

Una red conceptual multinivel para analizar, modelizar y medir la sostenibilidad en sistemas socio-ecológicos

A multilevel conceptual network for analyze, modeling and measuring the sustainability in societal-ecological systems

Paolini R., Jorge^{1,2*}; De Felipe, José Juan¹; Sureda, Bárbara¹; Bermúdez, Darío² y Rosales, Judith²

¹ Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. Universidad Politécnica de Cataluña. Colom¹, Terrassa 08222. España.

²Universidad Nacional Experimental de Guayana. Postgrado UNEG. Ciudad Guayana. Venezuela

*jorge.paolini@catunesco.upc.edu

Resumen

La propuesta que se presenta muestra el diseño de una red conceptual multinivel para determinar la sostenibilidad de un sistema socio-ecológico. Tal diseño pasa por establecer diferentes niveles conceptuales para determinar la sostenibilidad. Los niveles del constructo son las disciplinas, los conceptos e hipótesis y los observables. Cada disciplina, relacionada con el objeto de estudio, aporta conceptos e hipótesis sobre el sistema observado. Una determinada disciplina ordena y genera el modo como podemos observar la realidad. Los observables, bien sean cualitativos o cuantitativos, permiten determinar el grado en que una categoría o un concepto se realiza en el sistema que se observa. El trabajo se ilustra con el estudio del impacto del mercurio proveniente de la minería artesanal en la cuenca baja del río Caroní.

Palabras clave: red conceptual, sostenibilidad, pensamiento complejo, cuenca hidrográfica.

Abstract

The paper presented shows the design of a multilevel conceptual network to determine the sustainability of societal-ecological system. Such design establishes different conceptual levels to determine the sustainability. These levels are the disciplines, the concepts and hypothesis and the observables. Each discipline related with the system studied contributes with concepts and hypothesis about the observed system. Observables whether qualitative or quantitative allows us to determine and observe the reality in order to quantify the sustainability. This work is illustrated by studying the impact of mercury from artisanal mining in the Caroni River downstream.

Key words: conceptual network, sustainability, complex thinking, river basin.

1 Introducción

El estudio de espacios en los que existen interacciones humanas con la naturaleza es de especial importancia para la observación y modelado de la sostenibilidad. En esos espacios donde la intervención humana deja sus huellas deteriorando el ambiente, es una cuestión imperiosa la observación y la detención de los daños. Por tanto, el diseño de modelos que cuantifiquen la sostenibilidad en estos ambientes, más que un trabajo académico es una cuestión de responsabilidad social y revela el papel que deben jugar los investigadores para alertar a los tomadores de decisiones sobre la situación de los sistemas socio-ecológicos. Este trabajo tiene como objetivo diseñar un constructo que a partir de 'lo disciplinar' se pueda construir una red que conecte conceptos, hipótesis y observables en un plexo de

relaciones que permita cuantificar la sostenibilidad de un sistema socio-ecológico. Partiendo de los principios del pensamiento complejo se diseña una red conceptual multinivel (RCM) con los observables que sirven de fundamento para la construcción de cantidades que cuantifican la sostenibilidad de un sistema socio-ecológico. La red se construye considerando que las disciplinas relacionadas en el estudio de espacios socio-ecológicos permitan determinar la sostenibilidad de los sistemas observados. De las disciplinas se derivan los conceptos, las hipótesis y los observables cuantitativos para la determinación de la sostenibilidad.

2 La red conceptual multinivel

La red conceptual multinivel puede definirse como un aparato conceptual (constructo) para hacer viable el análisis

sis, la modelización y el cálculo de una medida de la sostenibilidad en espacios socio-ambientales. Con este constructo se postula un diseño que considera como un sistema el conjunto de disciplinas relacionadas con la situación observada en el sistema socio-ambiental considerado, un conjunto de conceptos derivados de las disciplinas, las hipótesis necesarias para determinar la sostenibilidad y los observables que permiten la modelización y la cuantificación de la sostenibilidad. En este sentido la RCM es un modelo teórico que proporciona una manera de concebir la modeliza-

ción y la medición de la sostenibilidad a partir de las disciplinas relacionadas con el sistema observado. En la figura 1 se observa la estructura de una RCM para la medición de la sostenibilidad. Está conformada por la idea central de sostenibilidad y la jerarquía disciplina-concepto-observable. De cada una de las disciplinas relacionadas se derivan conceptos y de ellos se ‘desprenden’ los observables (graficados como rectángulos) para la determinación de la cuantificación de la sostenibilidad.

