



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**“Propuesta metodológica de un índice de sustentabilidad para la GIRH
en cuencas urbanas: análisis de gran visión”**

TESIS

Que para obtener el grado de:
Doctor en Ciencias del agua

Presenta:

Biol. Mónica Cervantes Jiménez

Director de tesis:

Dr. Carlos Alberto Mastachi Loza

Directores adjuntos:

Dr. Carlos Díaz Delgado
Dr. Enrique González Sosa

Agradecimientos

Este trabajo no se pudo haber llevado a cabo sin el apoyo de la Universidad Autónoma del Estado de México, quienes me otorgaron la beca Enlace de investigación durante los cuatro años del programa de estudio.

Así mismo, agradezco el apoyo incondicional, la gran certeza y creatividad científica, además de la formación ética-profesional, al Dr. Carlos A. Mastachi Loza, gracias infinitas. De igual manera, mi reconocimiento para el Dr. Carlos Días delgado, cuyos comentarios fueron fundamentales para esta investigación.

Al mismo tiempo, agradezco al Dr. Enrique González, al Dr. Miguel A. Gómez, a la Dra. Marivel Hernández, al Dr. Héctor Martínez y el Dr. Tonatiuh por el apoyo y comentarios, su contribución fue invaluable.

También doy gracias a mis compañeros y amigos, quienes dejaron marca en mí por sus grandes aportaciones y apoyo personal y emocional: Ray, Luis, Nancy, Ivania, Tere y Gaby.

A Josué y el bebé que viene en camino

*A mi familia, en especial, mi mamá, mi abue Natita y mis tres hermanos,
ustedes son mi fortaleza*

Índice

Lista de tablas.....	iv
Lista de Figuras	v
Nomenclatura y acrónimos.....	vii
Simbología	ix
Resumen	1
CAPÍTULO 1: Introducción.....	2
1.1 Sustentabilidad y cuencas urbanas	3
1.2 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)	4
1.3 Planeación estratégica participativa	5
1.4 La gestión del agua en México.....	6
1.4.1 Cuencas	6
1.4.2 Gestión del agua	8
CAPÍTULO 2: Planteamiento de la investigación	10
2.1 Justificación.....	11
2.2 Hipótesis	13
2.3 Objetivos	13
2.3.1 General	13
2.3.2 Particulares	13
CAPÍTULO 3: Medición de sustentabilidad hídrica: Indicadores e índices	14
3.1 Indicadores	15
3.1.1 Indicadores ambientales en México	16
3.1.2 Indicadores hídricos	17
3.2 Índices	17
3.2.1 Índices de sustentabilidad.....	18
3.2.2 Índices de sustentabilidad hídrica.....	25
3.3 Métodos estadísticos para la construcción de índices	29
3.3.1 Normalización y ponderación	30
3.3.2 Análisis multivariado	32
CAPÍTULO 4: Metodología general.....	39
4.1 Sección 1: Preparación de variables.....	41

4.2 Sección 2: Análisis de Componentes Principales.....	41
4.3 Sección 3: Análisis de factores.....	41
4.4 Sección 4: Discusión de resultados	42
CAPÍTULO 5: Regionalización de subcuencas urbanas de México.....	43
5.1 Introducción	44
5.1.1 Algoritmos de regionalización	45
5.2 Metodología	46
5.2.1. Selección de variables	46
5.2.2 Distribución de valores a nivel subcuenca	48
5.2.3 Modulación de variables	50
5.2.4 Reducción de variables.....	51
5.2.7 Elección de grupos	51
5.3 Resultados	54
5.3.1 Análisis de componentes principales (ACP).....	59
5.3.2 Grupos homogéneos	61
5.4. Conclusiones del capítulo.....	70
CAPÍTULO 6: Índice de sustentabilidad hidrológica de subcuencas urbanas de México.....	72
6.1 Introducción	73
6.2 Metodología	74
6.3 Resultados	79
6.3.1 Análisis factorial	79
6.3.2 Bases de datos en México	89
6.3.3 Reporte digital	90
6.4 Conclusiones del capítulo.....	91
CAPÍTULO 7: Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones.....	93
7.1 Diagnóstico de sustentabilidad de la GIRH a gran visión.....	94
7.2 Discusión.....	94
7.2.1 Índice de Sustentabilidad Hidrológica regional	94
7.2.2 Equipo de trabajo	101
7.3 Conclusiones generales y recomendaciones.....	102
Anexo I: Variables económicas.....	104
Anexo II: Variables ambientales	107

Anexo III: Variables sociales	112
Anexo IV: Variables Institucionales	116
Anexo V: Cartografía y archivos digitales	118
Referencias	124

Lista de tablas

Tabla 3.1 Variables utilizadas para el Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI).	20
Tabla 3.2 Componentes y variables del Índice de Pobreza de Agua	28
Tabla 3.3. Métodos de normalización, ponderación y agregación de algunos índices	31
Tabla 3.4. Cálculo de índices para selección de número de grupos	37
Tabla 5.1. Geo-Bases de datos para la selección de variables.	54
Tabla 5.2. Variables hidrológicas de subcuencas urbanas del país	55
Tabla 5.3. Promedio y coeficiente de variación de las regiones en cada	62
Tabla 6.1. Categorías de ISH	77
Tabla 6.2. Matriz de asignación de códigos para subíndices de sustentabilidad.	77
Tabla 6.3. Pesos de los factores principales de la AEPA económica.....	79
Tabla 6.4. Pesos de los factores principales de la AEPA social sin <i>varimax</i>	80
Tabla 6.6. Pesos de los factores principales de la AEPA ambiental después de <i>varimax</i>	81
Tabla 6.7. Pesos de los factores principales de la AEPA ambiental sin <i>varimax</i>	83
Tabla 6.8. Pesos de los factores principales de la AEPA ambiental después de <i>varimax</i>	83
Tabla 6.6. Códigos ESAI para el 3% del territorio mexicano	88

Lista de Figuras

Figura 1.1. Subcuencas urbanas de México	8
Figura 3.1. Diagrama de emergencia de la biósfera	24
Figura 3.2. Proceso de huella hídrica multidimensional	26
Figura 3.3. Huella de agua verde y azul	26
Figura 4.1. Método del Índice de Sustentabilidad Hídrica para subcuencas urbanas	40
Figura 5.1. Manejo de variables climáticas	47
Figura 5.2. Distribución de valores a nivel subcuenca de variables no climáticas	48
Figura 5.3. Método de desagregación de valores a subcuenca de variables no climáticas	49
Figura 5.4. Construcción de base de geo-database con valores medios por subcuenca	50
Figura 5.5. Código de programación de análisis K-medoides en el software R	52
Figura 5.6. Pesos de los componentes principales de la AEPA económica	59
Figura 5.7. Pesos de los componentes principales de la AEPA social	60
Figura 5.8. Pesos de los componentes principales de la AEPA ambiental	61
Figura 5.9. Mapa de regionalización de las 614 subcuencas urbanas de México	62
Figura 5.10. Características económicas de las regiones del país	64
Figura 5.11. Características sociales de las regiones del país	66
Figura 5.12. Características ambientales de las regiones del país	69
Figura 5.13. Características sociales de las regiones del país	70
Figura 6.1. Método del Índice de Sustentabilidad Hídrica para subcuencas urbanas sección 3	75
Figura 6.2. Código de programación del criterio Kaiser-Meyer-Olkin en el software R	75
Figura 6.1. Subíndices de sustentabilidad hídrica	85
Figura 6.2. Índice de Sustentabilidad Hídrica para México	86
Figura 6.3. Caracterización de sustentabilidad hídrica para subcuencas de México usando códigos ESAI	87
Figura 6.4. Caracterización de sustentabilidad hídrica para subcuencas “Especiales” de México usando códigos ESAI	88
Figura 7.1. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 1 de México	95
Figura 7.2. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 2 de México	96
Figura 7.3. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 3 de México	97
Figura 7.4. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 4 de México	98
Figura 7.5. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 5 de México	99

Figura 7.6. Índice de Sustentabilidad Hidrológica de la región de subcuencas no urbanas de México. 100

Figura 7.7. Hoja de reporte digital del Índice de Sustentabilidad Hídrica 91

Nomenclatura y acrónimos

ACP	Análisis de Componentes Principales
AEPA	Áreas Estratégicas de Planeación y Articulación
AF	Análisis de factores
ANUIES	Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación superior de México
AVAD	Años Vida Ajustados por Discapacidad
AVD	Años Vida vividos con Discapacidad
AVP	Años Vida perdidos por muerte Prematura
CART	Árboles de Regresión y Clasificación (Classification and Regression Trees)
Cc	Consejos de cuenca
CDS	Comisión para el Desarrollo Sostenible
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión nacional del Agua
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación Política de la Política de Desarrollo Social
COTAS	Consejo Técnico de Aguas Subterráneas
Cur	Cuenca urbana
DB	Davies-Boulding
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DJSGI	Grupo del índice de Sustentabilidad Dow Jones (Dow Jones Sustainability Group Index)
DOF	Diario Oficial de la Federación
DPSIR	Drivig forces, Pressures, State, Impact, Responses
DSR	Drivig forces, State, Responses
EF	Huella ecológica (Ecological Footprint)
EMSI	Índice de Sustentabilidad de Emergía (Emergy Sustainability Index)
EPI	Índice de Desempeño Ambiental
ESI	Índice de Sustentabilidad Ambiental (Environmental Sustainability Index)
FMA	Foro Mundial del Agua
G1	Calinski-Harabasz
G3	Hubert y Levine
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

GWP	Global Water Partnership
Hh	Huella hídrica (Water Footprint)
IB	Índice de Bienestar
IBES	Índice de Bienestar Económico Sustentable
IDC	Índice de Desarrollo de Ciudades
IES	Instituciones de Educación Superior
ILA	Índice Legítimo de Ahorros
INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal
INE	Instituto Nacional de Ecología
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPV	Índice de Planeta Vivo
ISH	Índice de Sustentabilidad Hídrica
ISU	Índice de Sustentabilidad Urbano
IVA	Índice de Vulnerabilidad Ambiental
KMO	Kayser Mayer Olkin
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LCS	Cuenca Lerma-Chapala-Santiago
ME	Máxima Expectativa
MIAZU	Manejo Integrado del Agua en Zonas Urbanas
Oc	Organismos de cuenca
OD	Oxígeno Disuelto
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
Pam	Particionamiento alrededor de medoides (Partitioning around medoids)
PEIR	Presión, Estado, Impacto, Respuesta
PEP	Planeación Estratégica Participativa
PER	Presión, Estado, Respuesta
PER	Presión, Estado, Respuesta
PIB	Producto Interno Bruto
PIBAA	Producto Interno Bruto Ambientalmente Ajustado
PNDUT	Programa Nacional de Desarrollo Urbano y Ordenamiento del Territorio
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
RHA	Región Hidrológico-Administrativa
S	Silhouette

SE	Secretaría de Economía
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistema de Información Geográfica
SNIA	Sistema Nacional de Indicadores Ambientales
SNIARN	Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales
SNIM	Sistema Nacional de Información Municipal
SSTD	Sistemas de Soporte para la Toma de Decisiones
UAEMex	Universidad Autónoma del Estado de México
UNEP	Naciones unidas (United Nations Environment Programme)
WWF	World Wild Foundation (en inglés)
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Simbología

%	Porcentaje
L/día	Litros por día
L/hab/día	litros por habitante por día
°C	Grados centígrados
mm	milímetros
Hab/km ²	Habitantes por kilómetro cuadrado
Años * 10,000 hab	Años de vida perdidos por discapacidad y mortalidad por enfermedades intestinales asociadas al agua por cada 10,000 habitantes
m ³ /año	metros cúbicos por año
mm/año	milímetros de lluvia por año
Pesos/km ²	pesos por kilómetro cuadrado
Habitantes	Número de habitantes
haG	Hectáreas globales de bioproductividad
Casa	Número de viviendas
haG/hab	Hectárea global por habitante
SEJ	Joule de energía solar

$\$/\text{hab}/\text{año}$	pesos por pesona al año
L/proc	litros de agua gastados en un proceso o producto
pec	proporción de la emergía de cosecha
pca	Proporción de la carga ambiental
Hh_{azul}	Huela hídrica de agua azul (superficial o subterránea)
Hh_{verde}	Huela hídrica de agua verde (de lluvia)
Hh_{gris}	Huela hídrica de agua gris (necesaria para asimilar la contaminación)
Hh_{proc}	Huella hídrica para un proceso productivo
Ev	Evaporación de agua
In	Incorporación de agua
PF	Periodo de retorno
L	carga del contaminante que llega al cuerpo de agua
C_{max}	Carga de contaminante máxima
C_{nat}	Carga de contaminante natural
$Abio$	Área bioproductiva
Fe	Factor de equivalencia
W	Ponderación
X_i	Variables
\sum	Suma
f	factores
x	funciones lineares de m
ε	error
m	constantes de factores
q^2	Cuadrados de elementos fuera de diagonal de antimatriz
$SR^{-1}S$	Antimatriz
r^2	Cuadrado de elementos fuera de diagonal de matriz de correlaciones
p	número de variables
N	Tamaño de muestra

$ R $	Determinante de matriz de correlación
d^2	distancia euclidiana ente dos puntos
dm	distancia de Mahallanobis
A	Filas de vectores
β	grupo de patrones
α	agrupación
e^2	error cuadrático de agrupación
C	centroide de un grupo
V_{xi}	valor modulado para una variable x de la cuenca i
Cp	Componente principal
P	Peso de componente principal
V	Valor estandarizado de variable
i	Objetos de una muestra
j	características de los objetos de una muestra
u	Número de grupos
S^+, S	Pares de distancia
$Tr(Bu)$	Traza de matriz de covarianza entre grupos
$Tr(Wu)$	Traza de matriz de covarianza dentro de grupos
K_q	Clúster q
S_q	medición de dispersión para objetos del grupo q
Z	Medoide
$D(u)$	Suma de las distancias dentro de los grupos
Iw	Numero de distancias dentro de los grupos
D_{min}	Distancia mínima dentro de grupos
D_{max}	Distancia máxima dentro de grupos
n	numero de indicadores de cada subíndice
Sa	Subíndice ambiental
Ss	Subíndice social

Se	Subíndice económico
Si	Subíndice institucional
$B(i, k)$	distancia promedio de un punto a los demás dentro de su propio clúster
$w(i)$	Distancia promedio desde un punto i a otro dentro de su propio clúster
f_{sx}	Factor de subsistema X
C	coeficiente de factor
Ve	Varianza explicada

Resumen

El agua es un recurso natural, único, finito e indispensable para todo organismo viviente (Bórquez, 2006), y constituye un factor potencialmente limitante para el desarrollo socioeconómico, debido a que es un recurso necesario para satisfacer las necesidades básicas de la población.

El manejo del agua necesita hacerse con un enfoque sustentable, esto es que, los proveedores del servicio sean capaces de atender las necesidades del presente, conservando la calidad y cantidad de agua para abastecer las demandas futuras. Los factores que limitan o promueven los esfuerzos organizacionales para transformar las operaciones hacia una visión sustentable, son principalmente, la estructura organizacional de las instituciones, la visión de la organización, la capacidad de manejo del sistema de información, la capacidad técnica, las prácticas de los recursos humanos, entre otras (Herrick & Pratt, 2013).

Por otra parte, la gran diversidad cultural y natural son características singulares del territorio mexicano. Es por esto que, definir métricas que consideren atributos ambientales, sociales y económicos, con la finalidad de elaborar estrategias de desarrollo regional con alto impacto, es un reto aún no superado. En este sentido, uno de los objetivos de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), es enfocarse en identificar la interrelación de los socioecosistemas para potenciar un desarrollo hídrico sustentable dentro de las cuencas y/o región hidrológica.

Sin embargo, las herramientas usadas para medir la sustentabilidad hídrica, generalmente juzgan con el mismo conjunto de criterios a los países y pocas veces reflejan la variabilidad entre cuencas hidrológicas. Por ello, en este trabajo, se identificaron zonas con características socioecosistémicas similares, para las que se utilizaron variables ambientales, sociales, económicas e institucionales, a nivel espacial, obteniendo una regionalización de las subcuencas urbanas de México con base en un análisis de componentes principales (ACP) y un algoritmo de agrupación. Como resultado se obtuvo un mapa con cinco regiones con características distintivas. Para complementar la caracterización de las regiones del país, se diseñó una metodología para la construcción de un Índice de Sustentabilidad Hídrica (ISH). La metodología del ISH integra el análisis de factores para la ponderación de los socioecosistemas. El ISH es una herramienta que marca la pauta para definir y proponer estrategias locales y políticas públicas de alto impacto para la gestión del agua, atendiendo las debilidades particulares de cada cuenca urbana en el país.

CAPÍTULO 1:

Introducción

1.1 Sustentabilidad y cuencas urbanas

El análisis de gran parte de los fenómenos hidrológicos que ocurren sobre un determinado espacio geográfico suele tener como referencia a la unidad fisiográfica conocida como cuenca (Delgado, Alberich, & López-Vera, 2005), el cual es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y donde los excedentes de agua convergen en un punto espacial único: la desembocadura (Llamas, 1993).

Los territorios de las cuencas otorgan bienes y servicios ambientales invaluable para la población, como son, el suministro de agua dulce, el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales, la regulación de la erosión, entre otros (Balvanera et al., 2009). La gestión de estos sistemas debe hacerse con un enfoque sustentable, debido a las interacciones y repercusiones de las actividades socioeconómicas sobre la integridad ecológica de las cuencas (Cotler, 2010).

En este sentido, el término “sustentabilidad”, consiste en la unión de procesos de los ejes económicos, sociales y ambientales y su equidad intergeneracional a través del tiempo (Berkes & Folke, 1998a; IUCN, 1980). En los trabajos más recientes, se considera al eje institucional como parte de los pilares de sustentabilidad (O’Connor, 2006), debido principalmente a que la coordinación institucional es considerada una de las principales limitantes en la implementación de la GIRH en ciudades (Brown & Farrelly, 2009).

Desde el establecimiento de esta última definición, ha habido gran controversia en cuanto a las dimensiones sociales, económicas y ambientales, así como la importancia de buscar una nueva forma de desarrollo sustentable, concibiendo éste como un esquema de desarrollo humano, social y económico capaz de mantenerse de manera indefinida en armonía con los sistemas biofísicos del planeta (Hák, Moldan, & Dahl, 2012).

Por otra parte, probablemente ningún problema actual sea tan inquietante como el crecimiento desmesurado de las ciudades (World Health Organization, 1965). En efecto, este crecimiento poblacional aumenta la presión sobre los recursos naturales, en especial sobre agua, el cual se constituye como un problema serio en la mayor parte del mundo (United Nations, 2007). Al respecto, Taylor (2007) sugiere que las áreas urbanas son aquellas donde el ecosistema es significativamente modificado por densos asentamientos humanos y actividades asociadas con ellos.

Las ciudades juegan un papel significativo en las actividades económicas, pero su desarrollo es pobre en relación con la conservación ambiental (Mori & Christodoulou, 2012) así, su viabilidad y sustentabilidad dependen directamente de la naturaleza, dentro y alrededor de la estructura urbana (Cicea & Pirlogea, 2011). Adicionalmente, cada país emplea diferentes criterios para la delimitación de

zonas urbanas, en México se consideran las cabeceras municipales y poblaciones con más de 2,500 habitantes (INEGI, 2010b).

