

BIOINDICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA CON LÓGICA DIFUSA SUGENO Y MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS EN LA SABANA DE BOGOTÁ

Bioindication of water quality in the Bogotá Sabana using fuzzy logic Sugeno and aquatic microinvertebrates

JUAN DAVID GUTIÉRREZ^{1*}, WOLFGANG RISS²,
RODOLFO OSPINA¹

¹Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia.

²Abt. Limnologie, Universität Münster.

* (El presente artículo hace parte del trabajo de tesis doctoral de este autor).

RESUMEN

Se presenta una implementación de la metodología de lógica difusa Sugeno que permite el cálculo de la calidad biológica del agua en la Sabana de Bogotá, Colombia. Se emplearon un total de 28 sitios correspondientes a 9 subcuencas de la Sabana de Bogotá. Los organismos utilizados para la implementación del modelo de lógica Sugeno fueron: Leptoceridae e Hydrobiosidae como indicadores de aguas limpias, Planariidae y Amphipoda como indicadores aguas contaminadas y como indicadores de aguas muy contaminadas se seleccionaron Psychodidae y Syrphidae. Adicionalmente se incluyó la familia Chironomidae. Los resultados obtenidos con la aplicación de la lógica Sugeno fueron confrontados con los valores del índice fisicoquímico (Cfq) para comprobar el nivel de confiabilidad de la metodología de lógica Sugeno, observándose una correlación altamente significativa.

Palabras clave: Lógica Sugeno, modelamiento ecológico, bioindicadores, macroinvertebrados, calidad del agua, Sabana de Bogotá.

ABSTRACT

An application of the Sugeno-type fuzzy logic to calculate biological water quality in Bogotá, Colombia is presented 28 sites corresponding to 9 watersheds in the Bogotá area were used. The organisms selected were: Leptoceridae and Hydrobiosidae as indicators of clean waters, Planariidae and Amphipoda as indicators of polluted waters and Psychodidae and Syrphidae as indicators of highly polluted waters Chironomids were also included. In order to prove the degree of reliability of Sugeno-type fuzzy logic, the results obtained were compared with values for the Cfq index, and a highly significant correlation was obtained.

Key words: Sugeno logic, ecological modeling, bioindicators, macroinvertebrates, water quality, Sabana de Bogotá.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de evaluación de la calidad de las aguas basados en macroinvertebrados acuáticos ofrecen múltiples ventajas con respecto a métodos fisicoquímicos, a saber: simplicidad metodológica, rapidez de los resultados y alta confiabilidad de los mismos. Tales ventajas hacen de estos métodos una herramienta idónea para la vigilancia rutinaria de las cuencas y ríos en general (Alba-Tercedor 1996).

El empleo de macroinvertebrados acuáticos para la calificación biológica del agua se basa en el conocimiento taxonómico de la fauna, su distribución y la calidad del agua a la que está asociada. En el contexto mundial y en especial en Europa y los Estados Unidos, la asignación de valores de indicación para los macroinvertebrados acuáticos ha sido abordada mediante la calificación a manera de “consenso de expertos”, el cual se basa en el conocimiento amplio de la fauna y de la información fisicoquímica de los ríos. Sin embargo, en el norte de los Andes son muy pocos los trabajos desarrollados sobre la taxonomía, biogeografía y autoecología de los organismos acuáticos, por lo que la aplicación del esquema de “consenso de expertos” no resulta viable. Además, debe tenerse en cuenta que, al parecer, en el caso del neotrópico, la gran mayoría de las especies locales de taxones supraespecíficos cosmopolitas provienen de linajes evolutivos propios y diferentes de aquellos de las regiones biogeográficas colindantes, por lo cual pueden presentar niveles de tolerancia diferentes a los que muestran en la zona holártica (Illies 1969, Banarescu 1995). Lo anterior justifica la necesidad de presentar valores de tolerancia generados mediante el estudio directo de los factores ambientales y de la distribución de los taxones en una región determinada (Cairns *et al.*, 1993). De otro lado, el gran número de interacciones resultantes entre las variables fisicoquímicas y los organismos acuáticos se constituye en un problema matemático de gran complejidad, por lo que se requiere de técnicas sofisticadas para el análisis multivariado de modelos no lineales. La lógica difusa Sugeno, o lógica Sugeno, ofrece una posibilidad debido a su fácil comprensión, pues es una extensión del sentido común para la solución de problemas matemáticos, la habilidad para reconocer patrones y relaciones en una serie de datos y su capacidad de hacer inferencias sobre nuevos datos.

LÓGICA SUGENO

Es una modalidad de la lógica difusa y está clasificada como una técnica de inteligencia artificial de procesamiento simbólico (Dubois y Prade 1980). En un sentido estrecho, la lógica difusa es un sistema lógico y una extensión de la lógica multivaluada (Boyer 1979, Zadeh 1988). En un sentido más amplio, es una herramienta emparentada con la técnica de los conjuntos difusos (Kaufmann y Gupta 1985), una teoría que relaciona los objetos con límites no definidos en los cuales la pertenencia a un conjunto es abordada desde la perspectiva de diferentes grados de certeza (Anderson 1983). Por ejemplo, el enunciado “El vaso está lleno”, en lógica binaria, tendría el valor de verdadero (1) si el recipiente contiene tanto líquido como su capacidad máxima lo permite; por el contrario, si el vaso contiene 90% de su capacidad total, el enunciado sería falso (0). En tal caso, aunque falso, parece evidente que es casi verdadero, puesto que casi está lleno. La lógica multivaluada permite asignar diferentes grados de certeza; de esta

forma, si el vaso está al 90% de su capacidad, el valor de verdadero del enunciado sería 0.9 (casi verdadero), mientras que si contiene, por ejemplo, un 10% de líquido el valor sería 0.1 (poco verdadero). Por lo tanto, en lógica difusa se trabaja con conjuntos que se definen por sus funciones de pertenencia, que se denotan como: $C(x)$ e indican el grado de pertenencia (entre 0 y 1) del elemento con valor x al conjunto C . Por ejemplo, se podrían tener dos conjuntos de tipos de peso de personas que tuvieran valores dentro de los siguientes rangos (Fig. 1a):

$$\text{Delgado} = \{40, \dots, 70 \text{ Kg}\} \quad \text{Normal} = \{55, \dots, 85 \text{ Kg}\}$$