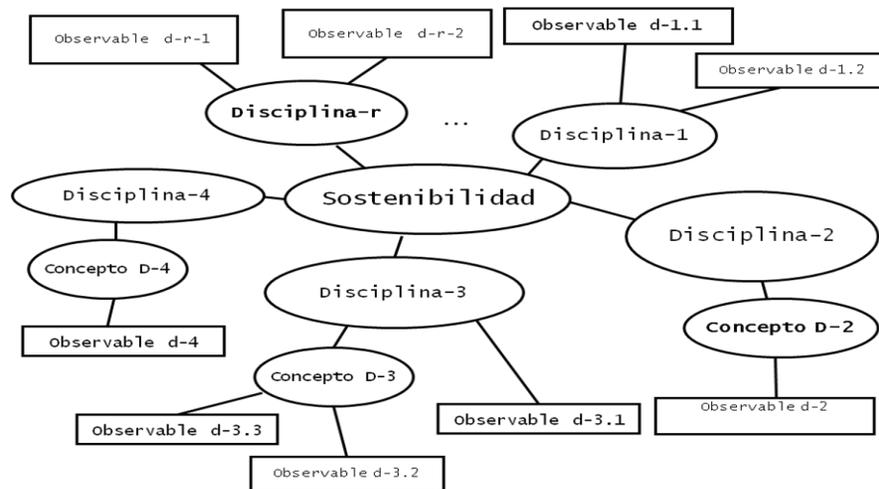


Fig. 1. Una red conceptual multinivel

Para lograr el análisis de la sostenibilidad en el sistema socio-ambiental que se estudia, el modelo conceptual relaciona el pensamiento complejo, el enfoque de sistemas (sistémica) y los métodos cuantitativos. La RCM es un modelo en el sentido en que Falguera lo establece: “un sistema mediante el cual se postula una representación conceptual de un asunto determinado conforme a determinada finalidad. Dicha representación conceptual es un sistema abstracto” (1994a, p.237). Suscribir esta definición nos obliga a describir los tres componentes mencionados por Falguera (1994b, p.17) en la construcción de modelos, a saber: soporte material, representación conceptual (sistema abstracto) y asunto o finalidad.

Consideremos en primer lugar el soporte material que se utiliza en la RCM. Este soporte se basa en la noción de grafo, es decir, un conjunto de vértices (sostenibilidad, disciplinas-conceptos-observables) unidos por un conjunto de arcos (líneas) y una relación de jerarquía que depende de un vértice único y central ocupado por la entidad interdisciplinaria, objeto de la red: la sostenibilidad. Alrededor de este vértice central se “agregan” –por así decirlo– las disciplinas con sus respectivos conceptos y observables. La tríada conformada por vértices, arcos y una relación jerárquica, es el soporte material fundamental que proporciona la estructura de la red. En los vértices se encuentran las disciplinas, los

conceptos y los observables. Los arcos o líneas unen los elementos conceptuales en relación jerárquica. La relación jerárquica viene dada por los niveles conceptuales, de las disciplinas se derivan los conceptos y de éstos los observables.

En segundo lugar tenemos que la red está conformada por un conjunto de relaciones entre el sistema socio-ecológico y los hechos instanciados en los observables, utilizando conceptos e hipótesis. Los observables evidenciarán los puntos donde acontecen y ocurren los acoplamientos entre el sistema social y el sistema ambiental. Los observables destacan los puntos focales donde los seres humanos tienen un “encuentro” con el ambiente, es decir, donde ocurre una o más transformaciones que tienen relevancia para la sostenibilidad del sistema observado. La representación conceptual o sistema abstracto está conformado en primera instancia por la red misma con la idea central de sostenibilidad como concepto consiliente, entendiendo por consilencia la consistencia y coherencia que existe entre las disciplinas que observan un sistema común (Maurer, 2000). Otro de los elementos del sistema abstracto es el conjunto de relaciones que se diseña y construye a partir de la red y de los métodos cuantitativos.

Para establecer las relaciones utilizamos un conjunto de principios del pensamiento complejo desarrollado por

Morin (2004, 2005). Uno de los principios que se toma en cuenta es el principio de integración, que nos orienta en la composición de la red considerando diversas disciplinas, imbricándolas en un tejido conceptual coherente. El principio de multi-factorialidad o multi-dimensionalidad considera distintos factores y dimensiones en la construcción de las relaciones: los factores eco-biológicos, los factores sociales y la dimensión espacio-temporal. El principio de jerarquización permite seleccionar los datos significativos y no significativos para la concepción de los observables de la red que permitirá modelar algunos aspectos de una cuenca hidrográfica. García (2006) establece la inter-definibilidad y la mutua dependencia como principios de la complejidad. La inter-definibilidad para un sistema complejo no puede determinarse sólo a partir de la suma de disciplinas sectoriales, sino a partir de la integración de los factores esenciales del estudio. Así mismo, el principio de mutua dependencia determina que la alteración que ocurre en un sistema complejo se propaga de diversos modos a través del plexo de relaciones que conforman el sistema observado. Se destaca en la construcción conceptual el carácter multidisciplinario e inter-definible de los fenómenos que acontecen en una cuenca hidrográfica. Finalmente, cuantificar la sostenibilidad de sistemas socio-naturales es el asunto o finalidad de este modelo conceptual. Esta cuantificación se hace posible a partir de los observables relacionados con los acoplamientos entre el sistema social y natural. Para la cuantificación se determinan las relaciones y se obtienen indicadores e índices de aquellos puntos focales que tienen vital importancia para la sostenibilidad del sistema socio-ecológico.

3 Caso de estudio: la minería artesanal en la cuenca baja del río Caroní

Las cuencas de la Guayana venezolana están siendo objeto de un deterioro continuo debido a actividades mineras que impactan y alteran los ecosistemas acuáticos y terrestres. En adición a esto se realizan incendios de suelos para 'limpiar' las tierras que se dedicarán a actividades agrícolas y ganaderas (Picón, 2007; EDELCA, 2004). La cuenca del río Caroní está situada en el sur-oriente de la República Bolivariana de Venezuela, como se muestra en la figura 2. Allí puede verse la ubicación de la cuenca baja del río Caroní, donde se encuentra el reservorio de agua de Guri, que sirve a la central hidroeléctrica Raúl Leoni como fuente de suministro de agua.