El incremento en la urbanización tiene dos perspectivas: por un lado, las ciudades son los motores principales del crecimiento socioeconómico, ya que ofrecen una gran variedad de ventajas por economía de escala. Pero, por el otro, las áreas urbanas son puntos de concentración de deterioro ambiental, con problemas de contaminación, ruido y tráfico, además, la escasez de agua y energía pueden significar problemas críticos en su desarrollo (Siche, Agostinho, Ortega, & Romeiro, 2008a; Van Dijk & Mingshun, 2005).

Diferentes escenarios para mejorar el suministro de agua en el contexto urbano deben ser evaluados con respecto a los aspectos de sustentabilidad, como son el uso eficiente del agua, la energía y recursos no renovables, la participación pública, el cumplimiento de la legislación, la transparencia, etc. (Nederlof & Frijns, 2010). En este sentido, el manejo sustentable del agua en las ciudades requiere de una aproximación participativa e integrada dentro de un marco de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) (Díaz-Delgado et al., 2009).

De manera que, la sustentabilidad del agua en las ciudades debe ser atendida a nivel de cuencas urbanas, ya que son estas cuencas quienes dan soporte y limitan su capacidad de desarrollo. Al respecto, Platt (2006) las define como unidades de escurrimiento que albergan en parte o totalmente una región metropolitana. Así, las cuencas urbanas (Cur) deben ser consideradas como sistemas físicos integrados ya que su funcionamiento depende de la interacción entre elementos hidrológicos, químicos, ecológicos y urbanos (Graf, 2001), además es una unidad útil para fijar una escala de instrumentación de políticas públicas (Monroy-Ortiz, 2013).

1.2 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)

Todos los aspectos relacionados con el agua, requieren de un enfoque integrado (Ernstson et al., 2010; Ven, Gersonius, Graaf, Luijendijk, & Zevenbergen, 2011), con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas locales (GWP, 2009). En la cumbre mundial para el desarrollo sustentable de Johannesburgo (Naciones Unidas, 2002), la GWP (Global Water Partnership) definió el manejo integrado de los recursos hídricos como “un proceso que promueve el desarrollo coordinado y la gestión del agua, la tierra y los recursos relacionados con la finalidad de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas locales” enfatizando que el agua debe ser manejada en un contexto de cuenca, bajo los principios de buena gobernanza y participación pública (Rahaman & Varis, 2005)

Al respecto, la GIRH es un nuevo paradigma filosófico y metodológico que facilita la solución de problemas del recurso agua (Franco, 2008). Este paradigma se basa en los principios de Dublín establecidos en 1992. En algunos países, la aplicación de la GIRH a nivel de cuenca no es una estrategia nueva, en España y Francia llevan décadas practicándolo (GWP, 2009). Existen diversas guías metodológicas sobre el enfoque GIRH y al parecer hay consenso en la manera en la que se debe desarrollar un plan de gestión del agua (Burton, 2003), aunque algunas incluyen herramientas específicas de planeación (Díaz-Delgado et al., 2009).

En este sentido, el enfoque GIRH ha sido aplicado a una gran variedad de estudios sobre cuencas de todo el mundo (Cotler & Caire, 2009; Harmancioglu, Barbaros, & Cetinkaya, 2012; Jujnovsky, González-Martínez, Cantoral-Uriza, & Almeida-Leñero, 2012; Tanaka et al., 2006), aunque los métodos usados son variados ya que dependen de las necesidades particulares de cada lugar.

Por otra parte, el manejo de las áreas urbanas se tiene que respaldar en la planeación de toda la cuenca (Desa, 2006). Si bien, se ha establecido el concepto de “Manejo Integrado del Agua en Zonas Urbanas (MIAZU)” (Mitchell, 2006), su aplicación está limitada al espacio urbano y en la mayoría de los casos no se considera a la cuenca urbana como unidad funcional de estudio y para aplicación de la GIRH.

Por ejemplo, en la ciudad de Salta, en Argentina, se propuso un índice de sustentabilidad y saneamiento bajo un enfoque de sustentabilidad de cinco dimensiones y dando énfasis a indicadores espaciotemporales, como la disponibilidad de agua, la infraestructura para la distribución de agua, etc. (Seghezze et al., 2010). También se han aplicado estudios relacionados de manera indirecta con la sustentabilidad del agua, por ejemplo, evaluando la calidad del suelo urbano (Vrščaj, Poggio, & Marsan, 2008).

En las ciudades, la gestión del agua se ha aplicado en distintos contextos, por ejemplo, en la ciudad de México se han identificado los servicios ecosistémicos del suministro de agua de una subcuenca mediante un balance hídrico. Determinando que la cuenca del río Magdalena, con una extensión de 33 km², es capaz de abastecer potencialmente a 153,203 usuarios (Jujnovsky et al., 2012).

1.3 Planeación estratégica participativa

El proceso de planeación estratégica participativa (PEP) con enfoque de GIRH consiste en un proceso sistemático que integra el desarrollo del conocimiento intuitivo y analítico, mediante la participación de los involucrados, quienes a su vez se ven influenciados por el accionar del plan. La PEP se fundamenta en los principios y desarrollo teórico de la planeación estratégica, incorporando al proceso la participación social (Díaz-Delgado et al., 2009), que es crucial en el manejo sustentable de los recursos naturales (Mendoza & Prabhu, 2006; Sinclair & Smith, 1999).

El proceso transita por la definición de perspectivas comunes, la identificación de posiciones futuras deseadas o necesarias, y el establecimiento de condiciones de rendimiento en áreas críticas de resultados, lo que conduce al planteamiento de un plan estratégico con una visión a largo plazo (Díaz-Delgado et al., 2009). El proceso PEP conlleva la definición de áreas críticas de análisis y resultados (Morrisey, 1996) o Áreas Estratégicas de Planeación y Articulación (AEPA). Las AEPA son propuestas por (Díaz-Delgado et al., 2009) con la finalidad de englobar las acciones generadas en el proceso de planeación en áreas específicas. Uno de los propósitos de las AEPA es comprender de forma global la problemática de la cuenca, identificando los principales temas que la caracterizan.

La PEP se ha aplicado en distintos contextos del agua. En la cuenca de Andarax, España, se desarrolló un sistema de soporte para la toma de decisiones (SSTD) en el que se ponderaron diferentes indicadores referentes a criterios para predecir la demanda futura en el agua. Un análisis multicriterio de los indicadores permitió clasificar escalonadamente las alternativas de manejo del agua de acuerdo con los múltiples objetivos de mejora formulados por el grupo participante. Aunque en este trabajo no se define propiamente el concepto de cuenca urbana, la cuenca de estudio comprende a la ciudad de Almería (Van Cauwenbergh et al., 2007). Graymore, Wallis, & Richards (2009) desarrollaron un SSTD para subcuencas de Australia, en el que se jerarquizaron indicadores de sustentabilidad por un grupo de actores en todos los niveles de las cuencas y se integraron en un Sistema de Información Geográfica (SIG). En la Provincia de Hebei en China, se aplicó la metodología Delphi, una técnica importante en la PEP para ponderar indicadores de sustentabilidad integrados a una sistema SIG (Tan et al., 2011a).

La técnica Delphi forma parte del enfoque de PEP y está basada en la opinión de los expertos. Permite la comunicación estructurada e iterativa entre un grupo de personas para obtener conocimiento para resolver un problema complejo (Landeta, 2006). El proceso de comunicación con los expertos (Delphi), se caracteriza por tres aspectos: 1) el anonimato de los participantes, 2) se basa en interacciones con retroalimentación para cada participante y 3) produce resultados estadísticos o cualitativos (Ardón, 2010).

1.4 La gestión del agua en México

1.4.1 Cuencas

México se encuentra en una posición geográfica privilegiada en el planeta, ya que el trópico de Cáncer atraviesa casi por la mitad su territorio, lo que hace posible la presencia de zonas templadas y tropicales. Está rodeado por el océano Pacífico, el golfo de California, el golfo de México y el mar Caribe. Su relieve es producto de una accidentada historia geológica, con cordilleras que lo cruzan de norte a sur y de este a oeste por el eje Neovolcánico (Carabias & Landa, 2005). Estas características le permiten tener, prácticamente, todos los climas que existen en el mundo (excepto los fríos más extremos) (García & CONABIO, 1998) y sus consiguientes tipos de ecosistemas y especies biológicas,

muchas de las cuales son endémicas del país (Ceballos et al., 2010); por ello, México es considerado un país megadiverso.

En su mayor parte, México es un país árido o semiárido (56%). En efecto, los estados norteños abarcan 50% de la superficie y ocurren precipitaciones anuales menores a los 500 mm/año, mientras que el sureste del país es húmedo con precipitaciones promedio que superan los 2,000 mm/año (CONAGUA, 2012).

El país cuenta con todo tipo de cuencas: exorreicas y endorreicas; y con una gran variedad de características morfométricas y fisiográficas. Para administrar y regular los usos y aprovechamientos de las aguas superficiales y subterráneas en México, se dividió al país en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), en cada una de las cuales hay una gerencia regional de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), organismo federal reconocido por la Ley de Aguas Nacionales (LAN), como la autoridad en la gestión hídrica (FCEA & CEMDA, 2006). Esta clasificación divide al país en 731 cuencas y 974 subcuencas hidrológicas.

Políticamente del país está constituido por 32 estados soberanos e independientes subdivididos en municipios o bien delegaciones en el caso del Distrito Federal, donde residen los poderes federales (DOF, 2016). En conjunto abarcan una superficie continental de 1.9 millones de km² (Figura 1.1).

En el país, se sigue el criterio de considerar a una población urbana cuando la localidad tiene más de 2,500 habitantes; cuando son menos de 2,500 se considera como rural. De acuerdo con este criterio, la población total en el país es de 112,336,538 habitantes, de la cual el 78% se encuentra concentrada en centros urbanos (INEGI, 2010a). Los centros urbanos se consideran actualmente como el componente territorial más activo en términos económicos, y por ello un motor del crecimiento económico y social. La tendencia hacia la mayor concentración de la población y de las actividades económicas en las ciudades, se debe a que se piensa que es ahí donde existen las mayores oportunidades de generación de riqueza, inversión, empleo y valor agregado, variables susceptibles de traducirse en bienestar económico e incluso social (Nieto, 2013). Un ejemplo es que, comparado con otros países de América Latina, México tiene una alta cobertura en la red de agua potable y alcantarillado, además la nación a través de la CONAGUA subsidia hasta el 70% del costo de las obras de modernización en la red de drenaje público de ciudades con más de 50,000 habitantes (Hearne, 2004).

Las funciones de gestión y control de la economía en México están centralizadas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que es el epicentro de la economía nacional generando alrededor del 32% del PIB anual nacional. De este modo, ciudades cercanas a la ZMVM como Querétaro, Toluca, Puebla, Guadalajara y Aguascalientes, han tenido un gran impulso industrial y por tanto económico (Parnreiter, 2002).

Desafortunadamente, la población y el crecimiento económico se ubican en áreas con clima relativamente seco. Por ejemplo, la región sureste contiene el 72% del escurrimiento de agua, pero económicamente sólo produce el 16% del PIB nacional. En el norte del país, el aumento en los convenios con Estados Unidos, ha llevado a un rápido crecimiento en la población y la actividad económica, así como en la urbanización y las inversiones en tratamiento y suministro de agua (Hearne, 2004).

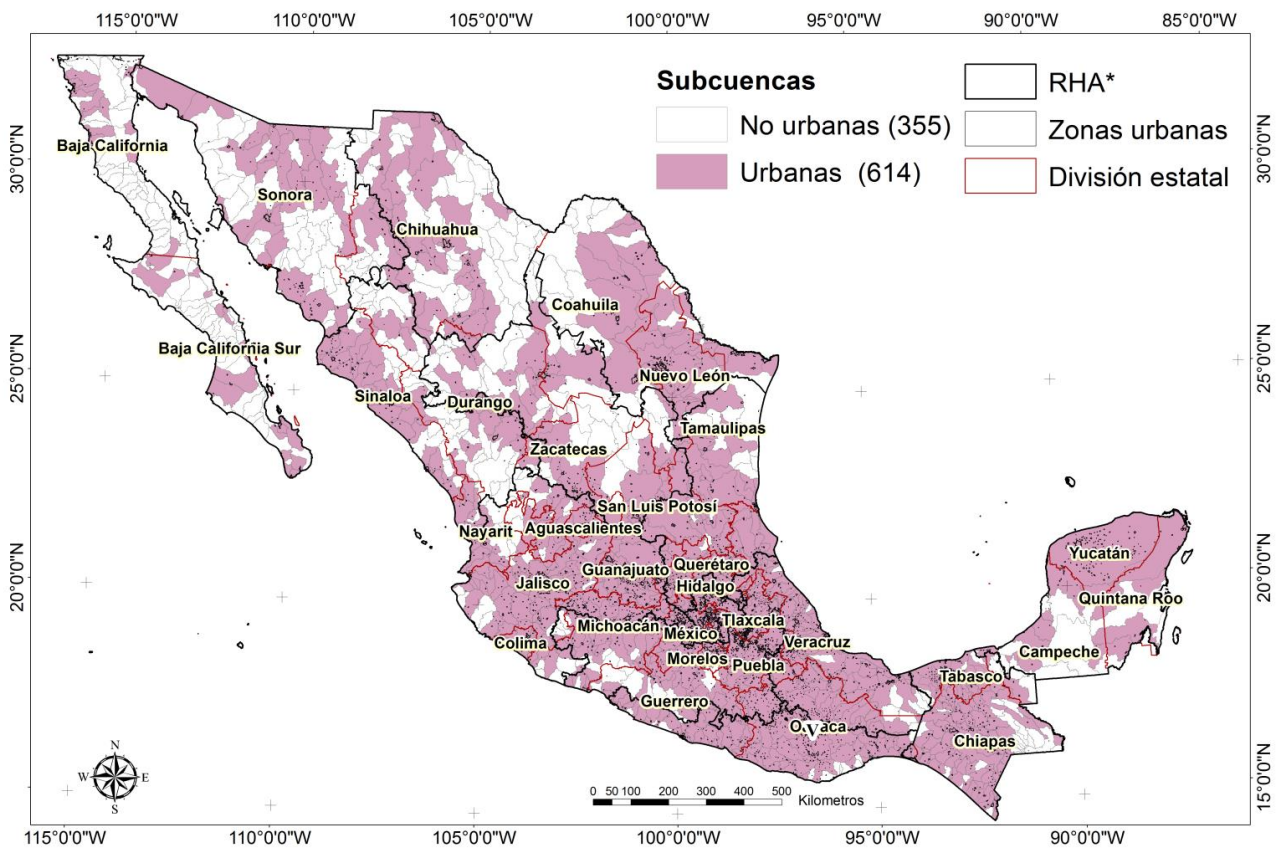


Figura 1.1. Subcuencas urbanas de México. Las subcuencas no urbanas tienen menos de 2,500 habitantes. *RHA: Región Hidrológico-Administrativa

1.4.2 Gestión del agua

En México, la vía elegida para la GIRH ha sido el fortalecimiento jurídico de los Consejos de Cuenca (Cc), teóricamente, mediante la participación coordinada de actores gubernamentales y no gubernamentales y la definición de las acciones que a cada quien corresponde, en busca del beneficio común de los usuarios de la respectiva cuenca.

La GIRH en México se inicia con la publicación de la Ley de Aguas Nacionales en 1992, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) comenzó a promover la descentralización de funciones, a propiciar la

participación ciudadana y a fomentar la GIRH al considerar, entre otros principios, la cuenca hidrológica como la unidad básica para la administración del agua (Cotler, 2004). Sin embargo, es preciso que en la Ley se incorporen criterios de descentralización y de apertura a la participación de todos los involucrados en ella, sean autoridades y/o usuarios (FMA, 2012). Sin embargo, las deficiencias institucionales y la ausencia de consensos entre las instituciones, son aspectos que frenan la generación y empleo del conocimiento y la gestión adecuada de las cuencas en México (Cotler, 2004)

Por otra parte, en el VI Foro Mundial del Agua se estableció que se debe de atender el contexto urbano e interactuar con los sistemas de las ciudades, sin dejar de lado la unidad de cuenca, incorporando visiones a mediano plazo, atendiendo sobre todo en las grandes ciudades la presión en la demanda de agua y en el ambiente en general. Las consecuencias del crecimiento urbano en México, se reflejan en la alteración del ciclo hidrológico y el ecosistema del entorno urbano (FMA, 2012).

Monroy-Ortíz (2013) parece ser el primer autor en identificar geográficamente el límite de las cuencas urbanas con base en la información de CONAGUA, reconociendo 45 sistemas de cuenca urbanos que incluyen el mismo número de zonas metropolitanas del país. Aunque este autor no hace un análisis profundo, si nota que a mayor concentración de capacidad productiva en las cuencas urbanas, se presenta mayor vulnerabilidad ambiental, en términos de disponibilidad de agua. Identifica también el cambio de uso de suelo como uno de los factores que más altera el sistema hídrico.

Las políticas públicas para zonas urbanas en México, contemplan dos objetivos generales: la competitividad económica y la generación de reservas territoriales para la expansión urbana. Ambos se consideran útiles para proveer desarrollo urbano, a tal grado que forman parte de la Ley General de Asentamientos Humanos (DOF, 1994). En el Programa Nacional de Desarrollo Urbano y Ordenamiento del Territorio (PNDUT) se hace hincapié en maximizar la eficiencia económica generando cohesión social y cultural (SEDESOL, 2001), sin embargo, aún queda pendiente asumir mayor responsabilidad en la atención a variables de tipo ambiental y bienestar social.

CAPÍTULO 2:

Planteamiento de la investigación

2.1 Justificación

La importancia que tiene el recurso hídrico como factor crítico en el desarrollo de la sociedad, es una justificación para que se considere como variable indispensable en la formulación de políticas públicas y como elemento decisorio en la gestión de cuencas (Barrantes & Vega, 2002). El manejo del territorio con enfoque en cuencas urbanas, es importante para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, ya que integra las interacciones biofísicas, ambientales, sociales y económicas, en una unidad de medida basada en interacciones, más que en límites políticos. Aunque en México se han identificado las cuencas urbanas, la atención no ha sido dirigida a identificar los problemas hídricos trascendentes o la necesidad de información para su cuantificación.

En el tema de sustentabilidad, los estudios se basan en los límites políticos de las ciudades, sin integrar la unidad territorial de cuenca hidrológica. Entonces, es importante conocer el estado de sustentabilidad del agua en las ciudades ya que son puntos de concentración de la presión sobre el recurso y hasta la fecha, no existe un índice capaz de monitorear el efecto de las políticas públicas o de los planes de acción en gestión hídrica en las cuencas que las albergan.

Los avances sobre la gestión hídrica de cuencas en México, se encuentran plasmados tanto en la normatividad, como en el esfuerzo de las instituciones por homogeneizar las herramientas y metodologías de medición y monitoreo, y las bases de datos nacionales. Sin embargo, la falta de integridad y transparencia, así como la discreta comunicación interinstitucional, han llevado a que la sustentabilidad esté presente sólo en la documentación pero nunca en la implementación de acciones efectivas y articuladas.

En este sentido, los indicadores hídricos a nivel nacional reflejan la presión sobre el recurso y la disponibilidad del mismo, así como las respuestas que han surgido para su manejo eficiente. No obstante, no existe un índice que los integre a nivel de cuenca urbana, considerando la participación de expertos en cada una de las áreas de referencia de sustentabilidad hídrica. Además, la resolución espacial de la base de datos de indicadores ambientales en México es muy gruesa, por lo que una justificación para que se realice este trabajo, es que es necesario generar indicadores e índices de sustentabilidad para monitorear el país a nivel de cuenca urbana.

