

INDICADORES DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES EN MICROCUENCAS RURALES¹

Amado Insfrán Ortiz ²
Adilson Pinheiro ³

ABSTRACT

In hydrographic basin with agronomic characteristics, the water use is generally diverse and sometimes with negative impact in the quality. It is necessary to find out mechanisms to explain the practical significance about water quality and environmental phenomenon. The proposal to establish indicators is a good reason based on the aggregation of information to interpret the results. The goal of this research is to establish water quality indicators in agricultural micro basin of Alto Dona Luiza, Areado, Das Pedras, Máximo y Tiroleses Rivers, all of them Itajai River affluent, in the State of Santa Catarina, Brazil. Water quality data between 1998 and 2001 were used and it monitored by Enterprise Pesquisa Agropecuaria e Extension Rural (EPAGRI) and data of soil use. To establish the final quality indicators analysis of principal components were applied (ACP) of multivariate statistic. The groups of final indicators were four: a) Quality indicators of stability (ICEA) applied to high micro basin, that indicate an stability condition of the water system, which level of aggregation establish/constitute the less human intervention and higher slope; b) Eutrophization Indicator (IEu) applied to flow into Itajai River studied of the micro basin, resulting significant component of ortho phosphate, nitrate, ammonium, total solid, turbidity and total iron; c) Potential Pathogenic Contamination Indicators (IPCP) applied to rivers flow into Itajai River studied of the micro basin, related to microbiological parameters of total and defecate coli forms; and d) Punctual Origin Pollution Indicators (IPOP) applied to the whole micro basin context, where were showed significancy in the drain area, field/pasture, fishery, total coli forms, defecate coliforms, turbidity, otho phosphate and ammonium.

Key words: indicators, water quality, micro basins, rural.

RESUMEN

En cuencas hidrográficas de características agropecuarias, los usos del agua generalmente son diversos y a veces con fuertes impactos negativos en la calidad. Por ello, es necesario encontrar mecanismos para explicar el significado práctico de la relación entre la calidad del agua y ciertos fenómenos ambientales decurrentes. La propuesta de establecer indicadores es una premisa basada en la agregación de las informaciones que posibilita la interpretación conjunta de resultados. Este estudio tiene como objetivo establecer indicadores de calidad de agua en las microcuencas agrícolas del río Alto Dona Luiza y los arroyos Areado, Das Pedras, Máximo y Tiroleses, todos afluentes del río Itajai, Estado de Santa Catarina, Brasil. Fueron usados datos de calidad de agua del periodo comprendido entre 1998 y 2001, monitoreado por la Empresa de Pesquisa Agropecuaria e Extensão Rural (EPAGRI) y datos de usos de suelo. Para establecer los indicadores finales de calidad fue usado el método de Análisis de Componentes Principales (ACP) de la estadística multivariada. Los grupos de indicadores finales establecidos fueron cuatro: a) Indicadores de calidad estable del agua (ICEA) aplicados a las nacientes en cuencas altas, que indican una condición de estabilidad del sistema acuático cuyo nivel de agregación constituyen las áreas de drenaje de menor intervención antrópica y mayor declividad; b) Indicadores de Eutrofización (IEu) aplicados a las desembocaduras de los brazos estudiados en las microcuencas, donde resaltaron la significancia del ortofosfato, nitrato, amonio, sólidos totales, turbidez e hierro total; c) Indicadores de Potencialidad de Contaminación Patogénica (IPCP) aplicados las desembocaduras de los brazos estudiados en las microcuencas, relacionados a los parámetros microbiológicos de coliformes totales y fecales; y d) Indicadores de Polución de Origen Puntual (IPOP) aplicados en el contexto de toda la microcuenca, donde presentaron significancia el área de drenaje, campo/pastura, piscicultura, coliformes totales, coliformes fecales, turbidez, ortofosfato y amonio.

Palabras clave: Indicadores, calidad de agua, cuencas hidrográficas, rural.

¹ Parte de la Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental denominada Indicadores de Qualidade da água em microbacias rurais, Universidad Regional de Blumenau-SC, Brasil. 2003.

² MSc. en Ingeniería Ambiental, Profesor de la Carrera de Ingeniería en Ecología Humana de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción. Campus Universitario, San Lorenzo Telefax (595) 21-5856012, e-mail: dptcieh@agr.una.py

³ Dr. en hidrología, Profesor de la Universidad Regional de Blumenau, SC-Brasil

INTRODUCCIÓN

La complejidad de los fenómenos ambientales y la diversidad de informaciones requeridas para un abordaje sistémico, ya hace 150 años se procuraba encontrar las formas de medir la calidad ambiental (Bollman & Da Motta Marques, 2000). Respecto al agua, los parámetros físicos, químicos y biológicos fueron las primeras formas encontradas y utilizadas hasta hoy para medir la calidad; sin embargo, es necesario encontrar mecanismos para explicar el significado práctico de las relaciones de esos parámetros con ciertos fenómenos decurrentes de la calidad de las aguas. La propuesta de establecer indicadores constituye una premisa, que se basa en la agregación de las informaciones posibilitando la interpretación conjunta de resultados. En ese marco, este trabajo pretende ser un aporte metodológico en la idea de usar indicadores relacionados con la calidad aguas superficiales en microcuencas rurales similares a las estudiadas.

