contribute?*. Symposium of the Spatial Sciences Institute. Biennial International Conference. (Parrot, 2009:10)

La figura anterior, representa esquemáticamente la conformación e interacción de un modelo de paisaje que podemos adoptar sin problema buscando una solución geomática para una cuenca; cobijados por la teoría de la complejidad como modelo de conocimiento, y considerando la integración de la cuenca como un sistema socioecológico complejo que se encuentra alojado en un medio espacialmente explícito: el territorio. Todo esto descrito, es lo que bajo el enfoque del presente trabajo, representa una cuenca, y la distribución espacial de sus elementos, la relación espacial entre ellos y los patrones espaciales generados por tales relaciones, resultan fundamentales para la comprensión y desarrollo de un modelo de solución geomática y a través de éste, lograr la comprensión de la dinámica global de la cuenca como sistema.

En el desarrollo de soluciones geomáticas, es indispensable el abordaje de la problemática con el soporte de modelos de conocimiento y la participación de diferentes

especialistas con distintos marcos teóricos apropiados dependiendo del fenómeno o la problemática que se estudia. De igual manera, debe existir participación activa de la sociedad, actores, usuarios, autoridades y la iniciativa privada; desde la integración y desarrollo de la solución hasta su aplicación. Este abordaje multidisciplinario desde distintos marcos teóricos y distintas maneras de compartirlos y comunicarlos; hacen necesario encontrar puntos comunes de interés para todos los involucrados sobre los cuales pueda desarrollarse un dialogo en torno al problema que se aborda. Pueden existir distintos puntos comunes de interés, pero sin duda el especialista en geomática debe distinguir claramente uno entre todos ellos, como el más importante: el territorio; y precisamente la concepción del territorio es la que servirá como la arena donde deben discutirse cada una de las distintas perspectivas de los participantes; de esta forma se lograra hacer explicito el conocimiento y la percepción que cada uno tiene sobre el espacio y como asume cada quien la participación que tiene el espacio en la dinámica de la problemática estudiada. Esto es precisamente lo que significa dar al análisis del fenómeno o problemática, un enfoque territorial.

Esto significa que además de la teoría de la complejidad implícita en el modelo de conocimiento de los sistemas socioecológicos complejos, estamos también colocando en el centro de nuestro estudio al espacio. Este enfoque territorial permite fusionar el espacio con las interacciones propias de los elementos y los sistemas que conforman la cuenca, así como con los procesos y emergencias que esas interacciones provocan; y de esta manera, interacciones, procesos y emergencias; participan y dan origen a la reconstrucción del espacio de una manera continua y dinámica a través del tiempo.

Un modelo geo-espacial como el descrito, puede finalmente llevar a la comprensión de los mecanismos que hay detrás de los patrones observados y a la colaboración y soporte en las intervenciones directas al sistema y puede además servir como un verdadero sistema de soporte en la construcción de regulaciones y políticas apropiadas de planeación territorial, integrando desarrollos basados en múltiples tecnologías acoplados en una interfaz común; esperando que facilite la gestión de la



información, el análisis y diseño de soluciones a distintas problemáticas manejables y facilite también las acciones de comunicación y determinando las acciones pertinentes en un tiempo definido; acciones en las que se verán reflejada la participación directa de la sociedad y de este modo poder finalmente dar lugar a la creación de escenarios deseados en un cierto marco de escala espacial y temporal.

Hopkins se refiere a modelos de este tipo como: la integración de distintos puntos de vista y herramientas que apoyen en el conocimiento del medio, en la construcción de futuros escenarios, en la definición, seguimiento y evaluación de acciones que en den soporte a tareas de planificación, (Hopkins, 1999:333).

Puede constatarse que en el proceso completo de modelaje geo-espacial tal y como aquí ha sido descrito; eventualmente en algún momento se incluye al observador, al igual que a los usuarios y los actores quienes fungen ahora como agentes propios otro sistema, uno mayor. Esto da lugar a que los ciclos de retroalimentación no solo se presenten entre los propios elementos del sistema que se observa (la cuenca); sino que también emergen nuevos ciclos de retroalimentación debidos a la interacción entre el modelo geo-espacial, el observador, los usuarios y los propios actores; (Geyer y Van der Zowen, 1991:82; Heylighen y Joslyn, 2001:3-4; Martínez y Reyes, 2005:102-103); quienes ahora son vistos como nuevos agentes de un sistema mayor que se conforma por: la cuenca, el sistema socioecológico complejo alojado en el espacio ocupado por la cuenca, el modelo geo-espacial, el observador, los usuarios y los actores; este hecho puede claramente observarse en la figura 2.4. Este pues es un claro ejemplo de un ejercicio de **cibernética**<sup>4</sup> de **segundo orden**<sup>5</sup>; la cual se relaciona con la subjetividad

---

<sup>4</sup> Desde este punto de vista, la **Cibernética** se interesa en los sistemas que tienen un propósito, así como en las dinámicas y procesos de control responsables de mantener el estado preferido del sistema. **Norbert Wiener** observó la relación entre la comunicación y el control como parte de un largo proceso al que llamó Cibernética: La ciencia de la comunicación y el control en el organismo, en la maquina, en los humanos y en la sociedad. Conceptos como información, mensaje, retroalimentación, control, variedad, selección, interacción y evolución, los cuales son el núcleo de la teoría de la Cibernética desarrollada por **Wiener**, guían el diseño, producción, inserción social y demás desarrollos de la **GeoCibernética**. (Reyes et al. 2006:10).

en la construcción del conocimiento, ya que éste se construye y se valida socialmente; es decir, no solo se recibe de manera pasiva a través de los sentidos o por medio de la comunicación, sino que se construye de manera activa por los sujetos a través del proceso de aprendizaje (Geyer, 2000 citado por Muñoz, 2006: 15).

---

<sup>5</sup> La **Cibernética de Segundo Orden**, (también conocida como cibernética de la cibernética o nueva cibernética), fue desarrollada entre 1968 y 1975, como consecuencia de estudios cibernéticos de la circularidad. Es decir, cuando la cibernética es sujeta a la crítica y la comprensión de la propia cibernética; esto es, cuando el rol del observador no solo se distingue, sino que se reconoce su participación más allá de simplemente observar. En esta cibernética de segundo orden, se considera a los sistemas observando a sistemas como parte de ellos y no fuera de ellos (Glanville, 2004:1).

# **Capítulo 3**

## **Un camino hacia la Solución Geomática**

### **3. Un camino hacia la Solución Geomática**

La geomática como una ciencia geo-espacial emergente, puede concebirse como una armonización entre la ciencia y la tecnología aplicadas en el desarrollo de modelos geo-espaciales, para el análisis de fenómenos o problemáticas que relacionan al ser humano con su espacio con el fin de comprender la dinámica del territorio desde un enfoque multidisciplinario, integrando el conocimiento de ciencias como la geografía, las matemáticas, la topografía, geodesia, fotogrametría, percepción remota, los sistemas de información geográfica. La parte tecnológica de la geomática, incorpora las ciencias de la computación, las tecnologías de información, las tecnologías de comunicaciones y las tecnologías geo-espaciales (como los Sistemas de Información Geográfica o el concepto de Geo Web); las cuales están orientadas hacia procesos de adquisición, almacenamiento, manipulación y gestión de información geo-espacial.

En el desarrollo y aplicación de la geomática, bajo la escuela de pensamiento del **CentroGeo**<sup>1</sup>, se busca contribuir en la construcción de propuestas y acciones de mejora en bien de la sociedad; apoyando la toma de decisiones basadas en la información geo-espacial y marcos de conocimiento territoriales. Resulta evidente que el conocimiento, la información y la tecnología son ejes fundamentales de desarrollo en nuestros días; el carácter multidisciplinario de la geomática permite la construcción de conocimiento colectivo y uno de los objetivos del conocimiento generado es que sirva como soporte para la resolución de problemáticas geo-espaciales o para el diseño e implementación de políticas públicas territoriales, incorporando una visión holística en beneficio de la sociedad (Muñoz, 2006:21; Trujillo, 2009:30).

---

<sup>1</sup> El **Centro de Investigación en Geografía y geomática “Ing. Jorge L. Tamayo A.C.”** o **CentroGeo** es uno de los 27 Centros Públicos de Investigación integrado al sistema CONACyT en México. Es una institución académica dedicada a la investigación, educación, innovación tecnológica y disseminación de conocimientos en Geomática y Geografía Contemporánea, comprometido con el avance de la ciencia para responder a las necesidades de la sociedad. Fuente: <http://www.centrogeo.org.mx/GeoESP/0101.htm> (Consulta Junio de 2011).

### **3.1 La Cibercartografía. Un nuevo paradigma de la Geomática**

De acuerdo con la Dra. Reyes, la cibercartografía, al igual que las **Soluciones Complejas de Geomática**<sup>2</sup> y la generación de **Mapas Mentales Colectivos** o técnica **Strabo**<sup>3</sup>, son los ejes de desarrollo de la geomática; y la fuerza principal que la orienta se encuentra en las necesidades de la sociedad; las cuales pueden ser abordadas a través de un modelo adecuado de interacción entre la sociedad y la geomática establecido (Reyes et al. 2006:8-9).

La **cibercartografía** es una nueva construcción teórica propuesta por D.R. Fraser Taylor (1997, 2003); y se refiere a:

“La organización, presentación, análisis y comunicación de información espacialmente referenciada en una amplia variedad de tópicos de interés y uso para la sociedad en un formato multimedia, interactivo, dinámico, multisensorial y multidisciplinario”. (**Geomatics and Cartographic Research Centre**<sup>4</sup>).

Según Taylor; la multidisciplinariedad, la transdisciplinariedad, la heterogeneidad, la conciencia social y la calidad son elementos clave en esta ciencia. Si bien es cierto que la cartografía es parte fundamental del cuerpo teórico, se agregan conocimientos

---

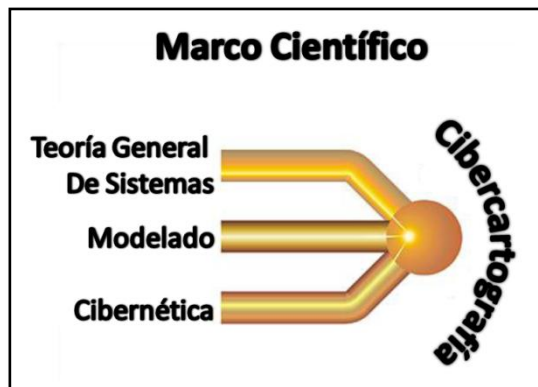
<sup>2</sup> Se refiere a la incorporación de modelos matemáticos en el desarrollo de artefactos Cibercartográficos con el fin de responder a las necesidades de la sociedad. La articulación de tales modelos como parte de la Cibercartografía dio origen a un nuevo tópico denominado **Soluciones Complejas en Geomática** adoptando el marco conceptual derivado de la emergente Teoría de la Complejidad (Martínez y Reyes, 2005:99-121).