Aunque existe información sobre los atributos relacionados con el agua, no existe una metodología para estimar la sustentabilidad de la gestión hídrica en cuencas urbanas. Por eso, proponer un Índice de Sustentabilidad Hídrica (ISH), apoya la identificación del estado de sustentabilidad hídrica. Se propone el ISH para generar, o en su caso evaluar, planes de acción para el manejo sustentable del agua, para el monitoreo del avance de la sustentabilidad hídrica a través del tiempo y para generar una herramienta de medición de sustentabilidad a escala local. De este modo, el ISH servirá como herramienta para la

toma de decisiones en cuestión de GIRH, en la identificación de los problemas más importantes de cada cuenca.

Este trabajo se enfoca en las cuencas urbanas ya que son espacios de concentración de impactos económicos y que dependen de otras áreas para satisfacer sus necesidades (Munda, 2006). Se empleó la técnica de planeación estratégica participativa (PEP) con enfoque de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) según lo indica Díaz-Delgado *et al.* (2009) para la elaboración del Índice de Sustentabilidad de los Recursos Hídricos en cuencas urbanas (ISH).

Las Áreas Estratégicas de Planeación y Articulación (AEPA), en las que se comprende de forma global la problemática hídrica y en las que se enfoca la atención colectiva para construir los consensos sobre el destino estratégico de las cuencas urbanas, se definen en este trabajo como:

1. Ambiental (A)
2. Social (S)
3. Económica (E)
4. Institucional (I)

La AEPA institucional, es considerada en el contexto de las instituciones dedicadas al estudio, investigación y administración del agua en México.

2.2 Hipótesis

Es posible diseñar un índice que permita medir y cualificar la sustentabilidad hídrica en cuencas urbanas, integrado por indicadores ponderados estadísticamente y usando la información espacial disponible en México, como base para la definición de planes estratégicos de gestión hídrica.

2.3 Objetivos

2.3.1 General

Proponer una métrica de sustentabilidad hídrica, con enfoque de Gestión Integrada de Recursos Hídricos, utilizando indicadores ponderados estadísticamente, para conocer el estado de sustentabilidad hídrica de cuencas urbanas en México y orientar la construcción de planes de gestión hídrica.

2.3.2 Particulares

1. Seleccionar variables espaciales relacionadas con el agua para integrar una base de datos espacial que facilite la caracterización del recurso.
2. Explorar la agrupación espacial de indicadores para definir regiones que compartan características ambientales, sociales, económicas, e institucionales.
3. Definir la metodología de construcción de un índice de sustentabilidad hídrica ponderado estadísticamente, para diagnosticar el estado de sustentabilidad de cuencas urbanas.

CAPÍTULO 3:

Medición de sustentabilidad

hídrica: Indicadores e índices

Ciertamente, la sustentabilidad se ha intentado medir en escalas nacionales, regionales y locales (Gustavson, Lonergan, & Ruitenbeek, 1999; Prescott-Allen, 2001), pero hoy en día no existe un marco genérico común para medirla a estas escalas, usando indicadores. Una de las razones, es la complejidad de la interrelación entre los sistemas ecológicos y humanos (Graymore et al., 2009). La complejidad de los sistemas consiste en las propiedades inherentes de los mismos, así como la multiplicidad espacial de los procesos ecológicos, las interacciones no lineales entre los componentes, la heterogeneidad espacio-temporal y la organización jerárquica (Zurlini et al., 2006).

Mori y Christodoulou (2012), mencionan que los indicadores de sustentabilidad tienen que distinguirse y compararse en distintas áreas. Además, una forma de llegar a un plan sustentable es que los diferentes tomadores de decisión participen en el diseño y proceso de selección de indicadores (Singh, Murty, Gupta, & Dikshit, 2009). Según Díaz-Delgado et al. (2009), en la práctica se requiere más de un indicador para abarcar todos los aspectos importantes de una situación, por ello, es necesario recurrir a un conjunto de indicadores para comprenderla.

Un marco de referencia que se ha utilizado de manera recurrente para definir los indicadores de sustentabilidad, es el de Presión, Estado, Respuesta (PER) y sus derivaciones que incluyen algunos elementos adicionales, como el modelo de Presión, Estado, Impacto, Respuesta (PEIR), el modelo de Fuerzas impulsoras, Estado, Respuesta (DSR, por sus siglas en inglés), el modelo DSIR similar al anterior pero incluye el impacto (Soto & Schuschny, 2009).

Con la finalidad de mejorar el sistema actual de indicadores de sustentabilidad, existen tendencias y requerimientos metodológicos que se enfocan en las coyunturas de unión entre los ejes de la sustentabilidad, más que en problemas individuales de los mismos (Olsson *et al.*, 2004).

3.1 Indicadores

La naturaleza de los indicadores les confiere dos grandes virtudes: primero, la capacidad de simplificar sustancialmente la visión de un fenómeno o situación, y segundo, la posibilidad de comunicar, de una manera sencilla, fenómenos complejos e información científica, técnica y numérica al público interesado (OECD., 2003; Rodríguez, 2002).

No existe una definición única de indicador, sino una amplia lista que corresponde a los objetivos para los cuales han sido propuestos. Existen listas de indicadores tan sencillas que sólo reportan simples medidas de las presiones que afectan a los componentes del ambiente, hasta listas complejas que sólo incluyen indicadores con información espaciotemporal (Rodríguez & Flores, 2009).

En términos generales, un indicador es una medición cuantitativa derivada de una serie de hechos observados que puede revelar una posición relativa en un área determinada. Cuando los indicadores se

evalúan a intervalos regulares, pueden dar la dirección de cambio a través del tiempo (Ciegis, Ramanauskiene, & Startiene, 2009).

En particular, para que los indicadores cumplan su función, es conveniente que reúnan ciertas características. Para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 1993), son tres los criterios importantes:

- 1) Ser relevantes para los tomadores de decisiones y el público en general
- 2) Tener solidez analítica
- 3) Tener facilidad de medición.

Además, los indicadores deben ser importantes, correspondientes a objetivos de políticas públicas, informativos, fáciles de interpretar y calcular, lógicos, efectivos, prácticos, fiables, resumidos y basados en datos accesibles (Ciegis et al., 2009).

3.1.1 Indicadores ambientales en México

En el caso particular de México, los primeros pasos formales hacia el desarrollo de indicadores ambientales, los hizo el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en 1993, que estableció las bases conceptuales para el desarrollo de indicadores ambientales en nuestro país. En 1997, se utilizó el esquema de Presión-Estado-Respuesta (PER), que tuvo como objetivo evaluar el desempeño de las políticas ambientales. En el 2000, México documentó 113 de los 134 indicadores que propuso la Comisión para el Desarrollo Sostenible (CDS) en el programa de acción para el desarrollo sustentable suscrito en la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro en 1992.

Uno de los avances más recientes y significativos fue la publicación, en 2006, de los *indicadores básicos de desempeño ambiental en México: 2005*, el cual puso al alcance de los usuarios uno de los conjuntos de indicadores que integran el SNIA (Sistema Nacional de Indicadores Ambientales). El SNIA forma parte del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) dedicado a recopilar, organizar y difundir la información ambiental y los recursos naturales en el país. Se integra por bases de datos estadísticos, geográficos y documentales que se nutren de la información que generan distintos órganos de los gobiernos federales, estatales y municipales, así como de universidades e institutos de investigación (Rodríguez & Flores, 2009).

El objetivo central del SNIA es la integración y difusión de la iniciativa nacional de indicadores ambientales, con la intención de brindar información ambiental confiable y oportuna a los tomadores de decisiones y al público en general sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en el país (Rodríguez & Flores, 2009). Por último, es importante recalcar que se han hecho esfuerzos aislados para establecer indicadores relacionados con el agua, por ejemplo, los propuestos con respecto

al riesgo de enfermedades diarreicas por consumo de agua contaminada (Gómez-Albores, 2012), o los indicadores propuestos para la gestión hídrica con un enfoque termodinámico (Fonseca, 2010).

3.1.2 Indicadores hídricos

En México, los parámetros hídricos sólo se han considerado a nivel local como indicadores de la calidad del agua, por ejemplo, la Demanda Química de Oxígeno (*DQO*), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (*DBO*), el oxígeno disuelto (*OD*) y las concentraciones de nutrientes o sólidos suspendidos (van Leeuwen, Frijns, van Wezel, & van de Ven, 2012).

En México se calificaron 11.3 % de los sitios muestreados a nivel nacional con un valor de *DBO*₅ por debajo de lo aceptable, es decir, como contaminados y fuertemente contaminados, éstos pueden ser identificados en el Atlas Digital del Agua (CONAGUA, 2012). Es importante señalar que, la cobertura de agua entubada, también se ha utilizado como indicador de sustentabilidad de agua, al respecto, México cuenta con 90.9 % de la población con suministro de agua entubada.

Además, se han identificado indicadores clave relacionados con el agua que reflejan el grado de presión en el recurso, la infraestructura de abastecimiento, el tratamiento de agua residual y la calidad del agua subterránea (SEMARNAT, 2010). El país experimenta a nivel nacional un grado de presión de 17.38% lo cual se considera moderado, sin embargo existen áreas como el Noreste del país que cuenta con un grado de presión del 88% (CONAGUA, 2012).

3.2 Índices

Los índices, son una agregación de indicadores que combinan una serie de variables relacionadas con diferentes dimensiones del desarrollo sustentable y que involucran técnicas de ponderación para asignar una importancia a los indicadores que lo conforman (Geniaux, Bellon, Deverre, & Powell, 2006). La construcción de un indicador compuesto o índice requiere de dos condiciones básicas, a saber: 1) la definición clara del atributo que se desea medir y 2) la existencia de información confiable para poder realizar la medición.

Así, la construcción de índices que permitan la evaluación de las condiciones locales a partir de indicadores confiables es una herramienta de gran valor para la toma de decisiones. Facilitando el análisis comparativo y proporcionando un mecanismo para la toma de decisiones en cuestión del manejo ambiental con base en técnicas cuantitativas, empíricas y sistemáticas (Esty & Porter, 2005; Myllyviita, Hujala, Kangas, & Leskinen, 2011).

3.2.1 Índices de sustentabilidad

En el mundo, se han aplicado una gran variedad de indicadores e índices para intentar medir la sustentabilidad a distintos niveles. Algunos países han desarrollado simples indicadores ambientales, mientras que otros, los han desarrollado bajo un enfoque de desarrollo sustentable, esto es, incorporando (pero no necesariamente vinculando) las dimensiones económica, social, ambiental e institucional del desarrollo.

En América Latina, los países que lideran el desarrollo de los indicadores son: Chile, Colombia, Costa Rica, México y Brasil (Rayén, 2007). En este sentido, se han utilizado indicadores que, aplicados de manera singular, no reflejan realmente la magnitud del problema, por ejemplo, el Producto Interno Bruto (*PIB*) que sólo refleja el crecimiento económico sin integrar el bienestar social y ambiental (Bossel, 1999).

De manera local y para situaciones específicas se han construido modelos de soporte para la toma de decisiones incorporando múltiples criterios ponderados estratégicamente para atender la problemática de sustentabilidad (Banai, 2005; Harmancioglu et al., 2012). Por ejemplo, en China, van Dijk & Mingshun (2005), midieron la sustentabilidad de cuatro ciudades, usando un Índice de Sustentabilidad Urbano (*ISU*), desarrollado previamente por Mingshun (2002) e integrado por indicadores ponderados por expertos en varias rondas de encuestas. La ponderación de los indicadores se asignó con un análisis jerárquico y con la colaboración de expertos. La desventaja de este indicador es que, como el índice de sustentabilidad ambiental (*ESI*), se basa en gran medida en el PIB anual y la riqueza de las localidades, por lo que se desprecian otros aspectos importantes para la sustentabilidad, como el estrés en los componentes clave.

Igualmente, en la ciudad de México se aplicó un sistema de indicadores para la planeación urbana sustentable conformado por tres pilares de indicadores (sustentabilidad, desempeño en la planeación urbana y de monitoreo y evaluación), revelando que la ciudad consume más recursos naturales de los que reincorpora al sistema, importando gran cantidad de materiales crudos (alimentos y recursos) de otras regiones, los cuales generan desechos, gases y aguas residuales que expanden el impacto negativo de la ciudad a una escala regional. Este estudio también demuestra que la ciudad excede su capacidad de carga, convirtiéndola en un sistema urbano no sustentable (Rosales, 2011).

En general, los índices de sustentabilidad son aplicados a escala global, como el índice de sustentabilidad ambiental (*ESI*, por sus siglas en inglés), la huella ecológica (*EF*, por sus siglas en inglés) y el índice de desempeño de emergía (*EMPI*, por sus siglas en inglés), que consideran indicadores pertenecientes a los tres ejes de sustentabilidad (Esty & Porter, 2005; Siche, Agostinho, Ortega, & Romeiro, 2008b).

Aunado a la limitante de escala, también existe un enorme desacuerdo en los protocolos para medir la sustentabilidad y como resultado los índices no coinciden en los resultados globales.

Se considera que el *ESI* y el *EF* como los que tienen el mayor impacto en la evaluación de la sustentabilidad a nivel país (Jha & Murthy, 2003; Morse & Fraser, 2005).

3.2.1.1 Huella ecológica

La huella ecológica o *Ecological Footprint (EF)*, es una herramienta capaz de estimar el consumo de recursos y los requerimientos para la asimilación de desechos de una población humana definida, o de la economía, en términos de su correspondiente área productiva (Devuyt, Hens, & De Lannoy, 2001; Wackernagel & Rees, 1998). Es capaz de comparar el suministro ecológico (*biocapacidad*), contra la demanda de los recursos naturales (Monfreda, Wackernagel, & Deumling, 2004).

El capital natural de las principales áreas bioproductivas (de cultivo, pastoreo, bosque, pesca y construcción), en el mundo es de 11.4 billones de hectáreas: Para medir el consumo de energía y los recursos renovables, la *EF* usa unidades estandarizadas con las áreas bioproductivas, llamadas *hectáreas globales (haG)*. Cada *haG* representa un monto igual a la productividad biológica, es decir, 1 *haG* es igual a 1 ha con productividad igual a la media mundial de productividad obtenida de los 11.4 billones de áreas bioproductivas. Así, 1 ha de tierra altamente productiva, es igual a más *haG*, que 1 ha de tierra con baja productividad (Monfreda et al., 2004).

En el cálculo de la *EF*, los factores de equivalencia se establecieron para comparar las biocapacidades de diferentes países y están establecidos como constantes calculadas a partir de la productividad que se puede lograr en condiciones climáticas específicas.

La *EF* se calcula como la suma de las demandas a la biosfera que hacen las áreas bioproductivas mencionadas arriba adicionales al factor de equivalencia de cada área en el país evaluado:

$$EF(haG) = Abio(ha) * Fe \left(\frac{haG}{ha} \right) \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde *EF* es la huella ecológica, *Abio* es el área bioproductiva y *Fe* es el factor de equivalencia para cada área en cada país.

La *EF* es la suma de los procesos productivos y el consumo de los productos necesarios para la subsistencia humana. El cálculo de la *EF* de un país considera que la exportación de un producto no produce huella, ya que ésta es aplicada en el país destino de tal producto. Para productos primarios, la *EF* representa la capacidad biológica y técnica para su producción estandarizada usando el promedio de

cosecha global: Para productos secundarios la huella corresponde a la del origen del producto, además de la causada por el proceso de comercialización. Además, la *EF*, considera la huella de energía nuclear y fósil, la asimilación de desechos, la energía de los procesos de comercio, biocapacidad (máxima tasa de suministro de recursos en un país) y el déficit ecológico (Monfreda et al., 2004).

En este contexto, México es evaluado con una *EF* de aproximadamente 2.5, mientras que su biocapacidad (*Bc*), es decir, la capacidad biológica productiva es de 1.5 hectáreas per cápita, generando un déficit ecológico de 1 hectárea per cápita (Siche et al., 2008a). Para contextualizar, en un estudio comparativo de 12 países, Siche et al. (2008a), muestran que Estados Unidos presenta el déficit ecológico mayor de *EF* (-7 ha per cápita), mientras que Brasil tiene una reserva ecológica positiva (5 ha per cápita).

3.2.1.2 Índice de Sustentabilidad Ambiental

De acuerdo con el Índice de Sustentabilidad Ambiental (*ESI*, por sus siglas en inglés), la sustentabilidad ambiental es fundamentalmente un concepto multidimensional, que se centra en el estrés de los sistemas naturales y artificiales, midiendo el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación, la vulnerabilidad humana ante cambios ambientales, etc., debido a que estos factores son útiles como indicadores del estado de los sistemas (Esty, Levy, Srebotnjak, & De Sherbinin, 2005). Básicamente, el *ESI* tiene valores que van de 0 (menos sustentable) a 100 (más sustentable) y considera 5 componentes, 21 indicadores y 76 variables, entre las que se incluye la *EF* (Esty & Porter, 2005) (Tabla 3.1). En este sentido, México es calificado con un *ESI* de 46.2, lo que lo coloca en el lugar 95 del ranking de *ESI* de 146 países, entre los países menos sustentables del mundo (Siche et al., 2008b).