La conceptualización de los *Indicadores* se puede plantear desde el punto de vista de la sustentabilidad de los agroecosistemas o la calidad ambiental, como es el caso de cuencas hidrográficas. Meyer (1992) y Scarn (1993) citado por Walker & Reuter (1996), afirman que son atributos mensurables del ambiente y específicos de un conjunto, incluyendo un aspecto particular de los componentes de interés y que pueden ser monitoreados por medio de la observación y muestreo de campo, sensores remotos o compilación de datos existentes. De forma similar, Torquebiau (1989) citado por Camino & Müller (1993), define los indicadores como una medida del efecto de la operación de un sistema sobre el descriptor. Para la selección, Marzall y Almeida (2000) consideran la dificultad de definir indicadores prácticos y aplicables a partir del estado de arte, límites y potencialidades de los mismos, como una herramienta para evaluar el desarrollo sustentable. Escoger indicadores depende de varios aspectos; en nivel de comunidad y cuencas rurales existen criterios, que desde el punto de vista de su aplicación, deben ser respetados donde el mecanismo de evaluación basado en un intervalo de 0 (como la peor situación) y de 10 (como la mejor situación), parece ser la más aceptada (Sparrow et al, 1998; Walker y Reuter, 1996).

Para la estructuración de indicadores sistémicos y formas de agregación en órdenes superiores, existen restricciones. El establecimiento de un marco referencial transitorio en el modo de pensar y el abordaje a partir de estructuras multiniveles, representan un avance en la obtención de indicadores de características sistémicas, que puedan explicar una realidad sociocultural, económica y del ambiente natural. Una referencia del inicio del proceso es el analogismo, hecho por Einstein citado por Bollmann (2001), del objeto de la ciencia como castillo de cristal, en el cual solamente la agregación de los conocimientos obtenidos a

través del análisis desde todo punto de vista posible, la totalidad puede ser reconocida integralmente.

En la estructuración, definición y utilización de indicadores de calidad del agua, el mayor problema es el uso múltiple y diversificado del agua. En general, cada uso requiere padrones individuales de calidad con escalas de valores diferenciados para cada una de las variables. Camino e Müller (1993), establecieron una estructura básica en: *Categoría de análisis* (aspecto significativo de un sistema); los *Elementos* (una parte significativa de la categoría); los *Descriptor* (características significativas de un elemento dentro del sistema); y los *Indicadores* (medida del efecto de operación del sistema sobre el descriptor). La figura 1, presenta la secuencia de la estructuración teórica de los indicadores.

Con esta estructura se podría establecer la estructura básica de cualquier sistema en un estudio con sus correspondientes indicadores. Para una cuenca hidrográfica, la propuesta es:

- Sistema: Cuenca del río, arroyo
- Categoría: Del sistema

Recursos exógenos

- Elemento: Agua
- Descriptores: Calidad, cantidad
- Indicadores: OD (Flujo diario (mm/día))

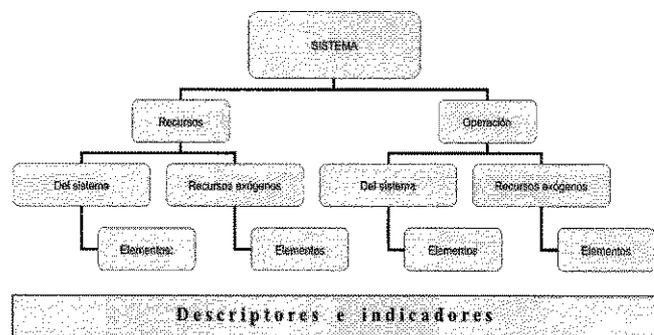


Figura 1. La estructuración del sistema de indicadores (Adaptado de Camino & Müller, 1993)

La propuesta señala categoría de análisis que envuelve recursos y operaciones del sistema y de otros recursos exógenos. A partir de ello, se podrían considerar los elementos, que en el caso de la categoría de recursos podrían ser agua, aire, vegetación, suelo, fauna, culturas, etc. y para recursos exógenos podrían ser manejo técnico, manejo socioeconómico, productividad, etc. Los descriptores pueden ser numerosos, entre ellos la calidad del agua, que podrían ser identificados a través de diferentes medidas. Un *indicador* es apenas una medida, no una medida estadística o causalidad y consecuencia evidente, ni un elemento de previsión de eventos (Benbrook & Groth III, 1996). Ruitenbeek (1991) citado por Camino & Müller (1993), reconoce que algunos tipos de indicadores permiten hacer alguna predic-

ción de eventos futuros, denominándolos indicadores de previsión; y otros denominan indicadores descriptivos, proyectivos, etc. Agrega Marzall (1999), que los de previsión, son un producto de capacidad de abstracción del observador que responde a su bagaje de conocimiento y visión del tema.