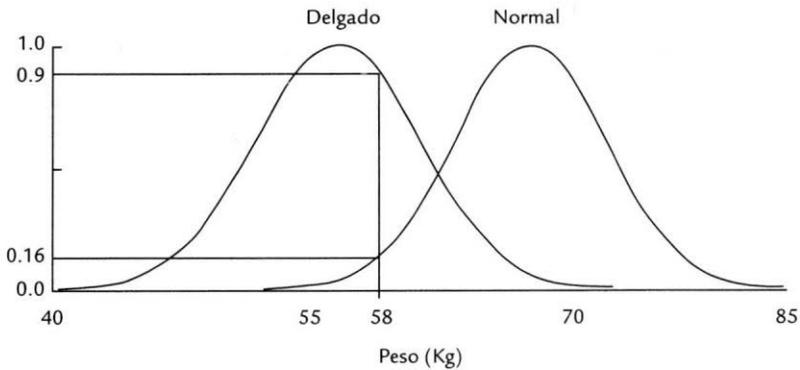


Figura 1a. Conjuntos difusos.

En este caso, una persona con un peso de 58 Kg pertenecería en un 90% ($\mu_{\text{Delgado}}(58) = 0.9$) al conjunto de personas Delgadas y en 0.16% ($\mu_{\text{Normal}}(58) = 0.16$) a las de peso Normal. En contraposición en lógica binaria se utilizan los conjuntos no difusos, donde los grados de pertenencia son binarios (0 ó 1) como se muestra en la figura 1b.

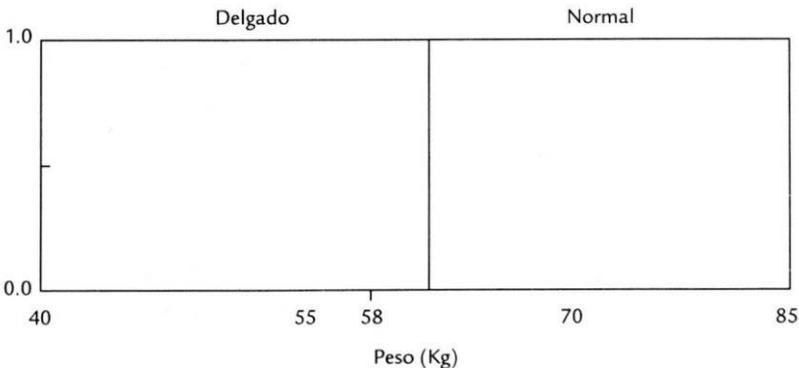


Figura 1b. Conjuntos no difusos.

En lógica difusa, las operaciones entre conjuntos se plantean en operaciones difusas entre sus funciones de pertenencia, las operaciones más empleadas para los conjuntos son la Unión (U), Intersección (\cap), Complemento ($-$), Suma lógica difusa (\vee) y Producto lógico difuso (\wedge). Además de negación difusa para las funciones de pertenencia. La característica principal de la lógica Sugeno es que no existen funciones de pertenencia para las respuestas, sino que dichas funciones son remplazadas por constantes, pero el proceso de implicación es exactamente igual.

Para entender la mecánica del funcionamiento de las reglas de decisión y agregación supóngase el siguiente ejemplo: Se desea evaluar la calidad de un libro mediante los criterios de CONTENIDO y PRESENTACIÓN, ambos criterios son evaluados en un rango de 0 a 100 siendo 100 el mejor. La variable CONTENIDO esta compuesta por 3 funciones de pertenencia: pobre, aceptable y bueno, mientras que la variable PRESENTACIÓN posee 2 funciones de pertenencia: **simple** y **atractiva** (Fig. 2). La función de respuesta es TIPO DE LIBRO en un rango de 0 a 100 y posee 3 constantes: **malo**, **promedio** y **excelente**.

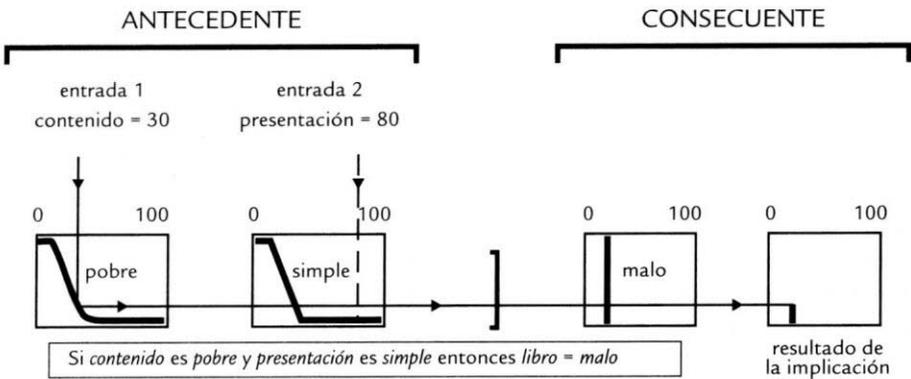


Figura 2. Resultado de la implicación de una regla de decisión.

Las reglas de decisión planteadas para este ejemplo son:

1. SI CONTENIDO es **pobre** Y PRESENTACIÓN es **simple** ENTONCES libro es **malo**.
2. SI CONTENIDO es **aceptable** ENTONCES libro es **promedio**.
3. SI CONTENIDO es **bueno** Y PRESENTACIÓN es **atractiva** ENTONCES libro es **excelente**.

En la figura 3, se aprecia como se evalúa una regla de decisión. Obsérvese como la regla está dividida en un antecedente y un consecuente. Las entradas para el proceso de implicación son las entradas en el antecedente. Debe resaltarse la forma como el consecuente es redibujado usando solo una función asociada con el valor de la entrada en el antecedente (CONTENIDO = pobre) debido a que es la única con una respuesta mayor que 0.