<sup>3</sup> El concepto de **Mapa Mental Colectivo** surge de la interacción, cooperación, intercambio y consenso entre individuos de un grupo de trabajo. Esta inteligencia colectiva permite al grupo resolver problemas más complejos que los miembros lo harían de manera individual (Heylighen, 1999). Desde esta perspectiva teórica, W. Luscombe desarrolló la técnica que denominó **Strabo** (Luscombe, 1986), bajo la cual se han explorado nuevas líneas de investigación bajo el concepto de mapas mentales colectivos propuesto por Heylighen (Reyes et al. 2006:17).

<sup>4</sup> The **Geomatics and Cartographic Research Centre** (GCRC) es un centro de investigación oficial en el Departamento de Geografía y Estudios Ambientales, Universidad de Carleton, Ottawa, Canadá.

provenientes de otras ciencias como las computacionales, la biología, humanidades, artes gráficas, psicología, etc. La cibercartografía es una disciplina conformada por equipos multidisciplinarios, que aportan sus conocimientos para conformar una solución transdisciplinaria y heterogénea (Porras, 2008, 8).

En la construcción de un marco teórico-científico suficientemente robusto que sirviera como base a la cibercartografía, se reconoce a la Teoría General de Sistemas, el Modelado y la Cibernética; como bloques de construcción que pueden dar soporte a la estructura científica de la cibercartografía (Reyes, 2005:66), (Fig. 3.1).



**Figura 3.1:** Marco científico de la Cibercartografía.

Adaptado de:  
“Cybercartography from a modeling perspective” en  
*Cybercartography: Theory and practice*. Ed. D.R.F. Taylor. 63-97. (Reyes, 2005:66).

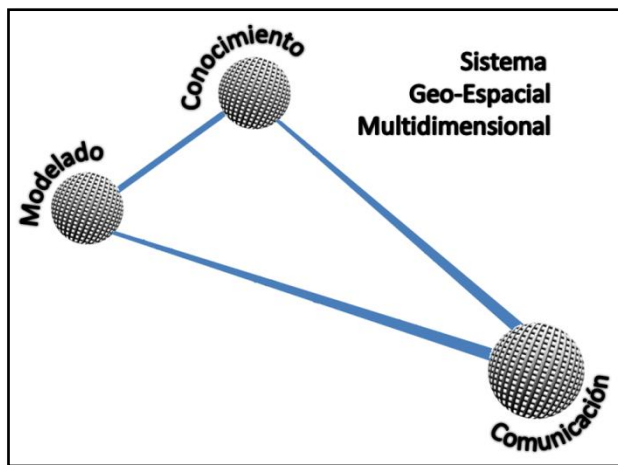
En la búsqueda de soluciones geomáticas bajo el enfoque del CentroGeo; se desarrollan modelos cibercartográficos basados en distintos modelos de conocimiento; y para ello es necesario completar una serie de etapas que conforman todo un proceso; el cual se describe a continuación (Reyes, 2005:85):

- Como punto de partida, se inicia con la identificación de una demanda o problemática de la sociedad, la cual crea la necesidad de diseñar modelos y producir servicios geo-espaciales que busquen satisfacer tal demanda; o aporten en la solución de la problemática.
- A través de estos servicios geo-espaciales se estará estableciendo un canal de comunicación con la sociedad a través del cual se estará brindando información geo-espacial específica relacionada con la problemática; fundamentada siempre con un modelo de conocimiento.

**Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.**

- Esta interacción entre el modelo geo-espacial y la sociedad, es propia de la cibercartografía y permite a los usuarios manipular la información geo-espacial que se ofrece en forma de mensajes. Esta información es asimilada y analizada por los usuarios; y a partir de esta interacción los usuarios también generan nueva información que es retroalimentada al modelo geo-espacial.

Este proceso de retroalimentación entre el modelo de la solución geomática y los usuarios es una característica esencial de la cibernética. El proceso de comunicación se logra a través de mensajes e información organizada en subsistemas utilizando distintos medios; el conocimiento se incorpora a través de modelos implícitos derivados del sistema y su entorno, de tal manera que reflejen los intereses específicos de los usuarios según el fenómeno o problemática analizada (Reyes 2005:77), (Fig. 3.2).

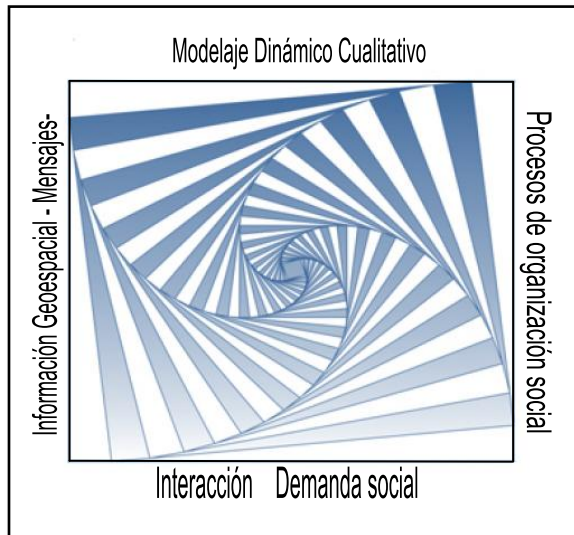


**Figura 3.2:** Ejes de comunicación en los Atlas Cibercartográficos. Reproducido de: "Cybercartography from a modeling perspective" en *Cybercartography: Theory and practice*. Ed. D.R.F. Taylor. 63-97. (Reyes, 2005:78).

En el desarrollo de soluciones geomáticas, se pretende que la cibercartografía sea de utilidad a la sociedad, a través de aplicaciones geo-computacionales e interfaces de usuarios que puedan ser utilizados por aquellos interesados en conocer su entorno geo-espacial, sin importar que no cuenten con experiencia sobre el manejo de herramientas tecnológicas como los Sistemas de Información Geográfica o de artefactos cibercartográficos. La importancia del eje de comunicación comprende la necesidad de contar con diseño de interfaces simples e intuitivas (como la tecnología multimedia), que permitan interactuar con la información estructural (cartográfica) y con los modelos que representan y comunican el paisaje geográfico (Trujillo, 2009:37-38).

**Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.**

Puede observarse, que el proceso explicado anteriormente describe una trayectoria; la cual en palabras de Reyes, corresponde a la ruta de la “espiral virtual desenvolviéndose” (unfolding virtual hélix), (Fig. 3.3); (Reyes, 2005:84-86).



**Figura 3.3:** Virtual Helix.  
Reproducido de:  
“Cybercartography from a modeling perspective” en  
*Cybercartography: Theory and practice*. Ed. D.R.F. Taylor. 63-97. (Reyes, 2005:86).

Los atlas cibercartográficos diseñados y desarrollados por el CentroGeo, incluyen funciones tecnológicas que permiten a los usuarios incorporar nueva información geoespacial y permiten además expandir los modelos geo-espaciales. Una vez que el producto geomático es incorporado a procesos sociales, como pueden ser ejercicios de planeación y desarrollo de política pública, éste tiene una participación dinámica en el sentido de que evoluciona de acuerdo a la conducción de los usuarios. Resulta obvio que los atlas cibercartográficos generados tienen limitaciones, tales como: el alcance de la problemática abordada, la necesidad de mayor información geo-espacial, un modelo de conocimiento más profundo, etc.; de manera que en su conjunto todas estas limitantes pasan a ser nuevas demandas y necesidades de la sociedad hacia el diseño original del producto geomático; así, la “espiral virtual” regresa a un punto de inicio: la demanda de conocimiento e información espacial por parte de la sociedad; pero resulta evidente que este nuevo punto de partida estará en un nivel distinto en el contexto global, en cuanto a su alcance y funcionalidad. Este proceso puede repetirse una y otra vez, de modo que la espiral no tiene necesariamente un punto final. Esta es la razón



por la que se caracteriza como “espiral virtual desenvolviéndose”, (Fig. 3.3), (Reyes, 2005:86-87).

Los sistemas pueden ser estudiados a partir diferentes enfoques y en distintos niveles jerárquicos. En la cibercartografía confluyen sistemas que interactúan entre sí en un contexto muy amplio; y organizados en varios niveles jerárquicos; por ejemplo hay individuos, grupos sociales, sistemas de información, ecosistemas, etc. Cada uno de estos sistemas puede ser estudiado desde la perspectiva de una o varias disciplinas (sociología, psicología, tecnologías de la información, biología, ecología, etc.). El enfoque sistémico le da cohesión a estas visiones y las integra en un marco común; además la visión holística de la teoría general de sistemas, coadyuva en el marco de la cibercartografía, ya que los sistemas estudiados por ella serían difícilmente aislables de su entorno (compuesto por otros sistemas). De este modo, un sistema de información sería poco exitoso si no se toman en cuenta aspectos como la cultura de los usuarios (Porras, 2008:11).

### **3.2 Desarrollo de Soluciones Geomáticas: Proceso Metodológico. CentroGeo**

El paradigma de la cibercartografía fue retomado por el CentroGeo mediante el desarrollo de diversos **Atlas Cibercartográficos**; que incorporaban las características de la cibercartografía propuestas por Taylor, pero además, contextualizando éstas, dentro de marcos geográficos de conocimiento. Cabe mencionar que los procesos de interacción con la sociedad, modelado, procesos de producción y desarrollo tecnológico, estaban basados por avances de trabajo empírico (Reyes, 2005:65).

Las soluciones geomáticas diseñadas, desarrolladas e implementados bajo la escuela de pensamiento del CentroGeo, adoptan un marco metodológico propio que se alinea perfectamente con los principios básicos de la cibercartografía definida por Taylor; sin embargo, a diferencia del marco conceptual desarrollado por Taylor

valiéndose de la teoría integral de Ken Wilber (Eddy y Taylor, 2005:35-61); el marco conceptual del CentroGeo esta basado en la teoría general de sistemas, la cibernética y el modelado. (Reyes, 2005; Martínez y Reyes, 2005; Reyes y Martínez, 2005). Esta metodología formalizada en la década de los 90's y desarrollada bajo un enfoque sistémico y holísta y dando especial interés a la incorporación explícita de procesos de retroalimentación, involucra dos cuestiones básicas interrelacionadas: La metodología estructural y el marco del contenido (Reyes, 2005:87-88).

### **3.2.1 La Metodología Estructural**

La metodología estructural provee la orientación en cuanto a la observación, modelaje y retroalimentación del ciclo cibernético y de acuerdo a la metodología desarrollada por la Dra. Reyes, (Reyes, 2005:87-92), el primer paso consiste en desarrollar un meta-modelo en el cual se enfoquen y describan de la manera más clara posible, los aspectos siguientes:

1. La comprensión de los requerimientos sociales en términos de análisis y conocimiento de información geo-espacial;
2. La conducta del equipo de investigación, incluyendo el objeto de la observación, cómo se conducen, cómo interactúan con actores relevantes, como identifican los temas que son relevantes y como sintetizan la información;
3. La coherencia del sistema y el efecto sinérgico entre los diferentes lenguajes y modelos involucrados;
4. Los mensajes geo-espaciales y la información transmitida a través del proceso de comunicación.

El propósito de esta metodología estructural, es proveer un marco conceptual base para desarrollar la investigación y el proceso de producción de la solución geomática que se elijan; y resulta esencial en cualquier ejercicio de cibercartografía. Esta metodología engloba tres niveles conceptuales: El meta-sistema; El proceso de modelación y La solución tecnológica (Reyes, 2005:88).