Las actividades de extracción de oro de la minería artesanal no sólo deterioran los suelos y la cobertura vegetal, además sus desechos son vertidos al ambiente. En la minería artesanal del oro se utilizan métodos rudimentarios de extracción que utilizan generalmente mercurio para amalgamar los metales, convirtiéndose este mercurio en uno de los residuos de la obtención del oro (Bermúdez y col., 1999). Huidobro y colaboradores (2004) estiman que el 90% del oro proveniente de este método de extracción es atrapado por el mercurio en la mezcla amalgamada. Esta amalgama se quema al aire libre para separar los metales, el mercurio se evapora y se deposita en el suelo, las plantas y en las aguas. Este tipo de proceso de producción de oro genera daños y alteraciones en el plano ecológico, ya que el mercurio vertido al ambiente pasa a las cadenas tróficas de la fauna terrestre y acuática.

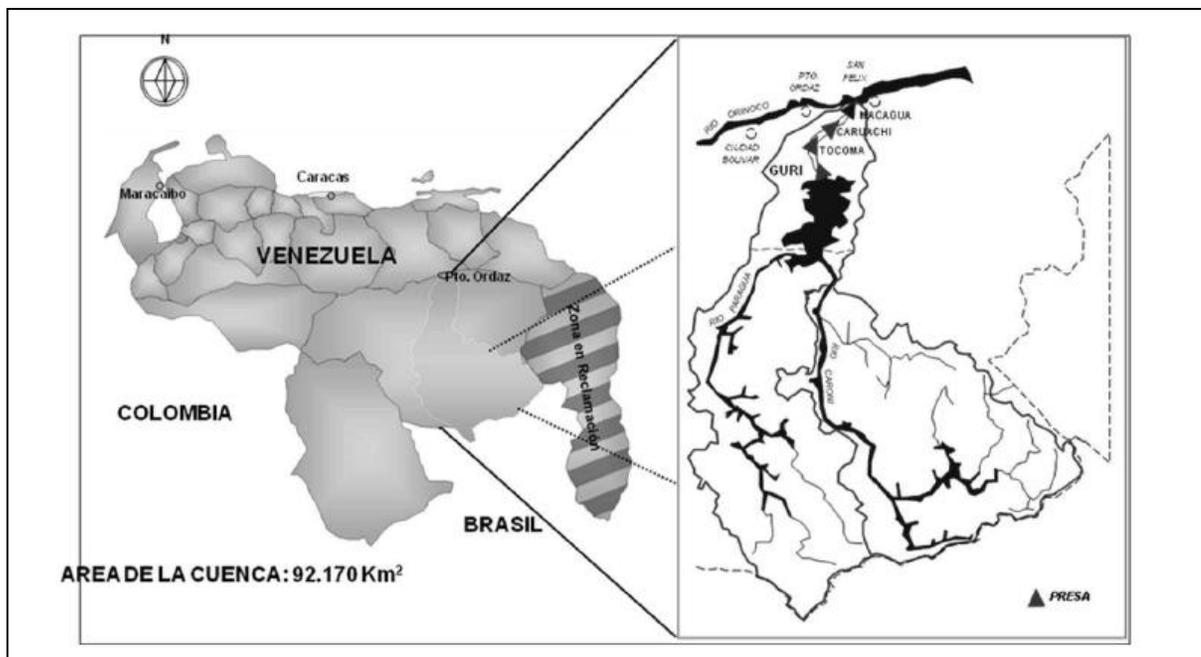


Fig. 2. Ubicación geográfica de la cuenca del río Caroní
Fuente: Cartografía Nacional de Venezuela y CVG EDELCA

Veiga y Baker (2005) recomiendan muestrear el mercurio en peces por dos razones: en primer lugar para determinar las cantidades de mercurio que pueden pasar a los habitantes ribereños a través de la ingesta de peces. En segundo lugar para determinar la biodisponibilidad de mercurio debida a la minería artesanal, es decir, se desea determinar el impacto de la minería en las cadenas tróficas. Novo (2006) lo refiere de esta manera: "ahora los tóxicos se vuelven contra nosotros, y acaban siempre reapareciendo en las cadenas tróficas de uno u otro modo". En este caso, los peces actúan como bioindicadores mostrando los niveles de mercurio en sus tejidos. La determinación de mercurio en los peces es un indicador del impacto de las actividades mineras en las cuencas de los ríos de la Guayana Venezolana. Los numerosos impactos ambientales de la minería artesanal de pequeña escala son quizás los de mayor preocupación para muchos observadores del sector minero. Se tiene "la contaminación mercurial y por cianuro, los desechos de restos y aguas residuales en los ríos, daños al río en zonas aluviales, alta sedimentación del río, daños por erosión, deforestación y destrucción del paisaje" (MMSD, 2005). Estos impactos están afectando a las poblaciones ribereñas que dependen de estos recursos naturales (agua, bosques, animales) para su supervivencia. En consecuencia se plantea diseñar un estudio que cuantifique los efectos de estas actividades antrópicas sobre los ecosistemas y los pobladores de la cuenca baja del río Caroní en términos de un marco para la sostenibilidad.