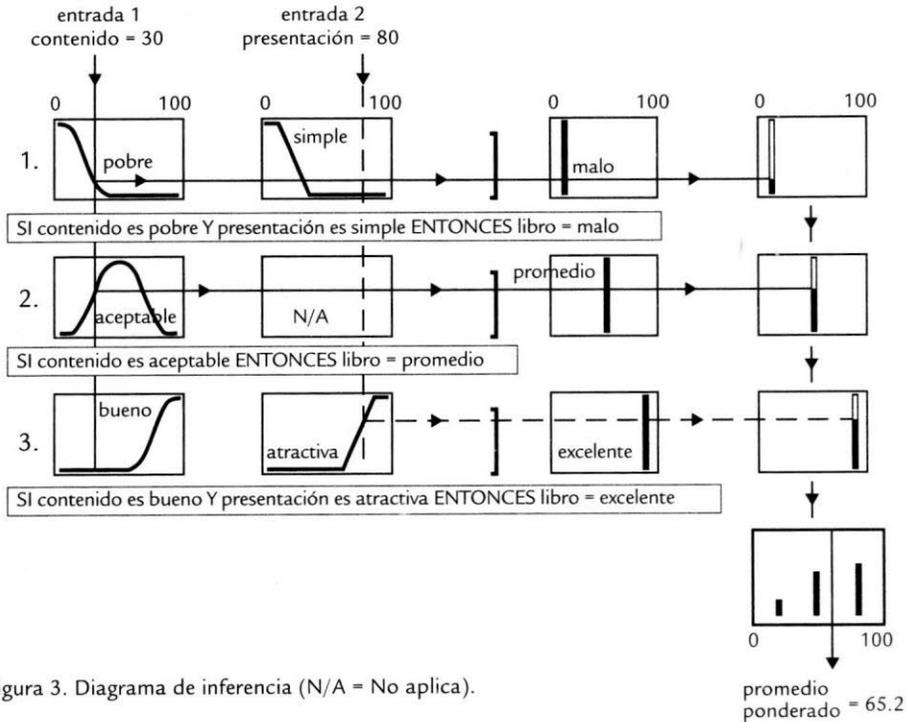


Figura 3. Diagrama de inferencia (N/A = No aplica).

La figura 2 muestra la forma en que la lógica Sugeno integra las reglas de decisión y cómo se realiza la agregación de las respuestas. Este tipo de diagramas se conoce como diagramas de inferencia (Zadeh 1965). Nótese que el flujo de información se inicia en las entradas, luego cruza cada una de las 3 reglas de decisión y las constantes en la salida (malo, promedio y excelente), para integrarse finalmente en un único diagrama en la esquina inferior derecha donde se realiza la defuzzificación por el método del promedio ponderado. Mayores detalles sobre la técnica de lógica Sugeno pueden encontrarse en: Hunt (1975), Sugeno (1985) y Kapur & Mundy (1988).

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objeto de abarcar un amplio espectro de ríos pertenecientes a diferentes calidades del agua se emplearon los datos reportados por Riss *et al.*, (2002) y Bohórquez (1989). En total se seleccionaron 28 sitios correspondientes a 8 cuencas de la Sabana de Bogotá. En la Tabla 1, se incluyen los datos reportados por Riss *et al.*, (2002), los cuales corresponden a siete ríos localizados en la cuenca alta y media del río Bogotá, ubicados entre 2.550 y 3.300 m.s.n.m. La mayor parte de las corrientes de la cuenca alta del río Bogotá y de sus principales afluentes están levemente afectadas por actividades humanas, mientras que en su parte media, en la zona plana de la Sabana de Bogotá, se presenta un mayor grado de contaminación, producida principalmente por las descargas de aguas residuales domésticas y por los desechos derivados de una intensa actividad agrícola e industrial.

Variable	Sitio	Fr1 (11)	Fr2 (12)	Fr3 (13)	Te1 (23)	Te2 (24)	Te3 (25)	Tu1 (26)	Tu2 (27)	Tu3 (28)	Su1 (20)	Su2 (21)	Su3 (22)	Ne1 (14)	Ne2 (15)	Ne3 (16)	Si1 (17)	Si2 (18)	Si3 (19)	Av2 (1)	Av3 (2)
altitud [m s.n.m]		3040	2650	2560	3290	3010	2820	3300	2820	2670	2700	2620	2580	2940	2660	2590	2830	2660	2590	2640	2570
temp [°C]		10.2	12.5	13.3	9.6	11.5	13.2	11.5	13.8	14.8	11.5	14.2	15.7	14.5	14.9	16.9	10.5	12.9	15.8	14.0	15.9
conc-O ₂ [mg/l]		8.0	7.6	5.2	7.8	7.9	7.8	7.6	7.6	7.3	8.4	6.9	5.2	7.2	7.5	7.7	7.9	7.8	7.6	7.7	7.3
sat-O ₂ [%]		103	99	67	101	104	103	106	103	99	105	91	71	99	102	107	100	100	103	101	100
var-O ₂ [%]		1.7	3.7	56.2	1.7	3.2	4.9	3.4	2.5	5.9	8.5	5.3	56.9	5.5	1.7	14.4	0.5	2.1	3.3	1.8	4.4
Conductividad [µS/cm]		32	44	79	7	21	215	6	23	37	176	134	246	48	50	53	15	22	28	18	21
pH		6.6	6.8	6.6	4.8	6.1	6.8	6.1	7.0	6.9	7.0	6.5	6.9	6.8	7.3	7.0	6.5	6.7	6.8	6.8	6.8
NH ₄ [mg/l]		0.08	0.10	0.23	0.05	0.18	0.28	0.00	0.06	0.30	0.05	0.25	2.18	0.18	0.16	0.08	0.03	0.10	0.18	0.03	0.08
P _{tot} [mg/l]		0.46	0.15	1.34	0.09	0.61	1.07	0.20	0.13	0.43	0.31	0.95	0.82	0.14	0.41	0.23	0.38	0.31	0.67	0.20	0.28
PO ₄ [mg/l]		0.00	0.00	0.02	0.00	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02	0.06	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00
DBO ₅ [mg/l]		1.3	1.4	2.0	1.4	1.3	1.8	1.3	1.4	3.4	1.6	2.3	3.1	2.3	2.1	1.6	1.4	1.7	2.3	1.3	1.1
DQO [mg/l]		9.5	17.5	20.0	16.5	15.0	18.5	14.5	12.0	12.5	16.5	22.5	32.0	14.0	10.5	14.5	8.5	34.0	40.5	6.5	9.0
sólidos [vol.‰]		0.11	0.03	0.14	0.07	0.17	0.27	0.04	0.03	0.17	0.10	1.37	0.60	0.04	0.68	0.08	0.00	0.04	0.17	0.01	0.04
MO _{inc} [mg/l]		2.7	4.0	25.5	3.4	70.3	136.7	2.4	45.1	49.4	6.0	14.4	12.3	10.5	31.6	8.1	2.5	11.5	33.7	11.4	11.8
MOP [mg/l]		1.6	2.1	9.1	2.3	8.4	17.0	2.1	5.0	11.9	1.3	3.2	5.7	6.6	11.4	2.8	1.6	4.1	6.2	2.5	3.5
vel [cm/s]		25	42	44	19	31	38	18	23	28	41	32	23	57	72	55	22	34	33	43	47
caudal [m ³ /s]		0.64	1.45	1.03	0.22	2.01	1.20	0.30	5.12	5.74	0.16	0.08	0.07	1.35	1.37	1.26	0.22	0.39	3.14	0.68	0.95
var-caudal [%]		57	24	121	116	154	130	96	135	129	26	28	76	51	82	134	63	82	157	93	131

