

APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD WSI EN LA CUENCA LERMA-CHAPALA

• Margarita Preciado-Jiménez •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Javier Aparicio* •
Consultor

*Autor de correspondencia

• Alberto Güitrón-de-los-Reyes • Jorge Arturo Hidalgo-Toledo •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Los indicadores ambientales para medir la sustentabilidad se usan a partir de la década de los años setenta, cuando la defensa del medio ambiente se convirtió en uno de los temas más importantes de las campañas y agendas políticas en varios países. Se hace necesario, por lo tanto, contar con herramientas que permitan cuantificar de forma apropiada este concepto de sustentabilidad asociado con la gestión de recursos hídricos en zonas áridas. Parte de estas herramientas son dichos indicadores, cuyo propósito es representar, de manera cuantitativa, una serie de atributos que caracterizan el sistema analizado y que, contrastados con una escala de referencia, permiten establecer, por un lado, en qué estado se encuentra el sistema respecto a la condición de referencia, y por otro, cómo ha sido su evolución y cuál es su estado potencial futuro. La problemática ambiental que actualmente se presenta en la cuenca Lerma-Chapala es el resultado de la interacción entre los actores políticos, económicos y sociales, y su entorno. Las prácticas agrícolas y pecuarias intensivas ocasionan una gran degradación de los ecosistemas naturales; el uso urbano de la tierra también ejerce un fuerte impacto en el equilibrio ecológico, el cual se ha visto degradado en décadas recientes debido a la acción antropogénica. En este trabajo se lleva a cabo un análisis desde un enfoque sistémico de jerarquización, en el cual se utiliza la metodología llamada Índice de Sustentabilidad de Cuencas (WSI).

Palabras clave: sustentabilidad ambiental, indicadores, cuenca Lerma-Chapala, esquema presión-estado-respuesta.

Introducción

La historia de los indicadores ambientales para medir la sustentabilidad inicia en la década de los años setenta, cuando la defensa del medio ambiente se convirtió en uno de los temas más importantes de las campañas y agendas políticas en distintos países. Fue precisamente en junio de 1972, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, celebrada en Estocolmo, Suecia, cuando creció la convicción de que se estaba atravesando por una crisis ambiental en el

mundo. El índice de sustentabilidad de cuencas identifica políticas para preservar o mejorar la gestión del agua en las cuencas (Sandoval-Solís *et al.*, 2011). Con este índice es posible evaluar y comparar políticas de manejo del agua en las cuencas en función de su sustentabilidad (Sandoval-Solís *et al.*, 2011).

En el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (PHI), a través de su Programa de Hidrología, Ambiente, Vida y Políticas (HELP) (UNESCO, 2005), se contempla establecer una red mundial de cuencas para mejorar los enlaces entre hidrología y las

necesidades de la sociedad. En este contexto, HELP inició la búsqueda de un índice que estuviera más acorde con su estrategia de desarrollo. Con este propósito optó por el Índice de Sustentabilidad de Cuencas (WSI), desarrollado por los doctores Henrique Chaves y Susana Allipaz en el año 2007, en donde consideran para su formulación los factores de hidrología, medio ambiente, vida y política, con el fin de establecer una dimensión integral, que refleje el estado en el cual se encuentra la gestión de una cuenca en análisis. El presente trabajo muestra como una herramienta útil para estos propósitos el denominado Índice de Sustentabilidad de Cuencas (Chaves y Allipaz, 2007), el cual es concebido como una herramienta capaz de integrar información base, de relativo fácil acceso, cuyo fin es apoyar a los tomadores de decisiones en la gestión integrada de los recursos hídricos en el nivel de cuenca.

Sandoval-Solís *et al.* (2011) aplicaron esta metodología para la cuenca transfronteriza del Río Grande y concluyeron que el índice hace más sencilla la evaluación, comparación e identificación de políticas adaptativas que mejoran la gestión del agua cuando existen variaciones entre diferentes criterios. Asimismo, indican que esta metodología promueve una evaluación política de la gestión del agua debido a que incorpora criterios a la medida en la estructura del índice y usa diferentes estructuras con el mismo criterio. En su aplicación a la cuenca del Río Grande se observa en todos los casos analizados que el índice de sustentabilidad decrece rápidamente a medida que la demanda de agua rebasa el 70% de la demanda establecida.

Metodología

Descripción del WSI

El Índice de Sustentabilidad de Cuencas, en adelante *WSI*, por sus siglas en inglés (Watershed Sustainability Index), es un

indicador que estima la sustentabilidad socioeconómica de una cuenca mediante el promedio aritmético de cuatro indicadores, conforme a la siguiente ecuación (Chaves y Allipaz, 2007):

$$WSI = (H + AM + VI + PO) / 4$$

Donde *H* es el indicador de hidrología (0-1); *AM*, el indicador de medio ambiente (0-1); *VI*, el indicador de vida humana (0-1), y *PO* es el indicador de políticas públicas (0-1).

Cada uno de los cuatro indicadores del WSI está integrado a su vez por un conjunto de parámetros en tres niveles relativos que Chaves y Allipaz (2007) describen en su metodología y que forman parte del Modelo PER (Presión-Estado-Respuesta), propuesto por Environment Canada y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1998). Los parámetros presentan cierta especificidad, por ejemplo, al utilizar como medida de calidad la conductividad eléctrica del agua, tal como es propuesto originalmente por Chaves y Allipaz (2007). Cada uno de los parámetros presentes en la matriz indicadores-parámetros es clasificada en niveles, a los que se asocian puntajes entre 0 y 1, siendo el WSI el promedio global de las líneas y columnas. El WSI da el mismo peso a los cuatro parámetros de la ecuación.

El Modelo de Presión-Estado-Respuesta (PER) fue desarrollado por la OCDE para estructurar su trabajo sobre políticas ambientales (Semarnat, 1997). Considera que las actividades humanas ejercen presión sobre el ambiente y los recursos naturales (Presión), afectando su calidad y cantidad, respectivamente (Estado); la sociedad responde a estos cambios a través de políticas ambientales sectoriales y económicas generales, y a través de cambios en su comportamiento y conciencia hacia el medio ambiente (Respuesta de la sociedad). Los niveles mencionados en el esquema PER se definen como sigue (Chaves y Allipaz, 2007):

- **Presión:** los indicadores de presión son aquellos que describen los impactos que provocan las actividades humanas sobre el medio ambiente, ya sea de forma directa (por ejemplo, emisiones de gases de efecto invernadero o consumo de recursos naturales) o indirecta (como presiones sobre la biodiversidad ejercidas por la construcción de carreteras), y sirven para describir cómo ciertas acciones antropogénicas afectan la calidad y cantidad de recursos naturales.
- **Estado:** los indicadores de estado muestran la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales (flora, fauna, suelo, aire y agua). Estos indicadores dan una visión global de la situación del medio ambiente y de su evolución, pero no de la presión que se ejerce sobre él.
- **Respuesta:** los indicadores de respuesta expresan en qué medida la sociedad (instituciones, administraciones, colectivos, sectores económicos, etc.) responde a los cambios ambientales y su preocupación por ellos. Esta información provoca que se adopten políticas y se implementen proyectos para prevenir o reducir los impac-

tos negativos. Se entiende por respuesta de la sociedad a las acciones individuales o colectivas que tienen como propósito evitar, atenuar o corregir las repercusiones negativas para el medio ambiente, como consecuencia de la actividad humana. Las respuestas generarán nuevas presiones, formando otra vez un ciclo.

El WSI, utilizado como una herramienta de diagnóstico, provee información necesaria para medir y mejorar la gestión integrada de los recursos hídricos y el desarrollo sustentable. En el cuadro 1 se presenta la descripción de cada uno de los indicadores y parámetros del WSI para los tres niveles a evaluar (Chaves y Allipaz, 2007).

El valor final del WSI surge, por tanto, de la ponderación que se haga de cada uno de los atributos señalados en el cuadro 1. Una vez obtenido este valor, se contrasta respecto a la escala de referencia mostrada en el cuadro 2, que indica el grado de sustentabilidad que presenta la cuenca analizada. Para su correcta utilización, Chaves y Allipaz (2007) recomiendan que el WSI sea calculado en intervalos de cada cinco años, lo cual surge

Cuadro 1. Descripción de los indicadores de la ecuación WSI para el esquema PER.