Se diseñó un estudio de campo muestreando tres poblaciones ribereñas del reservorio de Guri para determinar la ingesta de pescado y los niveles de mercurio en los pobladores. Así mismo se elaboró una batería de pruebas para determinar la respuesta neurológica de la muestra de pobladores escogida. Las poblaciones escogidas fueron: El Manteco (nM=206), La Paragua (nP=186) y Los Guacos (nG=79). Para determinar los niveles de mercurio en los pobladores se construyeron unos criterios de inclusión que permitieron discriminar la muestra. Se incluyeron a las personas que consumieran peces del reservorio de Guri, con un consumo igual o mayor a 500 gramos/semana, cuya edad

estuviese comprendida entre 30 y 60 años y con un índice de masa corporal entre 18 y 30 Kg/m². Se excluyeron de la muestra a aquellas personas que estaban expuestas al mercurio debido al trabajo en la minería u odontología, a los que hicieran uso de plaguicidas, gasolina y kerosén y aquellos que tuvieran historias de desórdenes neurológicos, así mismo, se excluyeron a aquellas mujeres en estado de gravidez (Bermúdez, 2008). Aplicando los criterios mencionados, el número de personas que resultaron seleccionadas para los estudios neuroconductuales y las muestras de mercurio en cabello, fueron n1=51 en El Manteco, n2=34 en la Paragua y n3=13 en Los Guacos. A estas personas se les aplicaron cuatro pruebas neuroconductuales diseñadas para estudios neurotóxicos descritas en el manual de Pruebas neuroconductuales (Van Wendel y col., 2000). Las pruebas aplicadas fueron: Dígitos y Símbolos (dominio cognitivo), Santa Ana versión Helsinki (dominio cognitivo-motor), Tamborileo (dominio motor) y la Evaluación Neurológica Cuantitativa de Panisset (dominio motor). Todas las pruebas se aplicaron a la muestra de los pueblos considerados y a un grupo de n=12 personas no expuestas al consumo de peces del reservorio de Guri y de los cuerpos de agua tributarios en la cuenca baja del río Caroní.

Una de las hipótesis que se desea probar en este trabajo es la de neurotoxicidad en los pobladores ribereños debido a la ingesta de peces contaminados con mercurio. La toxicidad del mercurio depende de su forma química. Una de las formas más comunes en la naturaleza es el metilmercurio, cuya toxicidad está bien caracterizada y documentada como neurotóxico (UNEP, 2000). Se define neurotoxicidad como los déficits cognitivos presentes en las personas expuestas a sustancias químicas tóxicas y que se evidencian a partir de las pruebas neuroconductuales cuando se comparan con grupos de personas no expuestas (Slikker y col., 2000). Los resultados de las pruebas neuroconductuales se muestran en la tabla 1. Allí podemos observar los valores promedio de cada uno de los test ejecutados en las poblaciones expuestas y en la no expuesta al consumo de peces del reservorio Guri y ríos aledaños.

Tabla 1. Promedios de las puntuaciones de las pruebas neuroconductuales

| Población | Santa Ana | Dígitos y Símbolos | Tamborileo | Panisset |
|-------------|-----------|--------------------|------------|----------|
| El Manteco | 73,43 | 17,64 | 55,45 | 153,81 |
| La Paragua | 69,76 | 30,57 | 45,25 | 156,09 |
| Los Guacos | 64,26 | 25,88 | 48,16 | 166,52 |
| No Expuesta | 88,25 | 54,08 | 132,75 | 101,08 |

Para el análisis de los resultados de las pruebas Santa Ana, Dígitos y Símbolos y Tamborileo, se tiene que considerar que las respuestas neuroconductuales con déficits neurológicos están asociadas a puntuaciones bajas en los test, mientras que en la prueba Panisset los valores altos indican déficits neurológicos. Nótese que en la población no expuesta los valores promedios de las tres primeras pruebas neuroconductuales se obtienen las puntuaciones más altas,

mientras que en la prueba Panisset, el conjunto de personas no expuesta obtiene la menor puntuación promedio que se relaciona con bajos déficits neurológicos. Las mediciones de mercurio en cabello se realizaron a la población expuesta y a la población no expuesta. En todos los análisis efectuados se tomó el promedio de dos réplicas de cada muestra, las mediciones se realizaron en una muestra de cabello de la región occipital en la que se evalúa mercurio total mediante

la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica por combustión con un analizador de mercurio AMA-254. Para las pruebas de laboratorio se utilizó material certificado de referencia proveniente del Consejo de Investigación Nacional de Canadá (Bermúdez, 2008).

En la tabla 2 se pueden observar los valores promedios de la suma de los puntajes de las pruebas neuroconductuales de cada una de las poblaciones seleccionadas y respectivamente los valores promedios del contenido de mercurio en cabello. Los valores en la tabla fueron ordenados de modo creciente de izquierda a derecha. Se puede notar que los valores mayores de la suma de puntajes de las pruebas neuroconductuales se corresponden con valores menores de con-

tenido promedio de mercurio total en cabello. Se encontró una relación inversamente proporcional entre los puntajes obtenidos en las pruebas neuroconductuales y los contenidos de mercurio total en cabello ($r = -0,62$). Se utiliza la suma de puntajes como un indicador que resume los resultados de las pruebas neuroconductuales asumiendo que se corresponden con una suma de variables aleatorias. Para efectos de las pruebas estadísticas utilizadas en el presente estudio, se parte del supuesto que la suma de los puntajes de las pruebas neuroconductuales se distribuye como una variable aleatoria normal (Dytham, 2003; Walpole y col., 2007; Emdem, 2008).