Tabla 3.1 Variables utilizadas para el Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI). Modificado de Esty et al. (2002)

Componente	No. Indicador	Indicador	No. Variable	Variable
Sistemas ambientales	1	Calidad del aire	1	Concentración ponderada de NO ₂ en la población urbana
			2	Concentración ponderada de SO ₂ en la población urbana
			3	Concentración ponderada de TSP en la población urbana
			4	Contaminación del aire interno por el uso de combustibles sólidos
	2	Biodiversidad	5	Porcentaje del territorio nacional en ecorregiones amenazadas
			6	Especies de aves amenazadas en relación a las especies de aves en crianza en cada país.
			7	especies de mamíferos amenazados en relación a los mamíferos descritos para cada país

Tabla 3.1 Variables utilizadas para el Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI). Modificado de Esty et al. (2002) (Continuación)

Componente	No. Indicador	Indicador	No. Variable	Variable
Sistemas ambientales			8	Especies de anfibios amenazados en relación de las especies de anfibios identificados para cada país
			9	Índice nacional de Biodiversidad
	3	Tierra	10	Porcentaje del total del territorio con muy bajo impacto antropogénico
			11	Porcentaje del total del territorio con muy alto impacto antropogénico
	4	Calidad de agua	12	Concentración de oxígeno disuelto
			13	Conductividad eléctrica
			14	Concentración de fósforo
			15	Sólidos suspendidos
	5	Cantidad de agua	16	Disponibilidad de agua per cápita
			17	Agua subterránea disponible per cápita
	6	Reducción de la contaminación del aire	18	Consumo de carbón por área poblada
			19	Emisiones de No _x antropogénico
			20	Emisiones de SO ₂ antropogénico
			21	Emisiones de VOC antropogénico
	7	Reducción del estrés ecosistémicos	22	Vehículos en uso por área poblada
			23	Promedio de cambio de cobertura forestal anual de 1990 a 2000
	8	Reducción de la presión poblacional	24	Exceso de acidificación de deposición de sulfuro antropogénico
			25	Porcentaje de cambio en la proyección de población 2004-2050
	9	Reducción de desechos y la presión de consumo	26	Tasa de fertilidad total
			27	Huella ecológica per cápita
			28	Tasa de reciclaje de desechos
	10	Reducción del estrés hídrico	29	Generación de residuos peligrosos
			30	Emisiones industriales de contaminantes orgánicos en agua dulce
			31	Consumo de fertilizante por hectárea de tierra arable
			32	Consumo de pesticidas por hectárea de tierra arable
	11	Manejo de recursos naturales	33	Porcentaje de la nación bajo estrés hídrico severo
			34	Productividad de sobre pesca
			35	Porcentaje total de área forestal certificada para el manejo sustentable
36			Encuesta del foro mundial económico sobre subsidios	
37			Área salinizada debido al riego como porcentaje total de tierra arable	
38			Subsidios agrícolas	
12	Salud ambiental	39	Tasa de mortalidad por enfermedades infecciosas intestinales	
		40	Tasa de mortalidad infantil por enfermedades respiratorias	

Tabla 3.1 Variables utilizadas para el Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI) (Continuación)

Componente	No. Indicador	Indicador	No. Variable	Variable		
Sistemas ambientales	12		41	Tasa de mortalidad de niños menores de cinco años por cada 1,000 nacimientos		
	13	Sustento básico humano	42	Porcentaje de desnutrición en la población total		
			43	Porcentaje de población con acceso a agua potable		
	14	Vulnerabilidad relacionada a desastres naturales	44	Número de muertes promedio por millones de habitantes a causa de inundaciones, ciclones tropicales y sequías		
			45	Índice de riesgo ambiental		
Capacidad social e institucional	15	Gobernanza ambiental	46	Precio de gasolina con relación a la media mundial		
			47	Medida de corrupción		
			48	Efectividad gubernamental		
			49	Porcentaje total de tierra bajo estatus de protección		
			50	Encuesta del foro mundial económico sobre gobernanza ambiental		
			51	Legislación		
			52	Iniciativas de la agenda 21 local por millones de personas		
			53	Libertades políticas y civiles		
			54	Porcentaje de variables carentes en el grupo consultivo de desarrollo de indicadores de sustentabilidad.		
			55	Organizaciones miembros de la IUCN por millón de habitantes		
			56	Generación de conocimiento en ciencias ambientales, tecnología y política		
			57	Medición de la democracia		
			16	Eco- eficiencia	58	Eficiencia energética
					59	Producción de energía hidroeléctrica y renovable como porcentaje del total de energía consumida
	17	Responsabilidad del sector privado	60	Grupo de índices de sustentabilidad Dow Jones (DJSGI)		
			61	Promedio de la tasa "Innovest EcoValue" de firmas en el país		
			62	Número de compañías certificadas con ISO 14001 por billones de dólares de PIB		
			63	Encuesta del Foro Económico Mundial en la innovación ambiental en el sector privado		
	18	Ciencia y tecnología	64	Participación en el programa de cuidado responsable de químicos de la asociación de Manufactureros		
			65	Índice de innovación		
			66	Índice de acceso digital		
			67	Tasa de educación en mujeres		

Tabla 3.1 Variables utilizadas para el Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI) (Continuación)

Componente	No. Indicador	Indicador	No. Variable	Variable
	18	Ciencia y tecnología	68	Tasa de inscripción al sector terciario
			69	Número de investigadores por millón de habitantes
Administración global	19	Participación en esfuerzos de colaboración internacional	70	Número de miembros en organizaciones ambientales intergubernamentales
			71	Contribución al fondeo internacional y bilateral de proyectos ambientales y con metas de desarrollo
	19	Participación en esfuerzos de colaboración internacional	72	Participación en acuerdos ambientales internacionales
			20	Emisiones de gases de efecto invernadero
	74	Emisiones de carbón per cápita		
	21	Reducción de las presiones ambientales transnacionales	75	Exportaciones de SO ₂
			76	Importación de bienes y materiales contaminados como porcentaje del total de bienes y servicios importados

3.2.1.3 Índice de Sustentabilidad de Emergía

La teoría de emergía ha sido desarrollada por las últimas cuatro décadas como una herramienta para determinar políticas ambientales y para evaluar la calidad de los recursos en la dinámica de sistemas complejos (Odum, 1986). Básicamente, el concepto de emergía se basa en el sistema de valoración económica de los ecosistemas con enfoque biofísico-económico. Es decir, es la suma de todas las entradas de energía (directas e indirectas), requeridas para un proceso o producto, las unidades de energía son traducidas como energía solar (Figura 3.1) (Brown & Ulgiati, 1997).

Uno de los índices para medir la emergía es el Índice de Sustentabilidad de Emergía (*EmSI*, por sus siglas en inglés), que valora la cantidad de energía relacionada con la producción y uso de los recursos naturales y antrópicos. El *EmSI* utiliza una unidad común para todos los recursos equivalente al joule de la energía solar. Las unidades de energía solar se utilizan para asignar un valor económico a los recursos naturales que generalmente no se evalúan de manera correcta.

El *EmSI* toma en cuenta el cálculo de la Proporción de Emergía de Cosecha (*pec*) y la Proporción de la carga ambiental (*Pca*), se calcula de la siguiente forma:

valores altos de *Pca* denotan grandes flujos de energía debido a las actividades humanas, resultando en una alta carga sobre los ecosistemas (Siche et al., 2008b):

$$Pca = \frac{N_0 + N_1 + F + G + S}{R} \quad \text{Ec.3.4}$$

Para que un proceso sea sustentable, según el *EmSI*, deberá ser evaluado con un alto *pec* y un bajo *pca*. El *EmSI* evalúa a México con un puntaje de 4, mientras que los países más sustentables como Brasil y Ecuador, están alrededor de 16 (Siche et al., 2008b).

El *EF* y el *EmSI* se han aplicado para hacer evaluaciones a todas las escalas espaciales (Agostinho, Siche, & Ortega, 2007; Brown & Ulgiati, 2001; Brown & Ulgiati, 1999; Vallianatos, 2006), mientras que *ESI* sólo se ha utilizado para evaluar la situación de países. En este sentido, se ha demostrado que la correlación entre el *ESI* con el *EF* y el *EmSI* es pobre (Esty & Porter, 2005; Siche et al., 2008b), mientras que la relación de *ESI* es casi lineal con el Producto Interno Bruto (Morse & Fraser, 2005) por lo que se sugiere que favorece a los países económicamente estables. Por estas razones se considera que el *ESI* no arroja una buena interpretación de la sustentabilidad de un país y de cómo puede éste lidiar con las amenazas con su propia sustentabilidad usando sus riquezas (Siche et al., 2008b).

3.2.2 Índices de sustentabilidad hídrica

3.2.2.1 Huella Hídrica

La huella hídrica (*Hh*) es un índice de uso directo e indirecto de agua entre productores y consumidores. La *Hh* de un producto es el volumen de agua utilizado en la cadena de suministro para producir dicho producto. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por recurso y los volúmenes de contaminación por tipo de contaminante, todos los componentes son especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra, 2011) (Figura 3.2).

La *Hh* se subdivide en tres tipos: 1) azul, 2) verde y 3) gris. La *Hh* azul, se refiere al consumo de los recursos de agua azul (superficial o subterránea) a través de la cadena de suministro de un producto. La *Hh* verde se refiere al consumo de agua verde (de lluvia, no de escurrimiento). La huella de agua gris se refiere a la contaminación y es definida como el volumen de agua dulce que es requerida para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales y existentes en el estándar de calidad de agua ambiental (Figura 3.3).

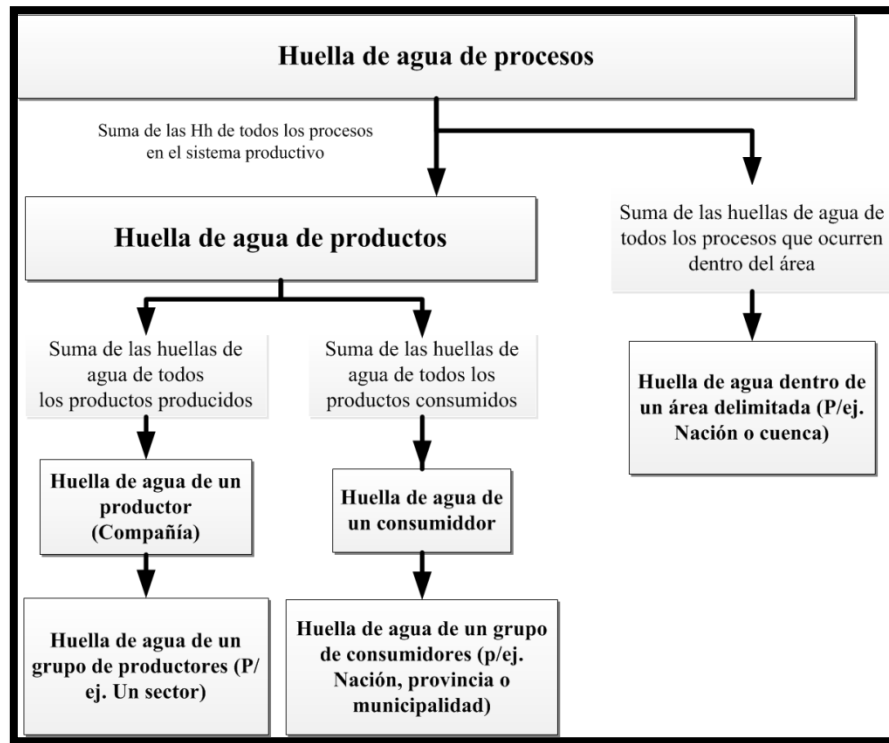


Figura 3.2. Proceso de huella hídrica multidimensional. Modificado de Hoekstra (2011)

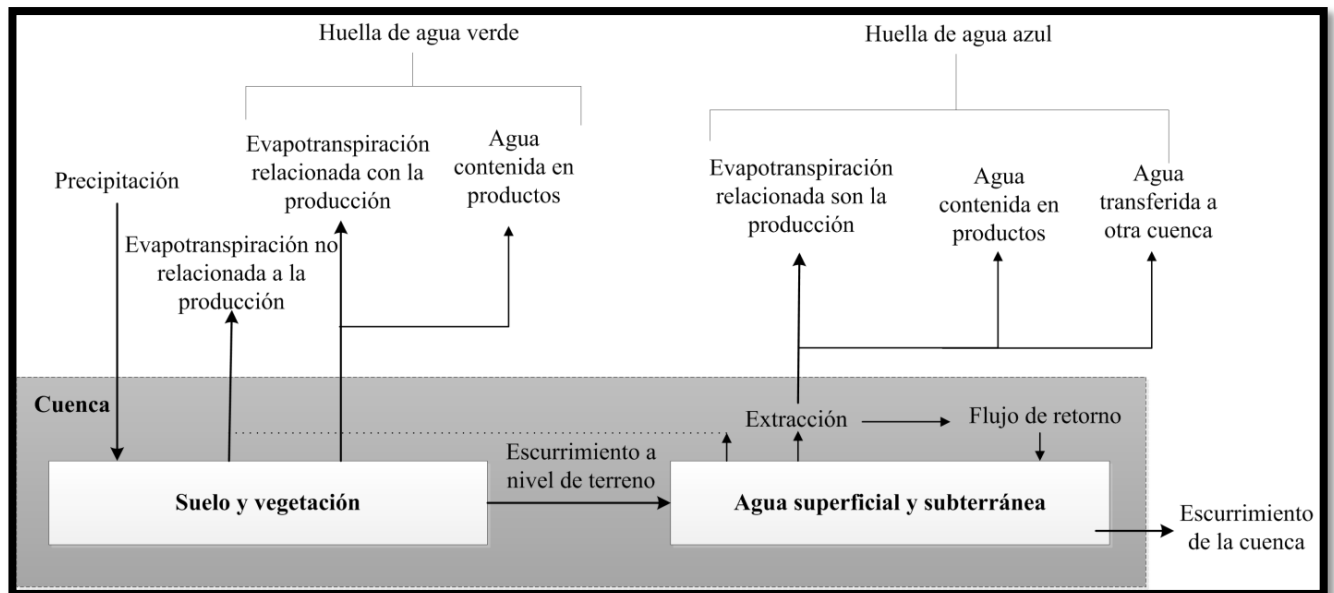


Figura 3.3. Huella de agua verde y azul. Modificado de Hoekstra (2011)

En el cálculo de la *Hh*, la incorporación de agua (*In*), se refiere a la cantidad de agua necesaria para producir un producto y la pérdida de flujo por retorno se refiere al flujo que no está disponible para reutilización dentro de la misma cuenca en un periodo de tiempo, porque es descargada al mar o a otra cuenca (Hoekstra, 2011).

La *Hh* azul en un paso del proceso, es calculada como:

$$Hh_{azul} = Ev_a + In_a + PF \left[\frac{Vol}{t} \right] \quad \text{Ec.3.5}$$

donde Ev_a es la evaporación del agua azul, In_a es la incorporación del agua azul y PF es el periodo de retorno (en unidades de caudal).

La *Hh* verde es el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso productivo, es particularmente relevante para la agricultura y los procesos forestales, donde se refiere a la evapotranspiración total de agua de lluvia de las plantaciones. La *Hh* verde se calcula como:

$$Hh_{verde} = Ev_v + In_v \left[\frac{Vol}{t} \right] \quad \text{Ec.3.6}$$

La *Hh* gris de un proceso es un indicador del grado de contaminación del agua dulce asociada al mismo proceso. Se calcula como:

$$Hh_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \left[\frac{Vol}{t} \right] \quad \text{Ec. 3.7}$$

donde L es la carga de contaminante que llega al cuerpo de agua (en masa/tiempo), C_{max} es la máxima concentración aceptable del contaminante en el agua (en masa/volumen) y C_{nat} es la concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua receptor (en masa/volumen).

Para sustancias hechas por el hombre que no presente en forma natural en el agua o si las concentraciones de éstas son muy bajas, $C_{nat} = 0$.

La *Hh* total para un proceso es:

$$Hh_{proc} = Hh_{verde} + Hh_{azul} + Hh_{gris} [Volumen/mas a] \dots \text{Ec.3.8}$$

El *Hh* no es una medida de la severidad del impacto de la contaminación y del consumo de agua en los ambientes locales (Hoekstra, 2011). México es el 11° país con mayor huella de agua en el mundo constituida por 73% verde, 11% azul y 16% gris (WWF, 2012).

La producción agrícola es el componente mayoritario de la *Hh*, seguido por el sector pecuario (pastoreo y producción), juntos representan el 91% de la *Hh* en México, el porcentaje restante es atribuido al consumo doméstico e industrial y agua gris (9%) (WWF, 2012). Baril, Marion, & Reynaga (2013), señalan que en México, la huella de agua per cápita es en promedio de 4.1 m³ de agua, por sus actividades domésticas diarias, sin embargo, la huella más alta se presenta en el Noreste del país (226.5

m³ /hab año⁻¹) donde el grado de presión hídrica es fuerte y el agua renovable media es alrededor de 2%.

3.2.2.2 Índice de Pobreza de Agua

El índice de pobreza de agua (*IPA*) es una herramienta holística basada en la participación de los actores en el uso de agua y que incluye mediciones de acceso, calidad y variabilidad de agua, agua para comida y otras finalidades productivas, capacidad de administración del agua, aspectos ambientales y aspectos de escala espacial, con la finalidad de mejorar la efectividad de administración del recurso a escala de comunidad.

El *IPA* se enfoca a las comunidades más pobres ya que son las que sufren de los accesos más inadecuados al agua. El índice combina información física, social, ambiental y económica, asociada con la escasez de agua, acceso al agua y la capacidad de usar agua para fines productivos. El *IPA* fue desarrollado en colaboración con científicos, usuarios y tomadores de decisión, que llegaron a la conclusión de que existen cinco componentes clave: recursos, acceso, capacidad, uso y ambiente, combinados en la siguiente expresión:

$$IPA = \frac{W_r R + W_a A + W_c C + W_u U + W_e E}{W_r + W_a + W_c + W_u + W_e} \quad \text{Ec.3.9}$$

donde *IPA* es el valor de pobreza de agua para una locación particular, *W* se refiere al peso para los componentes: *R* (Recursos), *A* (acceso), *C* (Capacidad), *U* (Uso) y *E* (Ambiente).

Las variables que fueron usadas en cada componente se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Componentes y variables del Índice de Pobreza de Agua. Modificado de Sullivan et al. (2003)

Componente	Variable
Recursos (<i>R</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de agua superficial y subterránea usando técnicas hidrológicas e hidrogeológicas. • Evaluación cuantitativa y cualitativa de la viabilidad y confiabilidad de los recursos. • Evaluación cualitativa y cuantitativa de la calidad de agua.

Acceso (A)	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de viviendas que cuentan con agua potable. • Reportes de conflictos sobre el uso de agua. • Porcentaje de población con acceso a sanitarios. • Porcentaje de agua acarreada por mujeres. • Tiempo gastado en la colecta de agua. • Acceso a cobertura de riego ajustada por las características climáticas.
Capacidad (C)	<ul style="list-style-type: none"> • Riqueza representada por la propiedad de artículos duraderos. • Nivel de educación. • Miembros de asociaciones de agua. • Porcentaje de viviendas que presentan enfermedades relacionadas con el agua. • Porcentaje de viviendas que reciben pensión/remesa o salario.
Uso (U)	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de consumo de agua doméstica. • Uso de agua en la agricultura, expresada como la proporción de tierra regada por el total de tierra cultivada. • Uso de agua en la ganadería, basado en las necesidades de agua estándares para el ganado. • Uso de agua en la industria (Propósitos distintos al agrícola y ganadero).
Ambiental ^a (E)	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de los recursos naturales por la población. • Reportes de pérdidas de cultivos durante los últimos 5 años. • Porcentaje de viviendas que reportan erosión en su propiedad.

Nota: ^a Estas variables se usan en ausencia de datos aceptables que representen la integridad ambiental o los requerimientos ambientales de agua.

Considerando que la mejor situación de pobreza, es representada con un *IPA* de 100 y la peor con 0. Este índice sólo ha sido aplicado en algunas de las comunidades de tres países del mundo (Sri Lanka, Tanzania y Sudáfrica), encontrándose que la época de estiaje es la que determina el componente de acceso al agua, además de que las comunidades que en promedio tienen mayor pobreza de agua son las de Sri Lanka ($IPA = 38$) (Sullivan et al., 2003).

3.3 Métodos estadísticos para la construcción de índices

Habitualmente, los índices se integran usando una función matemática. En este sentido, Nardo *et al*, 2005 describen de manera sencilla los 10 pasos para construir un índice o indicador compuesto. De manera resumida, estas etapas se describen a continuación:

1. **Desarrollo de un marco teórico:** se determina el fenómeno a ser analizado, así como sus sub componentes, los indicadores a ser usados y el método de ponderación de los mismos.
2. **Selección de variables:** se identifica la disponibilidad de información, se evalúa las bondades y desventajas de cada variable (indicador) y se resumen en tablas identificando las fuentes, si es necesario ajustan de escalas y las características de cada uno.

3. **Análisis multivariado:** se pueden construir subíndices, si los indicadores tienen suficiente información para describir el fenómeno. Se pueden aplicar técnicas como el *ACP* o técnicas clúster.
4. **Atribución de datos faltantes:** borrar o reajustar los datos faltantes con la sustitución de valores estadísticos de la muestra (moda, media, mediana, etc.).
5. **Normalización de datos:** Elegir un método adecuado de normalización, de acuerdo con las propiedades de los indicadores (estandarización, modulación, escalas categóricas, etc.).
6. **Ponderación y agregación:** no existe un consenso acerca de las metodologías que deben emplearse en la ponderación de los indicadores, en realidad las visiones son variadas, pero se debe aplicar alguna técnica de ponderación, ya sea subjetiva o estadística. Los métodos de agregación más comunes son el lineal (cuando los indicadores tienen las mismas unidades), de otra manera, la agregación geométrica.
7. **Robustez y sensibilidad:** por un lado, identificar las fuentes de incertidumbre, y por el otro, probar con diferentes combinaciones de técnicas para normalizar, estandarizar, agregar y ponderar los indicadores para ver el efecto de cada proceso en el índice.
8. **Conexión con otras variables:** correlacionar el indicador compuesto con algún fenómeno relacionado que sea medible, probar las conexiones con variaciones del índice como lo determinado en el análisis de sensibilidad.
9. **Regresar a los detalles:** descomponer el índice en subíndices o indicadores para apreciar el desempeño de un lugar en específico.
10. **Presentación y divulgación:** elegir las herramientas de presentación (gráficas, tablas, diagramas, etc.) acordes al tipo de audiencia a la que se va a exponer.