Índice	Presión	Estado	Respuesta
Hidrología	Variación de la disponibilidad de agua per cápita en el periodo	Disponibilidad per cápita de agua en la cuenca	Evolución en la eficiencia del uso del agua en el periodo
	Variación de la conductividad hidráulica del agua en el periodo de análisis, con relación al promedio	DBO de la cuenca (promedio a largo plazo)	Evolución en el tratamiento / disposición de aguas servidas en el periodo
Ambiente	índice de presión antropogénica de la cuenca en el periodo	% de la cuenca con vegetación natural	Evolución en áreas protegidas en la cuenca
Vida	Variación del Índice de Desarrollo Humano (IDH)- Ingreso de la cuenca en el periodo	IDH de la cuenca en el periodo anterior (ponderado)	Evolución del IDH de la cuenca en el periodo
Políticas	Variación del Índice de Desarrollo-Educación de la cuenca en el periodo	Capacidad legal e institucional en la cuenca en el periodo	Evolución en la inversión monetaria en el manejo integrado de los recursos de agua en la cuenca en el periodo

Cuadro 2. Valores finales de la ecuación WSI para el esquema PER (Chaves y Allipaz, 2007).

Baja	Intermedia	Alta
WSI < 0.5	0.5 < WSI < 0.8	WSI > 0.8

de un compromiso entre disponibilidad de información y la posibilidad de evaluar el efecto de políticas aplicadas en el rango habitual de gestión de los gobiernos, tasas de cambio de la tecnología, variabilidad climática, etcétera. La sobrestimación de un parámetro o indicador es compensada por la subestimación de otro, dando robustez al índice.

Método de cálculo de los valores PER para cada una de las subcuencas que integran la cuenca Lerma-Chapala

En los cuadros 3, 4 y 5 se presentan los rangos o niveles, y los puntajes para cada uno de los parámetros del WSI relativos a la Presión, el Estado y la Respuesta, respectivamente. Estos valores fueron tomados de Chaves y Allipaz (2007). El rango indica los límites que puede tomar cada parámetro, el nivel describe de forma cualitativa el parámetro correspondiente, y el puntaje es el peso que se le asigna al parámetro en el cálculo del índice y que permitirá obtener valores promedio para cada uno de los índices bajo el esquema PER.

Cuadro 3. Parámetros, rango y puntaje de la presión.

Índice	Presión		
	Parámetros	Rango	Puntaje
Hidrología: cantidad de agua	$\Delta 1$. Variación de la disponibilidad de agua en el periodo estudiado con respecto al promedio histórico (m^3 /año).	$\Delta 1 \leq -20\%$	0
		$-20\% < \Delta 1 < -10\%$	0.25
		$-10\% < \Delta 1 < 0\%$	0.5
		$0\% < \Delta 1 < 10\%$	0.75
		$\Delta 1 < 20\%$	1
Hidrología: calidad de agua	$\Delta 2$. Variación de la DBO_5 en la cuenca, en el periodo estudiado, en relación con el promedio histórico.	$\Delta 2 \leq -20\%$	0
		$-20\% < \Delta 2 < -10\%$	0.25
		$-10\% < \Delta 2 < 0\%$	0.5
		$0\% < \Delta 2 < 10\%$	0.75
		$\Delta 2 < 20\%$	1
AM (ambiente)	EPI (índice de presión antropogénica). Describe la presión ejercida por el ambiente por las actividades humanas de la cuenca en un periodo.	$EPI > 20\%$	0
		$20\% > EPI > 10\%$	0.25
		$10\% > EPI > 5\%$	0.5
		$5\% > EPI > 0\%$	0.75
		$EPI > 0\%$	1
VI (vida)	Variación en el IDH ingreso per cápita en la cuenca en el periodo estudiado.	$\Delta \leq -20\%$	0
		$-20\% < \Delta < -10\%$	0.25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0.5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0.75
		$\Delta < 10\%$	1
PO (políticas)	Variación del IDH-Educación en el periodo.	$\Delta \leq -20\%$	0
		$-20\% < \Delta < -10\%$	0.25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0.5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0.75
		$\Delta < 10\%$	1

Cuadro 4. Parámetros, rango y puntaje del estado.

Índice	Estado		
	Parámetros	Rango	Puntaje
Hidrología: cantidad de agua	Wa. Disponibilidad de caudal promedio histórico en la cuenca (superficial + subterránea), en relación con la población existente en ella (m ³ /persona-año).	Wa < 700	0
		1 700 < Wa < 3 400	0.25
		3 400 < Wa < 5 100	0.5
		5 100 < Wa < 6 800	0.75
		Wa < 6 800	1
Hidrología: calidad de agua	DBO ₅ . Promedio de la DBO (%) en la cuenca (largo plazo) en mg/l.	DBO > 10	0
		10 > DBO > 5	0.25
		5 > DBO > 3	0.5
		3 > DBO > 1	0.75
		DBO > 1	1
AM (ambiente)	% de la vegetación natural remanente en la cuenca (Av).	Av < 5	0
		5 < Av < 10	0.25
		10 < Av < 25	0.5
		25 < Av < 40	0.75
		Av < 40	1
VI (vida)	IDH ponderado de cuenca en el periodo anterior (ponderado).	IDH < 0.5	0
		0.5 < IDH < 0.6	0.25
		0.6 < IDH < 0.75	0.5
		0.75 < IDH < 0.90	0.75
		IDH < 0.90	1
PO (políticas)	Capacidad legal e institucional en el manejo de los recursos hídricos de la cuenca (existe marco legal, marco institucional y/o manejo de la participación).	Muy pobre	0
		Pobre	0.25
		Regular	0.5
		Buena	0.75
		Excelente	1

El valor final del WSI se calcula con base en los atributos señalados en cada uno de los cuadros presentados previamente. Una vez obtenido este valor, será contrastado respecto a una escala de referencia que indica el grado de sustentabilidad que presenta la cuenca analizada.

En el presente análisis se aplica el Índice de Sustentabilidad de Cuencas (WSI) a la cuenca Lerma-Chapala. El índice tiene un valor entre 0 y 1, y se integra por indicadores de los componentes hidrología, ambiente, vida y políticas públicas. En cada uno de los indicadores se determinan los parámetros del modelo Presión- Estado-Respuesta (PER), que incorpora las relaciones causa-efecto y permite

en la toma de decisiones ver la interconexión entre los parámetros analizados.

El método indica que el periodo de datos se divida en dos: uno, llamado histórico o de largo plazo, que debe ser de al menos 10 años, y otro, llamado de análisis, que debe ser de cinco años y estar incluido en el primero. En este caso, el periodo de análisis será de 2000 a 2005, y el histórico de 1990 a 2005.

El WSI, utilizado como una herramienta de diagnóstico, provee información necesaria para medir y mejorar la gestión integral de los recursos hídricos y el desarrollo sustentable, aunque se requiere trabajar sobre la medición de indicadores que no se encuentran disponibles en el nivel de cuenca, lo que aporta

Cuadro 5. Parámetros, nivel y puntaje de la respuesta.

Índice	Respuesta		
	Parámetros	Nivel	Puntaje
Hidrología: cantidad de agua	Acciones o mejoras en el manejo del recurso hídrico en la cuenca del periodo estudiado con respecto al histórico.	Muy pobre	0
		Pobre	0.25
		Regular	0.5
		Buena	0.75
		Excelente	1
Hidrología: calidad de agua	Evolución en el tratamiento y la disposición de aguas servidas en la cuenca en los últimos cinco años.	Muy pobre	0
		Pobre	0.25
		Regular	0.5
		Buena	0.75
		Excelente	1
AM (ambiente)	Evolución en las áreas protegidas (áreas de reservas) en la cuenca, en el periodo.	Muy pobre	0
		Pobre	0.25
		Regular	0.5
		Buena	0.75
		Excelente	1
VI (vida)	Variación del IDH en la cuenca, en el periodo (ponderado).	Muy pobre	0
		Pobre	0.25
		Regular	0.5
		Buena	0.75
		Excelente	1
PO (políticas)	Evolución en la inversión monetaria en el manejo integrado de los recursos de agua (durante el periodo anterior <i>versus</i> actual) en la cuenca.	Muy pobre	0
		Pobre	0.25
		Regular	0.5
		Buena	0.75
		Excelente	1

sesgos que necesitan ser considerados. En la actualidad no existen antecedentes de la aplicación de este índice en la cuenca del río Lerma, por lo que la información requerida no está disponible en su totalidad, lo que sugiere que se ajusten los resultados a estimaciones pertinentes y con sentido lógico de acuerdo con las circunstancias prevalecientes en la cuenca.