En una aproximación a la estructura multinivel de indicadores, Weber (1990) y la UNESCO (1987) citado por Bollmann y Marques (2000), reconocen dos clases: los *primarios*, de medidas directas toda y cualquier información posible de ser medida directamente del medio físico o alguna propiedad matemática o estadística que describe el elemento natural. En este nivel, se destacan la mayoría de los parámetros físicos, químicos y biológicos del sistema en estudio; además de las propiedades matemáticas o estadísticas de los elementos, tales como número más probable (NMP) de Coliformes, número de especies en extinción, pérdida de suelos, pérdida de cobertura vegetal; y los *secundarios*, que hacen una integración de los indicadores de niveles primarios abstracción derivada de las consideraciones de dos o más indicadores primarios; ejemplo o Índice de Calidad de Aguas (ICA) que considera los parámetros físicos, químicos y biológicos (Pinheiro, 2001; Silva y Soares, 2000), el Índice de Toxicidad a partir de algunos metales pesados (Bollmann y Marques, 2000), índice de Consumo de capital, índice de emisión de contaminantes (Krieger, 1997), entre otros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las 5 (cinco) microcuencas seleccionadas, se encuentran geográficamente dispersas a lo largo de la cuenca hidrográfica del río Itajaí, que abarca un área de 15.000 km² y está comprendida aproximadamente entre la longitud 48°40'-50°20' Oeste y latitud 26°20'-27°50' Sur (Figura 2).

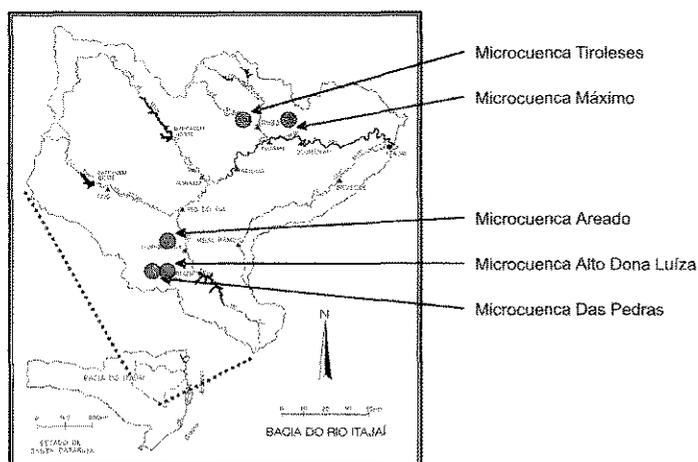


Figura 2. Localización geográfica de las microcuencas estudiadas en el contexto de la cuenca hidrográfica del río Itajaí, SC-Brasil.

Entre las variables de usos de suelo fueron estudiadas las áreas de bosque, campo/pastura, agricultura anual, reforestación, piscicultura y área de drenaje. Las mismas se obtuvieron de datos primarios resultantes del período de investigación mediante el uso de imágenes de satélite LANDSAT TM 7, año 2000, cedidas por el Instituto de Pesquisas Ambientales de la Universidad Regional de Blumenau, procesadas con el software Spring 3.6. En calidad de agua los parámetros *físicos* considerados fueron la turbidez (UTN) y la temperatura (°C); entre los *químicos* el pH, oxígeno disuelto (OD), alcalinidad (CaCO₃ A), ortofosfato (Orto-PO₄), nitrito (NO₂), nitrato (NO₃), amonio (NH₄), dureza (CaCO₃ A), sólidos totales (ST), sólidos disueltos (SD), Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) e hierro total (Fe); y los parámetros *microbiológicos* coliformes totales y coliformes fecales; resultados de monitoreo realizado por EPAGRI/CIRAM en los años 1998, 1999, 2000 y 2001 en los laboratorios de agua de los Centros Experimentales localizados en los municipios de Ituporanga e Itajaí.

Para establecer los indicadores finales fue usado el método de Análisis de Componentes Principales (ACP), que establece combinaciones lineales de variables aleatorias con propiedades especiales (Machado, 1991 citado por Bollmann y Marques, 2000). El punto crucial del análisis de componentes principales es testar si algunas variables explican con mayor intensidad ciertos fenómenos dada la variancia de los datos (Crivisqui, 1993). Este método parte de la estadística multivariada y considera las observaciones de m variables ($j = 1, 2, \dots, m$) sobre n objetos de investigación ($i = 1, 2, \dots, n$). A cada variable X_j se asocia un valor x_j llamado punto-variable de j , y a cada objeto Y_i se asocia un valor y_i distante de punto-objeto de i . Conforme al caso, a los conjuntos de puntos se denominan Nubes de puntos-variables contenido en una recta (R^n), o Nubes de puntos-objetos en la recta (R^m). Las nubes es constituida por puntos proyectados sobre cantidad variada de rectas ($R_1, R_2, R_3 \dots, R_n$) pasando por el origen donde cada recta es un espacio lineal que explica una dimensión del fenómeno con cierta variabilidad. La recta con variabilidad máxima se denomina primer componente principal, con valores propios y diferenciados de otras rectas (segunda, tercera, etc), explicando un determinado fenómeno. Para los fines del estudio, fue usado el Análisis de Componentes Principales a partir del Paquete Estadístico para Ciencias Sociales (SPSS) Student Version 9.0 (Ritchey et al., 2000). Conforme al modelo de interrelaciones de las variables y sus variancias, el procedimiento para el análisis final fue realizado en la secuencia siguiente:

- Obtención de la matriz de componentes (R_n)
- Selección de los componentes principales: conforme al porcentual de sus variancias explicadas, mayor porcentual de variancia significa mayor relevancia. Se consideró «poco relevante» para el estudio, aquel componente con porcentual de variancia inferior al 10%.