Tabla 2. Valores promedios de la suma de los puntajes en las Pruebas Neuroconductuales y contenido promedio de mercurio total en cabello.

| | No Expuesta | El Manteco | La Paragua | Los Guacos |
|---|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Suma de puntajes de las pruebas Neuroconductuales | 374,10 | 192,73 | 189,49 | 171,78 |
| Hg en cabello (ppm) | 1,16 ± 1,48 | 2,06 ± 1,55 | 5,91 ± 3,20 | 12,81 ± 6,22 |

Para evaluar la hipótesis de neurotoxicidad, se comparan cada una de las poblaciones expuestas con el conjunto de personas no expuestas al consumo de peces, para ello se utiliza la prueba t-Student de diferencia de promedios. Las muestras se consideran homogéneas ya que el análisis de varianza del Índice de Masa Corporal (IMC) indica que no hay diferencias significativas ($p=0,56$) entre los promedios observados. La tabla 3 muestra las comparaciones de las pruebas neuroconductuales entre cada una de las poblaciones (El Manteco, La Paragua y los Guacos) con la muestra de personas no expuestas. Adicionalmente, se observan los resultados de las pruebas de promedios entre las poblaciones expuestas y la muestra control (población no expuesta)

para la variable mercurio en el cabello. Tanto en las pruebas neuroconductuales como en las pruebas de mercurio en cabello, existen diferencias significativas entre las poblaciones expuestas y la población no expuesta al consumo de peces contaminados de mercurio. Por tanto, podemos afirmar que existen evidencias para concluir que son altamente probables los indicios de neurotoxicidad en las poblaciones que consumen peces con los niveles de mercurio encontrados. La comprobación empírica de esta hipótesis muestra el impacto de la explotación de la minería en poblaciones ribereñas, ya que hasta que no se evalúe empíricamente una hipótesis no se considerará una explicación razonable del fenómeno observado (King y col., 2000).

Tabla 3. Resultados de la hipótesis de Neurotoxicidad

| Población | Pruebas Neuroconductuales | | Hg en cabello (ppm) | |
|------------|---------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| | Valor de p | Resultado de la prueba | Valor de p | Resultado de la prueba |
| El Manteco | 0,0 (t=49,1) | significativa | 0,056 (t=1,98) | poco significativa |
| La Paragua | 0,0 (t=23,0) | significativa | 0,0 (t=8,36) | significativa |
| Los Guacos | 0,0 (t=23,9) | significativa | 0,0 (t=6,73) | significativa |

Otra de las hipótesis que se desea probar en el estudio de sostenibilidad de la cuenca baja del río Caroní, es la de biomagnificación. Se entiende por biomagnificación el incremento de la concentración de una sustancia –usualmente tóxica a lo largo de una cadena trófica. El mercurio presente en el ambiente se deposita en el suelo y en los cuerpos de agua, luego pasa a la forma de mercurio orgánico a partir del proceso de metilación realizado por bacterias en condiciones anaeróbicas. Se conocen al menos dos bacterias que

realizan este proceso: *la Eichoria crassipes*, identificada en Suecia y en América del Sur y la bacteria *Miriophillum spicatum*. Una vez las bacterias metilan el mercurio, éste se hace ‘asimilable’ a lo largo de las cadenas tróficas (Guimaraes y col., 2004). El metil-mercurio se fija a los sedimentos de los lagos y en otros cuerpos de agua, es absorbido por el fitoplancton, ingerido por el zooplancton y finalmente pasa a los peces como un eslabón más de la cadena alimenticia (WHO, 2007). Los peces son fuentes de proteínas para los

seres humanos, en especial de aquellas poblaciones ribereñas. Una vez ocurre la ingesta del pescado, el mercurio en sus diferentes formas pasa al cuerpo humano. El metilmercurio en la forma orgánica CH_3Hg^+ es el compuesto más tóxico de los que provienen del mercurio (Hope, 2005). En una investigación experimental se estableció que el 90% del mercurio contenido en el tejido de los peces está presente en la forma de metilmercurio (Hall y col., 1997). Para probar estadísticamente la hipótesis de biomagnificación de mercurio en las cadenas tróficas, se analizaron tres especies: la Payara (*Hydrolicus scomberoides*), la Curvinata (*Plagioscion squamosissimus*) y el Pavón (*Cichla ocellaris*). Los datos provienen de $n=88$ peces que fueron capturados en cuatro sitios escogidos del lago Guri (Bermúdez y col., 2004). El análisis de varianza permite determinar la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones de mercurio [Me-Hg] de las especies consideradas. La hipótesis H se establece de la siguiente forma:

$$\mu_{[\text{Me-Hg}] \text{ Curvinata}} = \mu_{[\text{Me-Hg}] \text{ Pavón}} = \mu_{[\text{Me-Hg}] \text{ Payara}}$$

Esta hipótesis se prueba a través del estadístico F-Fisher del análisis de varianza. Se encuentra que existen diferencias significativas entre los promedios de las especies observadas ($p=0$), esto significa que las concentraciones promedio de metilmercurio en las especies muestreadas difieren entre sí. En la figura 3 se observa que la Payara (PAY) contiene el valor más alto de concentración de metilmercurio entre las tres especies estudiadas, lo que conduce a establecer que este pez ocupa un lugar relevante en la cadena alimenticia. Esto se debe a que pertenece al nivel trófico carnívoro (piscívoro)