Delimitación, alcance o cobertura

El WSI es aplicable en cuencas de hasta 2 500 km², condición que se cumple para este caso, ya que se llevó a cabo la aplicación de

la metodología por subcuenca. Debido a que esta propuesta evalúa la viabilidad de aplicar indicadores ya existentes, no se han confeccionado los protocolos de cada uno, aunque en algunos casos se han realizado ajustes para adaptar los mismos a la situación de cada subcuenca. Sólo se utilizó la información disponible al momento de iniciar el análisis.

Restricciones o limitaciones

- Los datos de población utilizados para el cálculo de este subíndice corresponden a la población asentada en las comunidades

dentro de cada una de las 19 subcuencas; como fuentes de información se emplearon las bases de datos de INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) y Conapo (Consejo Nacional de Población).

- b) El análisis del subíndice de vida y política de la cuenca estudiada fue calculado utilizando las cifras del Índice de Desarrollo Humano (IDH) del periodo 2000-2005, publicado por la Conapo en el ámbito municipal.
- c) El parámetro de estado del indicador políticas no tiene una metodología detallada, ya que es de carácter cualitativo. Para disminuir la subjetividad, se utilizó una metodología implementada por Chaves para su construcción (Chaves y Allipaz, 2007).

Presentación y análisis de los resultados

a) Hidrología-cantidad de agua (H1)

- **Presión:** utiliza el parámetro de variación de la disponibilidad de agua por persona, en el periodo estudiado (2000-2005), en relación con el registro de agua disponible a largo plazo o histórico (1960-2004). El valor promedio de la presión es de 0.52 para la cuenca. En el cuadro 6 se muestran los valores de los caudales medio histórico y medio para cada una de las 19 subcuencas que integran la cuenca.
- **Estado:** el estado del recurso se calcula utilizando el escurrimiento por cuenca propia para el 2005 entre la población total para el año de estudio 2005 (cuadro 7). De esta manera se estima la disponibilidad per

Cuadro 6. Caudales medio históricos y caudales medios para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Caudal medio histórico, m ³ /s (1990-2005)	Caudal medio, m ³ /s (2000-2005)
Río Lerma 1	209.19	258.99
Río La Gavia	102.41	132.94
Río Jaltepec	92.71	84.70
Río Lerma 2	393.49	460.88
Río Lerma 3	467.39	467.14
Río La Laja 1	275.01	237.72
Río Querétaro	106.24	135.26
Río La Laja 2	84.09	42.79
Laguna de Yuriria	193.15	179.68
Río Lerma 4	102.62	133.19
Río Turbio	195.41	174.77
Río Angulo	379.57	306.14
Río Lerma 5	286.89	488.91
Río Lerma 6	324.76	159.25
Río Duero	502.77	500.86
Río Zula	208.40	207.97
Río Lerma 7	818.37	707.36
Lago de Pátzcuaro	79.53	70.61
Lago de Cuitzeo	485.26	484.51
Caudal promedio	279.32	275.45

Cuadro 7. Población total al 2005 para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Población total 2005 (habitantes)	Nombre oficial	Población total 2005 (habitantes)
Río Lerma 1	1 771 334	Río Turbio	1 452 804
Río La Gavia	129 677	Río Angulo	141 886
Río Jaltepec	80 559	Río Lerma 5	1 230 330
Río Lerma 2	543 608	Río Lerma 6	199 596
Río Lerma 3	250 848	Río Duero	411 594
Río La Laja 1	526 142	Río Zula	241 905
Río Querétaro	980 994	Río Lerma 7	531 734
Río La Laja 2	787 859	Lago de Pátzcuaro	124 003
Laguna de Yuriria	197 711	Lago de Cuitzeo	934 154
Río Lerma 4	521 551	Total	11 058 289

Cuadro 8. Evolución en la eficiencia del uso del agua para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Promedio de AP_1990	Promedio de AP_1995	Promedio de AP_2000	Promedio de AP_2005	Promedio incremental	Evolución de la eficiencia
Río Lerma 1	83.6%	89.5%	92.9%	94.0%	3.82%	Muy pobre
Río La Gavia	50.6%	61.4%	70.3%	76.1%	13.29%	Regular
Río Jaltepec	53.6%	65.5%	69.9%	64.1%	5.92%	Pobre
Río Lerma 2	59.1%	72.6%	81.3%	88.2%	12.55%	Regular
Río Lerma 3	59.7%	73.6%	81.9%	83.8%	10.86%	Regular
Río La Laja 1	66.1%	78.8%	85.5%	89.6%	9.45%	Pobre
Río Querétaro	67.7%	78.4%	87.8%	92.7%	10.57%	Regular
Río La Laja 2	78.4%	87.8%	90.5%	94.0%	5.20%	Pobre
Laguna de Yuriria	79.9%	86.8%	95.3%	97.8%	7.36%	Pobre
Río Lerma 4	81.6%	90.5%	93.1%	95.8%	4.63%	Muy pobre
Río Turbio	71.9%	79.0%	87.1%	91.0%	8.30%	Pobre
Río Angulo	80.0%	86.6%	92.0%	95.0%	5.79%	Pobre
Río Lerma 5	78.3%	86.8%	92.0%	94.6%	6.11%	Pobre
Río Lerma 6	74.1%	85.4%	93.9%	96.5%	8.83%	Pobre
Río Duero	81.2%	88.3%	91.1%	93.9%	4.37%	Muy pobre
Río Zula	78.6%	85.8%	88.9%	84.2%	2.58%	Muy pobre
Río Lerma 7	81.3%	90.7%	93.9%	95.0%	4.68%	Muy pobre
Lago de Pátzcuaro	77.3%	86.0%	90.8%	90.3%	5.16%	Pobre
Lago de Cuitzeo	78.6%	87.4%	92.4%	92.3%	5.34%	Pobre

cápita de agua en la cuenca, obteniéndose el valor promedio de 0.02 para toda la cuenca.

- **Respuesta:** se calculó considerando la evolución en la eficiencia del uso del agua en el periodo histórico. El dato utilizado

para el cálculo de este parámetro fue la recopilación de la eficiencia de los sistemas de agua potable integrados para cada subcuenca y su evolución en el periodo de 1990 a 2005 (cuadro 8). El valor obtenido promedio para la cuenca fue de 0.24.

En el cuadro 9 se muestra un resumen de los valores calculados para los parámetros presión, estado y respuesta para el indicador de hidrología cantidad.

b) Hidrología-calidad de agua (H2)

- **Presión:** se utilizó el parámetro de la variación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5 , en mg/l) como subindicador de calidad de agua, en el periodo estudiado (años 2000-2005), en relación con el registro promedio de DBO_5 a largo plazo o histórico (1990-2005), que, según Chaves y Allipaz (2007), debe ser de un mínimo de diez años (cuadro 10).
- **Estado:** es el promedio del DBO de cada una de las subcuencas a largo plazo (1990-2005).

- **Respuesta:** es la evolución en el tratamiento y la disposición de aguas servidas en el periodo (cuadro 11).

En el cuadro 12 se muestra un resumen de los valores calculados para los parámetros presión, estado y respuesta, para el indicador hidrología calidad.

c) Ambiente (AM)

Describe la presión ejercida por el ambiente por las actividades humanas de la cuenca en un periodo. Este parámetro involucra dos variables: áreas agropecuarias y áreas pobladas. Está definido por el Índice de Presión Antrópica (EPI) de la cuenca en el periodo 2000-2005.