- c) Selección de las variables que compondrán los indicadores finales: conforme al número de variables explicativas según el modelo y las cargas factoriales.
- d) Interpretación de resultados y establecimiento de indicadores finales: la interpretación del fenómeno parte de la particularidad de cada parámetro de calidad de agua y las caracterizaciones de cada microcuenca.

El criterio asumido para establecer los indicadores de calidad de agua está basado en los puntos de muestreo, de esta forma se consideraron:

- a) Indicadores a partir de parámetros de calidad de agua del punto de muestreo localizado en las nacientes de las microcuencas;
- b) Indicadores a partir de parámetros de calidad de agua del punto de muestreo localizado en las desembocaduras; e
- c) Indicadores a partir de tipos de usos de suelo y parámetros de calidad da agua de todos los puntos de muestreo en las microcuencas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados descriptivos de los promedios de concentraciones, desvíos estándares y número de casos, se observan en la Tabla 1.

Los resultados expresan diferencias entre los puntos de muestreo. En las desembocaduras de las microcuencas tuvieron concentraciones mayores de coniformes totales, coniformes fecales y ortofosfato, y aumento de temperatura y turbidez. La variabilidad de los resultados fue observada en la mayoría de los parámetros estudiados, especialmente en coliformes totales, coniformes fecales y turbidez con desvíos estándares superiores a las medias tanto en las nacientes como en las desembocaduras de las microcuencas; sin embargo, la variabilidad de temperatura, ortofosfato y sólidos totales, respecto a los promedios, fue mayor en las desembocaduras.

Indicadores finales de calidad de agua

El modelo identificó cinco componentes principales en orden de importancia para cada microbacía. La matriz de cargas factoriales presentaron diferencias notables en cuanto a número de variables significativas, formas de interrelaciones entre los parámetros y porcentuales de las variancias; hecho que indica una variabilidad asociativa de los parámetros y formas diversas de interpretación del fenómeno. Las tres agrupaciones de datos introducidos en la matriz del modelo de ACP, posibilitó el análisis independientes uno de otros buscando indicadores que expliquen razonablemente cada situación.

Indicadores a partir de parámetros de calidad de agua del punto de muestreo localizado en las nacientes de las microcuencas.

Fueron analizados 16 parámetros de calidad de agua de los puntos de muestreo ADL 00, ARE 10, DPE 20, MAX 00 y TIR 00 localizados próximos a las nacientes de los ríos de las microcuencas estudiadas. El cuadro 2 presenta un resumen de la distribución de las interrelaciones de variables significativas encontradas a partir del modelo, donde los signos (+ ó -) representa las formas de asociaciones resultantes y los valores de las cargas factoriales significativas.

A partir de los resultados fue establecido un factor denominado **Indicadores de Calidad Estable de Agua (ICEA)**, basados en la alta variabilidad y poca tendencia en las interrelaciones de las variables significativas. Las cargas factoriales significativas de los parámetros y los porcentuales de las variancias por componente, indican que existen diferencias entre las microcuencas estudiadas, pero no sugieren tendencias claras respecto de alguna variable en particular. Apoyado en las consideraciones de Walker & Reuter (1996), los elementos de análisis contribuyen suficientemente en el establecimiento de ICEA en microcuencas de características agropecuarias, cuyo nivel de agregación constituyen las áreas de drenaje de menor intervención antrópica y mayor declividad. Los ICEA solamente son considerados en el caso de las nacientes de agua, y no para inicio de subcuencas.

Los resultados están ligados y apoyados en las consideraciones siguientes:

- a) Los puntos localizados próximos a las nacientes tuvieron menores concentraciones de coliformes totales, coliformes fecales, turbidez, ortofosfato, nitritos, amonio, nitrato e hierro, valores normales de OD y temperatura, poca DBO₅, sólidos totales y sólidos disueltos, en la mayoría de los casos;
- b) Las áreas de usos do solo (Tabla 1), indicaron que los puntos de muestreo próximos a las nacientes fueron los de menor intervención antrópica y mayor área de bosque; y
- c) puntos localizados próximos a las nacientes de las microcuencas fueron los de menor intervención antrópica y de mayor declividad.

Indicadores a partir de parámetros de calidad de agua del punto de muestreo localizado en las desembocaduras de las microcuencas

Igualmente, fueron analizados 16 parámetros de calidad de agua en los puntos de muestreo ADL 80, ARE 80, DPE 80, MAX 99 y TIR 99, localizados próximos a las desembocaduras de los ríos. La tabla 3 presenta la distribución resumida das interrelaciones de las variables significativas encontradas el modelo.

Tabla 1. Promedio de concentraciones, desvíos estándares y n de los parámetros y de las variables físico-antrópicas, en los puntos de muestreo de nacientes, desembocaduras y de todos los puntos de las microcuencas estudiadas.