3.3.1 Normalización y ponderación

En particular, la normalización y ponderación de datos es una de las etapas más importantes, ya que es la que determina la inclinación del índice hacia una condición u otra. De manera general, cuando no se cuenta con información consensuada para la asignación de pesos específicos, se recurre a asignar el mismo peso a todos los indicadores dentro del sistema. Posteriormente, cuando los pesos se determinan de manera estadística, se debe tener especial cuidado en la correlación de las variables ya que deben incluirse sólo aquellas que sean independientes (Nardo *et al.*, 2005).

Una vez descrita la manera general en la que se diseñan los índices, los esfuerzos a nivel internacional para definir índices que describan la sustentabilidad a diferentes escalas han sido diversos, y en ellos se ha probado con la combinación de distintos métodos e indicadores (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Métodos de normalización, ponderación y agregación de algunos índices. Modificado de Böhringer y Jochem (2007). Más índices pueden ser encontrados en extenso en la revisión de Singh *et al.* (2009).

Índice	Normalización	Ponderación	Agregación
Índice de Planeta Vivo (IPV)	$\left(\frac{X_i, t}{X_i, t-1}\right)$	Igual	$\sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \frac{X_i, t}{X_i, t-1}}$
Huella ecológica (EF)	Transformación en km ²	Igual	$\sum_{i=1}^N X_i$
Índice de desarrollo de las ciudades (IDC)	$\frac{X_i - X}{\bar{X} - X}$	ACP/Expertos	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i X_i$
Índice de Desarrollo Humano (IDH)	$\frac{X_i - X}{\bar{X} - X}$	Igual	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$
Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI)	Desviación estándar	Igual/Expertos	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$
Índice de Desempeño Ambiental (EPI)	Mejor=100 Peor=0	ACP/Expertos	$\sum_{i=1}^N W_i X_i$
Índice de Vulnerabilidad Ambiental (IVA)	Objetivo=1 Peor=7	Igual	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$
Índice de Bienestar Económico Sustentable (IBES)	Monetizado	Igual	$\sum_{i=1}^N X_i$
Índice de Bienestar (IB)	Mejor=100 Peor=0	Subjetivo (No derivado)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$
Índice Legítimo de Ahorros (ILA)	Monetizado	Igual	$\sum_{i=1}^N X_i$
Producto Interno Bruto Ambientalmente Ajustado (PIBAA)	Monetizado	Igual	$\sum_{i=1}^N X_i$

Con variables representadas desde X_i hasta N , pesos con W_i , países por i y años por t .

3.3.2 Análisis multivariado

Los métodos estadísticos multivariados, hacen un tratamiento de datos simultáneos en un conjunto de variables (Sharma, 1995). En un estricto sentido estadístico, ellos se refieren al estudio colectivo de un grupo de variables, tomando en consideración una estructura de correlación dentro del grupo. También puede incluir la aplicación de técnicas de regresión múltiple (Abeyasekera, 2005).

Es esencial, previo a la elección del método de estadístico para la construcción del índice, estudiar a detalle, la naturaleza del fenómeno que se quiere medir para definir si se puede explicar con indicadores aislados o si es necesaria la agrupación de tales indicadores en subíndices.

3.3.2.1 Análisis factorial y de Componentes Principales

En la literatura, el análisis de Componentes Principales (*ACP*) es un caso especial del Análisis Factorial (*AF*), inclusive en algunos paquetes estadísticos incluyen al *ACP* como una opción al *AF*. Esta visión es errónea, debido a que ambas técnicas tienen diferencias. La confusión puede provenir, en parte del hecho, de que los componentes principales fueron introducidos para proveer un pequeño número de las variables “más fundamentales” que determinan los valores de las p variables originales (Hotelling, 1933). Además de que en la práctica, no se tiene la misma definición de las técnicas. En particular, algunos autores usan el término de *AF* para abarcar un amplio espectro de métodos multivariados (Jolliffe, 2002). Ambos, *AF* y *ACP* tienen el objetivo de reducir la dimensión de los datos pero las aproximaciones para hacerlo, son diferentes en cada técnica.

La idea básica del *AF* es que p son las variables aleatorias observadas, x son las funciones lineales de m ($< p$) variables aleatorias hipotéticas, o *factores comunes*, tal que sí, X_1, X_2, \dots, X_p son variables y f_1, f_2, \dots, f_m son factores, entonces (Jolliffe, 2002):

$$\begin{aligned} X_1 &= \lambda_{11}f_1 + \lambda_{12}f_2 + \dots + \lambda_{1m}f_m + \varepsilon_1 \\ X_2 &= \lambda_{21}f_1 + \lambda_{22}f_2 + \dots + \lambda_{2m}f_m + \varepsilon_2 \end{aligned}$$

⋮

$$X_p = \lambda_{p1}f_1 + \lambda_{p2}f_2 + \dots + \lambda_{pm}f_m + \varepsilon_p \quad \text{Ec. 3.10a}$$

donde $\lambda_{jk}, j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, m$ son constantes llamadas peso del factor, y $\varepsilon_j, j = 1, 2, \dots, p$ son términos de error, a veces llamados factores específicos (porque ε_j es específico a x_j , mientras que f_k son comunes a varios x_j). La ecuación 3.10 se puede reformular integrando matrices:

$$x = \Lambda f + \varepsilon \quad \text{Ec. 3.10b}$$

El *AF* intenta reducir las dimensiones de p a m utilizando un modelo relacionado con X_1, X_2, \dots, X_p a m variables hipotéticas o latentes. Entonces una de las diferencias entre *AF* y *ACP* es que el segundo no tiene un modelo explícito (Jolliffe, 2002).

En la forma básica del modelo del *AF*, se consideran tres términos correspondientes a la contribución de factores comunes, factores específicos y mediciones de error (Reyment & Jvreskog, 1996) o el modelo puede hacerse de manera no lineal. Existen tres supuestos asociados con el modelo factorial:

$$(i) \quad E[e] = 0, E[f] = 0, E[x] = 0$$

En el primer supuesto, se asume el error implícito en la mayoría de los modelos estadísticos, es conveniente y no pierde generalidad. Este supuesto puede no ser verdad, pero si no lo es, la ecuación 3.10b puede ser adaptada para lograrlo.

$$(ii) \quad \begin{aligned} E[ee'] &= \psi(\text{diagonal}) \\ E[fe'] &= 0(\text{dematriz de ceros}) \\ E[ff'] &= I_m(\text{una matriz de identidad}) \end{aligned}$$

Dentro de este supuesto se asume en principio que los términos de error no están correlacionados. Después, en la segunda se asume que los factores comunes no se correlacionan con factores específicos. Sin embargo, la tercera asume que los factores comunes pueden estar correlacionados (oblicuo) en lugar de no correlacionarse (ortogonal).

$$(iii) \quad \text{Para algunos propósitos, como las pruebas de hipótesis para decidir entre un valor adecuado de } m, \text{ es necesario asumir las distribuciones. Usualmente se asume la normalidad aunque en el } ACP, \text{ los resultados son independientes a la distribución.}$$

La formulación detallada del *AF* puede ser consultada en el libro de Jolliffe (2002).

En cualquiera de los dos tipos de procesamiento (*ACP* o *AF*), es necesario corroborar que la matriz de datos a analizar, sea apropiada para los métodos, debido a que pueden existir inconsistencias dentro de los datos que causen un sesgo en el análisis. Debido a lo anterior, existen técnicas diseñadas específicamente para ser aplicadas a matrices de correlación, anterior a cualquier procedimiento de factorización (Dziuban & Shirkey, 1974):

Los procedimientos más comunes para probar la adecuación de los datos a los análisis factoriales son, la prueba de esfericidad de Bartlett (Bartlett, 1950) y el criterio de Kaiser-Mayer-Olkin (Kaiser, 1970).

- Prueba de esfericidad de Bartlett es calculada como:

$$\text{Bartlett} = - \left[(N - 1) \frac{1}{6} (2P + 5) \right] \log_e |R| \quad \text{Ec. 3.11}$$

donde N es el tamaño de muestra, P es el número de variables, y $|R|$ es la determinante de la matriz de correlación.

Para tamaños de muestra grandes, la estadística es aproximadamente distribuida como Chi-cuadrada con $\frac{1}{2}(P - 1)$ grados de libertad y con la hipótesis asociada de que la matriz muestra de correlación viene de una población multivariada normal en la cual, las variables de interés son independientes.

El criterio de Kaiser-Mayer-Olkin (KMO), es definido como:

$$\text{KMO} = \frac{\sum \sum_{j \neq k} r_{jk}^2}{\sum \sum_{j \neq k} r_{jk}^2 + \sum \sum_{j \neq k} q_{jk}^2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde las q^2 son los cuadrados de los elementos fuera de la diagonal de una anti-matriz de correlación $SR^{-1}S$ y las r^2 son los cuadrados de los elementos fuera de la diagonal de la matriz de correlaciones original.

Los valores de adecuación del KMO, varían entre 0 y 1, donde 1 es la mayor adecuación para un análisis factorial.

3.3.2.2 Análisis clúster

El análisis clúster consiste en la organización de una colección de patrones en grupos, con base en su similitud. El arreglo organiza cada dato y lo acomoda en el grupo más similar a un patrón, cuando el dato analizado no se asemeja al patrón grupal, entonces se acomoda en un grupo con patrón diferente. Debido a que la similitud es fundamental en la determinación de los grupos, se han de desarrollado múltiples técnicas para representar los datos, medir la similitud entre ellos y agruparlos. Las medidas de similitud o proximidad son usualmente una medida de distancia entre dos puntos. La más simple es la distancia Euclídiana, que es la distancia recta entre dos puntos (Jain, Murty, & Flynn, 1999):

$$\begin{aligned} d_2(X_i, X_j) &= \left(\sum_{k=1}^d (X_{i,k} - X_{j,k})^2 \right)^{1/2} \\ &= \|X_i - X_j\|_2 \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.13}$$

donde X_i y X_j son puntos de dos clústers diferentes y d_2 es la distancia euclídiana entre dos puntos.

Esta distancia es útil cuando el grupo de datos es compacto o se pueden agrupar en grupos aislados (Mao y Jain, 1996). La desventaja en el uso de estas técnicas radica en la tendencia de las grandes escalas en dominar las otras. Este problema se atiende mediante la normalización de los datos (hacia un rango de varianza común) o utilizando otros métodos de ponderación. La correlación linear entre características también puede distorsionar las mediciones de varianza; lo que se puede mejorar aplicando la distancia cuadrada de Mahalanobis:

$$d_M = (A_i, A_j) = (A_i - A_j) \Sigma^{-1} (A_i - A_j)^T \quad \text{Ec. 3.14}$$

donde A_i y A_j son filas de vectores asumidos y Σ es la matriz de covarianza muestreada del proceso de generación de patrones; $d_M(\cdot, \cdot)$, asignando diferentes pesos a diferentes características con base en sus varianzas y correlaciones lineares.

3.3.2.2.1 Técnicas de agrupación

Los algoritmos particionales de clúster, obtienen una simple partición de los datos, en lugar de una estructura de grupos, como el dendograma producido con la técnica clúster. Las técnicas de partición llevan la ventaja cuando se analizan bases de datos grandes, sin embargo, una de las limitantes de estos algoritmos es elegir el número apropiado de grupos para los datos (Jain et al., 1999).

3.3.2.2.1.1 Algoritmos de error cuadrático

Este criterio es el más usado en las técnicas de agrupación particional, el cual tiende a trabajar bien con grupos aislados y compactos. El error cuadrático de la agrupación α de un grupo de patrones β (que contienen K clústers) es:

$$e^2(\beta, \alpha) = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} \|X_i^{(j)} - C_j\|^2 \quad \text{Ec. 3.15}$$

donde $X_i^{(j)}$ es el i ésimo patrón perteneciente al j ésimo clúster y C_j es el centroide del j ésimo clúster.

El k medias es el algoritmo más simple que emplea el error cuadrático medio (MacQueen, 1967). K medias inicia con una partición inicial al azar del grupo de datos, después encuentra los centroides (promedio de los datos) iniciales de cada clúster (centroides K). Posteriormente reasigna los objetos al centroide del clúster más cercano, hasta que se alcanza el criterio de convergencia (por ejemplo, la reasignación de un clúster a otro, no se hace si el valor del error cuadrático medio deja de decrecer después de una serie de repeticiones) (Jain et al., 1999).

Suponga que $X = \{X_i\}, i = 1, \dots, n$ es una serie de puntos n d - dimensional que se quieren agrupar en una serie de grupos K.

Desafortunadamente, este algoritmo es vulnerable a datos atípicos dentro de las variables. Además, otra de las desventajas de este algoritmo es que es sensible a la partición inicial y puede converger en un mínimo del error cuadrático local, si no se elige apropiadamente el método de partición inicial (Velmurugan & Santhanam, 2010).

Por tal motivo, recientemente en lugar de K medias, se usa el algoritmo K medoides, donde los objetos representativos llamados medoides, son empleados en lugar de los centroides (Di Giuseppe, Jona Lasinio, Esposito, & Pasqui, 2013). Debido a que K medoides usa objetos más centralizados dentro del clúster, es menos sensible a datos atípicos que K medias (Park & Jun, 2009). Dentro de K-medoides, *Partitioning Around Medoids* (PAM) es conocido como el más poderoso, sin embargo, la limitante de PAM es que es ineficiente con series de datos grandes, debido a su complejidad de cálculo (Kaufman & Rousseeuw, 1990; Ng & Han, 2002).

Uno de los grandes retos de la regionalización es la determinación del número óptimo de regiones. Por esto se han desarrollado métodos de validación, los más aplicados son: los externos, que comparan los grupos de salida con alguna estructura de datos conocida, y los relativos, que comparan diferentes grupos de entrada y calcula la compactación dentro del grupo (varianza) y la separación entre grupos (distancia), simplificando el resultado en un índice (Baarsch & Celebi, 2012).

Algunos de los índices para medir la consistencia de la regionalización y determinar el número de adecuado grupos son los siguientes (Baarsch y Celebi, 2012):

- 1) Davies-Bouldin (DB) (Davies & Bouldin, 1979), mide la compactación entre clúster con relación a la distancia entre ellos, se considera tomar el valor mínimo.
- 2) Calinski-Harabasz (G1) (Caliński & Harabasz, 1974), hace una relación entre la matriz de dispersión entre clústers y la matriz de dispersión *intra* clúster, se toma el valor máximo para la elección del número de clústers.
- 3) Solhouette (S) (Rousseeuw, 1987), al igual que Bouldin, también mide la compactación y separación pero con base en el valor medio de cada punto en el conjunto de datos, en este caso el valor que más se acerque a 1 es mejor.
- 4) Hubert y Levine (G3) (Hubert & Levin, 1976), está basado en la suma de las matrices de dispersión de cada clúster.

Los criterios que se toman para cada índice y la ecuación para calcularlo, se engloban en la siguiente tabla.

Tabla 3.4. Cálculo de índices para selección de número de grupos.

Índice	Formula	Criterio de selección de número de grupos
Davies – Bouldin (DB)	$DB(u) = \frac{1}{u} \sum_{q=1}^u \max_{r, q \neq r} \left[\frac{S_q + S_r}{d(q, r)} \right]$	Mínimo
Calinski – Harabasz (G1)	$G1(u) = \frac{tr(B_u)/(u-1)}{tr(W_u)/(n-u)}, G1(u) \in R_+$	Máximo
Hubert y Levine (G3)	$G3(u) = \frac{D(u) - l_w D_{min}}{l_w D_{max} - l_w D_{min}}, G3(u) \in (0; 1)$	Mínimo
Silhouette (S)	$S(u) = \frac{1}{u} \sum_{j=1}^n S_q$	Máximo

donde n es el número de objetos ($i = 1, \dots, n$); m es el número de características ($j = 1, \dots, m$); u es el número de grupos ($q, r, s = 1, \dots, u$); S_+, S_- son los números de pares de distancia, consistentes e inconsistentes, respectivamente; $tr(B_u), tr(W_u)$ es la traza de la matriz de covarianza, entre grupos (B_u) y dentro de grupos (W_u) respectivamente; K_q es el clúster q ; $S_q = \sqrt[t]{(1/n_q) \sum_{i \in K_q} \sum_{j=1}^m |X_{ij}^q - Z_{qj}|^t}$ es la medición de dispersión para objetos del grupo q (K_q), donde para $t=1$ es la distancia promedio de objetos en el clúster q desde el centro de gravedad, por ejemplo, el medoide del grupo, y para $t=2$ es la desviación estándar de la distancia de los objetos en el clúster q desde el centro de gravedad, p/ej. El medoide en el grupo (para el grupo r , las mediciones S_r pueden ser análogamente obtenidas); $d(q, r) = \sqrt[p]{\sum_{j=1}^m |Z_{qj} - Z_{rj}|^p}$ es la medida entre los centros de gravedad, p/ej. los medoides (Z_{qj}, Z_{rj}) de los grupos r y q ; $D(u)$ es la suma de las distancias dentro de grupos; l_w es el número de distancias dentro de grupos; D_{min}, D_{max} distancia dentro de grupos (Tomado de Mikulec y Fijałkowska-Kupis, 2012).

Como se mencionó, uno de los pasos decisivos en la determinación del método clúster, es el método de partición inicial:

1. Selección al azar: Selecciona i objetos al azar de todos los datos.
2. Selección sistemática: Ordena todos los objetos en función de los valores de la variable elegida (primera variable por ejemplo). Divide el rango de los valores de arriba en k intervalos iguales y selecciona un objeto al azar de cada intervalo.
3. Muestreo: Toma el 10% de muestreo al azar de todos los objetos y diseña una fase preliminar de clústers con base en las muestras y usando el algoritmo propuesto. Los clústers resultantes son usados como medoides/medias iniciales.
4. Objetos exteriores: Selecciona i objetos más alejados del centro.
5. Mezcla Gaussiana: Asumiendo que los objetos son derivados de componentes Gaussianos, estima cada vector medio de modelos Gaussianos a través de la Maximización del algoritmo de máxima expectativa (ME) (Vlassis & Likas, 2002) y encuentra el objeto más cercano al vector estimado medio.

CAPÍTULO 4:

Metodología general

En este capítulo se describe de manera general la metodología de investigación, se determina en cuál de los siguientes capítulos se aborda cada sección metodológica de manera detallada.

La sección 1, que integra la selección, espacialización, modulación y distribución de variables, es la base de esta investigación y por tanto, es común a los capítulos 5, 6 y 7, sin embargo, únicamente se describe de manera detallada en el capítulo 5 de regionalización de subcuencas urbanas. Las siguientes secciones metodológicas (2, 3 y 4) son específicas a cada capítulo (5, 6 y 7 respectivamente).