Cuadro 9. Resumen de los valores calculados para los parámetros presión, estado y respuesta, para el indicador de hidrología cantidad de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Presión		Estado		Respuesta		Hidrología Cantidad WSI
	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor	
Río Lerma 1	19.23%	1	118.10	0	Muy pobre	0	0.33
Río La Gavia	22.96%	1	789.73	0	Regular	0.5	0.50
Río Jaltepec	-9.45%	0.5	1 150.80	0	Pobre	0.25	0.25
Río Lerma 2	14.62%	1	723.85	0	Regular	0.5	0.50
Río Lerma 3	-0.05%	0.5	1 863.24	0.25	Regular	0.5	0.42
Río La Laja 1	-15.69%	0.25	522.69	0	Pobre	0.25	0.17
Río Querétaro	21.46%	1	108.30	0	Regular	0.5	0.50
Río La Laja 2	-96.54%	0	106.73	0	Pobre	0.25	0.08
Laguna de Yuriria	-7.50%	0.5	976.94	0	Pobre	0.25	0.25
Río Lerma 4	22.95%	1	196.76	0	Muy pobre	0	0.33
Río Turbio	-11.82%	0.25	134.51	0	Pobre	0.25	0.17
Río Angulo	-23.99%	0	2 675.17	0.25	Pobre	0.25	0.17
Río Lerma 5	41.32%	1	233.18	0	Pobre	0.25	0.42
Río Lerma 6	-103.93%	0	1 627.08	0	Pobre	0.25	0.08
Río Duero	-0.38%	0.5	1 221.53	0	Muy pobre	0	0.17
Río Zula	-0.21%	0.5	861.51	0	Muy pobre	0	0.17
Río Lerma 7	-15.69%	0.25	1 539.06	0	Muy pobre	0	0.08
Lago de Pátzcuaro	-12.63%	0.25	641.35	0	Pobre	0.25	0.17
Lago de Cuitzeo	-0.15%	0.5	519.46	0	Pobre	0.25	0.25

Cuadro 10. Valores promedios de DBO para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Promedio 1990-2005	Promedio 2000-2005	Variación DBO
Río Lerma 1	85.71	91.45	7%
Río La Gavia	85.00	85.00	0%
Río Jaltepec	85.00	85.00	0%
Río Lerma 2	52.90	50.08	-5%
Río Lerma 3	10.09	10.30	2%
Río La Laja 1	0.00	0.00	0%
Río Querétaro	299.61	265.63	-11%
Río La Laja 2	8.30	4.98	-40%
Laguna de Yuriria	0.00	0.00	0%
Río Lerma 4	0.57	0.34	-40%
Río Turbio	133.25	79.95	-40%
Río Angulo	4.02	3.91	-3%
Río Lerma 5	2.32	1.39	-40%
Río Lerma 6	9.52	12.11	27%
Río Duero	80.00	80.00	0%
Río Zula	9.07	7.38	-19%
Río Lerma 7	13.67	11.30	-17%
Lago de Pátzcuaro	70.31	56.53	-20%
Lago de Cuitzeo	28.56	30.12	5%

Cuadro 11. Evolución en el tratamiento de aguas residuales para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Núm. de plantas (2000)	Núm. de plantas de tratamiento (2005)	Variación	Evolución tratamiento
Río Lerma 1	17	13	-23.53%	Muy pobre
Río La Gavia	2	2	0.00%	Pobre
Río Jaltepec	-	-	0.00%	Muy pobre
Río Lerma 2	7	8	14.29%	Regular
Río Lerma 3	2	2	0.00%	Pobre
Río La Laja 1	9	9	0.00%	Pobre
Río Querétaro	32	33	3.13%	Regular
Río La Laja 2	10	8	-20.00%	Muy pobre
Laguna de Yuriria	1	2	100.00%	Excelente
Río Lerma 4	5	5	0.00%	Pobre
Río Turbio	9	12	33.33%	Buena
Río Angulo	1	1	0.00%	Pobre
Río Lerma 5	10	13	30.00%	Buena
Río Lerma 6	2	2	0.00%	Pobre
Río Duero	3	2	-33.33%	Muy pobre
Río Zula	7	7	0.00%	Pobre
Río Lerma 7	26	20	-23.08%	Muy pobre
Lago de Pátzcuaro	7	7	0.00%	Pobre
Lago de Cuitzeo	5	4	-20.00%	Muy pobre

Cuadro 12. Resumen de los valores calculados para los parámetros presión, estado y respuesta, para el indicador hidrología calidad para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre de la cuenca	Presión		Estado		Respuesta		Hidrología Calidad WSI
	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor	
Río Lerma 1	6.69%	0.5	91.13	0	Muy pobre	0	0.17
Río La Gavia	0.00%	0.75	0.00	1	Pobre	0.25	0.67
Río Jaltepec	0.00%	0.75	0.00	1	Muy pobre	0	0.58
Río Lerma 2	-5.32%	0.75	45.02	0	Regular	0.5	0.42
Río Lerma 3	2.12%	0.5	9.52	0.25	Pobre	0.25	0.33
Río La Laja 1	0.00%	0.75	0.00	1	Pobre	0.25	0.67
Río Querétaro	-11.34%	1	10 207.13	0	Regular	0.5	0.50
Río La Laja 2	-40.00%	1	2.08	0.75	Muy pobre	0	0.58
Laguna de Yuriria	0.00%	0.75	0.00	1	Excelente	1	0.92
Río Lerma 4	-40.00%	1	0.20	1	Pobre	0.25	0.75
Río Turbio	-40.00%	1	38.07	0	Buena	0.75	0.58
Río Angulo	-2.66%	0.75	5.14	0.25	Pobre	0.25	0.42
Río Lerma 5	-40.00%	1	0.99	1	Buena	0.75	0.92
Río Lerma 6	27.16%	0	15.83	0	Pobre	0.25	0.08
Río Duero	0.00%	0.75	0.00	1	Muy pobre	0	0.58
Río Zula	-18.56%	1	13.04	0	Pobre	0.25	0.42
Río Lerma 7	-17.34%	1	4.56	0.5	Muy pobre	0	0.50
Lago de Pátzcuaro	-19.60%	1	15.19	0	Pobre	0.25	0.42
Lago de Cuitzeo	5.49%	0.5	37.39	0	Muy pobre	0	0.17

Cuadro 13. Áreas agrícolas y urbanas en km², periodo 2000-2005, para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre de la cuenca	Áreas agropecuarias (2000)	Áreas agropecuarias (2005)	Áreas pobladas (2000)	Áreas pobladas (2005)
Río Lerma 1	1 492.42	1 512.37	131.23	131.23
Río La Gavia	407.70	494.10	0.00	0.00
Río Jaltepec	317.93	318.53	0.00	0.00
Río Lerma 2	1 678.42	2 133.48	14.88	14.88
Río Lerma 3	2 163.04	2 173.29	30.96	30.96
Río La Laja 1	3 495.60	3 495.60	38.80	38.80
Río Querétaro	1 423.40	1 506.77	146.57	146.57
Río La Laja 2	1 941.63	1 941.63	79.35	79.35
Laguna de Yuriria	778.41	778.41	23.57	23.57
Río Lerma 4	1 848.99	1 848.99	51.99	51.99
Río Turbio	1 666.58	1 666.58	155.76	155.76
Río Angulo	1 181.17	1 181.17	23.43	23.43
Río Lerma 5	5 026.23	5 026.23	139.92	139.92
Río Lerma 6	1 533.80	1 533.80	23.55	23.55
Río Duero	1 135.58	1 422.16	68.76	68.76
Río Zula	1 634.45	1 634.45	21.81	21.81
Río Lerma 7	3 556.52	3 578.43	99.07	99.07
Lago de Pátzcuaro	382.73	406.15	24.65	24.65
Lago de Cuitzeo	1 871.50	1 874.30	180.15	180.15

El EPI se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{EPI} = \frac{\% \text{ var. áreas agropecuarias} + \% \text{ var. áreas pobladas}}{2}$$

Presión: se calcula con el valor del EPI de la cuenca en el periodo 2000-2005. En el cuadro 13 se muestra el valor en km² de las áreas agropecuarias y de las áreas urbanas en el lapso 2000-2005.

Estado: se calcula cuantificando el porcentaje de la cuenca con vegetación natural en el periodo 2000-2005. En el cuadro 14 se muestran las superficies en km² de cada una de las 19 subcuencas, así como sus áreas vegetales para los años 2000 y 2005.