Tabla 1. Datos fisicoquímicos promedio reportados por Riss et al (2002)*.

Fr: Río Frío, Te: Río Teusaca, Tu: Río Tunjuelito, Su: Río Suságua, Ne: Río Neusa, Si: Río Siecha, Av: Río Aves

*El número entre paréntesis corresponde al número del sitio en la figura 6.

El la Tabla 2, muestra los datos fisicoquímicos reportados por Bohórquez (1989), correspondientes a ocho estaciones localizadas sobre el río Bogotá, desde su nacimiento hasta el municipio de Soacha. Esta información hace referencia a sitios con contaminación media a muy alta. Debe resaltarse la diferencia en cantidad, tanto a nivel faunístico como fisicoquímico entre ambos estudios, y que dicha diferencia suele imponer una limitante a los intentos de síntesis de información. No obstante, mediante el uso de la técnica de lógica difusa es posible tolerar dichos vacíos de información, debido a su habilidad para reconocer patrones y relaciones en una serie de datos y su capacidad de hacer inferencias sobre nuevos datos.

Variable	Sitio	Esp (4)	Var (10)	Com (8)	Bal (6)	Cor (3)	Cun (9)	Isl (5)	Can (7)
Ancho [m]		27.2	17.7	26.8	18.1	29.8	40	33.5	53.2
Profundidad [m]		2.3	1.8	1.8	1.8	2.1	1.6	3.2	3.2
Velocidad [m/min]		13.0	35.6	37.9	42.5	29.5	44.4	26.6	19.5
Temp [°C]		18.0	17.4	17.3	15.7	17.2	18.3	17.9	16.6
conc-O ₂ [mg/l]		4.4	3.8	4.4	2.0	0.3	0.1	0.1	0
pH		6.8	6.4	6.4	7.0	6.7	6.9	6.9	7.0
Conductividad [mS/cm]		71.5	563.4	680.3	481.9	249.0	269.7	335.2	427.0
NH ₄ [mg/l]		0.9	1.6	1.6	2.6	9.1	10.1	13.9	21.4
Ptot [mg/l]		0.3	0.2	0.2	1.2	1.6	1.3	2.2	2.4
DBO ₅ [mg/l]		4.4	4.0	4.5	3.6	29.0	29.1	36.5	36.5
DQO [mg/l]		57.8	76.7	71.4	73.3	207.7	205.6	240.2	338.6

Tabla 2. Datos fisicoquímicos promedio reportados por Bohórquez (1989)*

Esp: El Espino, Var: Pte. Vargas, Com: Pte. El Común, Bal: La Balsa, Cor: El Cortijo, Cun: Pte. Cundinamarca, Isl: La Isla, Can: Pte. Canoas. *El número entre paréntesis corresponde al número del sitio en la figura 6.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IMPLEMENTACIÓN DE LA LÓGICA SUGENO

Para la implementación de la lógica Sugeno fue necesario el desarrollo de un programa de computador llamado SUGMACROINV escrito en lenguaje C++. La aplicación de la lógica difusa Sugeno como herramienta para la estimación del grado de contaminación de un río a partir de los macroinvertebrados, requiere de los siguientes pasos:

1. Selección de los organismos indicadores. El principal criterio empleado para la selección de dichos organismos fue la condición de estenótico de cada uno de ellos para las condiciones de la calidad de agua: buena, regular y mala. De tal forma que la información para dicha selección está asociada con la distribución y abundancia de cada uno de los organismos a lo largo del espectro de calidad del agua. Los organismos seleccionados por su condición estenótica para la implementación del modelo de lógica Sugeno fueron: Leptoceridae e Hidrobiosidae como indicadores de aguas limpias (Wiggins 1996, Correa *et al.*, 1981, Holzenthal 1988, Quintero & Rojas 1987, Rincón 1999), Planariidae y Amphipoda como indicadores aguas contaminadas (Roldán 1988, Covich & Thorp 1991, Zamora & Alba-Tercedor 1996) y como indicadores de aguas muy contaminadas se seleccionaron Psychodidae y Syrphidae (Courtney *et al.*, 1996, Foote 1987, Merrit *et al.*, 1996). Adicionalmente, se incluyó la familia Chironomidae, muy

abundante en aguas limpias y moderadamente contaminadas, pero que en aguas extremadamente contaminadas sufre una importante reducción de la abundancia.

2. Construcción de las funciones de pertenencia. Consiste del cálculo de las funciones matemáticas apropiadas para cada uno de los organismos indicadores, con el objeto de simular la forma e intensidad de la respuesta (nivel de contaminación) del modelo de la lógica difusa (ver más adelante).