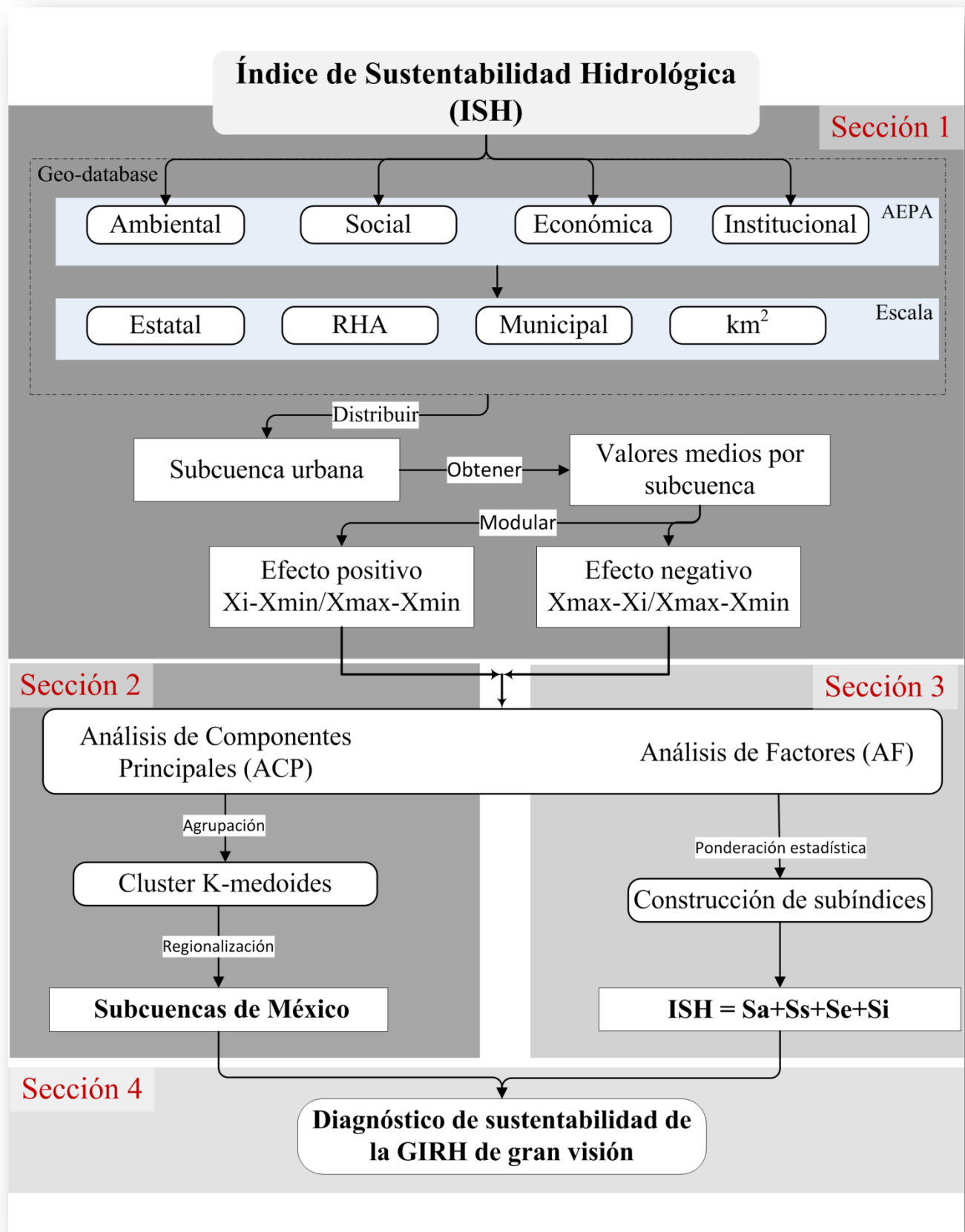


Figura 4.1. Método del Índice de Sustentabilidad Hídrica para subcuencas urbanas. *Sa, Ss, Se, Si*: subíndices de las AEPA ambiental, social, económica e institucional, respectivamente. RHA: Región Hidrológico-Administrativa.

Los productos de este trabajo son:

1. Regionalización de subcuencas urbanas de México (Capítulo 5).
2. Índice de Sustentabilidad Hidrológica para cuencas urbanas de México (Capítulo 6).
3. Diagnóstico de sustentabilidad de la GIRH de gran visión para México (Capítulo 7).

4.1 Sección 1: Preparación de variables

Se hizo una búsqueda exhaustiva de variables representativas del agua, en las bases de datos nacionales e internacionales. Se eligieron variables con información espacial a nivel nacional para identificar regiones con características distintas en el país.

Las variables fueron elegidas para modelar cada una de las AEPAs (Ambiental, social, económica e institucional), por lo que se integraron cuatro geo-databases.

Se determinó el efecto de las variables haciendo reuniones periódicas con expertos del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). El efecto consistió en hacer que los valores positivos de las variables fueran positivos para la sustentabilidad hídrica dentro de cada AEPA. Usando la dirección del efecto, se moduló la escala de valores de las variables, para obtener un rango de 0 a 1. Donde 0 es la peor condición y 1 es la mejor condición.

La metodología detallada se presenta en el capítulo 5.

4.2 Sección 2: Análisis de Componentes Principales

Se eligió el Análisis de Componentes Principales (*ACP*) para reducir la dimensión de las geo-databases. Posteriormente se aplicó el método clúster K medoides para determinar un mapa de regiones para México.

La metodología detallada se presenta en el capítulo 5.

4.3 Sección 3: Análisis de factores

Se utilizaron las geo-databases construidas en la sección 1, que fueron distribuidas espacialmente por subcuenca y moduladas con la dirección del efecto para la sustentabilidad.

En este caso se utilizó el Análisis de factores (*AF*) con una rotación *varimax* para facilitar la identificación de diferencias entre factores. El peso de los factores dentro de cada AEPA fue usado para la ponderación del ISH. Los factores obtenidos dentro de cada AEPA fueron modulados con la estrategia usada para las variables iniciales (0 = peor condición, 1 = mejor condición).

Tomando como base que la sustentabilidad está definida por la intersección de los subsistemas, el ISH está formado por cuatro subíndices (uno por cada AEPA). Por tanto, los subíndices ambiental (S_a),

social (S_s), económico (S_e) e institucional (S_i), se confaron por los indicadores ponderados en cada uno de los campos. Por eso, el peso específico de éstos se consideró como igual. Como resultado, la sumatoria de los pesos específicos de los subíndices es de 1.

Es importante recalcar que en este paso, la ponderación de las variables se hizo usando un *AF* ya que demuestra el nivel de importancia de cada una dentro de la AEPA:

$$S_a = P_{a_1}I_{a_1} + P_{a_2}I_{a_2} + P_{a_3}I_{a_3} + \beta_{a_n}I_{a_n} \quad P_{a_1} + P_{a_2} + P_{a_3} + P_{a_n} \dots = 0.25 \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$S_s = P_{s_1}I_{s_1} + P_{s_2}I_{s_2} + P_{s_3}I_{s_3} + P_{s_n}I_{s_n} \quad P_{s_1} + P_{s_2} + P_{s_3} + P_{s_n} \dots = 0.25 \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$S_e = P_{e_1}I_{e_1} + P_{e_2}I_{e_2} + P_{e_3}I_{e_3} + P_{e_n}I_{e_n} \quad P_{e_1} + P_{e_2} + P_{e_3} + P_{e_n} \dots = 0.25 \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$S_i = P_{i_1}I_{i_1} + P_{i_2}I_{i_2} + P_{i_3}I_{i_3} + P_{i_n}I_{i_n} \quad P_{i_1} + P_{i_2} + P_{i_3} + P_{i_n} \dots = 0.25 \quad \text{Ec. 4.6}$$

donde, n es el número de indicadores que conformaran cada subíndice, I son los indicadores que conformarán cada subíndice modulados mediante el efecto, P es el peso específico de cada indicador.

Por último, se obtuvo el ISH para las subcuencas urbanas del país considerando los valores de los indicadores y sus pesos específicos, esto permitió obtener un valor de sustentabilidad hídrica de cada subcuenca urbana y clasificarlas en función del mismo.

Finalmente, el índice de sustentabilidad hídrica se construye de la siguiente forma:

$$ISH = 0.25S_a + 0.25S_s + 0.25S_e + 0.25S_i \quad \text{Ec. 4.7}$$

donde; a , s , e , i corresponden al valor de los subíndices de las AEPA ambiental, social, económica e institucional.

4.4 Sección 4: Discusión de resultados

Las regiones obtenidas en el capítulo 5 se describieron con base en la condición de sustentabilidad obtenida con el ISH en el capítulo 6. De igual forma, se presentan algunas subcuencas particulares como casos demostrativos.

CAPÍTULO 5:

Regionalización de subcuencas urbanas de México

Este capítulo está redactado a manera de artículo científico de manera extendida. Una versión resumida está siendo revisada por la revista *Environmental Management* de Springer con la clave: EMVM-D-15-00747. Se presenta la metodología referente a la sección 1 y 2 definidas en el capítulo 4 de metodología general.

5.1 Introducción

El desarrollo de estrategias de gestión del agua a nivel regional, nacional y local, son indispensables para detener la explotación inadecuada de los recursos hídricos (United Nations, 2000). La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un nuevo paradigma, y a la vez, proceso sistémico multidimensional que busca el desarrollo sustentable mediante la articulación de los sistemas involucrados: ambiental, económico, social e institucional. Este proceso reconoce las interacciones entre los sectores que usan o abusan del agua y las necesidades ambientales (GWP, 2009). Además, este tipo de enfoque se considera como una estrategia de gran alcance, ya que tiene en cuenta la información clave de las dimensiones consideradas y las interrelaciones sistémicas entre ellos.

La articulación de los sectores relacionados con el agua, se refleja en un sistema dinámico (socioecosistema), que enfatiza las respuestas del ecosistema por el uso de recursos y la retroalimentación de la población ante los cambios en el ecosistema (Berkes, Folke, & Colding, 2000). La gestión del agua en México se hace con base en dos modelos contrapuestos. El tradicional, que es equivalente al modelo generalizado y centralizado de la administración federal de recursos económicos. El segundo, bajo el concepto de una gestión integrada, siendo ésta, una naciente forma de gestión descentralizada, con instituciones oficiales articuladas con grupos de la sociedad civil, que demandan e incrementan la participación pública en la toma de decisiones. Aunque este último es el sistema más incluyente e integrado, claramente los organismos federales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se resisten, voluntaria o involuntariamente, a su desarrollo e implementación (Scott & Banister, 2008). De manera que en México la GIRH está centralizada en las oficinas regionales de la CONAGUA, quienes coordinan la administración del agua a través de los 13 Organismos de cuenca (Oc).

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), establece la GIRH de manera que cada Oc, atiende los problemas de una Región Hidrológico-Administrativa (RHA), las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas y subcuencas, consideradas como las unidades básicas de gestión integrada de los recursos hídricos, esta delimitación respeta los límites políticos para facilitar la administración e integración de la información socioeconómica (CONAGUA, 2012). A su vez, los Oc se apoyan en los comités y consejos de cuenca locales, además de los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS), que están integrados por servidores públicos y pueden incluir organizaciones independientes y de la sociedad civil, que no tienen voto en la toma de decisiones (DOF, 2013).

Sin embargo, el soporte para la planeación y la toma de decisiones de GIRH en México, debe considerar las características específicas de las RHA. Por ejemplo, los atributos sociales, económicos, ambientales e institucionales, para lograr que la gestión del agua se ajuste a las condiciones reales en el contexto de las complejas interacciones que ocurren al interior de un socioecosistema.

En este sentido, la demanda de agua en México y en el mundo, es determinada principalmente por el rápido crecimiento de la población, además de otros factores (Al Radif, 1999). Por lo que, evaluar el socioecosistema de las cuencas urbanas, es un desafío para la gestión del agua. Una cuenca urbana, es aquella que contiene total o parcialmente a una zona urbana (Platt, 2006). Además, la GIRH reconoce la entrañable relación entre las zonas urbanas y las cuencas hidrológicas, así como la importancia de identificar sus características.

Debido a lo anterior, en este trabajo se propone una metodología que sirva de apoyo a la regionalización socioecosistémica de las cuencas urbanas de México con base en variables relacionadas con la sustentabilidad hídrica para identificar zonas con características similares y establecer estrategias de planeación y manejo regional de los recursos hídricos en México.

5.1.1 Algoritmos de regionalización

La gestión de los recursos hídricos, necesita considerar el arreglo e interacción de los atributos multidimensionales presentes en las regiones, para detectar la homogeneidad de las cuencas hidrológicas (Allende, Mendoza, López Granados, & Morales Manilla, 2009). En estos casos, las técnicas de regionalización permiten agrupar atributos similares y facilitan la toma de decisiones en distintas disciplinas del conocimiento.

En efecto, el uso de técnicas estadísticas multivariadas permite, entre otras cosas, determinar regiones con características similares como: regiones bioclimáticas en México (Pineda-Martínez, Carbajal, & Medina-Roldan, 2007), de niebla y aridez (Timilsena & Piechota, 2008), de sequía (Shamshirband et al., 2015), de precipitación (Bravo Cabrera, Azpra Romero, Zarraluqui Such, Gay García, & Estrada Porrúa, 2012; Darand & Daneshvar, 2014) e inclusive, zonas socio-agrícolas (Ahmed, Mahmood, & Kausar, 2014).

Dentro de las principales técnicas utilizadas para regionalizar atributos se encuentran: el Análisis de Componentes Principales (ACP) (Baeriswyl & Rebetez, 1997; Pineda-Martínez et al., 2007), los algoritmos clúster (Fuzzy C-medias, K medias, K medoides, jerárquico y otras) (Ahmed et al., 2014), o su combinación (Darand & Daneshvar, 2014; Shamshirband et al., 2015; Zhang, Wu, Wang, Yuan, & Zhao, 2011) y dentro de los métodos menos comunes se encuentran los Árboles de Regresión y Clasificación (CART) (Laaha & Blöschl, 2006; Mertens, Nestler, & Huwe, 2002).

En el ámbito de los recursos hídricos, generalmente se usan los límites de cuenca para regionalizar: características de sequía (Rajsekhar, Mishra, & Singh, 2012; Stahl & Demuth, 1999), caudales mínimos en ríos (Laaha & Blöschl, 2006; Števková, Sabo, & Kohnová, 2012), sitios de recarga (Isik & Singh, 2008), frecuencias de caudal (Burn, Zrinji, & Kowalchuk, 1997; Rao & Srinivas, 2006), (Stahl & Demuth, 1999). En México los límites de cuenca se usaron para definir regiones hidrogeográficas

como base para determinar el efecto del cambio de uso de suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo (Allende et al., 2009)

Existen relativamente pocos trabajos en la literatura que traten de regionalizar usando variables de distintos ejes con objetivos de sustentabilidad ambiental (Huang, Fan, Li, & Wang, 2013) o socio-agrícolas (Ahmed et al., 2014). No obstante, para México las regionalizaciones multidimensionales que incluyan características de las cuencas, diferentes a las relacionadas con el comportamiento hídrico, son escasas. Monroy-Ortiz (2013) realizó un esfuerzo por identificar cuencas urbanas y sus principales características hídricas, sin embargo aún es necesario vincular la información con un enfoque sustentable que permita determinar regiones de cuencas con características similares en distintos ámbitos para apoyar la orientación de la planeación regional y la toma de decisiones en la GIRH.

5.2 Metodología

5.2.1. Selección de variables

Con el objetivo de identificar regiones homogéneas, en cuanto a los aspectos relacionados con los recursos hídricos, se seleccionaron bases de datos de las AEPA's: ambiental, social, económica e institucional, y de éstas se eligieron variables clave relacionadas con los recursos hídricos de las cuencas urbanas que pudieran representarse de manera espacial. El tratamiento, manejo e interpretación territorial de las variables extraídas de las bases de datos se realizó a través de los paquetes de sistemas de información geográfica IDRISI selva (Eastman, 2012) y ArcMap 10.2 (Esri, 2011).

A partir de las bases de datos de las cuatro AEPA's, fueron seleccionadas variables relacionadas con el agua, con información disponible a nivel nacional para el año base 2010 o en su ausencia 2005. La base de datos ambiental, las variables climáticas (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005), son el resultado de valores promedio de cada variable para el periodo 1950-2000 y los datos se encuentran en formato raster y distribuidos por km², por lo que simplemente se extrajo el valor promedio para cada subcuenca urbana del país (Figura 5.1).

Dentro de las AEPA social y económica, se eligieron variables con información municipal a nivel nacional tomadas del Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM) (INAFED, 2010). Las bases de datos estuvieron subdivididas en las ramas: población, vivienda, educación, economía, Índice de Desarrollo Humano (IDH), marginación y PIB anual municipal. A excepción del IDH, el índice de marginación y el PIB anual municipal, para cada municipio y cada rama se tiene la información histórica cada 5 años desde el año 1990, sin embargo, se tomó la información más reciente para la regionalización (2010 o en su caso 2005).

Se incluyeron todas las variables de género (Por ejemplo, Población femenina que habla alguna lengua indígena, femenina económicamente activa o que asiste a la escuela, etc.), ya que es un aspecto

importante en la GIRH, del mismo modo se sintetizaron variables como la población por distintos rangos de edad, tomando únicamente la población por municipio. La base de datos económica estuvo conformada por 16 variables.

Además de estas bases de datos, en la AEPA social se utilizaron dos variables que se consideraron importantes en el análisis: disponibilidad de agua natural media *per cápita* generada por Gómez-Albores (2012) utilizando un módulo para evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos de manera espacial (Franco, 2008) y los Años Vida Ajustados por Discapacidad por enfermedades intestinales (AVAD) calculado para México por Gómez-Albores (2012). La disponibilidad natural media *per cápita* es la relación entre el volumen de agua disponible renovable que es factible para uso humano y el número de habitantes en un mismo espacio y tiempo.

En otro sentido, la incidencia de enfermedades diarreicas es un problema grave para la población y suele ser atribuida al saneamiento e higiene del agua. Un indicador para medir el impacto de las enfermedades intestinales en un área es el AVAD, compuesto por el costo económico, la morbilidad y la mortalidad. El AVAD combina el tiempo vivido con discapacidad (AVD) y el tiempo perdido por muerte prematura (AVP) (Prüss-Ustün, Mathers, Corvalán, & Woodward, 2003).

Finalmente, se usó la capa de uso de suelo y vegetación de la serie V de INEGI (2013), a partir de la cual se calculó el área (km²) del uso de suelo urbano dentro de cada subcuenca. De este modo, la AEPA social estuvo conformada por 24 variables.