Respuesta: evolución en áreas protegidas en la cuenca en el periodo de estudio 2000-2005. Se obtuvo de Conabio (2006) (cuadro 15).

Cuadro 14. Superficie en km² y la evolución de sus áreas vegetales para los años 2000 y 2005 de cada una de las 10 subcuencas.

Nombre oficial	Superficie km ² (DOF)	Área vegetal, km ² (2000)	Área vegetal, km ² (2005)
Río Lerma 1	2 137.0	422.2	422.2
Río La Gavia	505.0	22.9	22.9
Río Jaltepec	378.0	38.1	38.1
Río Lerma 2	2 623.0	388.1	388.1
Río Lerma 3	2 895.0	704.4	704.4
Río La Laja 1	4 981.0	3 288.7	3 288.7
Río Querétaro	2 255.0	682.4	686.1
Río La Laja 2	2 415.0	574.8	574.8
Laguna de Yuriria	1 093.0	354.9	354.9
Río Lerma 4	2 751.0	544.9	544.9
Río Turbio	2 913.0	1 585.1	1 585.1
Río Angulo	2 064.0	813.0	813.0
Río Lerma 5	7 147.0	1 635.3	1 635.3
Río Lerma 6	2 023.0	465.2	465.2
Río Duero	2 198.0	1 307.4	1 307.4
Río Zula	2 098.0	451.1	451.1
Río Lerma 7	6 644.0	1 499.5	1 499.5
Lago de Pátzcuaro	1 096.0	396.5	396.5
Lago de Cuitzeo	3 675.0	1 471.3	1 471.3

Cuadro 15. Representatividad del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre	% Considerado del Sinap	Nombre	% Considerado del Sinap
Río Lerma 1	7.50%	Río Lerma 4	7.50%
Río La Gavia	7.50%	Río Turbio	1.00%
Río Jaltepec	7.50%	Río Angulo	7.50%
Río Lerma 2	7.50%	Río Lerma 5	4.25%
Río Lerma 3	7.50%	Río Lerma 6	4.25%
Río La Laja 1	1.00%	Río Duero	7.50%
Río Querétaro	1.98%	Río Zula	4.25%
Río La Laja 2	4.25%	Río Lerma 7	6.85%
Lago de Cuitzeo	7.50%	Lago de Pátzcuaro	7.50%
Laguna de Yuriria	7.50%		

En el cuadro 16 se muestra un resumen de los valores calculados para los parámetros presión, estado y respuesta para el indicador ambiente.

d) Vida (L)

Emplea como indicador la variación del índice del ingreso per cápita en el periodo de estudio (2000-2005), para los municipios que se encuentran en cada una de las subcuencas.

Presión: para la obtención de este parámetro se usa la variación del IDH-Ingreso de la cuenca en el periodo de estudio (2000-2005) para los municipios que se encuentran en cada una de las subcuencas. En el cuadro 17 se muestra el ingreso per cápita en pesos corrientes del periodo 1990-2005.

Estado: IDH de la cuenca en el periodo 2000-2005. En el cuadro 18 se puede observar la variación del Índice de Desarrollo Humano de 2000 a 2005.

Respuesta: evolución del IDH de las subcuenca en el periodo. En el cuadro 19 se muestra un resumen de los valores asignados a la presión estado respuesta para el parámetro vida.

e) Políticas (P)

Utiliza como parámetro la variación en el Índice de Desarrollo Humano, subindicador de educación (índice de conocimiento), lo que describe la variación entre dos periodos de las potencialidades de las personas para participar activa y conscientemente en el mejoramiento

Cuadro 16. Resumen de los valores calculados para los parámetros presión, estado y respuesta para el indicador ambiente para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Presión		Estado		Respuesta		Ambiente WSI
	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor	
Río Lerma 1	0.67%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42
Río La Gavia	10.60%	0.25	0.00%	0	7.50%	0.50	0.25
Río Jaltepec	0.10%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42
Río Lerma 2	13.56%	0.25	0.00%	0	7.50%	0.50	0.25
Río Lerma 3	0.24%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42
Río La Laja 1	0.00%	1	0.00%	0	1.00%	0.50	0.50
Río Querétaro	2.93%	0.75	0.16%	0	1.98%	0.50	0.42
Río La Laja 2	0.00%	1	0.00%	0	4.25%	0.50	0.50
Laguna de Yuriria	0.00%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42
Río Lerma 4	0.00%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42
Río Turbio	0.00%	0.75	0.00%	0	1.00%	0.50	0.42
Río Angulo	0.00%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42
Río Lerma 5	0.00%	1	0.00%	0	4.25%	0.50	0.50
Río Lerma 6	0.00%	1	0.00%	0	4.25%	0.50	0.50
Río Duero	12.62%	0.25	0.00%	0	7.50%	0.50	0.25
Río Zula	0.00%	1	0.00%	0	4.25%	0.50	0.50
Río Lerma 7	0.31%	0.75	0.00%	0	6.85%	0.50	0.42
Lago de Pátzcuaro	3.06%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42
Lago de Cuitzeo	0.07%	0.75	0.00%	0	7.50%	0.50	0.42

Cuadro 17. Ingreso per cápita en pesos corrientes del periodo 1990 al 2005 para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Ingreso per cápita, pesos corrientes								%
	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Variación 2000-2005
Río Lerma 1	296.14	407.07	407.21	492.54	534.53	572.73	606.05	596.93	0.66
Río La Gavia	3 990.46	5 536.56	5 562.38	10 135.70	10 947.98	11 676.20	12 298.10	12 057.62	1.54
Río Jaltepec	10 437.61	14 238.20	8 953.85	23 220.83	25 576.65	27 793.00	29 816.31	29 760.70	1.22
Río Lerma 2	844.20	1 223.19	1 326.90	2 730.48	2 989.63	3 230.98	3 447.86	3 424.07	2.23
Río Lerma 3	453.20	686.93	799.06	2 626.08	2 914.62	3 230.25	3 611.53	3 515.16	4.79
Río La Laja 1	438.10	580.81	608.15	1 446.22	1 629.71	1 731.23	1 886.47	1 874.56	2.30
Río Querétaro	75.79	140.86	137.61	174.89	192.94	213.11	231.34	223.90	1.31
Lago de Pátzcuaro	845.11	1 480.95	1 616.44	2 392.99	2 642.88	2 916.12	3 247.23	3 148.58	1.83
Laguna de Yuriria	1 331.98	1 375.70	1 618.39	2 503.37	2 859.07	3 077.62	3 397.78	3 419.59	0.88
Río Lerma 4	347.28	554.72	613.50	890.33	1 011.14	1 082.40	1 188.28	1 189.21	1.56
Río Turbio	147.56	224.22	220.25	248.66	273.58	283.90	302.30	293.59	0.69
Río Angulo	786.74	1 161.35	1 412.71	2 793.36	3 109.77	3 457.65	3 878.82	3 788.12	2.55
Río Lerma 5	185.47	243.27	260.07	433.85	486.05	513.30	556.04	549.11	1.34
Río Lerma 6	479.75	875.27	1 004.25	1 915.51	2 126.04	2 357.82	2 639.13	2 572.66	2.99
Río Duero	345.42	443.96	486.99	636.55	701.74	772.92	859.30	831.90	0.84
Río Zula	1 429.67	2 091.70	2 193.13	2 981.44	3 279.79	3 570.55	3 823.82	3 790.89	1.09
Río Lerma 7	651.16	880.72	997.74	1 544.42	1 713.01	1 879.45	2 028.11	2 025.73	1.37
Río La Laja 2	251.26	396.70	406.13	554.05	619.99	654.22	708.19	699.09	1.21
Lago de Cuitzeo	127.73	206.99	214.57	276.00	301.79	329.80	363.87	349.69	1.16