- **El Meta-Sistema.**- Resulta de un proceso de conceptualización en el cual existe retroalimentación esencial entre sus diferentes componentes. Para el desarrollo del meta-sistema se consideran aspectos como:
  1. El contexto político, organizacional, cultural y social, en el cual la solución geomática será incorporada;
  2. La adopción de enfoques organizacionales que guíen la conducta del equipo de investigación durante las etapas de diseño y producción;
  3. El análisis de requerimientos de los usuarios; y
  4. Las especificaciones globales del análisis, modelaje y marco de contenido espacial.

La exploración de sistemas de información hoy se enfoca en cuestiones organizacionales y administrativas a través de la aplicación de métodos de **investigación cualitativa**<sup>5</sup> con énfasis en la descripción del contexto del sistema revisando cuestiones como la situación laboral, cultural y política y determinación de factores que puedan afectar la implementación de sistemas de información en las organizaciones.

La aplicación de métodos de evaluación de las necesidades de los usuarios ayuda en el análisis y diseño de la solución e identificación de la información geo-espacial necesaria.

La definición del análisis y diseño del modelo geo-espacial global consiste en hacer explícito el espacio en la problemática analizada y es un factor clave en el desarrollo de la solución geomática, su enfoque depende del propósito específico del ejercicio cibercartográfico y se requiere la identificación de distintos marcos teóricos y metodologías apropiadas.

---

<sup>5</sup> La **investigación cualitativa** involucra el uso de información cualitativa, tal como el desarrollo de entrevistas, documentación estratégica, análisis de procesos organizacional y observación de las entidades participantes para comprender y explicar fenómenos sociales (Myers, 2011). Fuente: <http://www.qual.auckland.ac.nz/> (consulta Abril de 2011).

- **El proceso de modelación.-** La generación de productos cibercartográficos, involucra tres dimensiones interrelacionadas: modelaje, comunicación y conocimiento (Fig. 3.2). El modelaje es un eje transversal en el sentido que está presente en todas las dimensiones. El meta-sistema guía el diseño del modelaje global respecto del modelaje particular computacional, geográfico, visual y cartográfico. Cabe mencionar que en algunos casos la solución geomática usa modelos ya establecidos, pero en otros casos se requiere de modelos nuevos que deben desarrollarse.
- **La solución tecnológica.-** Una vez que el diseño conceptual del modelo está realizado, debe identificarse la estrategia tecnológica que responda a las necesidades de la solución geomática; determinar los requerimientos de Hardware, Software, Plataforma, Arquitectura, etc.; y considerar sobre manejadores de bases de datos geográficos, sistemas de información geográfica, programas de diseño asistido por computadora, sistemas operativos, servidores web, etc. Como ya se mencionó, la tecnología juega un papel central en el desarrollo de modelos geo-espaciales; por lo tanto, el diseño de la parte tecnológica, debe significar una ventaja implícita en nuestro modelo de solución geomática, respecto a las tecnologías de información y comunicación disponibles.

### **3.2.2 El Marco del Contenido**

El marco del contenido se refiere al conocimiento, derivado de las diferentes disciplinas involucradas en el proyecto de solución y que responden a las necesidades de la sociedad, tales como descripción, predicción, planeación, etc. de un fenómeno o problemática particular. Este enfoque teórico y metodológico debe responder a problemas específicos o situaciones identificadas por los usuarios, los cuales proveen la orientación esencial y la línea del contenido que debe incluirse en la solución geomática.

Para el caso del abordaje de la problemática ecológica-social de una cuenca, bajo la orientación de gestión y planeación; y con el enfoque descrito en el presente trabajo, el modelo de conocimiento a aplicar, sería la teoría de la complejidad implícita en el marco teórico de los sistemas socioecológicos complejos y la teoría de la planeación territorial.

Como se explicó antes, en la búsqueda de una solución geomática para la cuenca, fueron identificados puentes explícitos: La complejidad de los sistemas socioecológicos y el enfoque territorial; los cuales sirven de enlace entre el modelaje teórico de análisis espacial y el modelaje empírico de la geomática, y puede constatarse una vez conocida la metodología para el desarrollo de una solución geomática, que estos puentes resultan fundamentales en el desarrollo de un modelo geo-espacial para una cuenca desde la perspectiva de la cibercartografía.

En la interacción entre la sociedad y su territorio, la cibercartografía puede actuar como estructura integradora del conocimiento geo-espacial y además como un proceso por el cual puede este conocimiento ser retroalimentado, organizado, entendido y utilizado. Al incorporar referencias espaciales a la información, la cibercartografía puede retroalimentarla para iniciar ciclos de generación de nuevo conocimiento. Se ha pensado a la cibercartografía como un instrumento de gestión basado en el conocimiento geo-espacial de la sociedad, que puede ser utilizado para comunicar sus necesidades y alcanzar el consenso de las partes involucradas en el proceso de generación de políticas públicas (Muñoz, 2006:28-29).

A través de las soluciones geomática desarrolladas por el CentroGeo, bajo esta metodología y puestas en práctica en el contexto de la sociedad mexicana, se ha logrado que la conciencia geo-espacial de gobernantes, organizaciones sociales, especialistas en política pública y comunidades, evolucione y tenga impactos directos en procesos sociales que incluyen la gestión, toma de decisiones y planeación. La construcción de nuevo conocimiento geo-espacial, a través de la cibercartografía, puede conducir a la estimulación de la elaboración de políticas públicas territoriales, al

explorar e identificar regiones con alto potencial de competitividad buscando alcanzar un desarrollo sustentable, y contribuir con la economía y al fortalecimiento de la sociedad a través de la innovación social y tecnológica.

### **3.3 Los Sistemas de Información Geográfica**

En nuestros días la percepción de nuestro planeta ha mejorado enormemente mediante el uso de diferentes tecnologías las cuales permiten la gestión e interpretación de los datos geográficos. Un hecho fundamental que ha caracterizado el desarrollo reciente de la ciencia y la tecnología es la progresiva integración de conocimientos y recursos, así como la integración de diversas disciplinas que anteriormente se habían diferenciado en cuanto a sus métodos, técnicas y herramientas. Los datos geográficos debidamente organizados, procesados y analizados propician una base consistente para distintas tareas; entre las que podemos mencionar la evaluación e implementación de acciones de planeación, gestión y políticas territoriales como casos particulares.

En el ámbito de la geomática, tienden a desaparecer las fronteras entre varias disciplinas geográficas tradicionales, produciéndose una creciente interdependencia, interconexión e integración bajo un enfoque transdisciplinario y holístico de distintas ciencias relacionadas con la información espacialmente referenciada (Gagnon y Coleman, 1990:377-382); permitiendo con ello llevar a cabo la recopilación, procesamiento y análisis de datos geográficos bajo diferentes técnicas, tales como levantamiento de información, posicionamiento global GPS, percepción remota, procesamiento digital de imágenes, cartografía automatizada, sistemas de información geográfica, etc.

El estudio de los Sistemas de Información Geográfica, surge como disciplina a finales de los años 60's, cuando los geógrafos, como muchos otros científicos sociales, empezaron a gestar la revolución cuantitativa en geografía. Baker y Boots se refieren a los trabajos de Chorley y Haggett de 1969 (Models in Geography); como un importante

catalizador, que confirmó que los modelos deberían ser una parte integral en la evolución del conocimiento geográfico (Baker y Boots, 2005:269).

Los Sistemas de Información Geográfica pueden visualizarse desde dos puntos de vista: Como una herramienta de conocimiento y como una herramienta tecnológica (Reyes, 2010).

Como marco de conocimiento, los Sistemas de Información Geográfica se refiere a la integración de los modelos teóricos desde distintas disciplinas en la búsqueda de soluciones geomáticas. Bajo este enfoque los Sistemas de Información Geográfica son multidisciplinarios y en ellos convergen ciencias como la Geografía, las Matemáticas, la Computación, la Teoría de Sistemas o las Ciencias de la Información; para interactuar en conjunto desarrollar marcos transdisciplinarios implícitos en las soluciones geomáticas con aplicaciones de análisis espacial en distintos ámbitos como la planeación territorial, catastro, geo-demografía, gestión ambiental, geo-negocios, etc.

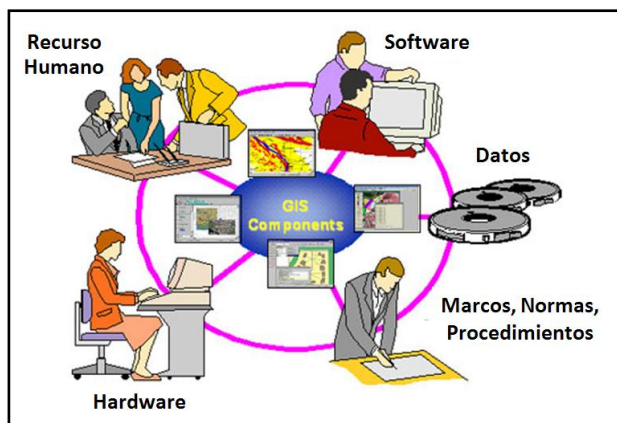
Como herramienta tecnológica, un Sistema de Información Geográfica es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y tecnologías de telecomunicación y redes; diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas, la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de diversa índole; entre ellos, particularmente podemos mencionar la problemas de planificación y gestión del territorio.

Para ambos casos, un Sistema de Información Geográfica puede ser considerado como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer necesidades concretas de información; es pues una herramienta informática y analítica que apoya las tareas de análisis espacial.

En un sentido estricto, se trata de cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente

referenciada; mientras que en un sentido más genérico, los Sistemas de Información Geográfica son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

Los Sistemas de Información Geográfica, caen dentro de una categoría particular entre los sistemas de información que se especializa en el manejo de datos espaciales, (Moreno, 2006:4-5). Bajo el enfoque tecnológico, un Sistema de Información Geográfica está conformado por diferentes elementos que interactúan entre sí para lograr fines específicos; entre los cuales como ya se mencionó, se encuentran: el recurso humano, el software, el hardware, los datos, los marcos teóricos, procedimientos y soportes institucionales contextuales al tema que pretende abordarse y enfoque que pretende aplicarse (Fig. 3.4).



**Figura 3.4:** Componentes de un Sistema de Información Geográfica.

Reproducido de: . *Cartesia G/S*. Likesele Komun.

Fuente:

<http://www.lycksele.se/templates/Page.aspx?id=21643>

### **3.4 Planeación Territorial y Sistemas de Información Geográfica**

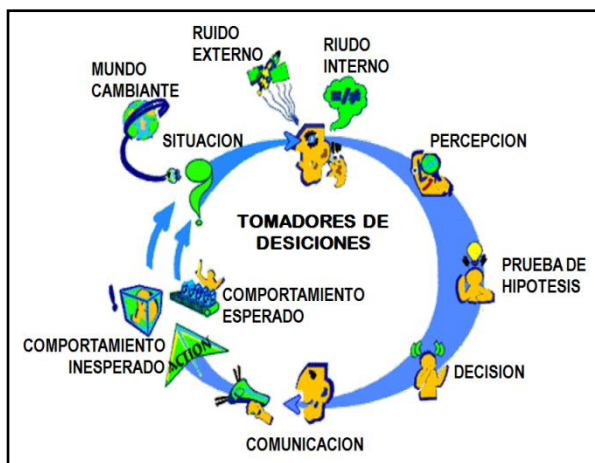
La planeación es una actividad orientada a futuro, pero condicionada por el pasado y el presente; que vincula “el conocimiento científico y técnico con acciones del dominio público” (Friedmann, 1987:38). La planeación urbana o regional representa un escenario rico y dinámico donde se estudian problemas sociales y alternativas de solución; por ejemplo: el crecimiento urbano, el desempleo y la reactivación económica, el transporte, la degradación ambiental y la protección, preservación histórica,



**Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.**

conservación de la tierra y los recursos naturales y la provisión de espacios abiertos, parques e instalaciones recreativas; entre otras muchas (Nedovic`-Budic`, 2000:81).