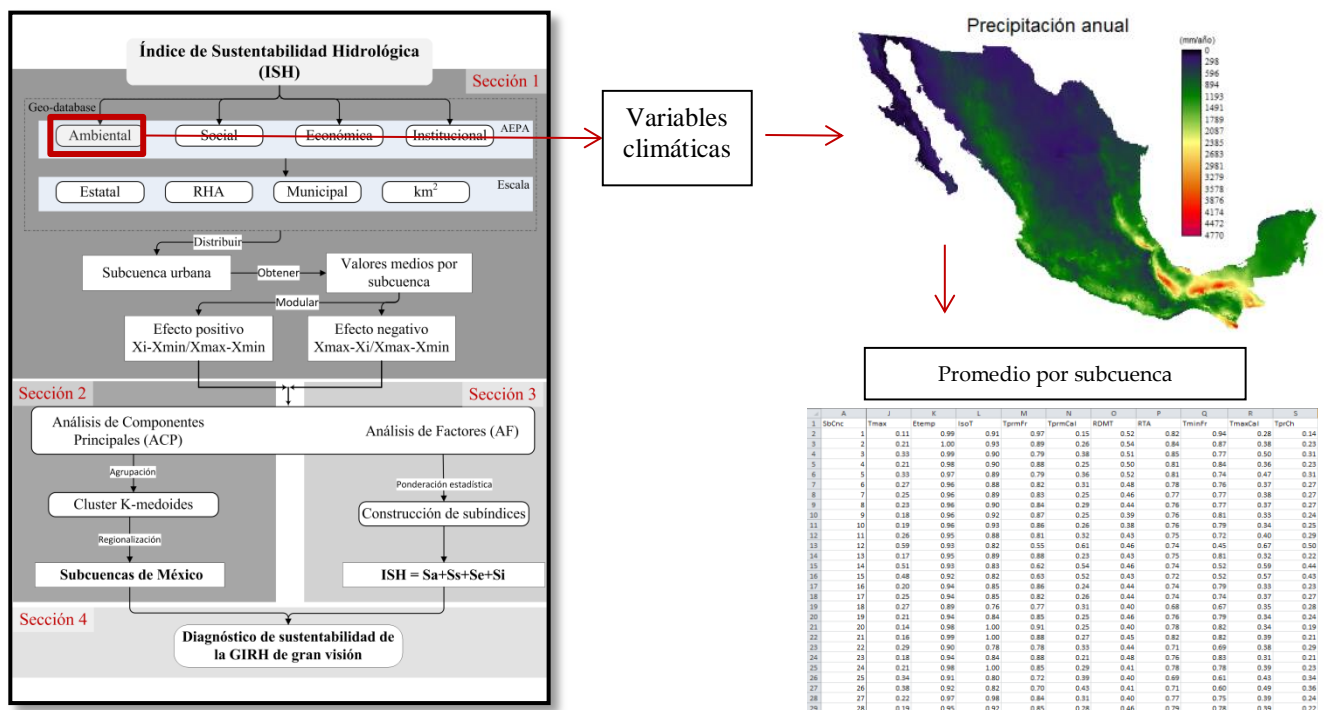


Figura 5.1. Manejo de variables climáticas.

En cuanto a la AEPA institucional, se incluyeron tres variables:

1. El número de empresas por municipio (SE, 2010),
2. Los organismos operadores de agua en cada región hidrológica (CONAGUA, 2011),
3. El número de instituciones de educación superior por municipio (ANUIES, 2010).

5.2.2 Distribución de valores a nivel subcuenca

El análisis espacial de variables a nivel subcuenca, se torna complicado cuando los valores se encuentran distribuidos a nivel municipal, estatal o por RHA. Por tal motivo se construyó un modelo de desagregación para distribuir los valores municipales a la subcuenca hidrológica. Este modelo sólo fue aplicado a las variables relacionadas directamente con la distribución de la población.

Por ejemplo, en la base de datos ambiental, las variables no climáticas (SEMARNAT, 2010), tienen escalas espaciales diferentes (estatal o RHA) y en formato vectorial (polígonos). De manera que, se transformaron a formato raster, con escala espacial de 1 km² (Figura 5.2).

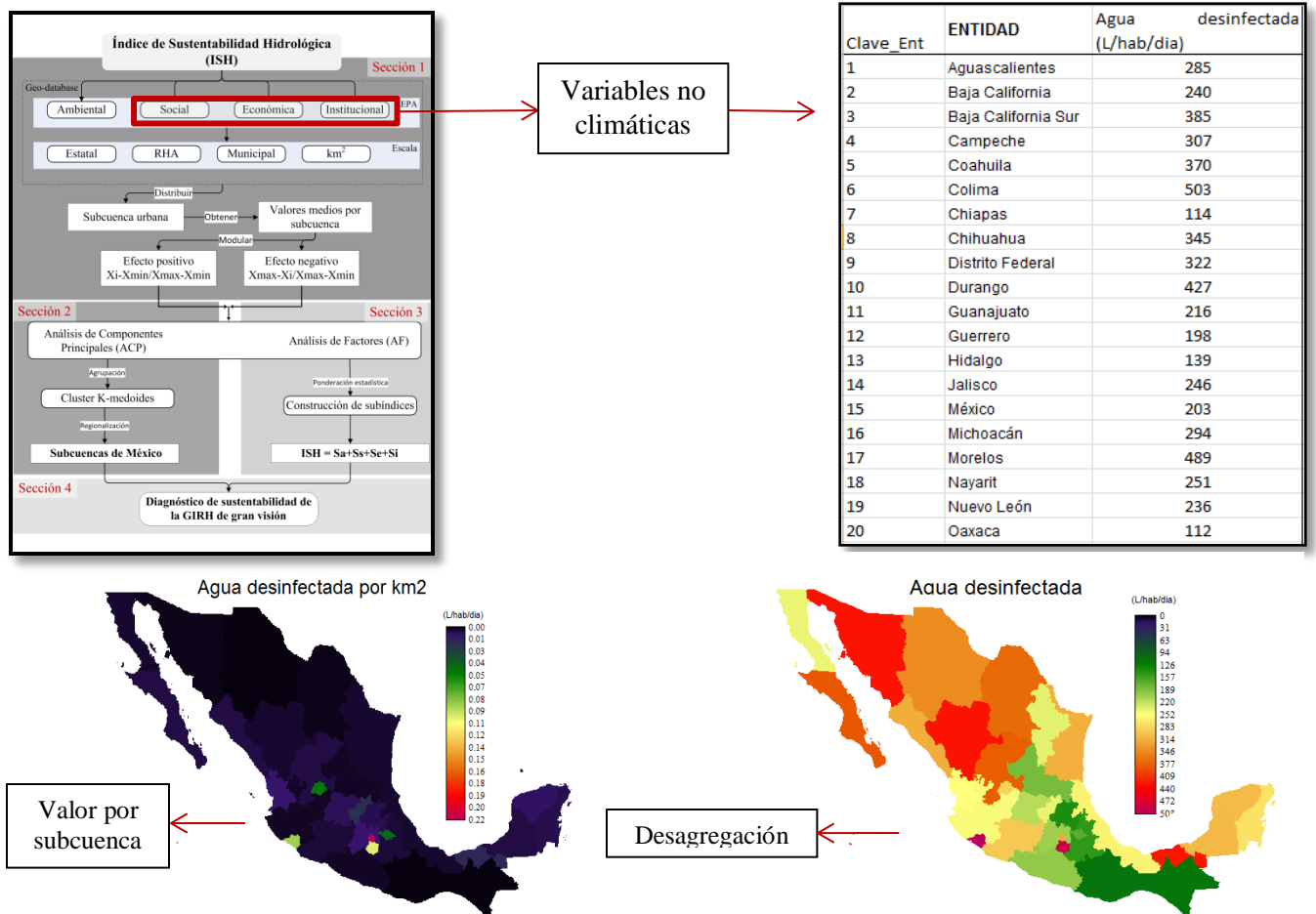


Figura 5.2. Distribución de valores a nivel subcuenca de variables no climáticas.

El modelo de desagregación redistribuye los datos, que se encuentran concentrados en el municipio, estado a nivel de subcuenca usando un patrón de dispersión dependiente de la distancia a los centros urbanos. Las variables que no fueron distribuidas fueron las climáticas y aquellas que estuvieran medidas como porcentaje de área o proporción como tasa y las variables con información por RHA. Para éstas variables, solo se obtuvo el valor medio por subcuenca.

Se usó el módulo *Dissagregate* en Idrisi Taiga, usando para cada proceso, una imagen de subcuencas hidrológicas de México edición 2 con escala 1:50,000 (INEGI, 2010), las imágenes de densidad por km^2 para cada una de las variables (obtenidas según su unidad de origen, municipal o estatal), y una imagen de distancia inversa a los polígonos urbanos del país (Figura 5.3). De este modo, se obtuvo una imagen de cada variable, distribuida a nivel de subcuenca hidrológica.

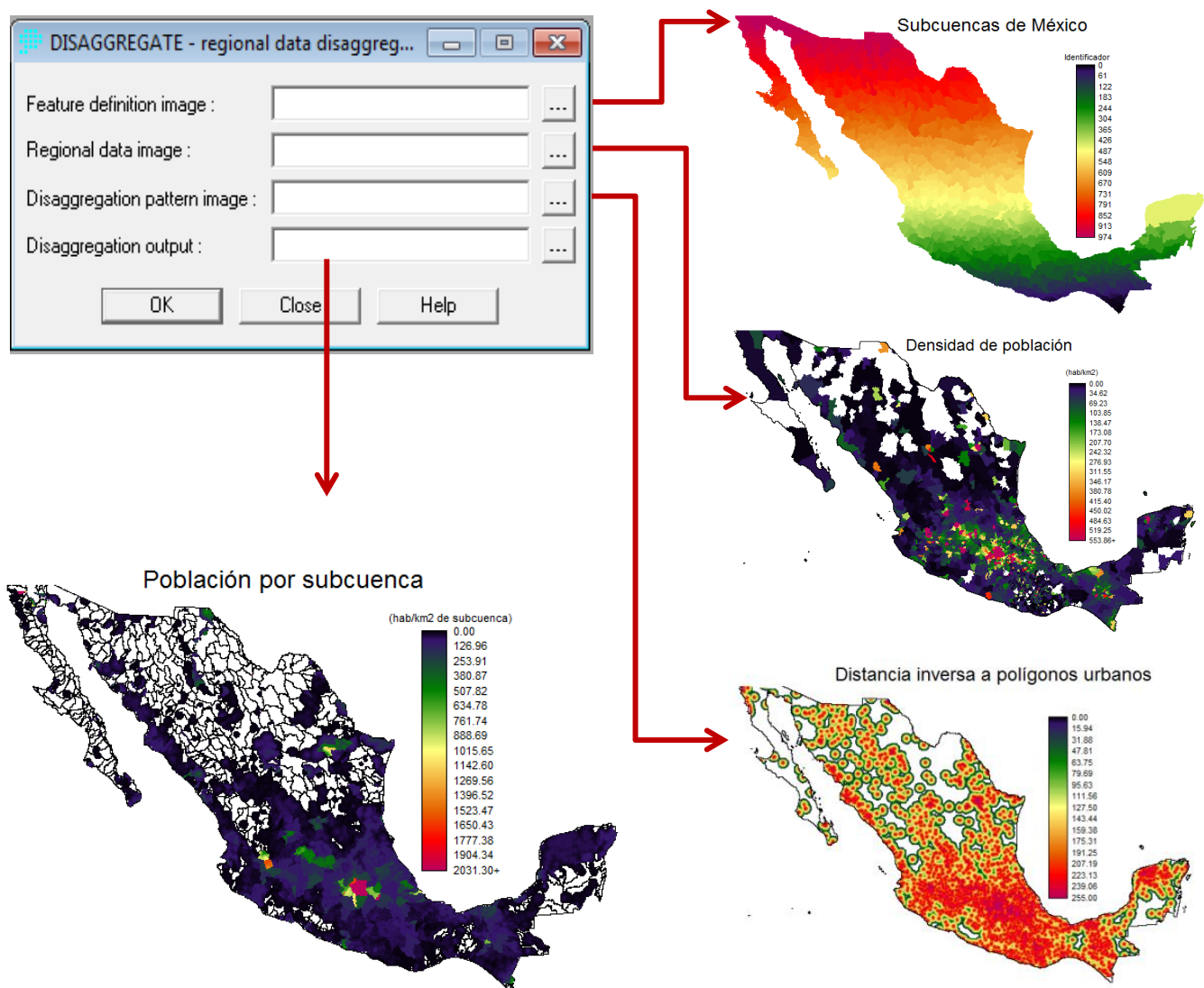


Figura 5.3. Método de desagregación de valores a subcuenca de variables no climáticas.

Finalmente se extrajeron los valores medios de cada variable para las 970 subcuencas del país, para posteriormente hacer un análisis de componentes principales (Figura 5.4).

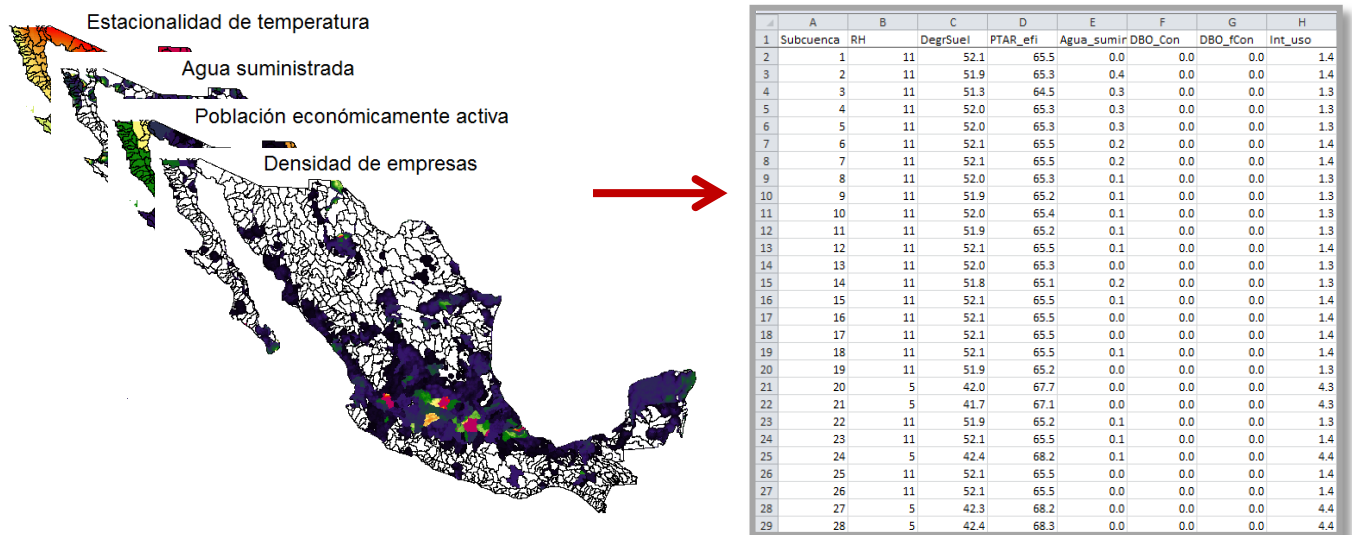


Figura 5.4. Construcción de base de geo-database con valores medios por subcuenca.

5.2.3 Modulación de variables

La técnica de grupos de análisis Delphi, forma parte de las técnicas de participación multidisciplinaria de la GIRH y está basada en la opinión de los expertos. Permite la comunicación estructurada e iterativa entre un grupo de personas para compartir y generar conocimiento con fines de resolver un problema complejo (Landeta, 2006). Se usó esta técnica mediante reuniones periódicas de expertos del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), para llegar a un consenso sobre el efecto que las variables tienen sobre el socioecosistema, para determinar si su aumento o decremento son benéficos para los recursos hídricos. Esto es, hacer que los valores positivos de todas las variables tengan un efecto positivo sobre los recursos hídricos.

Para modular el efecto de las variables, se consideró que, si el aumento de una variable es positivo para los recursos hídricos, la modulación consiste la función:

$$V_{xi} = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad \text{Ec. 5.1a}$$

donde V_{xi} representa el valor modulado para el indicador X en pixel i , $\min(X_i)$ y $\max(X_i)$ los valores mínimos y máximos para un indicador.

Complementariamente, si el decremento de la variable tiene un efecto positivo, se modula de la forma siguiente (Tan et al., 2011b):

$$V_{xi} = \frac{\max(X_i) - X_i}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad \text{Ec. 5.1b}$$

5.2.4 Reducción de variables

Con un esfuerzo mínimo, el análisis de componentes principales (*ACP*) provee una vía para reducir un complejo conjunto de datos a una dimensión más simplificada (Shlens, 2003). El *ACP* es empleado cuando se tiene un gran número de variables que posiblemente estén correlacionadas entre sí, transformándolas en variables sintéticas independientes entre sí. El *ACP* se usa principalmente para reducir variables antes de usar un análisis de clúster o de regresión múltiple.

Las nuevas variables son una combinación lineal de las anteriores y se van agregando según la variabilidad que expliquen de la muestra original, además éstas son independientes entre sí.

Se hizo un análisis de correlación entre las variables de cada AEPA para después, hacer la reducción de variables con *ACP*. Se aplicaron *ACP*'s con el software Statgraphics Centurion V 15.2, para la AEPA ambiental, social y económico, no se aplicó dicha técnica en la AEPA institucional debido a que sus variables no estuvieron correlacionadas. Se eligieron los componentes principales con eigenvalor igual o mayor a 1 (Kaiser, 1960). Esto con el fin de reducir el conjunto de variables correlacionadas a la dimensión más simplificada (Shlens, 2003).

Los componentes principales se construyeron de la siguiente forma:

$$CP = P_1V_1 + P_2V_2 + \dots + P_nV_n \quad \text{Ec. 5.2}$$

donde *CP* es el componente principal de cada AEPA, *P* es el peso de cada variable en dicho componente y *V* es el valor estandarizado de cada variable en cada pixel (resta de media y división por desviación estándar).

5.2.7 Elección de grupos

Se consideró adecuado usar una técnica de clúster *K medoides* con el método PAM (*Partitioning Around Medoids*), para la regionalización del país ya que se considera más robusto que el algoritmo K medias (Kaufman & Rousseeuw, 1990; Ng & Han, 2002).

La definición del número de regiones no se hará de manera subjetiva, sino que se aplicará el índice de *Silhouette* (S), índice utilizado para medir la consistencia de la regionalización y determinar el número de regiones adecuadas con base en el conjunto de variables usadas (Baarsch & Celebi, 2012).

Según Rousseeuw (Rousseeuw, 1987), el S mide la compactación entre clúster con relación a la distancia entre ellos con base en el valor medio y sugiere tomar el valor que más se acerque a 1:

$$S(i) = \frac{b(i)-w(i)}{\max[b(i),w(i)]} \text{ con } b(i) = \min_k B(i, k) \quad \text{Ec. 5.3}$$

donde $w(i)$ es la distancia promedio desde el i ésimo punto a otro punto dentro de su propio clúster, y $B(i, k)$ es la distancia promedio desde el i ésimo punto a otros puntos en otro clúster k (Lletí, Ortiz, Sarabia, & Sánchez, 2004).

Para integrar el índice *Silhouette* al análisis *K medoides*, se diseñó el siguiente código de programación para aplicar el método en el software estadístico R v. 3.1.0 (R Development Core Team, 2009), usando la librería *ClusterSim* (Dudek, 2015). El proceso fue ejecutado para la matriz de valores medios de los componentes principales por subcuenca, eligiendo como valor mínimo de clústers 2 y máximo de 20 para cada índice. La matriz es un archivo en formato separado por comas (*.csv), el cual sólo tiene las columnas de los C_p , con su respectivo encabezado, no se incluye la columna con identificador de subcuenca.

```
//Leer la matriz de valores medios
varclus <-
read.table("F:/Mónica/SUSTENTABILIDAD/Regionalizacion/Rconciencia/Estandarizados/
SUBINDICES.csv", header=TRUE, sep=",", na.strings="NA", strip.white=TRUE, dec=".")
//Abrir la librería y leer el archivo
library(clusterSim)
data(varclus)
//Calcular matriz de distancia
md <- dist(varclus, method="euclidean")
# nc - number of clusters
min_nc=2
max_nc=20
res <- array(0, c(max_nc-min_nc+1, 2))
res[,1] <- min_nc:max_nc
clusters <- NULL
for (nc in min_nc:max_nc)
  //Partitioning Around Medoids
  {
  cl2 <- pam(varclus, k=nc, cluster.only=TRUE, diss=FALSE,
  metric="euclidean", stand=FALSE)
  res[nc-min_nc+1, 2] <- S <- index.S(varclus, cl2, md,
  centrotypes="medoids")$S
  clusters <- rbind(clusters, cl2)
  }
print(paste("min S
for", (min_nc:max_nc)[which.min(res[, 2])], "clusters=", min(res[, 2]) ))
print("clustering for min S")
print(clusters[which.min(res[, 2]),])
//Graficar resultados
plot(res, type="p", pch=0, xlab="Number of clusters", ylab="S", xaxt="n")
axis(1, c(min_nc:max_nc))
```

Figura 5.5. Código de programación de análisis K-medoides en el software R.