Cuadro 18. Variación del Índice de Desarrollo Humano de 2000 a 2005 para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	IDH 2000	IDH 2001	IDH 2002	IDH 2003	IDH 2004	IDH 2005	% Variación IDH 2000-2005	IDH promedio
Río Lerma 1	0.762	0.795	0.796	0.725	0.798	0.799	4.78%	0.779
Río La Gavia	0.727	0.759	0.761	0.740	0.764	0.746	2.64%	0.750
Río Jaltepec	0.686	0.772	0.774	0.722	0.776	0.690	0.63%	0.737
Río Lerma 2	0.721	0.779	0.780	0.720	0.783	0.735	1.91%	0.753
Río Lerma 3	0.713	0.765	0.768	0.752	0.771	0.734	2.89%	0.751
Río La Laja 1	0.737	0.771	0.775	0.778	0.778	0.764	3.67%	0.767
Río Querétaro	0.747	0.782	0.785	0.788	0.789	0.776	3.94%	0.778
Río La Laja 2	0.761	0.774	0.778	0.781	0.781	0.790	3.80%	0.777
Laguna de Yuriria	0.750	0.760	0.764	0.767	0.767	0.781	4.15%	0.765
Río Lerma 4	0.752	0.765	0.770	0.773	0.773	0.785	4.46%	0.770
Río Turbio	0.755	0.783	0.786	0.788	0.789	0.776	2.82%	0.779
Río Angulo	0.741	0.748	0.752	0.755	0.755	0.766	3.38%	0.753
Río Lerma 5	0.747	0.762	0.767	0.770	0.769	0.774	3.55%	0.765
Río Lerma 6	0.743	0.761	0.765	0.767	0.767	0.766	3.01%	0.762
Río Duero	0.737	0.748	0.752	0.755	0.755	0.764	3.69%	0.752
Río Zula	0.756	0.801	0.803	0.803	0.806	0.779	3.08%	0.791
Río Lerma 7	0.755	0.773	0.776	0.777	0.778	0.779	3.17%	0.773
Lago de Pátzcuaro	0.736	0.748	0.752	0.755	0.755	0.757	2.87%	0.751
Lago de Cuitzeo	0.740	0.752	0.755	0.758	0.758	0.770	4.10%	0.756

Cuadro 19. Resumen de los valores calculados de la presión, estado, respuesta para el parámetro vida para cada una de las 19 subcuencas

Nombre oficial	Presión		Estado		Respuesta		Vida WSI
	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor	
Río Lerma 1	30.80%	1	0.80	0.75	4.78%	0.5	0.75
Río La Gavia	99.76%	1	0.75	0.5	2.64%	0.5	0.67
Río Jaltepec	74.97%	1	0.69	0.5	0.63%	0.5	0.67
Río Lerma 2	154.37%	1	0.74	0.5	1.91%	0.5	0.67
Río Lerma 3	355.72%	1	0.73	0.5	2.89%	0.5	0.67
Río La Laja 1	159.62%	1	0.76	0.75	3.67%	0.5	0.75
Río Querétaro	81.47%	1	0.78	0.75	3.94%	0.5	0.75
Río La Laja 2	122.69%	1	0.79	0.75	3.80%	0.5	0.75
Laguna de Yuriria	47.81%	1	0.78	0.75	4.15%	0.5	0.75
Río Lerma 4	101.63%	1	0.79	0.75	4.46%	0.5	0.75
Río Turbio	32.53%	1	0.78	0.75	2.82%	0.5	0.75
Río Angulo	179.24%	1	0.77	0.75	3.38%	0.5	0.75
Río Lerma 5	83.97%	1	0.77	0.75	3.55%	0.5	0.75
Río Lerma 6	214.01%	1	0.77	0.75	3.01%	0.5	0.75
Río Duero	44.93%	1	0.76	0.75	3.69%	0.5	0.75
Río Zula	64.01%	1	0.78	0.75	3.08%	0.5	0.75
Río Lerma 7	86.53%	1	0.78	0.75	3.17%	0.5	0.75
Lago de Pátzcuaro	73.42%	1	0.76	0.75	2.87%	0.5	0.75
Lago de Cuitzeo	69.94%	1	0.77	0.75	4.10%	0.5	0.75

de su entorno familiar, comunitario, y social, es decir, de convivir en armonía con otras personas y de incrementar la propensión a una vida sana:

$$\Delta = \frac{IC_2 - IC_1}{IC_1} (100)$$

Donde:

IC_1 = índice de conocimiento, periodo anterior.

IC_2 = índice de conocimiento, periodo bajo evaluación.

Δ = porcentaje de cambio.

Presión: variación del IDH-educación de la cuenca en el periodo 2000-2005.

Estado: capacidad legal e institucional en la cuenca en el periodo 2000-2005.

Respuesta: evolución de los gastos en GIRH en la cuenca en el periodo 2000-2005.

Al introducir las variables en la fórmula dio como resultado una variación del + 4.912%, lo que de acuerdo con el cuadro de aplicación del WSI significa que el puntaje es de 0.75, equivalente a un avance excelente en el periodo estudiado. En el cuadro 20 se muestra un resumen de los valores calculados para la presión, estado y respuesta del parámetro políticas.

Resultados

En función de la disponibilidad de datos y otros aspectos logísticos, el periodo de análisis

Cuadro 20. Resumen de los valores calculados para la presión, estado y respuesta del parámetro políticas para cada una de las 19 subcuencas.

Nombre oficial	Presión		Estado		Respuesta		Políticas WSI
	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor	
Río Lerma 1	2.01%	0.75	Media	0.5	14.54%	1	0.75
Río La Gavia	3.66%	0.75	Media	0.5	14.54%	1	0.75
Río Jaltepec	7.02%	0.75	Media	0.5	14.54%	1	0.75
Río Lerma 2	4.37%	0.75	Media	0.5	25.42%	1	0.75
Río Lerma 3	3.47%	0.75	Media	0.5	9.44%	0.75	0.67
Río La Laja 1	3.80%	0.75	Media	0.5	7.78%	0.75	0.67
Río Querétaro	2.01%	0.75	Media	0.5	92.19%	1	0.75
Río La Laja 2	2.99%	0.75	Media	0.5	7.78%	0.75	0.67
Laguna de Yuriria	4.05%	0.75	Media	0.5	7.78%	0.75	0.67
Río Lerma 4	3.41%	0.75	Media	0.5	7.78%	0.75	0.67
Río Turbio	2.83%	0.75	Buena	0.75	10.03%	1	0.83
Río Angulo	2.64%	0.75	Buena	0.75	9.43%	0.75	0.75
Río Lerma 5	3.34%	0.75	Media	0.5	8.02%	0.75	0.67
Río Lerma 6	3.01%	0.75	Buena	0.75	8.89%	0.75	0.75
Río Duero	3.46%	0.75	Buena	0.75	9.43%	0.75	0.75
Río Zula	2.90%	0.75	Buena	0.75	12.29%	1	0.83
Río Lerma 7	3.14%	0.75	Buena	0.75	10.86%	1	0.83
Lago de Pátzcuaro	2.91%	0.75	Buena	0.75	9.43%	0.75	0.75
Lago de Cuitzeo	2.41%	0.75	Buena	0.75	9.43%	0.75	0.75

definido para la aplicación del WSI en las 19 subcuencas que integran la cuenca Lerma-Chapala (figura 1) fue el comprendido entre 2000 y 2005, y para el periodo histórico de 1990 a 2005, lapsos en que se cuenta con datos de la mejor calidad.

El cálculo del WSI fue de 0.61 para toda la cuenca Lerma-Chapala, que la califica con un nivel de sustentabilidad intermedio. En el cuadro 21 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del WSI para las 19 subcuencas. En este cuadro se puede apreciar, por ejemplo, que existen valores bajos para la disponibilidad de agua (hidrología cantidad) en la cuenca, que a su vez está ligada con las tendencias en el crecimiento de la población, sobre todo en las ciudades de Morelia, León, Toluca, Irapuato, Guanajuato y Celaya. Asimismo, debido al decremento en la disponibilidad de agua per cápita en el periodo 2000-2005, en las subcuencas Pericos, Corrales y Chapala, su indicador de sustentabilidad es cero.