3. Definición de las reglas del sistema de bioindicación. Dichas reglas tienen un enunciado de la forma: SI (organismo x) \rightarrow ENTONCES (calidad del agua = y), para indicar la acción a realizar de acuerdo al conjunto al que pertenece el organismo suministrado en el vector de entrada. Para definir cuál regla (o reglas) se activan ante una determinada entrada (organismo), se parte del grado de pertenencia de dicho organismo a cada uno de los diferentes conjuntos difusos.

4. Defuzificación de las salidas. Consiste en obtener un valor numérico para la calidad del agua a partir de los conjuntos difusos a los que pertenecen los organismos del vector de entrada. Para este caso se empleó como método de defuzificación del promedio ponderado. En la construcción de las funciones de pertenencia de cada uno de los organismos se empleó un análisis de regresión polinómica de la abundancia y la calidad del agua. Los polinomios obtenidos fueron transformados a las distribuciones de probabilidad más próximas con el objeto de optimizar la respuesta del sistema.

A continuación se describe, a manera de ejemplo, la forma en que se puede obtener la función de pertenencia de un bioindicador hipotético $b(i)$. Supóngase que $b(i)$ es un organismo estenótico de aguas "buenas" que están en el rango de 7 a 10, en una escala donde el valor de 0 corresponde a extremadamente malo y 10 es extremadamente bueno. La distribución hipotética del organismo $b(i)$ se muestra en la Tabla 3.

Calidad del agua (Ca)	Número de individuos (N)
7.00	12
7.25	35
8.00	46
9.00	59
9.75	77
10.0	74
10.0	81

Tabla 3. Distribución hipotética del bioindicador $b(i)$

Luego se construye el histograma de frecuencia para $b(i)$, como se aprecia en la figura 4.

Después se calcula la regresión polinómica para la distribución de $b(i)$; en este caso, el modelo de regresión que mejor se ajusta es ($R^2=0.98$, $p<0.05$, $n=7$):

$$N = 14.5Ca + 1.03Ca^2 - 0.21Ca^3$$

Pero este polinomio puede ser transformado y simplificado a una distribución o función sigmoide o con forma de "S", la cual es aplicada como función de pertenencia entre 0 y 1, para el bioindicador $b(i)$, como se muestra en la figura 4.

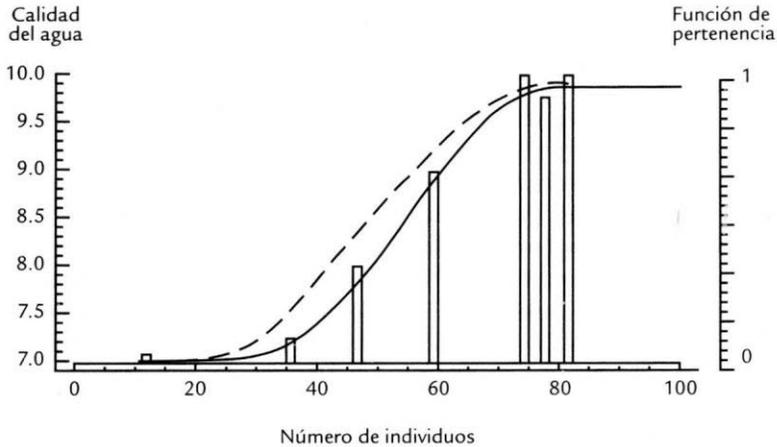


Figura 4. Histograma de frecuencia del organismo $b(i)$ y función de pertenencia de $b(i)$ (- - - polinomio, ____ distribución sigmoide).

Las distribuciones empleadas como funciones pertenencia fueron: normal (Amphipoda y Syrphidae), sigmoide (Leptoceridae, Hydrobiosidae, Planariidae y Psychodidae) y sigmoide invertida (Chironomidae). Como se mencionó anteriormente, la familia Chironomidae no es estenótica y por el contrario es muy abundante y posee una amplia distribución a lo largo del gradiente de calidad del agua. Sin embargo, puede observarse una dramática reducción de su abundancia desde miles en aguas buenas y moderadamente contaminadas a menos de 100 en aguas muy contaminadas y menos de 10 en aguas extremadamente contaminadas. Esta condición fue tomada en cuenta para incluir esta familia y definir su función de pertenencia al igual que las reglas de decisión en las que se incluye. Para la construcción de las reglas de decisión se emplearon las combinaciones de organismos indicadores que fueron observadas en las diferentes clases de calidad del agua (extremadamente buena, muy buena, buena, regular, mala, muy mala y extremadamente mala) y las cuales constituyen igualmente las constantes de la respuesta, en este caso los valores de las constantes fueron:

- Extremadamente buena = 10.0
- Muy buena = 8.5
- Buena = 7.0
- Regular = 5.0
- Mala = 3.0
- Muy mala = 1.5
- Extremadamente mala = 0.0

De tal forma que el rango de la respuesta del sistema de lógica Sugeno se encuentra entre 0 y 10. Por ejemplo, la regla: Si Leptoceridae y Hydrobiosidae entonces calidad del agua = muy buena, describe que la presencia simultánea de las familias Hydrobiosidae y Leptoceridae produce una respuesta en la que la calidad del agua es muy buena. Pero, como se mencionó anteriormente, el valor de la respuesta (calidad del agua) depende

del grado de pertenencia a las funciones correspondientes que se incluya en el vector de entrada (abundancia de las familias Hydrobiosidae y Leptoceridae).