Parámetro/variable	Puntos en nacientes			Puntos en desembocaduras			Total microcuencas		
	Valores	Desvío	n	Valores	Desvío	n	Valores	Desvío	n
Coliformes totales_CT (NMP/100ml)	26498,85	±35962,53	490	65477,80	±68158,21	493	57209,39	±33749,35	1735
Coliformes fecales_CF (NMP/100ml)	1490,91	±5238,51	492	6075,76	±17367,39	495	5078,62	±4487,31	1741
Oxígeno disuelto_OD (mg/l)	8,72	±1,84	544	8,97	±2,48	549	8,60	±0,53	2163
Temperatura (°C)	17,84	±3,16	541	21,04	±22,16	543	18,97	±2,39	2155
Turbidez (UTN)	13,73	±36,29	611	46,15	±73,07	2161	40,05	±26,30	3927
pH	6,81	±0,48	552	6,95	±0,66	555	6,85	±0,68	2191
Alcalinidad-CaCO ₃ A (mg/L)	41,28	±12,54	349	32,04	±9,63	351	36,03	±18,08	1310
Orto-PO ₄ (mg/L)	0,84	±1,34	473	3,82	±4,64	497	2,66	±2,05	1739
Nitrito (mg/L)	0,03	±0,14	486	0,07	±0,15	509	0,06	±0,03	1776
Nitrato (mg/L)	0,91	±0,83	511	0,80	±0,92	517	0,89	±0,62	1827
Amonio (mg/L)	0,84	±3,25	509	0,73	±0,70	517	0,69	±0,71	1825
Dureza_CaCO ₃ (mg/L)	38,10	±14,02	498	29,52	±12,43	505	33,26	±15,45	1785
Sólidos totales_ST (mg/L)	106,27	±53,14	323	124,77	±214,89	1895	119,95	±38,49	2952
Sólidos disueltos_SD (mg/L)	85,37	±34,83	178	77,02	±52,06	181	88,54	±57,31	830
DBO (ppm)	1,64	±2,79	473	1,88	±1,58	472	2,20	±1,07	1859
Hierro total_Fe (mg/L)	0,16	±0,30	478	1,78	±1,42	488	1,22	±0,90	1744
Área drenaje (km ²)							7,28	±6,21	21
Bosque (km ²)							1,85	±2,17	21
Campo/pastoreo (km ²)							1,27	±1,16	21
Reforestación (km ²)							0,13	±0,19	21
Piscicultura (km ²)							0,05	±0,06	21
Agricultura (km ²)							0,27	±0,30	21

Tabla 2. Interrelaciones de las variables significativas por componentes principais en las nacientes, período de estudio 1998-2001.

Punto por Microcuenca	ADL 00				ARE 10				DPE 20				MAX 00				TIR 00	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Parámetro	Componente																	
	Carga factorial significativa																	
CT		,55							,75		,75							
CF							,58									,77		
OD									,78						,79			
°C									,88						,79			
UTN								,46			,62							
pH	,64									,70				,76				
CaCO ₃ A			,86							,76								
Orto-PO ₄				,58		,57					,71				,69		,93	
NO ₂ ⁻				,67		,57										,72	,83	
NO ₃ ⁻										,88			,71					
NH ₄ ⁺																,51		
CaCO ₃ D	,72									,70								,69
ST	,65	,61			,62							,75						
SD	,63				,59							,70						
DBO ₅			,49											,73				,67
Fe		,51					,59					,56						,82
N° variables	4	3	2	2	2	2	2	2	4	3	3	2	3	2	2	2	3	2
% variancia	27,2	15,9	13,5	10,8	15,8	12,6	11,4	10,1	27,1	19,6	17,2	11,8	20,9	16,5	14,6	10,8	28,4	13,2
% total	67,4				49,9				75,7				62,8				41,6	

Tabla 3. Interrelaciones de las variables significativas por componentes principales en las desembocaduras de las microcuencas, periodo de estudio 1998-2001.

Punto por Microcuenca	ADL 80			ARE 80			DPE 80			MAX 99			TIR 99			
Parámetro	Componente															
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
	Carga factorial significativa															
CT						-,56		,67							,74	
CF	,79					-,72										,65
OD								-,73			-,71				-,85	
°C		,79						,69	-,57		,68		-,61			
UTN	,88			,95			,94				,51					,48
pH									,57	,71						-,54
CaCO ₃ A		,80		,73									,59			
Orto-PO ₄	,84			,95							,78			,85		
NO ₂ ⁻				,95												,70
NO ₃ ⁻		-,78			,63						,82			,76		
NH ₄ ⁺				,94			,91									
CaCO ₃ D					,79		-,68						,77			
ST	,68		-,50	,80			,91									
SD			-,76		,86											
DBO ₅							,69									
Fe	,88			,97			,91				,81			,70		
N° Variables	5	3	2	7	3	2	6	3	2	4	3	2	4	2	2	2
% variancia	32,5	19,7	12,5	46,1	16,0	13,1	38	19,9	10,7	24,3	18,3	14,3	25,8	15,9	12,3	11,2
% variancia total	64,7			75,2			69,2			56,9			65,2			