Las tareas de planificación y gestión; se basan en general en un proceso de análisis y resolución de problemas a través de toma de decisiones e implementación de planes de acción. De manera general el proceso consiste en la identificación, definición y descripción del problema; tratar de identificar sus causas; señalar con precisión los objetivos específicos que se han de resolver; integrar información relacionada; identificar alternativas que pueden ayudar; modelar las posibles decisiones que se acercan a la solución; evaluar y discriminar opciones; tomar una decisión; diseñar el plan de acción o política pública, comunicar a los involucrados; implementar el plan de acción; evaluar, controlar y gestionar el plan de acción (Batty y Densham, 1996; Silva et al. 2009:39-40) (Fig. 3.5).



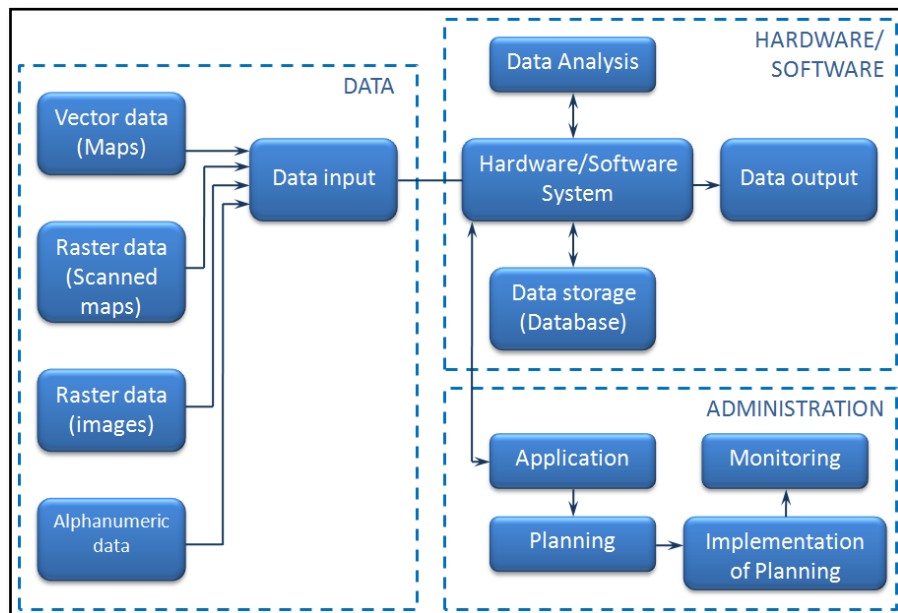
**Figura 3.5:** El proceso de toma de decisiones.  
Adaptado de: *Herramienta Geomática participativa para la integración del plan rector de las áreas naturales protegidas del Distrito Federal*. Proyecto final de Especialidad en Geomática. Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo” A. C. (Silva et al. 2009:40).

El proceso considera varias formas de análisis que pueden incluir el modelado y la simulación, pasando a la predicción y luego a la prescripción o el diseño del plan, el cual a menudo involucra la evaluación de soluciones alternas. El proceso global se lleva a cabo a través de diversas escalas y como puede observarse en la figura anterior, es claramente “cíclico”; los procesos de las etapas intermedias pueden estar anidados dentro de otros, mientras que el grado en que los usuarios, expertos, gerentes tomadores de decisiones se involucren, depende de la naturaleza de las aplicaciones específicas y su contexto (Batty y Densham, 1996).

En la tarea de planear, históricamente se han buscado herramientas que mejoren las capacidades analíticas, de resolución de problemas y de toma de decisiones. A partir de la década de los 50's los planificadores iniciaron con el desarrollo y uso de modelos informáticos y sistemas de información para dar soporte y mejorar su trabajo (Batty y Densham, 1996). La adopción de Sistemas de Información en general y de los Sistemas de Información Geográfica en particular, es una manifestación reciente en el mismo sentido; incorporar nuevas herramientas y tecnologías a la tarea de planear. El interés de los planificadores en los SIG y otras tecnologías geoespaciales se deriva de la naturaleza espacial de los fenómenos urbanos y de la naturaleza multidisciplinaria de la planificación (Nedovic`-Budic`, 2000:81).

Las tecnologías de información geográfica pueden aplicarse en todas las etapas del proceso de planificación; desde la recolección, almacenamiento y análisis de datos; realización de modelo de representación (los mapas como medio de comprensión comunicación en la planificación son reconocidos y apreciados); apoyo en el modelo de comunicación con usuarios, sociedad y tomadores de decisiones; apoyo en la implementación y gestión de los planes territoriales y políticas publicas a través de herramientas de simulación (Budic, 1994, Harris y Elmes 1993, Warnecke et al. 1998 citados por Nedovic`-Budic`, 2000:82).

La capacidad en el almacenamiento de grandes volúmenes de información geo-referenciada y su potencial para el análisis y representación de la misma, hacen a los sistemas de información geográfica idóneos para abordar problemas complejos de planificación, gestión toma de decisiones y monitoreo de ambientes naturales y socio económicos, (Moreno, 2006:4-5; Konecny, 2003:183-184), (Fig. 3.6).



**Figura 3.6:** Esquema conceptual de un Sistema de Información Geográfica. Adaptado de: *Geoinformation. Remote sensing, photogrammetry and geographic information systems* (Konecny, 2003:183).

### 3.5 Diseño del Modelo Geo-Espacial

Cabe mencionar una vez mas, que en la realidad la construcción de una solución geomática implica un despliegue importante de recursos humanos, materiales, financieros y de tiempo; de modo que no puede realizarse de manera aislada por una sola persona; sino por un equipo de trabajo de expertos, trabajando de manera conjunta con la sociedad, usuarios, el gobierno, la academia, etc.; de modo que en este apartado se pretende de manera general complementar conceptualmente la metodología para llegar a un modelo geo-espacial que sirva de base en la construcción de una solución geomática.

### **3.5.1 El Meta Sistema**

Siguiendo la metodología que fue descrita para el diseño del un modelo geo-espacial que sirva de base para la solución que se busca; en primer lugar se debe identificar el sistema objeto que se pretende analizar y del cual se pretende construir la solución geomática. Como se ha venido mencionando reiteradamente a lo largo del trabajo, este sistema objeto de nuestro estudio es la cuenca.

Del mismo modo, habrá que identificar de manera clara, el fenómeno o problemática que se presenta en torno al objeto de estudio; y como también ya se ha mencionado, el enfoque que en el trabajo se ha adoptado es el de la pérdida de resiliencia en el sistema de cuenca, la degradación de los sistemas naturales a causa de actividades antropogénicas y el riesgo de colapso del sistema. Problemática que también como ha sido indicado, podría atenuarse a través de la gestión adecuada de los recursos al interior de la cuenca y el establecimiento de planes y políticas sobre planeación territorial, a los que la Ciencia geomática puede dar soporte a través de sus distintos marcos de conocimiento y herramientas de modelación geo-espacial y geotecnológicas.

De acuerdo al enfoque de la problemática y posiblemente otros elementos; tales como la disponibilidad de recursos o de tiempo o la disponibilidad de información, entre otros posibles; habrá que definir la escala a la que es conveniente operar. En este sentido, debe especificarse claramente la escala tanto espacial como temporal para que de esta forma se pueda definir el nivel de detalle en el que se va a operar; por ejemplo respecto a la escala espacial, definiremos si se trabajará con una cuenca “completa”, una subcuenca o microcuenca; mientras que a nivel temporal se definirá si se trabajara con análisis y acciones a corto, mediano o largo plazo.

Esta información servirá para realizar una delimitación mucho mas clara nuestro sistema objeto; el contexto en el que se encuentra (organizacional, social, cultural, político, etc.); el enfoque de la problemática también permitirá delimitar los subsistemas

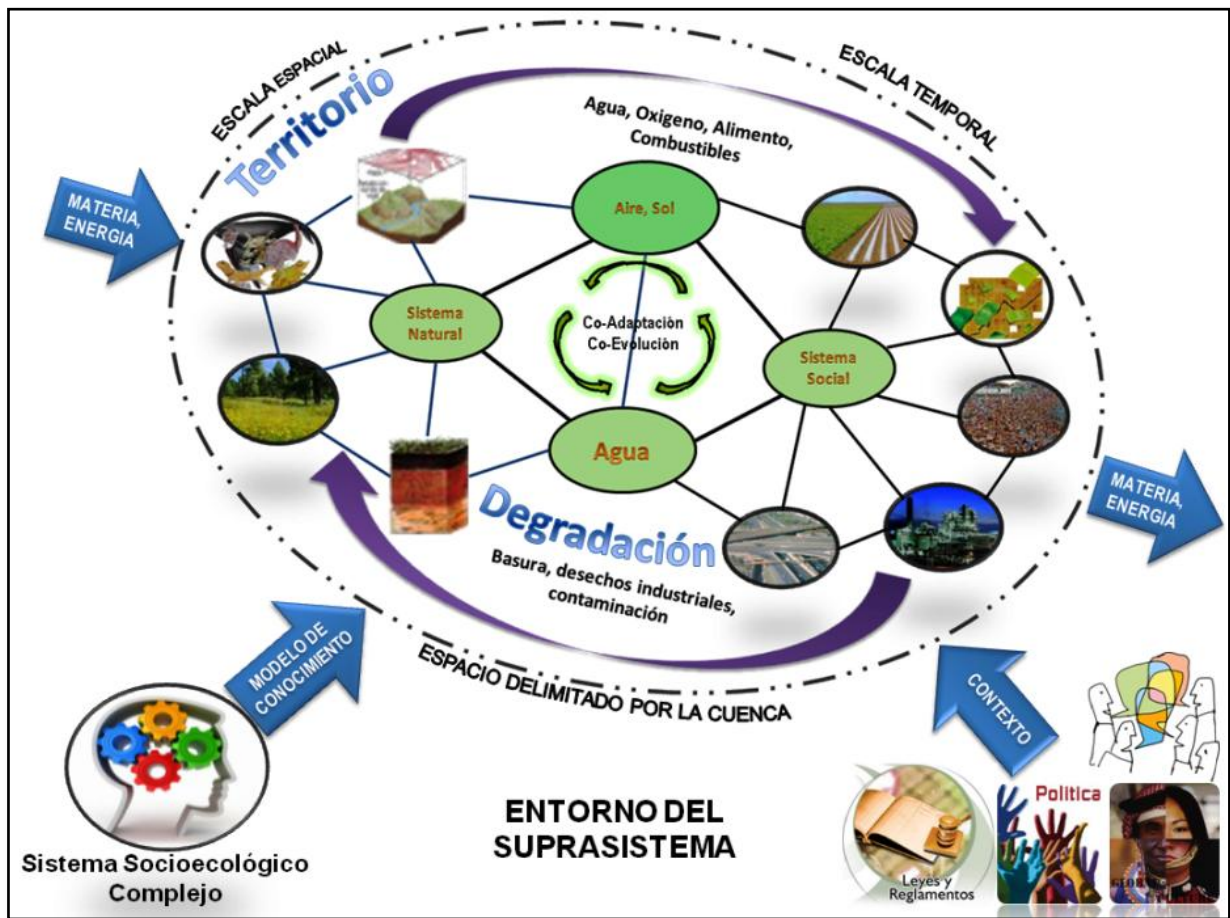
o elementos mas importantes en los que se enfocará la investigación y las relaciones mas relevantes que se dan entre éstos.