Las nueve reglas de decisión empleadas fueron:

1. Si Leptoceridae y Hydrobiosidae entonces calidad del agua = muy buena
2. Si Planariidae o Amphipoda entonces calidad del agua = regular
3. Si Leptoceridae o Hydrobiosidae entonces calidad del agua = muy buena
4. Si Planariidae y Amphipoda entonces calidad del agua = regular
5. Si Psychodidae y Syrphidae entonces calidad del agua = muy mala
6. Si Leptoceridae y Hydrobiosidae y Planariidae entonces calidad del agua = buena
7. Si Chironomidae y Psychodidae y Syrphidae entonces calidad del agua = mala
8. Si Leptoceridae y Hydrobiosidae y Amphipoda entonces calidad del agua = buena
9. Si Psychodidae o Syrphidae entonces calidad del agua = muy mala

La figura 5 muestra un ejemplo de la forma como el sistema de lógica Sugeno calcula el valor de calidad biológica del agua. Obsérvense los valores del vector de entrada (0, 0.03, 0.18, 0.1, 6.94, 0.08, 0.03) los cuales corresponden a la abundancia de cada organismo indicador. Igualmente se observan las 8 reglas de decisión empleadas y la manera como se activan de acuerdo al valor de entrada y la función de pertenencia correspondiente. A la derecha de la figura se aprecia la respuesta de cada regla de decisión a los valores del vector de entrada del ejemplo y en la esquina inferior derecha se observa el cálculo del promedio ponderado (3.88) para la respuesta final de las reglas de decisión.

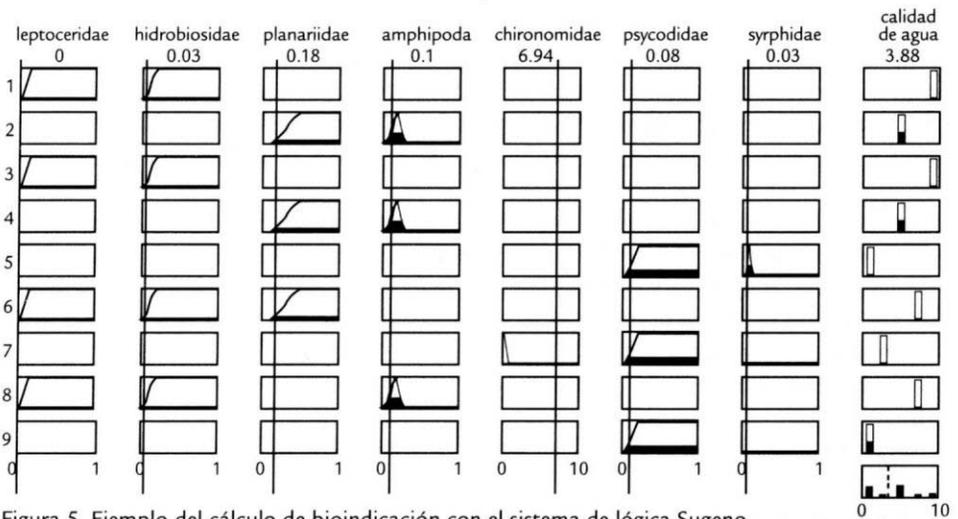


Figura 5. Ejemplo del cálculo de bioindicación con el sistema de lógica Sugeno.

COMPARACIÓN CON UN ÍNDICE FÍSICOQUÍMICO

Para comparar los resultados suministrados por el sistema de bioindicación empleando la lógica Sugeno, se utilizaron las variables fisicoquímicas para el cálculo de la calidad del agua de las mismas estaciones. Para este efecto, se empleó el índice fisicoquímico Cfq (Riss *et al.*, 2002). Este índice fue desarrollado específicamente para la cuenca alta y media del río Bogotá y, a diferencia de otros índices, permite calcular un valor de

calidad fisicoquímica del agua con cualquier número de variables fisicoquímicas, con lo que es posible comparar diferentes sitios en los que no todas las variables fisicoquímicas han sido monitoreadas. Los valores del índice Cf_q varían entre 10 (aguas extremadamente limpias) y 0 (aguas extremadamente sucias).

Las abundancias de los grupos indicadores fueron transformadas para ser expresadas en una escala de 0 a 1 (Tabla 4), dividiendo la abundancia de cada organismo entre 100, de tal forma que 1 correspondía a 100 o más individuos; excepción hecha de los quironómidos, que fueron expresados en una escala de 0 a 10 (con 10 = 1.000 ó más individuos), debido a su gran abundancia. De esta forma, los 28 vectores de entrada (1 para cada estación) al sistema, tenían una dimensión de 1 X 7 (1 valor de abundancia para los 7 taxones).

	Leptoceridae	Hydrobiosidae	Planariidae	Amphipoda	Chironomidae	Psychodidae	Syrphidae	Cf _q
Av2	1	0.73	0.16	0.01	10	0.01	0	8.34
Av3	1	0.42	0	0.15	10	0	0	8.12
Cor	0	0	0.92	0	0.085	1	0	2.04
Esp	0	0	1	0.06	0.165	0	0	5.54
Isl	0	0	0	0	0.2	0.35	0	1.78
Bal	0	0	0.03	0	0.277	0	0	3.79
Can	0	0	0.02	0	0.001	1	0.01	1.64
Com	0	0	0	0	0.024	0	0	4.96
Cun	0	0	0	0	0.2	0.19	0.02	2.27
Var	0	0	0	0	0.051	0	0	4.94
Fr1	0.19	0.14	0.06	0	10	0.01	0	8.18
Fr2	0.02	0	0.19	1	10	0	0	8.07
Fr3	0.01	0	0.71	0.02	10	0.03	0	5.85
Ne1	0.04	0	0	0.01	0.927	0	0	7.66
Ne2	0	0.03	0	0.45	10	0	0	7.59
Ne3	0.03	0	0.29	0.01	10	0	0	7.65
Si1	1	0.78	0.75	0	10	0.05	0	8.26
Si2	1	0.28	0.6	1	10	0.11	0	7.81
Si3	0.43	1	1	1	10	0.01	0	7.43
Su1	0.33	0.3	0.08	0.61	10	0.01	0	7.11
Su2	0.01	0.01	0.18	0.04	0.203	0	0	6.84
Su3	0	0.03	1	0.3	0.555	0.01	0	5.11
Teu1	0.56	0.45	0.09	0	0.644	0.04	0	8.51
Teu2	0.15	0.25	0.02	0.14	10	0	0	7.21
Teu3	0	0.03	0.01	0.13	10	0.02	0	6.33
Tu1	0.17	0.13	0.18	1	0.403	0	0	8.19
Tu2	0.08	0.11	0.03	0	10	0.01	0	7.98
Tu3	0	0	0.29	0	10	0.02	0	7.17

Tabla 4. Matriz transformada de la abundancia de los organismos empleados en el sistema de lógica Sugeno y valor del índice fisicoquímico Cf_q.