En las desembocaduras, el modelo permitió la determinación de dos factores que fueron denominados *Indicadores de Eutrofización (IEu)* e *Indicadores de Potencialidad de Contaminación Patogénica (IPCP)*. Los resultados de *Indicadores de Eutrofización* presentaron porcentuales mayores en las variancias. Las interrelaciones de mayor significancia aparecieron en el primer componente principal, con variancias explicadas que oscilaron entre 24,3% y 46,1%. Las variables más significativas como IEu fueron básicamente los nutrientes como el ortofosfato, nitrato y amonio, además de sólidos totales, hierro total y turbidez. Agraval (1999) atribuye las cargas de nutrientes, que para Donoso et. al (1999) son esencialmente nitrato, metales pesados y sólidos disueltos, a problemas de polución agrícola difusa. Resultados similares obtuvieron Metroplan (1998), citado por Bollmann & Marques (2000), con fosfatos totales y nitratos, y Jolly et al. (1996) con fósforo y turbidez. Las características físicas de las microcuencas probablemente haya sido una de las razones de esta asociación, pues en microcuencas topográficamente irregulares, el proceso de desprendimiento, transporte y sedimentación de nutrientes y material orgánico del suelo, suceden con mayor facilidad; Manahan (1997) citado por Dellagiustina (2000), respalda la premisa afirmando la materia orgánica y los fertilizantes de uso agrícola llevados al agua contribuyen en gran medida al proceso de eutrofización por nitrato, amonio y fósforo. Merten & Minella (2002) atribuyen a la cría de suínos, cuyo material producido cau-

sa grandes impactos en los ecosistemas acuáticos, siendo el fósforo el principal responsable del proceso de eutrofización. Las asociaciones de ortofosfato, sólidos totales e hierro total probablemente responden a procesos de adsorción física y química en el ambiente acuático, esta premisa es respaldada por Baumgartem & Pozza (2000) quien señala que sucede en el inicio del proceso, posteriormente los elementos precipitan.

Los *Indicadores de Potencialidad de Contaminación Patogénica (IPCP)*, agrupan las variables más significativas a los coliformes totales y coliformes fecales, cuya presencia en exceso en el cuerpo de agua produce alteraciones químicas, principalmente en el decrecimiento del OD y en menor intensidad alteraciones de pH, alcalinidad y dureza de las aguas. Las microcuencas de características pecuarias (suínos y ganados de leche) como Das Pedras y Alto Dona Luíza, tuvieron las mayores variancias explicativas del fenómeno. Comparando estos resultados con las concentraciones de coliformes totales y coliformes fecales, fueron encontradas elevadas en los puntos próximos a las desembocaduras. Respecto a valores medios de coliformes totales en las cinco microcuencas se encontró alrededor de 65.000 NMP/ml con n=493, que ultrapasaron en la totalidad de las microcuencas los padrones permisibles según la Resolución CONAMA No. 20/86. Comportamiento similar presentó coliformes fecales ultrapasando los padrones legales en todos los puntos analizados. Resultados similares fueron encontrados por

Metroplan (1998) citado por Bollmann & Marques (2000) con coliformes fecales, conductividad, DBO₅ y OD en las subcuencas de los ríos Gravataí, Guaíba, Caí y Sinos, Estado de Río Grande do Sul. Krieger (1997) admitió la existencia de emisión de contaminantes con cargas de residuos orgánicos en las aguas y Jolly et al. (1996) atribuyen los índices de contaminación biológica y potencialidad de contaminación patogénica a elevadas concentraciones de coliformes fecales. Las observaciones de campo permiten afirmar que existen puntos de muestreos localizados muy próximos a poblaciones humanas y cría intensiva de animales (suinos, ganado lechero y peces); por lo tanto es razonable afirmar que la presencia de coliformes fecales y materiales orgánicos en las aguas sea producto de desechos humanos y animales, con probables riesgos a la salud humana. Concuerta Kiely (1999) que la presencia de organismos patógenos (bacterias, virus, etc.) en el ambiente acuático se debe a los desechos humanos y animales, cuyo agente causal principal es del género *Escherichia*, con largo período de sobrevivencia en medio acuático.

Indicadores a partir de tipos de usos de suelo y parámetros de calidad da agua de todos los puntos de muestreo en las microcuencas.

Se establecieron indicadores a partir de los valores promedios de los parámetros de calidad de agua estudiados y las áreas (Km²) de usos de suelo y área de drenaje de todos los puntos de muestreo de las cinco microcuencas. Se consideró un factor denominado *Indicadores de Polución de Origen Puntual (IPOP)*, basado en las cargas factoriales del conjunto de variables consideradas en el primer componente principal del modelo, cuya variancia explicó el 37,2% de la variación de calidad del agua causada por el fenómeno de polución de origen puntual. De esta forma, se encontraron dos grupos definidos por 8 variables indicadores de polución de origen puntual, a seguir:

- a) La *Piscicultura* con carga factorial de 0,805, las *Áreas de drenaje* con carga factorial de 0,793, y *Campo/pastura* con valor factorial de 0,679, fueron los indicadores de polución de origen puntual (IPOP) más significativos relacionados a las características física y usos del suelo;
- b) El *ortofosfato* con carga factorial 0,902, los *Coliformes fecales* con 0,850, *Turbidez* con 0,806, *Amonio total* con carga factorial de 0,695 y los *Coliformes totales* con 0,679, fueron los parámetros de calidad de agua cuyos valores representan los principales IPOP.