Algo de suma importancia, es la determinación y adopción del modelo de conocimiento bajo el cual se desarrollara el trabajo; y que servirá como guía en la conducta del equipo de investigación en las etapas de diseño y producción del modelo geo-espacial. Como ya ha sido mencionado reiteradamente a lo largo del trabajo, el modelo de conocimiento que aquí se pretende aplicar es el de los sistemas socioecológicos complejos; el cual es un marco que a su vez esta basado en le teoría general de sistemas y la teoría de la complejidad.

Otro punto de relevancia y que también ya fue discutido en el capítulo anterior, es la concepción del territorio. Debe ponerse en el centro del estudio al territorio como la arena donde se discuten las diferentes perspectivas de los participantes en torno al territorio, hacer explicito el conocimiento y la percepción que cada participante tiene del espacio y determinar en conjunto, como debe asumirse la dinámica espacial en la problemática analizada; siendo este un verdadero ejercicio transdisciplinario, cuando se logra.

Con todos estos elementos será posible la construcción detallada del meta sistema como parte del diseño conceptual. A lo largo del presente trabajo, se han incluido varias figuras, que pueden representar conceptualmente y en distintos niveles, los subsistemas o elementos que eventualmente podrían formar parte del meta sistema de nuestro modelo geo-espacial; describiendo además, algunas de sus relaciones: Figuras 1.3, 1.16, 1.17 y 1.18 del capítulo 1; Fig. 2.3 del capítulo 2. Retomando la Fig. 1.18 y complementando con algunos de los aspectos aquí mencionados, podemos intentar esquematizar nuestro meta sistema (Fig. 3.7).

**Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.**



**Figura 3.7:** El Meta Sistema. Elaboración propia.

En el centro de la figura puede observarse el sistema socioecológico complejo (sistema social acoplado al sistema natural); alojado físicamente en el espacio delimitado por la cuenca en una escala conveniente y conformando el territorio; recibiendo, procesando y generando materia, energía e información. El sistema natural conformado por flora, fauna, agua, suelo, etc., ofrece al sistema social servicios ecosistémicos; tales como agua, oxígeno, alimento, combustibles, etc.; mientras que el sistema social conformado por la población, la economía, la industria, etc., de manera tradicional ofrece al sistema natural basura deshechos y contaminación (problemática). Este flujo de materia, energía e información desde y hacia cada uno de los sub sistemas, genera conocimiento y aprendizaje, y provocan a la vez una co-adaptación y co-evolución del sistema global para subsistir.

También podemos observar en la figura, el modelo de conocimiento bajo el cual pretende estudiarse el sistema y además el contexto en el que se desenvuelve con algunos de los elementos tales como leyes, reglamentos, políticas, cultura, etc., en torno al fenómeno estudiado; y que en la búsqueda de una solución geomática a la problemática, deben ser considerados.

### 3.5.2 El Sistema de Información

Como parte de la integración del Meta Sistema, fue mencionado que debían definirse claramente los subsistemas y/o elementos que van a analizarse dentro del contexto del fenómeno o problemática que se estudia; esto es importante porque aquellos subsistemas o elementos seleccionados deben ser los adecuados; aquellos que tengan una relación directa y de impacto con el fenómeno o problemática que se estudia.

En la integración del Sistema de Información, debemos ser capaces de lograr una “caracterización” tanto de los elementos como de las interacciones entre ellos y los procesos que realizan. Esta caracterización la lograremos conformar a partir de conocer información sobre elementos, relaciones y procesos; es decir, a partir de **Datos**; que serán parte integral de nuestro sistema geo-espacial y que lo alimentaran a través del Sistema de información y que permitirá representar: las **Entidades**; sus **Atributos**; las **Relaciones** que se dan entre ellas; y los **Procesos** en los que se incluyen.

Luego entonces en esta etapa determinaremos:

- Que datos requerimos conocer de cada uno de los elementos involucrados;
- De que fuente se pueden o se deben obtener;
- Bajo que formato los podemos o debemos encontrar;
- Que tratamiento previo es necesario aplicarles antes de introducirlos al modelo geo-espacial;

**Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.**

---

- Que proceso computacional (algoritmo) hay que realizar con ellos para lograr modelar las relaciones y los procesos;
- Que información vamos a obtener a partir de ellos;
- Cual será el formato de la información obtenida, (Cartografía, Tabular, Grafica, etc.; Impreso en Papel, en Formato Digital, etc.);
- Que usos se le dará a la información obtenida; entre otros.

Para el caso planteado en nuestro trabajo; la caracterización de nuestro sistema de cuenca a partir de los datos en forma de Entidades, Atributos, Relaciones y Procesos; tiene por objeto representar mediante un modelo y de alguna forma, el sistema real: la cuenca (Fig. 3.8).

La figura 2.1 ilustrada en el capítulo 2, muestra un esquema básico de un modelo de paisaje adaptado de acuerdo al planteamiento de nuestro trabajo. En tal esquema podemos observar una etapa intermedia denominada “*modelo representacional*” el cual como se mencionó, pretende mostrar esquemática, grafica o cartográficamente los elementos, las relaciones, la distribución y patrones que representen la dinámica del sistema que pretende modelarse; para nuestro caso, aquí se pretende representar detalles como: La distribución espacial de los elementos más importantes; Las relaciones espaciales entre ellos; y Los patrones de configuración espaciales que emergen a través de tales relaciones espaciales; todo ello a través de productos cartográficos, representaciones esquemáticas, graficas, estadísticas, etc.

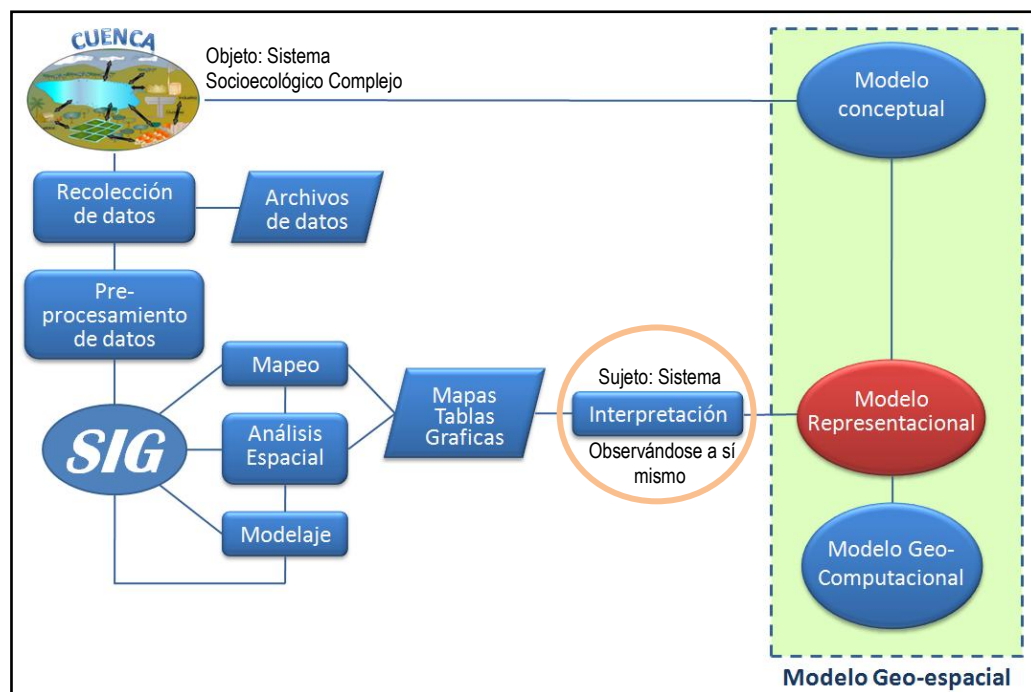
También ya fue mencionado que la información disponible del sistema a modelar puede ser de diversa índole y disponible a partir de diversas fuentes y por tanto también almacenada en diferentes medios y formatos, por lo que se hace necesario considerar la implementación de procesos de estandarización de la información. Este hecho junto con la necesidad de manipular grandes volúmenes de información con el fin de lograr representaciones cartográficas además de graficas y esquemáticas, hacen pensar de manera lógica y natural en el uso de un sistema de información geográfica, como el marco adecuado para desarrollar el modelo representacional que se busca.



**Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.**

En este contexto, los programas de software para integrar sistemas de información geográfica, se han posicionado como una tecnología básica imprescindible y poderosa para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y presentar datos espacialmente referenciados.

Como parte del diseño del modelo geo-espacial; podemos esquematizar el sistema de información y la incorporación de los sistemas de información geográfica en el desarrollo de una solución geomática geo-espacial (Fig. 3.8).



**Figura 3.8:** Representación del sistema de información e incorporación de un Sistema de Información Geográfica al desarrollo del Modelo Geo-Espacial. Elaboración propia a partir de: *Schematic representation of activities with respect to GIS.* (Scholten y Stillwell. 1990:44). *Understanding and managing the landscape as a complex system: What can bottom-up modeling approaches contribute?.* (Parrot, 2009:3)

En la figura anterior además de ilustrar el sistema de información, también podemos ver el sistema objeto: la cuenca, representado como un sistema socioecológico complejo; y además podemos ver mas allá del sistema de información el proceso de interpretación que realiza el sujeto, observando al sistema del cual el mismo forma parte. Este es un hecho relevante del proceso cibernético que caracteriza el modelo geo-espacial.

En la representación de nuestro sistema de cuenca; se busca que el modelo sea capaz de mostrar los elementos más importantes considerados en el análisis de la problemática; así como las relaciones y patrones entre éstos, espacialmente distribuidos. Según la figura anterior, con la incorporación de un sistema de información geográfica a nuestro modelo geo-espacial, primero los datos deben ser recolectados; esto puede ser mediante distintas técnicas: desde percepción remota hasta mediciones o entrevistas directas en los sitios de interés. Es común en estos proyectos, que la información se obtenga a partir del intercambio de distintas fuentes; por tanto es necesario desarrollar tareas de pre-procesamiento para estandarizar la información recabada; este proceso puede incluir interpolación, re-muestreo, transformación, escalamiento, agregación, reclasificación, etc. Los datos procesados son introducidos al sistema de información geográfica, en el cual se desarrollan otros distintos procesos y análisis complementarios; tales como: sobre-posición de capas, análisis multi-temporales, espacialización del fenómeno estudiado y otros más que sean necesarios para generar la información que necesitamos para de alguna manera obtener representaciones apropiadas que reflejen al sistema real (De Jong, 1990:43-45).