Av: Río Aves, Cor: El Cortijo, Esp: El Espino, Isl: La Isla, Bal: La Balsa, Can: Pte. Canoas, Com: Pte. El Común, Cun: Pte. Cundinamarca, Var: Pte. Vargas, Fr: Río Frío, Ne: Río Neusa, Si: Río Siecha, Su: Río Suságua, Teu: Río Teusacá, Tu: Río Tunjuelito.

Una vez construido el sistema lógico de bioindicación y ajustada la escala de los vectores de entrada, se calcularon los valores de calidad del agua, tanto fisicoquímicos

como con el sistema de lógica Sugeno, para las estaciones de muestreo. La figura 6 muestra la diferencia entre los valores calculados por la lógica Sugeno y los valores del índice fisicoquímico Cfq. Nótese cómo las mayores diferencias ocurren en los sitios con menor calidad del agua, esto obedece a que el número de sitios con valor del índice Cfq menor de 4 son relativamente pocos en los datos empleados (5 de 28), de tal forma que el ajuste de las funciones de pertenencia para los organismos bioindicadores de aguas contaminadas y muy contaminadas, es aún deficiente y es de esperar que con una serie de datos mayor puedan ajustarse mejor las funciones de pertenencia y, por consiguiente, aumenta la precisión del modelo de lógica Sugeno. La figura 7 muestra la correlación entre los resultados de la lógica Sugeno y los valores del índice Cfq, dicha correlación es altamente significativa ($r=0.87$, $p<0.05$, $n=28$).

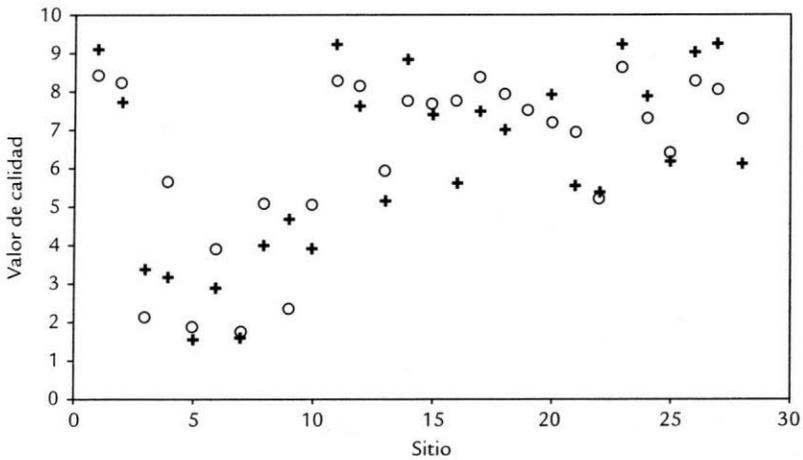


Figura 6. Variación entre el índice Cfq (o) y los valores de bioindicación obtenidos con lógica Sugeno

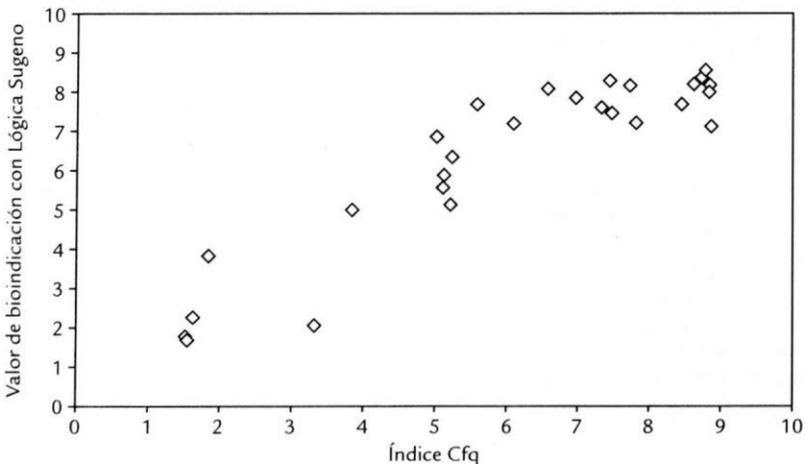


Figura 7. Correlación del índice Cfq y los valores de bioindicación con lógica Sugeno.

CONCLUSIÓN

En estudios de limnología, así como en muchos otros estudios de ecología, es usual tener que trabajar con datos heterogéneos y/o inciertos. Algunas de las razones, para estas características propias de datos ambientales son:

–Heterogeneidad proveniente de: diferentes fuentes de datos, (cuantitativos, cualitativos) y diferentes formatos y estructuras de los datos.

–Incertidumbre resultante de: presencia de variables aleatorias, datos incompletos o imprecisos, estimaciones aproximadas en lugar de mediciones (debido a problemas técnicos o financieros), incompatibilidad de datos, incompleto o deficiente conocimiento por parte de los expertos, información intuitiva proveniente de los expertos, etc.