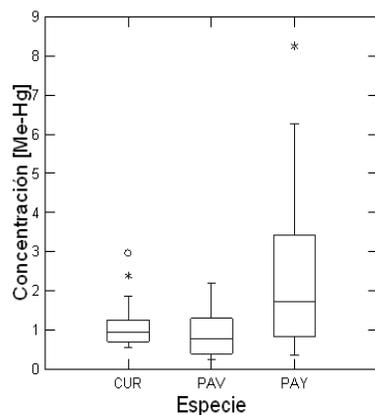


Fig. 3. Gráfico de la concentración de metilmercurio para las especies muestreadas

La biomagnificación en la Payara se produce por el consumo que hace de otros peces que contienen mercurio en los tejidos. En el estudio de preferencias de los pescados consumidos por los pobladores ribereños de la cuenca se

encuentran las especies analizadas. Esta ingesta de pescado ha conducido a los actuales niveles de mercurio encontrado en los habitantes y los indicios de contaminación mercurial con efectos neurotóxicos (Bermúdez, 2008). Dichos ecosistemas presentan altos contenidos de mercurio que se manifiestan en las cadenas tróficas y en especial en los habitantes de los pueblos ribereños que consumen pescado con los niveles de mercurio observados.

4 Construcción de la red conceptual

La red conceptual se va construyendo en la misma medida en que se diseña la investigación. Cuando se planifica la investigación se establecen las variables, hipótesis y se hace referencia a un conjunto de conceptos que le dan sentido al marco teórico del trabajo. Por investigaciones realizadas en la cuenca del Caroní (Bermúdez y col., 1999, 2004; Paolini, 2008) se conoce la contaminación mercurial de las poblaciones ribereñas debida a las actividades de la minería. De allí emergen los conceptos de bioacumulación, bioindicadores, toxicidad del mercurio, entre otros. Para el estudio de la sostenibilidad es necesario establecer una relación entre los contenidos de mercurio encontrados en los pobladores, los niveles de mercurio en los peces y la respuesta neurológica de las personas contaminadas. Surge así la necesidad de realizar las pruebas neuroconductuales en las poblaciones mencionadas. En el estudio se hizo un muestreo socio-demográfico, de ese sondeo emergieron observables que dan cuenta del estado actual de los pobladores ribereños de la cuenca. Se determinaron las preferencias sobre la ingesta alimentaria, los ingresos económicos, el nivel educativo, las características de la vivienda, entre otros observables. La red conceptual se conforma con las disciplinas asociadas al estudio de un sistema socio-ecológico, allí se van agregando los conceptos y observables con los que se determina la sostenibilidad del sistema observado. En la red conceptual de la figura 4 aparecen las pruebas neuroconductuales relacionadas con la toxicología, la demografía y la biocomplejidad; además se muestra la hipótesis de biomagnificación. Se pueden ver en esa RCM cada una de estas disciplinas con los respectivos observables que se requiere para determinar un índice de sostenibilidad del sistema observado.