### **3.5.3 El Sistema Geo-Computacional**

Esta parte del diseño es también muy importante en la construcción de un modelo geo-espacial. El sistema geo-computacional está relacionado con el sistema de información; pues a partir de los datos que sea necesario almacenar, procesar, modificar y representar de nuestros subsistemas, se definirán los requerimientos que tienen que ver con la parte computacional. El sistema geo-computacional se puede organizar en dos grandes apartados: la parte computacional que tiene que ver con la gestión de la información y la parte computacional que tiene que ver con la infraestructura (Reyes, 2010).

Respecto a la gestión de la información; el sistema geo-computacional debe contemplar:

- Diseñar la base de datos geográfica;
- Diseñar la base de datos alfa numéricos;
- Definir la estructura de datos;
- Definir las interfaces con los usuarios; entre otras posibles

En lo que respecta con la infraestructura; el sistema geo-computacional debe contemplar:

- La determinación del Software que será utilizado, (qué Software y de que tipo: comercial, libre, desarrollado específicamente para el proyecto);
- Los requerimientos de Hardware apropiado (Equipos, graficadores, impresoras, periféricos, servidores, etc.);
- Arquitectura de los equipos;
- Plataforma de operación (Web o Stand Alone);
- Gadgets (Navegadores GPS, Ipod, HandHeld, etc.); entre otros posibles

### **3.5.4 Interacción del Modelo Geo-Espacial con los usuarios**

Con la caracterización de la cuenca y sus elementos; y la caracterización de sus relaciones y patrones espaciales; será posible identificar algunas tendencias de la dinámica del sistema a través del tiempo y con ello pueden construirse escenarios futuros bajo ciertas condiciones establecidas en torno al fenómeno o problemática estudiada. Cuando se habla de construcción de escenarios futuros, estamos ya en posibilidad de realizar simulaciones; tales simulaciones representadas a través de resultados validados (mapas, tablas, imágenes, reportes, gráficas, animaciones, etc.), eventualmente serán analizados por expertos con el objeto de evaluar los impactos negativos al sistema en caso de mantenerse las tendencias actuales de la dinámica del sistema; esto a la vez debe eventualmente contribuir al diseño de escenarios ideales que minimicen los impactos negativos y a partir de estos escenarios podrán

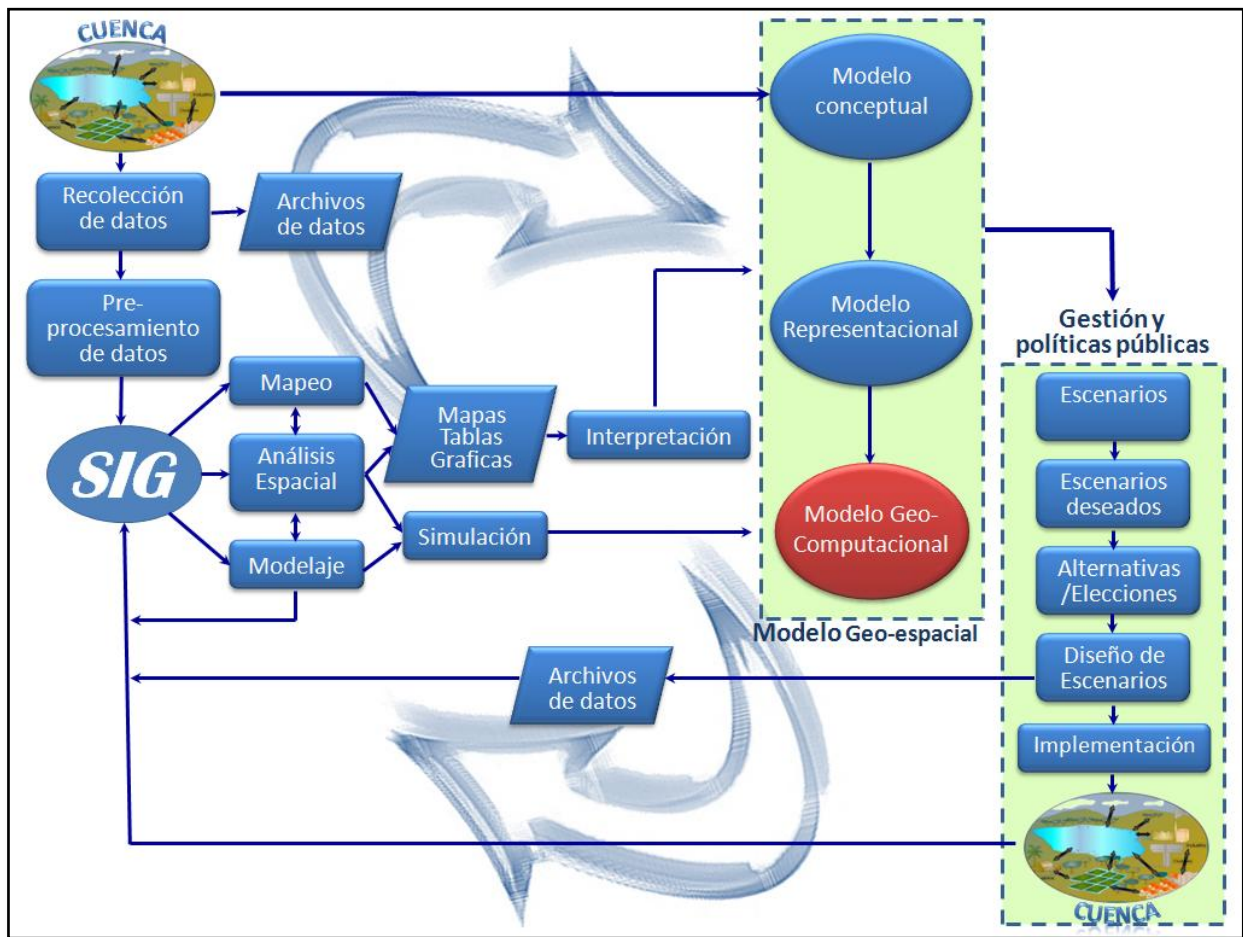
desprenderse las acciones y tareas específicas que puedan de alguna forma inducir e implementar las modificaciones necesarias al sistema real.

En esta etapa, se estará realizando un proceso de comunicación e interacción entre el modelo geo-espacial y los usuarios; a través de una interface de usuario del modelo geo-computacional. Es también en esta etapa donde eventualmente se realizara el proceso de toma de decisiones (Fig. 3.5) y el diseño de un plan preliminar de las posibles acciones que podrían implementarse. Estas acciones de corrección en primera instancia deben introducirse al modelo geo-espacial, para generar nuevamente todo el proceso pero ahora considerando las modificaciones al sistema y así evaluar su impacto completando con ello la etapa de simulación.

Puede verse claramente que en este proceso se generan ciclos de retroalimentación que son controlados y evaluados mediante la simulación a través del modelo geo-espacial y en este caso con la aplicación de un sistema de información geográfica como soporte. Todo este proceso de gestión de la información; su interpretación y representación, construcción de escenarios futuros, generación de propuestas de acciones correctivas y evaluación de los efectos de las mismas a través de la simulación, debe servir como sustento a las acciones y tareas de planeación, gestión y construcción de políticas públicas a ser implementadas de manera real al ecosistema que representa la cuenca.

Este proceso descrito, puede representarse esquemáticamente de manera completa en la (Fig. 3.9).

**Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.**



**Figura 3.9:** Representación del diseño conceptual del Modelo Geo-Espacial. Elaboración propia a partir de: *Schematic representation of activities with respect to GIS.* (Scholten y Stillwell, 1990:44). *Understanding and managing the landscape as a complex system: What can bottom-up modelling approaches contribute?* (Parrot, 2009:3).

La figura anterior representa nuestro modelo geo-espacial y en él puede observarse como se entrelaza nuestro sistema objeto: la cuenca, con el sistema de información, el sistema de información geográfica (geo-tecnología), el modelo representacional y el modelo geo-computacional. Puede también observarse el proceso de comunicación e interacción con los usuarios; todo ello encaminado hacia el soporte en la construcción de tareas de planeación.

También puede observarse que en el proceso global de modelado de escenarios futuros a partir de las tendencias actuales del sistema y la propuesta de alternativas para intentar modificar tales escenarios críticos por escenarios deseados; tendencias

***Solución geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Capítulo 3 – Un camino hacia la Solución geomática.***

---

que primero que nada son introducidas de regreso al modelo geo-espacial para simular y evaluar su impacto; se generan ciclos de retroalimentación que pueden repetirse las veces que sea necesario hasta afinar las acciones a implementar; resaltando una vez mas la naturaleza cibernética del proceso.

Como se mencionó al principio del capítulo, existe una relación directa entre la organización de una sociedad y la configuración de su espacio. El papel de la información geográfica validada y su difusión, es imprescindible en los procesos de planeación; además de que la ejecución de las decisiones de planificación siempre dejara huella a corto o largo plazo, sobre la estructura, funcionalidad y calidad de vida de los sistemas acoplados hombre-naturaleza (Nedovic`-Budic`,2000:1); y esto siempre se vera reflejado en el paisaje.

# **Conclusiones**

## **4. Conclusiones**

A lo largo de la historia reciente de la humanidad las actividades antropogénicas, han causado degradación cada vez mayor al medio ambiente y con ello un efecto de desequilibrio en los sistemas naturales de nuestro planeta de tal forma que se pone en riesgo su supervivencia. La búsqueda de soluciones en el intento de resarcir tales desequilibrios que históricamente han sido planteadas desde marcos teóricos desarrollados desde las disciplinas convencionales aplicadas de manera sectorial; han tenido resultados limitados.

Existen modelos de conocimiento desarrollados desde ciencias emergentes, como la teoría general de sistemas y la ciencia de la complejidad; a partir de las cuales se puede explorar los sistemas con el objetivo de entender las interacciones que se dan entre los sistema acoplados Hombre-Naturaleza, estos modelos de conocimiento en interacción con otros marcos teóricos de otras ciencias emergentes como la Geomática, permiten también el desarrollo de modelos cuyo objetivo es reproducir el estado actual de los ecosistemas; los daños ocasionados a los mismos. También pueden generarse modelos predictivos y de simulación a través de los cuales podemos construir los escenarios virtuales críticos a futuro bajo las condiciones específicas y tendencias actuales de la dinámica de los ecosistemas; todo ello en la búsqueda de soluciones alternas sustentadas en marcos científicos; que nos permitan ya no alterar más los sistemas y en lo posible, revertir los daños ocasionados; a partir de una gestión y planeación del los recursos del territorio en el marco de una cuenca.

En la búsqueda de alternativas que vengan a apoyar el objetivo planteado, el espacio juega un papel fundamental; pues como ya se explicó, el espacio no sólo es un elemento contenedor de los distintos componentes que conforman los sistemas y subsistemas existentes al interior de una cuenca sino que es el agente fundamental que permite en principio la propia existencia de los sistemas y a la vez es un agente integrador de todos elementos, permitiendo las interacciones entre ellos y flujos de materia, energía e información así como flujos de retroalimentación dando como



***Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Conclusiones.***

---

resultado de todos estos procesos, la distribución y construcción de patrones espaciales que caracterizan y tipifican de manera particular el territorio de una cuenca.