Tabla 4. Matriz de componentes^a principales de las microcuencas de Alto Dona Luíza e os Ribeirões Areado, Das Pedras, Máximo e Tiroleses (período 1998-2001).

Variable	Componente				
	1	2	3	4	5
Area drenaje	0,793	-0,333	-0,240	-0,102	0,348
Bosque	0,600	7,201E-02	-0,499	0,374	-0,219
Campo/pastoreo	0,679	-0,340	-0,563	0,285	-1,334E-02
Reforestación	0,129	0,450	0,241	0,800	0,190
Piscicultura	0,805	-0,198	-0,299	0,186	-0,273
Agricultura	0,617	-0,391	-0,368	0,398	-2,551E-02
CT	0,679	0,526	0,232	0,105	7,965E-03
CF	0,850	-1,784E-02	0,164	-0,262	-0,403
OD	0,480	-0,588	-0,172	-0,249	4,026E-02
°C	0,524	-0,141	-0,139	-0,405	0,511
UTN	0,806	-0,156	0,257	-0,172	-0,378
pH	0,583	0,648	-0,389	-0,128	0,157
CaCO ₃ A	5,715E-02	0,940	-0,258	-9,037E-02	0,119
Orto-PO ₄	0,902	-0,332	0,122	-0,132	6,557E-02
NO ₂ ⁻	0,528	0,227	0,613	0,370	0,193
NO ₃ ⁻	-0,495	-0,662	0,193	0,219	-0,225
NH ₄ ⁺	0,695	-0,210	0,567	2,140E-03	0,336
CaCO ₃ D	-2,155E-03	0,938	-0,261	-2,900E-02	0,142
ST	0,598	0,782	5,775E-02	-7,191E-02	-7,263E-03
SD	0,402	0,713	2,821E-02	-0,199	-0,455
DBO ₅	0,333	0,350	0,751	-3,766E-02	-0,134
Fe	0,663	-0,567	0,330	-3,358E-03	0,118
Nº de variable	8	6	3	2	1
% variancia	37,2	25,8	12,8	7,6	6,1
% variancia acumulada	37,2	63,0	75,8	<10%(variancia no considerada)	

^a 5 componentes extraídos.

El establecimiento de un único factor fue debido a que las variables significativas de segundo y tercer componente principal, ya conformaron los factores que definieron indicadores de Potencialidad de Contaminación Patogénica (IPCP) e indicadores de eutrofización (IEu), explicados en los ítems anteriores; sumado a ello, es que agrupan variables poco significativas respecto a usos de suelo. Entre las variables de usos de suelo, fueron altamente significativas las áreas de *Campo/pastura* y *piscicultura*, observándose que en la mayoría de las microcuencas, el sistema implementado es intensivo destinado a cría de suínos y ganados lecheros, y extensivo para ganados de carne y caballos. La cría de peces abarca áreas muy densas y con producción continua a nivel comercial, que generalmente se basa en sistema peces-suínos de forma complementadas, que conforman las actividades productivas esenciales y particularmente importantes en la economía familiar, de gran parte de población local. *Campo/pastura* y *piscicultura* probablemente sean los usos de suelo indicadores de polución de origen localizado que alteran la calidad de las aguas en microcuencas rurales, principalmente en lo que respecta a coliformes, ortofosfato y amonio total, siendo la cría de peces, suínos y ganados de leche los contribuyentes más importantes. Merten & Minella (2002) concuerdan con estos resultados, indicando que las actividades de pecuaria en sistemas de confinamiento, como la suinocultura, la cría de ganados de leche y la avicultura, constituyen importantes fuentes poluidoras de las aguas en microcuencas rurales. El amonio total y el ortofosfato, aparecieron como indicadores de polución de origen puntual en las microcuencas estudiadas, además de coliformes totales, coliformes fecales, temperatura, turbidez, ferro total e sólidos totais con asociación cercana con los usos de campo/pastura, piscicultura y cultivos anuales, además de áreas de drenaje; similar al nitrógeno y fósforo que son elementos relevantes producidos por la cría de cerdos (EMBRAPA, 1998; Merten & Minela, 2002),

CONCLUSIONES

Escoger indicadores de calidad de agua es altamente subjetivo, depende de varios aspectos, tales como metas y experiencias personales, conocimiento local, disponibilidad de datos y recursos financieros, además de la intuición particular, condiciones que resaltan la dificultad de establecer indicadores prácticos y aplicables en la realidad de las microcuencas rurales, lo que supone el riesgo de subjetividad en la interpretación de resultados.

Con la premisa de mayor objetividad, fueron establecidos cuatro factores indicadores de calidad de agua en las microcuencas de características agropecuarias, descriptos a seguir:

1. *Indicadores de Calidad Estable de Agua (ICEA)*, donde

se consideraron la alta variabilidad y pocas tendencias observadas en los resultados de las interrelaciones de las variables significativas. El nivel de agregación constituyen las áreas de drenaje de menor intervención antrópica, mayor cobertura forestal y mayor declividad; indicadores aplicados solamente en los casos nacientes de agua, no de nacientes de subcuencas.