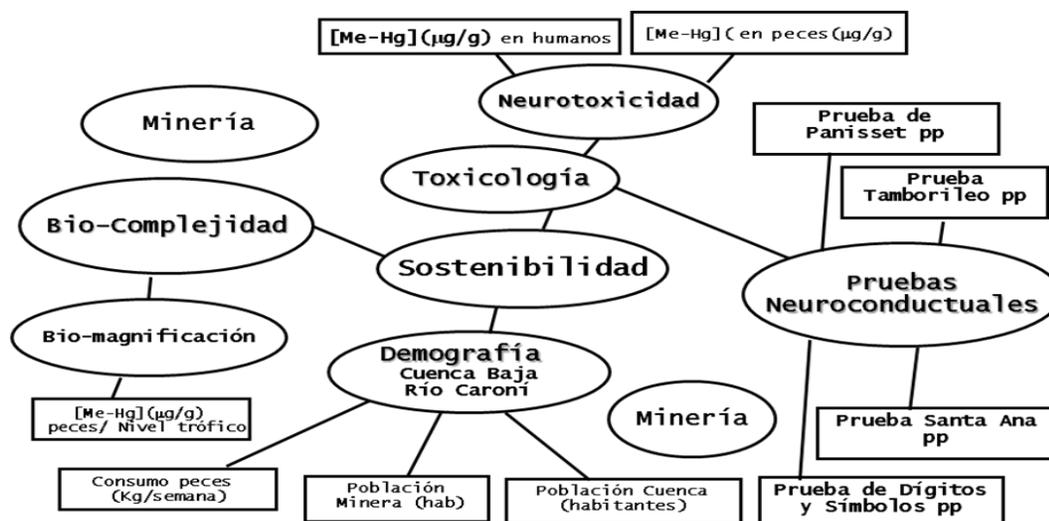


Fig. 4. Red Conceptual Multinivel de la investigación

5 Determinación de la sostenibilidad en las poblaciones observadas

Cuando nos referimos a la sostenibilidad de un espacio socio-ecológico hablamos de la perdurabilidad de los diversos aspectos de esa realidad observada. ¿Puede ser perdurable un sistema socio-ecológico con una manera de explotación de la naturaleza que expolie y contamine los ecosistemas que sustentan las poblaciones? Gallopin (2003) establece que uno de los factores fundamentales que subyacen en la sostenibilidad de un sistema socio-ecológico es la disponibilidad de recursos que sustentan al sistema. El sustento de estas comunidades depende de los ingresos por la minería y de los productos extraídos de los bosques y los ríos (Mansutti, 2004; Milano, 2008). En los estudios de sostenibilidad usualmente se tienen en cuenta tres dimensiones: la dimensión social, la dimensión económica y la dimensión ambiental (Granados, 2010; Martínez, 2010), algunos autores como Jiménez-Herrero (2000) incluyen la dimensión política. En Paolini (2008) se cuantifica la sostenibilidad en la cuenca del Caroní a partir de tres indicadores: la proporción de indígenas respecto de la población total en la cuenca, la concentración de mercurio en los peces y el área intervenida por la minería de oro. Para cuantificar la sostenibilidad en las poblaciones observadas se construyó un índice con tres variables que se consideraron pertinentes: la ingesta de peces (consumo en Kg/semana), la suma de los puntajes pruebas neuroconductuales y la concentración de mercurio en cabello (Hg en ppm). Este índice nos revela el estado de la salud de los ecosistemas en términos de la contaminación mercurial y la incidencia de ese fenómeno en los

habitantes de la cuenca. A partir del análisis de varianza se determinó que no existen diferencias significativas ($p=0,84$) entre los promedios de los ingresos en las poblaciones estudiadas, en este sentido se considera que el ingreso mensual no aporta información significativa para incluirlo como indicador. En su lugar, se toma la ingesta de peces como un observable asociado al sustento cotidiano de las poblaciones. La entrada de este indicador en el cálculo del índice la consideramos como una realización del principio de jerarquización (selección de indicadores significativos). Los indicadores que se utilizan en la construcción del índice son observables que pertenecen a la RCM y revelan los principios de inter-definibilidad, multi-dimensionalidad y mutua dependencia. La RCM responde a una visión de la sostenibilidad relacionada con las disciplinas que estudian el sistema socio-ecológico bajo la influencia de un fenómeno especificado (la minería de oro). Un índice sólo muestra una cantidad que para efectos de comparación y comprensión, ilustra numéricamente el estado en que el sistema socio-ecológico se encuentra. En la tabla 4 se muestra un índice que nos da una idea de ese aspecto que deseamos destacar: los impactos de la minería de aluvión en la sostenibilidad de las poblaciones ribereñas y en los ecosistemas.

Para calcular el índice de sostenibilidad se obtienen los valores normalizados de los tres indicadores considerados, luego se trasladan de la escala normal a una escala comprendida entre 1 y 10. Bohringer y Jochem (2007) recomiendan estandarizar los indicadores y utilizar una única escala que sirva para realizar las comparaciones. Finalmente, el índice se determina promediando los tres indicadores utilizados.

Tabla 4. Índice Sostenibilidad en las poblaciones estudiadas

| Población | Ingesta de peces | Suma de puntajes pruebas neuroconductuales | Mercurio en cabello | Índice de sostenibilidad |
|--------------------|------------------|--|---------------------|--------------------------|
| No expuestos (NEX) | 5,58 | 7,49 | 3,64 | 6,8 |
| El Manteco (ELM) | 7,04 | 4,31 | 3,92 | 6,1 |
| La Paragua (PAR) | 3,23 | 4,26 | 5,13 | 4,5 |
| Los Guacos (GUA) | 4,15 | 3,94 | 7,30 | 3,9 |

Se observa un índice mayor para la población no expuesta (NEX), le siguen El Manteco (ELM), La Paragua (PAR) y Los Guacos (GUA) respectivamente. En la figura 5 se observa el índice calculado para cada una de las poblaciones. Es de hacer notar que el menor índice observado se corresponde con la población de Los Guacos, en esta población se obtuvieron los menores puntajes en las pruebas neuroconductuales y las concentraciones más elevadas de mercurio en el cabello.

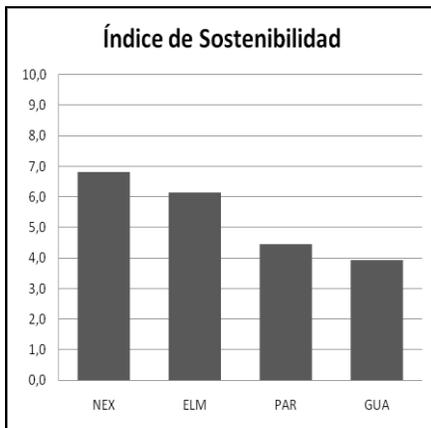


Fig. 5. Gráfico del índice de sostenibilidad para las poblaciones Observadas

Bermúdez D y col., 2004, Mercury exposure through fish consumption in riparian populations at the Guri Reservoir, using nuclear techniques. State of Bolivar, Venezuela, International Atomic Energy Agency, Uppsala (Sweden).

Bermudez D, 2008, Exposición al mercurio por el consumo de peces del Embalse de Guri: Causas y efectos, Universidad Nacional Experimental de Guayana, Ciudad Guayana.

Bohringer C and Jochem P, 2007, Measuring the immeasurable. A survey of sustainability indices, Ecological Economics, 63: 1-8.

Dytam C, 2003, Choosing and using Statistics. A biologist guide, 2nd edit., Blackwell Publishing Victoria (Australia).

EDELCA Corporación Venezolana de Guayana, 2004, La cuenca del Rio Caroní. Una visión en cifras, CVG Electrificación del Caroní, Ciudad Guayana.

Falguera JL, 1994a, Unidad de noción bajo los usos del término 'modelo' en las ciencias matemáticas y factuales, Contextos XII, 23-24: 221-244.