Bajo un enfoque sistémico, las autoridades y la sociedad están conformados en sistemas, y operando como agentes en constante interacción. Aplicando uno de los principios básicos de la teoría general de sistemas que dicta que todo sistema recibe entradas, realiza procesos y genera resultados; entonces es posible que estos sistemas sean capaces de construir conocimiento, realizar acciones, transformarse, evolucionar y quizá hasta dar lugar a otros sistemas. Bajo esta analogía, los flujos de entrada pueden estar representados por la información o el conocimiento del espacio y como resultados podemos tener las acciones realizadas por los agentes y actores sobre el territorio; formando así un ciclo de retroalimentación, donde el conocimiento y la información del espacio es transformado y se complementa a partir de las acciones implementadas que inciden y a la vez transforman el espacio.

Bajo este orden de ideas, la ciencia Geomática con sus modelos de conocimiento, escuela de pensamiento, herramientas, métodos y técnicas; conjugados con un enfoque holístico, sistémico, multidisciplinario y transdisciplinario; en conjunto con otros modelos de conocimiento desarrollados desde otras ciencias acordes al fenómeno que se pretenda explorar; debe jugar un papel fundamental de soporte científico para fortalecer y asegurar a la sociedad, mantener el ambiente, crear redes de conexión entre las personas a través del espacio, alcanzar un desarrollo sustentable de los sistemas cuidando el medio ambiente y los escasos recursos naturales vitales para la subsistencia del ser humano. El conocimiento que se genera a través de la Geomática, provee de una guía y asistencia para las prácticas económicas, políticas y sociales que aseguran el futuro de las actividades territoriales en un contexto globalizado. El conocimiento geo-espacial es requerido para sustentar la toma de decisiones acerca del territorio y la gestión planificada de los escasos recursos que hoy aun existen y así alcanzar un desarrollo balanceado social, económico y ambiental.

## **Bibliografía.**

- Agencia de noticias mundo (adnmundo) – Agencia informativa EFE. 2007. *China advierte una posible catástrofe ecológica*. Versión digital. Miércoles 26 de septiembre de 2007. Fuente: [http://www.adnmundo.com/contenidos/ambienteyenergia/catastrofe\\_medioambiental\\_ma\\_260907.html?PrintPage=1&New=1](http://www.adnmundo.com/contenidos/ambienteyenergia/catastrofe_medioambiental_ma_260907.html?PrintPage=1&New=1) (Consulta Junio 2011)
- Albalá, A. 2007. “Los territorios rurales como sistemas complejos en transición: resiliencia y capacidad adaptativa” en *Elementos institucionales en las zonas rurales: Una propuesta metodológica para su identificación y valoración en comarcas de Andalucía y Nicaragua*. Tesis doctoral (Especialista en Ciencias Económicas y Empresariales). España. Universidad de Córdoba, 967 p.
- Alberti, M. *et al.* 2003. Integrating humans into ecology: Opportunities and challenges for urban ecology. *BioScience* **53**, 169-179.
- Albuquerque, F., Dini, M. 2008. “El enfoque del desarrollo económico territorial”. En *Guía de aprendizaje sobre integración productiva y desarrollo económico territorial*. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Sevilla, España. Fundación Universitaria, 5-40.
- Anderies, J.M., Janssen M.A., Ostrom, E. 2004. A framework to analyze the robustness of socialecological systems from an institutional perspective. *Ecology and Society* **9**(1), 18 p.
- Awad, A., Dodd, Ch., Selkin, P. 2006. *Introduction to Earth systems science. Teaching quantitative skills in the Geosciences*. The Science Education Research Center at Carleton College (SERC). Fuente: <http://serc.carleton.edu/quantskills/courses/14007.html> (Consulta Marzo 2011).
- Baker, R.G.V., Boots, B. 2005. The quantitative revolution plus 55 years: Relevant, testable and reproducible modelling?. *Journal of Geographical Systems* **7**, 269-272.
- Batty, M., Densham, P.J. 1996. *Decision support, GIS, and urban planning*. London, U.K. University College London. Centre for Advanced Spatial Analysis, 9 p. Fuente: [http://www.acturban.org/biennial/doc\\_planners/decission\\_gis\\_planning.htm](http://www.acturban.org/biennial/doc_planners/decission_gis_planning.htm) (Consulta Junio de 2011).
- Beisner, B.E., Haydon D.T., Cuddington K. 2003. Alternative stable states in ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. **1**(7), 376-382.
- Camazine, S. *et al.* 2003. “What is Self-Organization?”. En *Self-Organization Biological Systems*. Princenton, N.J. Princenton University Press. (Princenton Studies of Complexity), 7-14.
- Cátedra de Ecología del Paisaje. 2010. *Ecología regional y ecología del paisaje: Historia y definiciones conceptuales*. Fuente: <http://epconsulta.blogspot.com/2010/08/tema-1-introduccion-historia-de.html> (Consulta Marzo de 2011).

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Bibliografía.**

---

- Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo-IDRC. ONU. 2008. "El ordenamiento territorial: Una herramienta para la gestión del riesgo". En *La Gestión del riesgo de desastres hoy. Contextos globales, herramientas locales*. Estrategias Internacionales para la Reducción de Desastres-IERD, 142-150. Fuente: <http://www.eird.org/gestion-del-riesgo/> (Consulta, Junio de 2011).
- Costanza, R. et al. 1993. Modeling complex ecological economic systems: towards an evolutionary dynamic understanding of people and nature. University of California. *BioScience* **43**, 545-555.
- Daily, G.C. et al. 2000. The value of nature and the nature of value. *Science* **289**, 395-396.
- Dajoz, R. 2001. *Tratado de ecología*. Madrid España. Mundi-Prensa, 600 p.
- Davis, M. 2008. Bienvenidos al Antropoceno. *Revista digital sinpermiso*. Fuente: <http://www.sinpermiso.info/textos/index.php?id=1954>. (Consulta Marzo de 2011).
- De Jong, W.M. 1990. "Geographical Information Systems Databases Design: Experiences of the Dutch National Physical Planning Agency". En Scholten, H., Stillwell, J. (Eds.), *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*. Netherlands. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 43-58.
- Delgado, M.M. 2004. *La política rural europea en la encrucijada*. Madrid, España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Serie: Estudios, 155, 351 p.
- Delgado, O. 2003. *Debates sobre el espacio en la geografía contemporánea*. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Unibiblios, 254 p.
- Dietz, T., Ostrom, E., Stern P.C. 2003. The struggle to govern the commons. *Science* **32**, 1907-1912.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., Chávez, G. 2002. *Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica*. Santiago de Chile. Publicación de las Naciones Unidas. CEPAL-ECLAC. División de Recursos Naturales e Infraestructura, 88 p.
- Eddy B.G., Taylor F. 2005. "Exploring the concept of Cybercartography using the holonic tenets of integral theory". En D.R.F. Taylor (Ed.), *Cybercartography: Theory and practice*. Amsterdam. Elsevier, 35-61.
- Enlaces y Comunicaciones del Sureste S.A. de C.V. *El Henequén*. Fuente: <http://thematrix.sureste.com/cityview/merida1/articulos/henequen1.htm>. (Consulta Junio 2011).
- Fernández, D.M. 2008. Antropoceno: La crisis ecológica se hace mundial. La expansión del capitalismo global choca con la Biosfera. *Ecologistas en acción*, 66 p. Fuente: <http://www.rebellion.org/docs/104656.pdf>
- Foley, J.A. et al. 2005. Global consequences of land use. *Science* **309**, 570-574.

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Bibliografía.**

---

- Folke, C. *et al.* 2004. Regime Shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review Ecology Evolution Systems*. **35**, 557-581.
- Fondo para la comunicación y educación ambiental. 2010. Centro virtual de información del agua. Fuente: [http://www.agua.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=section&id=12&Itemid=34](http://www.agua.org.mx/index.php?option=com_content&view=section&id=12&Itemid=34). (Consulta Octubre de 2010).
- Forrester, J.W. 1971. *World Dynamics*. Cambridge, Massachusetts. Wright-Allen, 114 p.
- Friedmann, J. 1987, *Planning in the public domain: From knowledge to action*. Princenton. Princeton University Press, 503 p.
- Gagnon, P., Coleman, D.J. 1990. Geomatics: An integrated, systemic approach to meet the needs for spatial information. Canadian Institute of Surveying and Mapping. *CISM Journal*. *ACSGC*, **44**(4), 377-382.
- Gall, N. 2010. From hierarchy to panarchy: Hybrid thinking's resilient network of renewal. *Gartner Research*, 27 p. Fuente [http://www.gartner.com/resources/209700/209754/from\\_hierarchy\\_to\\_panarchy\\_h\\_209754.pdf](http://www.gartner.com/resources/209700/209754/from_hierarchy_to_panarchy_h_209754.pdf)
- Galloway, J.N. *et al.* 2003. The nitrogen cascade. *BioScience* **53**, 341-356.
- García, Ch., W. 2002. *Planificación de cuencas hidrográficas bajo la perspectiva de los sistemas complejos*. Tesis Posgrado (Especialista en Gestión Agroambiental). Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Humanas, 22 p.
- Geyer, F., Van der Zowen, J. 1991. Cybernetics and social science: Theories and research in sociocybernetics. *Kybernetes* **20**, 81-92.
- Glanville, R. 2004. The purpose of second-order cybernetics. *Kybernetes* **33**, 1379-1386.
- Geomatics and Cartographic Research Centre. 2008. D.R.F. Taylor (1997, 2003). *Cybercartography* Fuente: <https://gcr.ccarleton.ca/confluence/display/GCRCWEB/Cybercartography>
- Gunderson, L.H., Holling, C.S. 2002. *Panarchy: Understanding Transformation in Human and Natural Systems*. Washington, D.C. Island Press, 508 p.
- Haberl, H. *et al.* 2006. From Long-Term Ecological Research (LTER) to Long-Term SocioEcological Research (LTSER): Conceptualizing the socioeconomic dimension of long-term socioecological research. *Ecology and Society* **11**(2):13, [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art13/>
- Heathcote, I.W. 1998. *Integrated watershed management: Principles and practice*. Nueva York, USA. John Wiley and Sons, 407 p.
- Heylighen, F. 1999. Collective intelligence and its implementation in the Web: Algorithms to develop a collective mental map. *Computational and Mathematical Organization Theory* **5**(3), 253-280.