2. *Indicadores de Eutrofización (IEu)*, que comprenden básicamente los nutrientes como el ortofosfato, nitrato y amonio, además de sólidos totales, hierro total y turbidez, cuyos factores de interrelación sugieren las variables más significativas en el modelo usado. La cría de suínos, cuyo material producido causa grandes impactos en el agua, es uno de los factores relevantes asociados, siendo el fósforo el principal responsable del proceso de eutrofización.
3. *Indicadores de Potencialidad de Contaminación Patogénica (IPCP)*, con variables significativas relacionadas a parámetros microbiológicos de calidad de las aguas, con factores de interrelación que sugieren a los coliformes totales y coliformes fecales como las variables más significativas.
4. *Indicadores de Polución de Origen Puntual (IPOP)* donde las variables conformadas por los parámetros turbidez (físico), ortofosfato, amonio (químicos), coliformes totales y coliformes fecales (microbiológicos) y datos de usos de suelos representados por: área de drenaje, campo/pastura y piscicultura, representan las más significativas. En resumen, las áreas de campo de uso intensivo para la cría de cerdos, ganado lechero y peces, conforman las fuentes puntuales más significativas de polución de agua y el redireccionamiento de las prácticas de control de polución, serían las estrategias de protección válidas en las cuencas rurales.

Se resalta que las características propias y distintas de cada ecosistema, no permiten establecer indicadores únicos aplicables en forma universal, existe necesidad de enfatizar en términos sectoriales y ambientes específicos.

LITERATURA CITADA

- AGRAVAL, G. D. 1999. Diffuse agricultural water pollution in India. In: *Water Science and Technology*, vol 39(3): p33-47. New Delhi, India.
- BAUMGARTEN, M. G.; POZZA, S. A. 2001. Qualidade de águas: descrição de parâmetros químicos referidos na legislação ambiental. Campo Grande, MS-Brasil, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, p23-31.
- BOLLMANN, H. A. 2001. Metodología para avaliação ambiental integrada. In: *Indicadores ambientais:*

- conceitos e aplicações. MAIA, N. B.; BARRELA, W.; MARTOS, H. L. (organizadores). EDUC. São Paulo, Br. P15-46.
- BOLLMANN, H. A.; MARQUES, D. M. 2000. Bases para a estruturação de indicadores de qualidade de águas. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol 5(1):37-60p. Porto Alegre, Br.
- CAMINO, R.; MÜLLER, S. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales: bases para establecer indicadores. San José, CR. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura/Proyecto IICA-GTZ, 134p. (Serie Documentos de Programas IICA, no. 38)
- CRIVISQUI, E. M. 1993. Análisis factorial de correspondencias; un instrumento de investigación en ciencias sociales. Asunción, Par., Universidad Católica de Asunción. 302p.
- DELLAGIUSTINA, A. 2000. Determinação das concentrações de nitrogênio e fósforo dissolvidos em diferentes locais do rio Itajaí-açu. Blumenau, Br. Dissertação Mestre em Engenharia Ambiental. Blumenau, Universidade Regional de Blumenau. 69p
- DONOSO, G.; CANCINO, J.; MAGRI, A. 1999. Effects of agricultural activities on water pollution with nitrates and pesticides in the Central Valley of Chile. In: Water Science and Technology, 1999, Vol 39(3): p49-60.
- EPAGRI. 1998. Inventário das terras em microbacias hidrográficas (Versão preliminar). Florianópolis, SC-Brasil, 62P.
- JOLLY, I.; CAITCHEON, G.; DONELLY, T.; HAFNER, S. 1996. Physical and chemical indicators of water quality. In: WALKER, J.; REUTER, D. J. Indicators of catchment health: a technical perspective, CSIRO, Melbourne, Australia. P131-141.
- KIELY, G. 1999. Ingeniería Ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Madrid, España, McGRAW-HILL. 1331P.
- KRIEGER M., L. F. 1997. Proposta metodológica de avaliação do desenvolvimento econômico na região do Vale do Itajaí (SC) através de indicadores ambientais. Revista Dynamis, vol 5(19):59-67p. Blumenau, Br.
- MARZALL, K.; ALMEIDA, J. 2000. Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas. Estado da arte, limites e potencialidades de uma nova ferramenta para avaliar o desenvolvimento sustentável. Brasília, Br., Cadernos de Ciencia & Tecnología, 17 (1): 41-59p.
- MERTEN, G. H.; MINELA, J. P. 2002. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. In: Agroecología e desenvolvimento rural sustentável. Porto Alegre, 3(4): 33-38p.
- PINHEIRO, A. 2001. Avaliação e monitoramento da qualidade das águas. Blumenau, SC-Brasil, IPA/FURB, s/p.
- RITCHEY, J. F.; GERALD, L. B.; LEVI, R. 2000. SPSS student version 9.0: The computer applications for the statistical imagination, McGraw-Hill, CD-ROM.
- SILVA, D. D. 2000. Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Brasília, Br, UFV/ABRH, 659p.
- WALKER, J.; REUTER, D. J. 1996. Key Indicators to assess farm and catchment health. In: WALKER, J.; REUTER, D. J. Indicators of catchment health: a technical perspective. CSIRO, Melbourne, Australia. p21-33.
- WEBER, F. 1990. Preliminary indicators for monitoring changes in the natural resource base. Washington, D.C. AID Program Design Evaluation Methodology no. 14.