Falguera JL, 1994b, La naturaleza representacional de los modelos, Endoxa 3, Series Filosóficas, UNED Madrid, pp. 7-29.

Gallopin G, 2003, Sostenibilidad y desarrollo Sostenible: un enfoque sistémico, División de Desarrollo sostenible y Asentamientos Humanos CEPAL, Santiago de Chile.

García R, 2006, Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria, Gedisa editorial, Barcelona (España).

Conclusiones

Son inocultables los daños de la minería artesanal sobre los espacios naturales y el impacto de la contaminación de dichas actividades sobre los pobladores ribereños, especialmente en aquellas personas que consumen pescado proveniente de los cuerpos de agua donde se ejerce esta actividad.

La cuantificación de la sostenibilidad requiere de la consideración de un conjunto de indicadores relevantes que se orienten en la comprensión del fenómeno bajo estudio, con el propósito de tomar decisiones que influyan de una mejora efectiva en estos sistemas socio-ecológicos.

Las redes conceptuales multinivel sintetizan en una estructura visual los principios del pensamiento complejo, materializan las interrelaciones que se dan en el espacio de lo disciplinar y proporcionan los observables para cuantificar la sostenibilidad.

Referencias

Bermudez, D y col., 1999, Mercury exposure through fish consumption in riparian population at reservoir Guri using nuclear techniques, Bolivar State Venezuela en Health impacts of Mercury Cycling in contaminated environments studied by nuclear techniques, Ljubljana Slovenia, International Atomic Energy Agency.

Granados J, 2010, Manual de medio ambiente y sostenibilidad, Editorial Dykinson, Madrid.

Guimaraes J y col., 2004, Health Impact of Mercury cycling in contaminated environments studied by nuclear techniques, International Atomic Energy Agency IAEA, Uppsala (Suecia).

Hall BD y col., 1997, Food as the dominant pathway of methylmercury uptake by fish. Water, Air and Soil pollution, 100,13-24.

Hope B, 2005, A mass budget for mercury in the Willamette river basin, Oregon, USA. Water, Air, and Soil Pollution, 161, 365-382.

Huidobro, P y col.. (2004). Strategies to Reduce Hg exposure in Artisanal and Small-Scale Miners. Regional Awareness Raising Workshop on Mercury Pollution, Dakar.

Jimenez-Herrero, L, 2000, Desarrollo sostenible. Transición hacia la coevolución global. Ediciones Pirámide Madrid .

King G y col., 2000, El diseño de la investigación social. La inferencia científica en los estudios cualitativos, Alianza Editorial, Madrid.

Mansutti A, 2004, El bosque cercado: características del poblamiento en los bosques de la Guayana venezolana, Copérnico 1, 23-23.

Martinez J, 2010, Viaje a la sostenibilidad, Catarata ediciones, Madrid.

Maurer B, 2000, Macroecología and Consilience, Global Ecology & Biogeography, 9, 275-280.

- Milano S, 2008, Símbolo y objeto de la minería del oro y diamante en la subjetividad del minero en pequeña escala, *Kuawai*, 1, 40-56.
- MMSD, 2005, The Mining, Minerals and Sustainable development Project, Communities and Small-scale Mining. Se encuentra en: http://www.artisanalmining.org/UserFiles/file/AMS_finalreport_13.pdf Fecha de consulta: 18 diciembre 2009.
- Morín E, 2004, Introducción al pensamiento complejo, Gedisa editorial, Barcelona (España).
- Morín E, 2005, La epistemología de la complejidad, En Con Edgar Morín, por un pensamiento complejo. Implicaciones interdisciplinarias, Solana, J (Coord.), Universidad Internacional de Andalucía/Akal, Madrid.
- Novo M, 2006, El Desarrollo sostenible. Su dimensión ambiental y educativa, Pearson Educación, Madrid.
- Paolini J, 2008, Diseño de un modelo para el análisis de la sostenibilidad en la Cuenca Hidrográfica del río Caroní en la Guayana Venezolana, *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 3, 21-38.
- Picon G y Dezeo H, 2007, Evaluación ambiental en áreas de influencia del Embalse GURI: Recorrido aéreo en el perímetro de la margen derecha, CVG EDELCA. Gerencia de Gestión Ambiental, Ciudad Guayana.
- Sliker W y col., 2000, Cognitive Test: interpretation for Neurotoxicity? *Toxicological Sciences*, 58, 222-234.
- Spiegel S, 2009, Socioeconomic dimensions of mercury pollution abatement: Engaging artisanal mining communities in Sub-Saharan Africa, *Ecological Economics*, 68, 3072-3083.
- UNEP United Nations Environment Programme, 2002, Global Mercury Assessment, Issued by UNEP Chemicals, Geneva (Switzerland).
- VanEmden H, 2008, *Statistics for terrified biologist*. Blackwell Publishing, Victoria (Australia).
- Veiga M y Baker R, 2005, Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury released by Artisanal and Small-Scale Miners, Global Mercury Project. UNIDO.
- Walpole y col., 2007, *Probabilidad & Estadística para ingeniería y ciencias*, 7ª edic, Pearson Prentice Hall, México.
- World Health Organization WHO, 2007,. Exposure to Mercury: a major public health concern, *Public Health and Environment*, Geneva (Switzerland)

Recibido: 20 de marzo de 2011

Revisado: 14 de septiembre de 2011