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Bibliografía.**

---

- Heylighen, F. Joslyn, C. 2001. Cybernetics and second-order cybernetics. *Encyclopedia of physical science & technology*. New York, N.Y. R.A. Meyers. Academic Press, 24 p.
- Hixon, M.A., Pacala, S.W., Sandin, S.A. 2002. Population regulation: Historical context and contemporary challenges of open vs. closed systems. *Ecology* **83**(6), 1490-1508.
- Holling, C.S. 2001. Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. *Ecosystems* **4**, 390-405.
- Holling, C.S., Gunderson, L.H. 2002. "Resilience and adaptative cycles". En Gunderson, L.H. y Holling, C.S (Eds.), *Panarchy: Understanding transformation in human and natural systems*. Washington, D.C. Island Press, 25-62.
- Hopkins, L.D., 1999. *Structure of a planning support system for urban development. Environment and Planning B: Planning and Design.* **26**(3), 333-343.
- Hynes, H.B.N. 1975. The stream and its valley. Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte. *Limnologie* **19**, 1-15.
- Kawata, M., Toquenaga, Y. 1994. From artificial individuals to global patterns. *Trends in Ecology and Evolution* **9**(11), 417-421.
- Kay, J.J., Regier, H.A., Boyle, M., Francis, G. 1999. An ecosystem approach for sustainability: Addressing the challenge of complexity. *Futures* **31**(7), 721-742.
- Kay, J.J. 2000. "Ecosystems as self-organizing holarchic open systems: Narratives and the second law of thermodynamics". En Sven Erik Jørgensen, Felix Müller (Eds.), *Handbook of ecosystem theories and management*, CRC Press - Lewis Publishers, 135-160.
- Kay, J.J. 2008. "Framing the situation: Developing a system description". En Walter-Toews, D. Kay, J.J., Lister, N.-M. (Eds.), *The ecosystem approach. Complexity, uncertainty and managing for sustainability*. New York, N.Y. Columbia University Press, 15-36.
- Konecny, G. 2003. *Geoinformation. Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*. New York, N.Y. Taylor & Francis, 248 p.
- Lawton J. 2001. Earth System Science. *Science*. **292**(5524).
- Lebel, L. et al. 2006. Governance and the capacity to manage resilience in regional social-ecological systems. *Ecology and Society* **11**(1):19. [online] URL:<http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art19/>
- Lee, C. 1971. *Models in planning: An introduction to the use of quantitative models in planning*. Oxford N.Y. Pergamon Press, 152 p.
- Liu, J. et al. 2007a. Coupled human and natural systems. Royal Swedish Academy of Science. *Ambio* **36**(8), 639-645.
- Liu, J. et al. 2007b. Complexity of coupled human and natural systems. *Science* **317**, 1513-1516.

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Bibliografía.**

---

- Luscombe, B.W. 1986. *Spatial data handling in data-poor environments*. PhD diss. Burnaby, British Columbia. Simon Fraser University, 300 p.
- Manson, S., O'Sullivan, D. 2006. Complexity theory in the study of space and place. *Environment and Planning A*. **38**(4), 33 p.
- Martínez, E., Reyes M. del C. 2005. "Cybercartography and society". En D.R.F. Taylor (Ed.), *Cybercartography: Theory and practice*. Amsterdam. Elsevier, 99-121.
- Matteucci, S.D., Buzai, G.D. 1998. *Sistemas ambientales complejos: Herramientas de análisis espacial*. Buenos Aires, Argentina. EUDEBA, 476 p.
- Maturana, H.R., Varela, F.J. 1980. *Autopoiesis and cognition. The realization of the living*. Netherlands. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 149 p.
- McDonnell, M.J., Pickett, S.T.A. 1993. *Humans as components of ecosystems: The ecology of subtle human effects and populated areas*. New York, N.Y. Springer-Verlag, 364 p.
- McIntosh, R.P. 1985. *The background of ecology. Concept and theory*. Cambridge, U.K. Cambridge University Press, 400 p.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W. III 1972. *The limits to growth*. New York, N.Y. Potomac Associates, 86 p.
- Melo, V., Cuamatzi, O. 2007. *Bioquímica de los procesos metabólicos*. México, D.F. 2ª Ed. Reverté, 406 p.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: Opportunities and challenges for business and industry*. Washington, D.C. Island Press, 36 p.
- Moreno, A., 2006. *Sistemas y Análisis de la Información geográfica. Manual de auto aprendizaje con ArcGIS*. Madrid, España. Alfaomega Ra-Ma, 895 p.
- Morin, E. 2005. *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona, España. Gedisa, 358 p.
- Muñoz, E. 2006, *El Papel de la cybercartografía en la elaboración de políticas públicas territoriales*. Tesis de maestría en geomática. México, D.F. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A. C., 68 p.
- Myers, M. D. 2011. "Qualitative research in information systems". *MIS Quarterly* (21:2), 241-242. MISQ Discovery, archival version, June 1997, [http://www.misq.org/discovery/MISQD\\_isworld/](http://www.misq.org/discovery/MISQD_isworld/). MISQ Discovery, updated version, last modified: February 17, 2011, 16 p.
- Nagaratna, P., MuraliKrishna, I., ChalapatiRao, K. 2007. Study of cellular automata models for urban growth. *Map World Forum*. Hyderabad, India. GIS Development, Fuente: [http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapworldforum/nrem/MWF\\_natural\\_169.pdf](http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapworldforum/nrem/MWF_natural_169.pdf)
- Naiman, R.J., Bilby, R.E. 2001. *River ecology and management. Lessons from the Pacific Coastal ecoregion*. Tacoma, USA. Springer-Verlag, 705 p.

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Bibliografía.**

---

- National Academy of Sciences (NAS) 2007. *The international geophysical year*. <http://www7.nationalacademies.org/archives/igyhistory.html>. (Consulta Agosto 2010).
- Nedovic`-Budic`, Z. 2000. Geographic information science implications for urban and regional planning. *URISA Journal* **12**(2), 81-93.
- Page, S.E. 2005. *Agents based models*. Center for the Study of Complex Systems (CSCS). University of Michigan, 12 p. Fuente: <http://cscs.umich.edu/~spage/palgrave.pdf>
- Parkes, M.W. et al. 2008. *Ecohealth and watersheds: ecosystem approaches to re-integrate water resources management with health and well-being*. Winnipeg, M.B. Canadá. Network for Ecosystem Sustainability and Health and the International Institute for Sustainable Development, 63 p.
- Parrot, L. 1995. *The EcoCyborg Project: A model of an artificial ecosystem*. Thesis of the degree of Master of Science. Montreal, Canada. Department of Agricultural Engineering McGill University, 108 p.
- Parrot, L., Kok, R. 2000. Incorporating complexity in ecosystem modelling. *Complexity International* **7**, 1-19 p.
- Parrot, L. 2009. *Understanding and managing the landscape as a complex system: What can bottom-up modeling approaches contribute?*. Adelaide, Australia. Symposium of the Spatial Sciences Institute Biennial International Conference 30 September - 1 October 2009. Adelaide Convention Centre, 15 p.
- Petts, G.E., Amoros, C. 1996. *Fluvial Hydrosystems*. London, U.K. Chapman and Hall, 322 p.
- Pontificia Universidad Javeriana. 2009. *Propuesta de política nacional de biodiversidad*. Bogotá, Colombia. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 51 p.
- Porras, A. 2007. *Cibercartografía en la WEB: Conocimiento, Representación y Comunicación*. Tesis de maestría en Geomática. México, D.F. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A. C., 116 p.
- Pozo, J., Elosegui, A. 2009. "El marco físico: La Cuenca". En Elosegui, A., Sabater, S. (Eds.), *Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial*. España. Fundación BBVA, 39-49.
- Reyes M. del C. 2005a. "Cybercartography from a modeling perspective". En D.R.F. Taylor (Ed.), *Cybercartography: Theory and practice*. Amsterdam. Elsevier, 63-97.
- Reyes M. del C., Martínez E. 2005b, "Technology and culture in cybercartography" En D.R.F. Taylor (Ed.), *Cybercartography: Theory and practice*. Amsterdam. Elsevier, 123-148.
- Reyes, M. del C., Taylor F., Martínez, E., López, F. 2006. Geo-cybernetics: A new avenue of research in geomatics?. *Cartographica* **41**(1), 7-20.
- Reyes, M. del C. 2010. *Análisis espacial y sistemas de información geográfica*. Apuntes y presentación de clase. Versión digital. Especialidad en Geomática. México, D.F. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A. C., 34 p.

**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Bibliografía.**

---

- Sabater, S., Elosegui, A. 2009. "Presentación: importancia de los ríos" En Elosegui, A., Sabater, S. (Eds.), *Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial*. España. Fundación BBVA, 15-21.
- Sánchez, F.J. 2011. *El ciclo hidrológico*. Salamanca, España. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca, Fuente: [http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Ciclo\\_hidrol.pdf](http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Ciclo_hidrol.pdf).
- Sanders, L. 2007. *Models in spatial analysis*. London, U.K. Iste Ltd, 319 p.
- Scholten, H.J., Stillwell, J. 1990. *Geographical information systems for urban and regional planning*. Netherlands. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 263 p.
- Schumpeter, J.A. 1943. *Capitalism, socialism and democracy*. New York, N.Y. Taylor and Francis, 437 p.
- Silva, N., Vázquez, R., López, V., Barrón, M.R. 2009. *Herramienta geomática participativa para la integración del plan rector de las áreas naturales protegidas del Distrito Federal*. Proyecto final de Especialidad en Geomática. México, D.F. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A. C., 73 p.
- Steffen, W. et al. 2004. *Global change and the Earth system: A planet under pressure*. Executive Sumary. New York, N.Y. Springer-Verlag, 44 p.
- Stern, P.C. 1993. A second environmental science: Human-environment interactions. *Science* **260**(5116), 1897-1899.
- Taylor, P. 2010. *Integrative sciences for society and environment: A strategic research initiative*. 2010. National Science Foundation, 35 p. Fuente: [http://www.nrs.fs.fed.us/urban/ultra/local-resources/docs/ISSE\\_complete\\_10April.pdf](http://www.nrs.fs.fed.us/urban/ultra/local-resources/docs/ISSE_complete_10April.pdf)
- Tilman D. et al. 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* **292**, 281-284.
- Toews, D.W., Kay, J.J., Lister, N.-M.E. 2008. *The ecosystem approach: Complexity, uncertainty, and managing for sustainability*. New York, N.Y. Columbia University Press, 389 p.
- Toledo, A. 2006. *Agua, hombre y paisaje*. México, D.F. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Instituto Nacional de Ecología (INE). Centro de Investigaciones y Estudios Sociales en Antropología Social (CIESAS), 260 p.
- Trujillo, J. 2009. *Cibercartografía Web: Hacia la construcción de un modelo colaborativo de conocimiento cibercartográfico*. Tesis de maestría en Geomática. México, D.F. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A. C., 96 p.
- Vernadsky, V.I. 2005. The Biosfere and the Noösphere. *EIR Online*. Feb 18 de 2005 **32**(7), 30-33. Fuente: <http://larouchepub.com/eiw/public/2005/eirv32/eirv32n07.pdf>
- Walker, B. et al. 2002. Resilience management in socialecological systems: A working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology* **6**(1), 14 p.



**Solución Geomática para cuencas hidrográficas.  
Una Aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos.  
Bibliografía.**

---

- Ward, J.V., Tockner, K. 2001. Biodiversity: Towards a unifying theme for river ecology. Department of Limnology, EAWAG/ETH, Switzerland. *Freshwater Biology* **46**, 807-819.
- White, R., Engelen, G. 2004. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling. *Environment and planning B: Planning and Design* **24**, 235-246.
- Wiens, J. A., 2002. Riverine landscapes: Taking landscape ecology into water. *Freshwater Biology* **47**, 501-515.
- Winter, T.C. 2001. The concept of hydrologic landscapes. *Journal of the American water resources association* **37**(2), 335-349.