Se presentan también valores bajos para el indicador del medio ambiente (E). El aumento en el uso antropogénico del suelo explica el bajo puntaje en este indicador. Las prácticas agropecuarias intensivas ocasionan un alto grado de degradación de los ecosistemas naturales; el uso urbano de la tierra también ejerce un fuerte impacto en el equilibrio ecológico, el cual se ha visto degradado en décadas recientes, como resultado de la intensificación de los procesos de desarrollo económico-urbano (Sotelo, 2005). En los aspectos ambientales se notan carencias en la cuenca en general con respecto al porcentaje con vegetación natural, ya que esta cuenca ha sufrido cambios por el aumento de las zonas urbanas asentadas y la conversión a zonas agrícolas en las subcuencas Duero, Ramírez y Tepuxtepec. El parámetro vida se puede cuantificar como bueno, ya que el índice de desarrollo humano en cada una de las 19 subcuencas se ha mantenido constante,

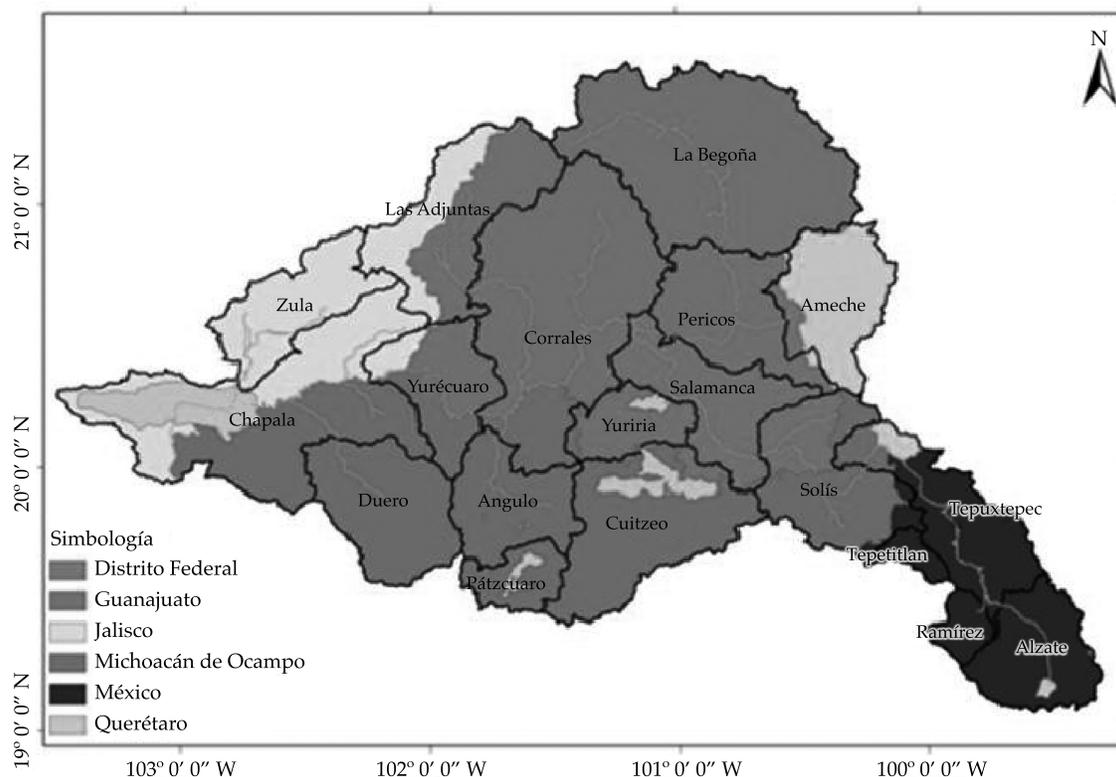


Figura 1. Mapa de las subcuencas Lerma-Chapala y las entidades federativas.

obteniéndose un promedio en cinco años de 0.73.

Con respecto a la parte de políticas en general, las 19 subcuencas han mantenido una buena relación entre el IDH y el nivel de educación, así como la capacidad legal e institucional de los estados que conforman la cuenca y la evolución de los gastos en GIRH en la cuenca, obteniéndose el puntaje más alto con un valor de 0.74.

La combinación más desfavorable bajo el esquema PER la obtuvo la subcuenca Yurécuaro, ya que los valores de los parámetros para la parte hidrológica de calidad y de cantidad tanto en la presión como en el estado resultó de cero. La superficie de la subcuenca Yurécuaro abarca de forma parcial territorio de tres estados, e incluye un total de 18 municipios: cuatro del estado de Guanajuato, ocho de Michoacán y seis de Jalisco. Esta subcuenca se caracteriza por una densidad demográfica

media y una dinámica socioeconómica intensa, que trae consigo una fuerte presión sobre los recursos naturales. El mosaico de actividades económicas que se conjugan en ella la define como una subcuenca predominantemente agrícola, atravesada por un corredor de comercialización, que genera el 47% del valor económico de la subcuenca y articula los flujos económicos de una parte del estado de Querétaro con la región de los altos de Jalisco. Las prácticas agropecuarias intensivas ocasionan un alto grado de degradación de los ecosistemas naturales; el uso urbano de la tierra también ejerce un fuerte impacto en el equilibrio ecológico, el cual se ha visto degradado en décadas recientes, como resultado de la intensificación de los procesos de desarrollo económico-urbano (Sotelo, 2005). El 64% del territorio de esta subcuenca corresponde a suelos agrícolas. Esta actividad se especializa en el cultivo del trigo y del sorgo. Tal tipo de

Cuadro 21. Resultados obtenidos del cálculo del Índice de Sustentabilidad de Cuencas (WSI) para las 19 subcuencas.

Nombre de la cuenca	Presión		Estado		Respuesta		Hidrología		Presión		Estado		Respuesta		Ambiente		Presión		Estado		Respuesta		Vida		Presión		Estado		Respuesta		Políticas				
	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI	val	WSI			
Lago de Cuitzeo	0.5	0.25	0	0.17	0	0.17	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
Lago de Pátzcuaro	0.25	0.17	0	0.42	0	0.42	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Laguna de Yuriria	0.5	0.25	0	0.92	1	0.92	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Río Angulo	0	0.17	0.25	0.42	0.25	0.42	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Río Duero	0.5	0	0	0.58	1	0.58	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Tepetitlán	0.5	0.25	0	0.58	1	0.58	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Ramírez	1	0.5	0	0.67	1	0.67	0	0.5	0.25	1	0.75	0	0.5	0.5	0.25	1	0.75	0.5	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	
Begoña	0.25	0.17	0	0.67	1	0.67	0	0.5	0.25	1	0.75	0	0.5	0.5	0.25	1	0.75	0.5	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	
Pericos	0	0.08	0	0.58	1	0.58	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Alzate	1	0.33	0	0.17	0	0.17	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Tepuxtepec	1	0.5	0	0.42	0	0.42	0	0.5	0.25	1	0.75	0	0.5	0.5	0.25	1	0.75	0.5	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	
Solís	0.5	0.42	0.25	0.33	0.25	0.33	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	
Salamanca	1	0.33	1	0.75	1	0.75	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Corrales	1	0.42	1	0.92	1	0.92	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Yurécuaro	0	0.08	0	0.08	0	0.08	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Chapala	0.25	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Ameche	1	0.5	1	0.5	1	0.5	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Adjuntas	0.25	0.17	1	0.58	1	0.58	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
Río Zula	0.5	0.17	1	0.42	1	0.42	0	0.5	0.42	1	0.75	0	0.5	0.5	0.42	1	0.75	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	

agricultura predomina en la porción oriental de la subcuenca, en municipios como Valle de Santiago, Abasolo, Huanímaro, Puruándiro y José Sixto Verduzco. Los rendimientos de los cultivos de riego van de altos a muy altos. No obstante, es común que estos resultados obedezcan a prácticas como el uso intensivo de agroquímicos o la utilización indiscriminada de maquinaria en el proceso de labranza. El problema de contaminación que padece esta subcuenca puede observarse como un impacto agregado del manejo de los recursos naturales de la cuenca Lerma-Chapala, pues gran parte del problema de contaminación del agua en el río Lerma se explica como resultado del estado de las aguas que escurren de los ríos Turbio y Alto Lerma. El problema más grave de contaminación se observa en el estado de las aguas del río Lerma que recibe esta subcuenca. Aunado al problema de contaminación que la subcuenca transmite hacia aguas abajo, se suma la contaminación generada dentro de su propio territorio. Luego de su paso por Salamanca, el río Lerma recibe las descargas de prácticamente todos los municipios de Guanajuato y Michoacán que integran dicha subcuenca. El problema se agudiza cuando este cauce recibe las descargas directas de la zona urbana de La Piedad, que es el principal generador de aguas residuales en la zona y descarga. El abuso en tal tipo de prácticas, en función de la obtención de altos rendimientos, también presenta efectos adversos sobre la calidad del suelo. Así, es común que tanto el uso de agroquímicos como la mecanización de las actividades agrícolas provoquen un efecto de declinación de la fertilidad en los suelos. Actualmente, este problema se presenta en casi el 40% de la superficie de la subcuenca, afectando algunas áreas de agricultura de temporal y pastizal inducido. Es posible apreciar, por ejemplo, en las zonas adyacentes a las ciudades de Toluca, León, Querétaro, Morelia y Guadalajara, un fuerte proceso de deforestación y erosión creciente, asociado con la expansión de los proyectos habitacionales, la creación de centros comerciales y obras de