De lo anterior, se puede observar que se requiere de métodos para el modelamiento y análisis ecológico, capaces de adaptarse y sacar provecho de las aparentes limitantes de la información ecológica. Dichos métodos de análisis y modelamiento deberían poder ser usados para manipular la incertidumbre y heterogeneidad en datos ecológicos. En este sentido, la lógica difusa Sugeno ofrece una posibilidad al permitir procesar simultáneamente la información “subjetiva” proveniente de expertos y la información “objetiva” recopilada mediante datos. Adicionalmente, los datos ecológicos pueden ser interpretados como series difusas, sin límites rígidos definidos, los cuales reflejan mejor el carácter continuo de la naturaleza (Salski *et al.*, 1996). La implementación de la lógica Sugeno como herramienta de análisis de la calidad del agua con base en macroinvertebrados acuáticos, ofrece las mismas ventajas de la bioindicación, tales como: simplicidad metodológica y rapidez de los resultados; pero, adicionalmente, proporciona una considerable disminución del tiempo dedicado a las determinaciones taxonómicas (7 taxones) y proporciona una alta confiabilidad de los resultados, debido a la capacidad de esta técnica de ofrecer soluciones a problemas matemáticos complejos, como los asociados a la calidad del agua y sus interacciones con la fauna acuática. La metodología propuesta permite implementarla en cualquier área de interés, con la simple adopción de los ajustes correspondientes tales como: organismos indicadores, funciones de pertenencia y reglas de decisión. Igualmente, esta metodología puede extenderse a ambientes lénticos o al biomonitoreo de procesos industriales que originan algún tipo de fluidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de los resultados del Proyecto “Quironómidos de la Sabana”, financiado por COLCIENCIAS. (Contrato 065/96 Colciencias, Universidad Nacional de Colombia). Los autores del trabajo agradecen a esta entidad el efectivo apoyo técnico y financiero. A la Fundación Alexander von Humboldt (AvH) por el apoyo al tercer autor mediante una beca de investigación, a las agencias alemanas DAAD y GTZ por la donación de equipos y apoyo general al proyecto, a la Facultad de Ciencias y al Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia por la construcción y dotación de laboratorios y apoyo al proyecto. A los demás miembros del equipo de trabajo por su ayuda en la identificación de la fauna bentónica.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBA-TERCEDOR, J. 1996. Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA), Almería España. II: 203-213.
- ANDERSON, J. R. 1983. *The Architecture of Cognition*. Cognitive Sciences Series. Harvard University Press. Cambridge, MA.
- BANARESCU, P. 1995. *Zoogeography of Freshwaters*. Bd. 1-3. Aula. Wiesbaden.
- BOHÓRQUEZ, A. 1989. Contribución al estudio limnológico por bioindicadores con macroinvertebrados bentónicos en aguas continentales. Proyecto Limnología Unincca - Colciencias. IP 1227-09004-89. Bogotá.
- BOYER, R. S. 1979. *A Computational Logic*. Academic Press. New York.
- CAIRNS, J., MCCORMICK, P. V. & NIEDERLEHNER, B. R. 1993. A Proposed Framework for Developing Indicators of Ecosystem Health. *Hydrobiologia* 263: 1-44.
- CORREA, M., MACHADO, T. & ROLDÁN, G. 1981. Taxonomía y Ecología del orden Trichoptera en el Departamento de Antioquia, en diferentes pisos altitudinales. *Actual. Biol.* 10 (36): 35 - 49.
- COURTNEY, G. W., TESKEY, H. J., MERRIT, R. W. & FOOTE, B. A. 1996. Larvae of Aquatic Diptera. En: R. Merrit & K. Cummins (editores). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Kendall/Hunt Publishing Company. Iowa, E.U. p.p. 484-514.
- COVICH, A. & THORP, J. 1991. Crustacea: Introduction and Peracarida En: J. Thorp & A. Covich (editores). *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. Academic Press, Inc. San Diego, E. U. p.p. 665-689.
- DUBOIS, D. & PRADE, H. 1980. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Academic Press. New York.
- FOOTE, B. A. 1987. Order Diptera. En: F. Stehr, (editor). *Immature Insects Vol II*. Kendall/Hunt Publishing Company. Iowa, E. U. p.p. 690-915.
- HOLZENTHAL, R. 1988. *Studies in Neotropical Leotoceridae (Trichoptera), VIII: The Genera Atanatolica and Grumichella (Tripletidinae: Grumichellini)*. *Trans. Ame. Entomol. Soc* 114: 71-127.
- HUNT, E. B. 1975. *Artificial Intelligence*. Academic Press. New York.
- ILLIES, J. 1969. *Biography and Ecology of Neotropical Freshwater Insects, Especially Those From Running Waters*. En: E. J. Fittkau, J. Illies, H. Klinge, G. H. Schwabe, & H. Sioli (editores). *Biography and Ecology in South America*, 2. *Monogr. Biol.* 19: 685-708.
- KAPUR, D. & MUNDY, J. L. 1988. *Geometric Reasoning*. En: D Kapur & J. L. Mundy (editores). MIT Press. Cambridge, MA.
- KAUFMANN, A. & M.M.GUPTA. 1985. *Introduction to Fuzzy Arithmetic*. V.N. Reinhold.
- MERRIT, R., WEBB, D. & SCHLINGER, E. 1996. Pupae and Adults of Aquatic Diptera. En: R. Merrit & K. Cummins (editores). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Kendall/Hunt Publishing Company. Iowa, E.U. p.p. 515-548.
- QUINTERO, A. & ROJAS, A. 1987. Aspectos bioecológicos del orden Tricóptera y su Relación con la Calidad del Agua. *Rev. Col. Ent.* 13 (1): 26 - 39.
- RINCÓN, M. E. 1999. Estudio preliminar de la distribución altitudinal y espacial de los Tricópteros (Trichoptera) en la Cordillera Oriental de Colombia. En: G. Amat, G.

- Andrade y F. Fernández (editores). Insectos de Colombia. Vol. II. p.p. 267-283. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Academia colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras N°13. Bogotá, Colombia.
- RISS, W., OSPINA, R. & GUTIÉRREZ, J. D. 2002. Establecimiento de valores de bioindicación para los macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia* 24 (1): 135-156.
- ROLDÁN, G. 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia, Fondo FEN. Medellín, Colombia.
- SALSKI, A., FRÄNZLE, O. & KANDZIA, P. 1996. Fuzzy Logic in Ecological Modeling. *Ecological Modeling, Special Issue* 85(1).
- SUGENO, M. 1985. *Industrial Applications of Fuzzy Control*. Elsevier Science Pub. Co.
- WIGGINS, G. 1996. Trichoptera Families En: R. Merrit & K. Cummins (editores). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. p.p. 309-349. Kendall/Hunt Publishing Company. Iowa, E.U.
- ZADEH, L. A. 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 8: 338-353.
- _____. 1988. Fuzzy Logic. *Computer* 1(4): 83-93.
- ZAMORA, C & ALBA-TERCEDOR, J. 1996. Bioassessment of Organically Polluted Spanish Rivers, using a Biotic Index and Multivariate Methods. *J. N. Am. Benthol. Soc* 15 (3): 332-352.