infraestructura en general. Dado que la mayor parte de la población se ha ubicado en tierras que son parte de una formación hidrogeológica que captura, canaliza y alimenta los acuíferos de la cuenca, la mayor presión por suelo urbano en esta zona va en detrimento de la producción y el mantenimiento de los mantos acuíferos y acelera los procesos de contaminación de los mismos. Ello limita la capacidad de abastecer agua a partir de las fuentes subterráneas. El parámetro *Ambiente* presenta niveles bajos debido a que las selvas de la cuenca Lerma-Chapala registraron cambios de cobertura vegetal hacia pastizales y cultivos agrícolas, con una tasa de cambio de -0.019 (es decir, se disminuyó un 1.9% el área de selvas cada año), lo que representa la tasa negativa más alta dentro de la cuenca. Algo similar ocurrió con los bosques, ya que presentaron la segunda mayor tasa de cambio negativa registrada en la cuenca durante el mismo periodo (-0.015). En cambio, la cobertura de asentamientos humanos presentó la tasa de cambio más alta (0.084). Mientras tanto, la única cobertura que presentó una tasa de cambio cero fue el cultivo agrícola. La contribución de las áreas naturales protegidas es marginal en este caso debido a la poca cobertura espacial de las mismas en cada subcuenca (Conabio, 2006). La subcuenca con mejor combinación en cuanto a la cuantificación de los parámetros del índice WSI bajo el esquema PER fue Corrales.

Conclusiones

La cuenca Lerma-Chapala se caracteriza por ser una cuenca hidrológica con un alto grado de variación en la disponibilidad del recurso hídrico. Las condiciones climáticas definen a esta región como árida en la parte media y baja. Esta escasez del recurso hídrico se convierte en un problema ambiental, económico y social, dada la competencia por el agua entre los usuarios agrícolas en toda la cuenca.

Es necesario mejorar la medición y el registro de los parámetros, para contar con información más puntual (a nivel de cuenca),

a fin de mejorar futuras evaluaciones de seguimiento. Se observa que el indicador más bajo corresponde al de hidrología, en sus componentes de cantidad y calidad, pues en la cuenca no se cuenta con los suficientes sistemas de tratamiento de aguas residuales, lo que impacta de forma directa en el saneamiento de la misma. Se debe mejorar el monitoreo para la obtención del parámetro DBO, así como otros parámetros físico-químicos indicadores de calidad del agua.

Debido a los altos niveles de concentración económica y social dentro de la cuenca, el proceso de urbanización ha superado ya ciertos umbrales en términos de relaciones territoriales, económicas y ambientales. La utilización del suelo ha ido mostrando a lo largo del tiempo un estilo de desarrollo territorial desordenado y poco congruente con un adecuado proceso de sostenibilidad ambiental. Los resultados muestran que es importante desarrollar políticas de conservación y buen manejo del recurso en la cuenca.

Los indicadores de vida y políticas fueron los más altos que se obtuvieron en este análisis. Los objetivos de la estrategia para el desarrollo sustentable plantean el fortalecimiento de la capacidad de rectoría, regulación, control ambiental y estrecha colaboración con otras instituciones gubernamentales. Además, en el programa hídrico para esa región se contempla recuperar la disponibilidad de sus recursos hídricos a través de medidas ligadas a una gestión para la reducción de la demanda, como mejora de rendimientos, eficiencia de uso del agua y conservación de cosecha en el sector agrícola; y tecnologías eficientes, reducción de fugas, y reúso del agua para los sectores público urbano e industrial, para mejorar las

deficiencias ambientales que persisten en la actualidad.

Recibido: 14/08/2012

Aceptado: 19/03/2013

Referencias

- CHAVES, H. y ALLIPAZ, S. An Integrated Indicator for Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. *Journal of Water Resources Management*. 2007.
- CONABIO. *Representación del SINAP en las provincias biogeográficas de la CONABIO*. México, D.F.: Conabio, 2006.
- CONABIO. *Estrategia para la Conservación y Uso Sustentable de la Diversidad Biológica de Michoacán*. México, D.F.: Conabio, 2007.
- OCDE. *Hacia el desarrollo sustentable. Indicadores ambientales*. París: OCDE, 1998.
- SANDOVAL-SOLÍS, S., MCKINNEY D.C., and LOUCKS, D.P. Sustainability Index for Water Resources Planning and Management. *J. of Water Resources Planning and Management*. Vol. 137, No. 5, September 1, 2011.
- SEMARNAT. *Avances en el desarrollo de indicadores para la Evaluación del Desempeño Ambiental*. México, D.F.; Semarnat, 1997.
- SEMARNAT. *Acuerdo por el que se dan a conocer las denominaciones y la ubicación geográfica de las diecinueve cuencas localizadas en la zona hidrológica denominada Río Lerma-Chapala, así como la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas que comprenden dicha zona hidrológica*. México, D.F.: Semarnat, 2003.
- SOTELO, E. *Acciones estratégicas para la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala: Recomendaciones técnicas para las diecinueve subcuencas*. México, D.F.: Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas, Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, 2005.
- TROYO-DIÉGUEZ, E., NIETO A., MURILLO, B., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J.L., BELTRÁN, L.F., ORTEGA, A. y ORONA, I. *Propuesta de un indicador robusto de sustentabilidad hidro-social para la valoración del recurso agua en cuencas*. Encuentro por una Nueva Cultura del Agua en América Latina. Fortaleza, Ceará, Brasil, del 5 a 9 de diciembre de 200, 13 pp.
- UNESCO. *Hydrology for the Environment, Life and Policy – HELP (Brochure)*. Paris: UNESCO, 2005.

Abstract

PRECIADO-JIMÉNEZ, M., APARICIO, J., GÜITRÓN-DE-LOS-REYES, A. & HIDALGO-TOLEDO, J.A. *Watershed sustainability index for the Lerma-Chapala Basin. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 4, September-October, 2013, pp. 93-113.*

The use of environmental indicators to measure sustainability began in the 1970s when environmental protection became one of the most important topics in campaigns and political agendas in several countries. Consequently, it was necessary to have tools to adequately quantify the sustainability of water resources management in arid regions. These indicators represent some of the tools used to quantitatively represent a series of attributes to characterize a system. They also make it possible to make comparisons to a reference scale, establish the state of a system with respect to the reference condition and identify its evolution and potential future state. The current environmental problem in the Lerma-Chapala River basin is the result of the interaction between political, economic and social factors in the region. Intensive agricultural and livestock practices have caused a high degree of degradation of the natural ecosystems in the basin and urban land use has greatly impacted the ecological equilibrium, which has degraded in recent decades due to anthropogenic activities. This work analyzes a hierarchical systems approach using the Watershed Sustainability Index (WSI) methodology.

Keywords: *environmental stability, indicators, Lerma-Chapala basin, pressure-state-response scheme.*

Dirección institucional de los autores

M.I. Margarita Preciado Jiménez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
preciado@tlaloc.imta.mx

Dr. Javier Aparicio

Consultor en el área de hidrología
javieraparicio@prodigy.net.mx

M.A. Alberto Güitrón de los Reyes
M.C. Jorge Arturo Hidalgo Toledo

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
aguitron@tlaloc.imta.mx
jhidalgo@tlaloc.imta.mx