La caracterización de las regiones es importante para conocer las diferencias entre ellas con base en los CP y las variables que más contribuyen a cada uno de ellos.

Se construyó un mapa de las regiones de México y se extrajeron los valores estadísticos de las variables para construir gráficas para determinar cuál o cuáles componentes determinan la regionalización.

5.3 Resultados

Se encontró que las subcuencas urbanas de México, cubren prácticamente el 62.9% del territorio nacional (614 subcuencas). El porcentaje restante son subcuencas no urbanas, con centros de población menores a 2,500 habitantes, estas subcuencas se encuentran principalmente en la parte norte del país, la cual se caracteriza por condiciones de aridez y, en general, climas extremos (García & CONABIO, 1998). Es probable que estas condiciones de escasa disponibilidad hídrica frenen el establecimiento y desarrollo de centros urbanos importantes.

Se consideraron 8 bases de datos (Tabla 1), con las cuales se construyó una matriz de 613 subcuencas urbanas por 69 variables relacionadas con el uso y manejo del agua. Esta matriz contiene 26 variables que pertenecen a la AEPA ambiental, 24 a la social, 16 a la económica y 3 a la institucional (Cuadro 1). En el Cuadro 2 se puede ver el efecto de las variables por AEPA y que favorecería la GIRH en las cuencas urbanas, el cual fue obtenido por el grupo multidisciplinario de expertos del CIRA bajo la técnica de grupo Delphi.

Tabla 5.1. Geo-Bases de datos para la selección de variables.

Base de datos	AEPA	Resolución espacial	Variables seleccionadas
Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010)	Social	1 km ²	1
Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM) (INAFED, 2010)	Social, Económica	Municipal	21,16
Años Vida Ajustados por Discapacidad por enfermedades intestinales (AVAD) y Disponibilidad de agua Natural Media per cápita (Gómez-Albores, 2012)	Social	1 km ²	2
Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012)	Institucional	RHA*	1
Sistema de Información Empresarial Mexicano (SIEM) (SE, 2010)	Institucional	Municipal	1
Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior en México (ANUIES) (ANUIES, 2010)	Institucional	Municipal	1
Worldclim (Hijmans et al., 2005)	Ambiental	1 km ²	20
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SEMARNAT, 2010)	Ambiental	Estatal, RHA*	6
* Región Hidrológico-Administrativa		Total	69

Tabla 5.2. Variables hidrológicas de subcuencas urbanas del país. Efecto positivo (+) y negativo (-). ID: Identificador

AEPA	ID	Variable	Unidades	Escala de origen	Desagregación	Extracción	Efecto	Descripción
Ambiental	A1	Superficie con degradación de suelo	%/km ² de subcuenca	Estado	No	Promedio	-	Degradación de suelo causada por actividades humanas.
	A2	Eficiencia en las Plantas de tratamiento	%/km ² de subcuenca	Estado	No	Promedio	+	Relación entre la capacidad instalada en las PTAR y la que realmente se trata
	A3	Agua desinfectada suministrada	L/día/km ² de subcuenca	Estado	Si	Suma	+	Agua desinfectada suministrada por habitante al día en el estado.
	A4	Demanda bioquímica de Oxígeno calificada como Contaminada	%/km ² de subcuenca	RHA	No	Promedio	-	Valores de <i>DBO</i> en las estaciones con valores promedio anuales entre 30 y 120 mg/l
	A5	Demanda bioquímica de Oxígeno calificada como fuertemente contaminada	%/km ² de subcuenca	RHA	No	Promedio	-	Valores de <i>DBO</i> en las estaciones con valores promedio anuales mayores a 120 mg/l
	A6	Intensidad de uso de acuíferos	%/km ² de subcuenca	RHA	No	Promedio	-	Relación entre el agua concesionada y la recarga natural del acuífero
	A7	Temperatura mínima promedio 50 años	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Calculada en promedio de 1950-2000
	A8	Temperatura máxima promedio 50 años (Tmax)	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Calculada en promedio de 1950-2000
	A9	Estacionalidad de temperatura	%/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Desviación estándar de la temperatura
	A10	Isotermalidad	%/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Razón del rango diario promedio con respecto al rango anual
	A11	Tprom del mes más frío	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Calculada en promedio de 1950-2000
	A12	Tprom del mes más caliente	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Calculada en promedio de 1950-2000
	A13	Rango medio de temperatura diaria	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Promedio mensual multiplicado por la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima del mes
	A14	Rango de temperatura anual	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Diferencia entre la Tmax del mes más caliente y la Tmin del mes más frío
	A15	Tmin del mes más frío	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Calculada en promedio de 1950-2000
	A16	Tmax del mes más caliente	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Calculada en promedio de 1950-2000
	A17	Tprom del cuarto más húmedo	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Promedio de los tres meses más húmedos del año.
	A18	Tprom del cuarto más seco	°C/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Promedio de los tres meses más secos del año

Tabla 5.2. Variables hidrológicas de subcuencas urbanas del país. Efecto positivo (+) y negativo (-). ID: Identificador (Continuación).

AEPA	ID	Variable	Unidades	Escala de origen	Desagregación	Extracción	Efecto	Descripción
Ambiental	A19	Precipitación promedio anual	mm/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Calculada en promedio de 1950-2000
	A20	Estacionalidad de precipitación	%/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Coefficiente de variación de precipitación
	A21	Precipitación del cuarto más húmedo	mm/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Promedio del cuarto de año más húmedo
	A22	Precipitación del cuarto más seco	mm/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Promedio del cuarto de año más seco
	A23	Precipitación del mes más húmedo	mm/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Calculada en promedio de 1950-2000
	A24	Precipitación del mes más seco	mm/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Calculada en promedio de 1950-2000
	A25	Precipitación del cuarto más caliente	mm/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Promedio del cuarto de año más caliente
	A26	Precipitación del cuarto más frío	mm/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Promedio del cuarto de año más frío
Social	S1	Porcentaje de uso de suelo urbano por subcuenca	%/km ² de subcuenca	Subcuenca	No	Suma	-	Porcentaje ocupado por polígonos urbanos, considerados como zonas con más de 2,500 habitantes
	S2	Población de 3 a 30 años y más que asiste a la escuela	hab/km ² de subcuenca	Municipio		Promedio	+	Población mayor de 3 años que asiste a la escuela
	S3	Grado de escolaridad mujeres	Años/km ² de subcuenca	Municipio	No	Promedio	+	Promedio de años de escolaridad alcanzados por mujeres de 15 y más años de edad
	S4	Grado de escolaridad hombres	Años/km ² de subcuenca	Municipio	No	Promedio	+	Promedio de años de escolaridad alcanzados por hombres de 15 y más años de edad
	S5	Grado de escolaridad promedio	Años/km ² de subcuenca	Municipio	No	Promedio	+	Promedio de años de escolaridad alcanzados por las personas de 15 y más años de edad
	S6	Densidad de población	hab/km ² de subcuenca	Municipio	No	Promedio	-	Número de personas por km ²
	S7	IDH	Adimensional	Municipio	No	Promedio	+	Índice de Desarrollo Humano. Adimensional con escala de valores 0 a 1.
	S8	Índice de marginación	Adimensional	Municipio	No	Promedio	-	Índice de marginación. Adimensional con escala de valores de 0 a 100.
	S9	Población de 3 años y más que hablan lengua indígena	hab/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	Población de 3 y más años de edad que habla alguna lengua indígena
	S10	Población masculina de 3 años y más que habla lengua indígena	hab/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	Hombres de 3 y más años de edad que hablan alguna lengua indígena

Tabla 5.2. Variables hidrológicas de subcuencas urbanas del país. Efecto positivo (+) y negativo (-). ID: Identificador (Continuación).

AEPA	ID	Variable	Unidades	Escala de origen	Desagregación	Extracción	Efecto	Descripción
Social	S11	Población femenina de 3 años y más que habla	hab/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	Mujeres de 3 y más años de edad que hablan alguna lengua indígena
	S12	Viviendas particulares habitadas (VPH)	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	Viviendas particulares habitadas de cualquier clase (VPH)
	S13	VPH con servicio de agua entubada	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	VPH que disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda
	S14	VPH sin servicio de agua entubada	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	VPH que no disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda
	S15	VPH con drenaje	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	VPH que tienen drenaje conectado a la red pública, fosa séptica, barranca, grieta, río, lago o mar.
	S16	VPH sin drenaje	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	VPH que no tienen drenaje
	S17	VPH con agua, drenaje y electricidad	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	VPH que disponen de luz eléctrica, agua entubada de la red pública y
	S18	VPH con bienes	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	VPH que disponen de radio, televisión, refrigerador, lavadora, automóvil, computadora, teléfono fijo, celular ni internet.
	S19	VPH sin bienes	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	VPH que no disponen de radio, televisión, refrigerador, lavadora, automóvil, computadora, teléfono fijo, celular ni internet.
	S20	VPH con electricidad	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	VPH que tienen luz eléctrica
	S21	VPH sin electricidad	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	VPH que no tienen luz eléctrica
	S22	VPH con sanitario	Casa/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	VPH que disponen de excusado o sanitario
	S23	Años Vida Ajustados por Discapacidad por enfermedades intestinales	Años * 10,000 hab/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	-	Años que se pierden por discapacidad o muerte prematura a causa de enfermedades intestinales relacionadas con el agua.
	S24	Disponibilidad natural media per cápita	m ³ /año/km ² de subcuenca	km ²	No	Promedio	+	Disponibilidad de agua promedio per cápita
Económica	Ec1	Tasa de participación económica	%/km ² de subcuenca	Municipio	No	Promedio	+	Relación entre las personas que trabajan y las que pueden trabajar (mayores de 15 años)
	Ec2	Tasa de participación económica hombres	%/km ² de subcuenca	Municipio	No	Promedio	+	Relación entre los hombres que trabajan y las que pueden trabajar (mayores de 15 años)

Tabla 5.2. Variables hidrológicas de subcuencas urbanas del país. Efecto positivo (+) y negativo (-). ID: Identificador (Continuación).

AEPA	ID	Variable	Unidades	Escala de origen	Desagregación	Extracción	Efecto	Descripción
Económica	Ec3	Tasa de participación económica mujeres	%/km ² de subcuenca	Municipio	No	Promedio	+	Relación entre las mujeres que trabajan y las que pueden trabajar (mayores de 15 años)
	Ec4	PIB anual	\$/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	Producto Interno Bruto per cápita
	Ec5	Población económicamente inactiva	hab/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	Personas de 12 años y más pensionadas o jubiladas, estudiantes, dedicadas a los quehaceres del hogar, que tienen alguna limitación física o mental permanente que les impide trabajar.
	Ec6	Población económicamente inactiva hombres	hab/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	Población masculina económicamente inactiva
	Ec7	Población económicamente inactiva mujeres	hab/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	-	Población femenina económicamente inactiva
	Ec8	Población económicamente activa total	hab/km ² de subcuenca	Municipio	Si	Promedio	+	Personas de 12 años y más que trabajaron; tenían trabajo pero no trabajaron o; buscaron trabajo en la semana de referencia
	Ec9	Población económicamente activa hombres	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	+	Población masculina económicamente activa
	Ec10	Población económicamente activa mujeres	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	+	Población femenina económicamente activa
	Ec11	Población económicamente activa ocupada	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	+	Población ocupada: Personas de 12 a 130 años de edad que trabajaron o que no trabajaron pero si tenían trabajo en la semana de referencia.
	Ec12	Población económicamente activa ocupada hombres	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	+	Población masculina ocupada
	Ec13	Población económicamente activa ocupada mujeres	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	+	Población femenina ocupada
	Ec14	Población económicamente activa desocupada	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	-	Población desocupada: Personas de 12 a 130 años de edad que no tenían trabajo, pero buscaron trabajo en la semana de referencia.
	Ec15	Población económicamente activa desocupada hombres	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	-	Población masculina desocupada
	Ec16	Población económicamente activa desocupada mujeres	hab/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	-	Población femenina desocupada

Tabla 5.2. Variables hidrológicas de subcuencas urbanas del país. Efecto positivo (+) y negativo (-). ID: Identificador. (Continuación).

AEPA	ID	Variable	Unidades	Escala de origen	Desagregación	Extracción	Efecto	Descripción
Institucional	I1	Instituciones de educación superior (IES)	Instituciones /km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	+	Universidades técnicas superiores, de educación normal, licenciaturas universitarias y tecnológicas, registradas en ANUIES.
	I2	Número de empresas	Empresas/km ² de subcuenca	Mpio.	Si	Promedio	-	Empresas registradas en el Sistema de Información Empresarial de México
	I3	Organismos operadores	Oc/km ² de subcuenca	RHA	No	Moda	+	Consejos, comisiones, comités de cuenca y COTAS en las regiones hidrológicas

5.3.1 Análisis de componentes principales (ACP)

En las AEPA's, ambiental, social y económica, las variables se correlacionaron y se compactaron en componentes principales (Cp), con el objetivo de eliminar la correlación y disminuir el número de variables explicativas. En la AEPA institucional no se aplicó dicho ACP, debido a que, dos de las tres variables no se correlacionaron entre ellas ($P < 0.05$). Los Cp están conformados por las variables, multiplicadas por el peso de cada una en el sistema. Los pesos de las variables dentro de los Cp reflejan la contribución sobre el componente (Figuras 5.6-5.9).

En la AEPA económica, se incluyeron 16 variables, agrupadas en dos Cp que explican en conjunto 89.9% de la varianza (Figura 5.6). En esta AEPA, las variables se agregaron de manera más uniforme que en los otros. El Cp 1 contiene variables relacionadas con la fuerza laboral (Ec8 a Ec13), tanto las que producen riqueza, como las que no (signos negativos, Ec5 a Ec7, Ec14 a Ec16). Mientras que el Cp 2 fue explicado negativamente por el PIB anual (Ec4) y positivamente por la tasa de participación económica (Ec1).

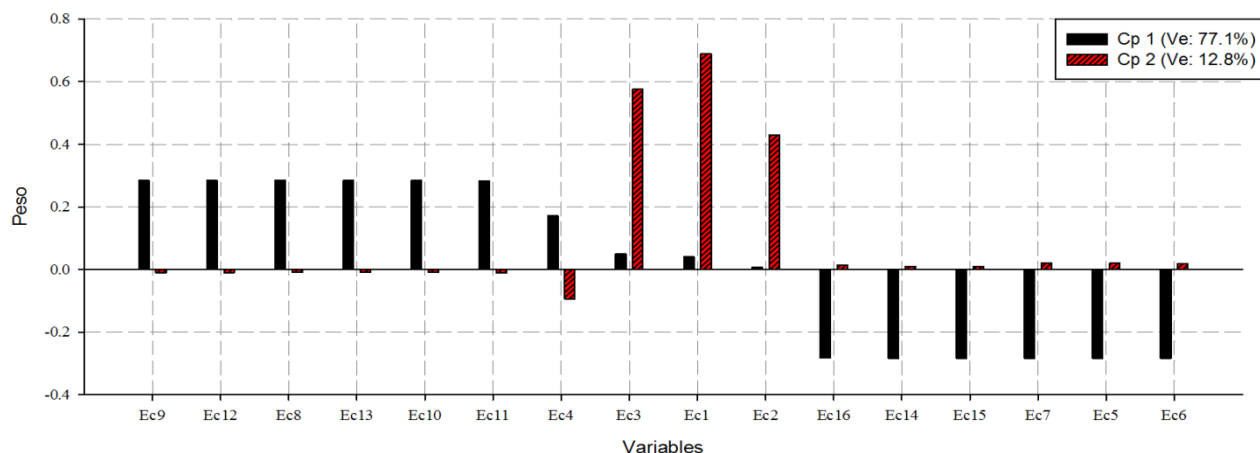


Figura 5.6. Pesos de los componentes principales de la AEPA económica. Ve: Varianza explicada del componente.

Los Cp en la AEPA social fueron 4, explicaron el 88.7% de la varianza (Figura 5.7). El primer Cp estuvo explicado positivamente por las viviendas particulares habitadas que no cuentan con servicio de drenaje (S16) y negativamente disponibilidad natural media per cápita (S24). El segundo Cp está descrito positivamente por el grado de escolaridad (S5) y negativamente por la población total (S6). El tercer Cp se explicó positivamente con el Índice de Desarrollo Humano (S7) y se representó negativamente por las Viviendas Particulares Habitadas (VPH) que no cuentan con servicio de agua entubada (S14). Por último, el cuarto Cp fue explicado positivamente por las VPH que no cuentan con electricidad (S21) y el porcentaje urbanizado de la subcuenca (S1), además se representó negativamente por el índice de marginación (S8).

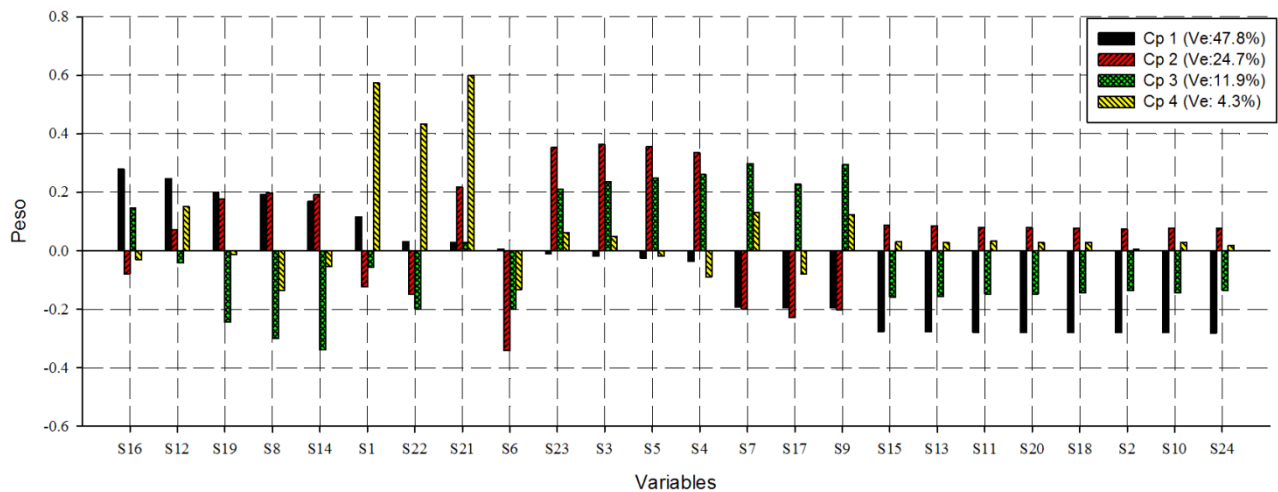


Figura 5.7. Pesos de los componentes principales de la AEPA social. Ve: Varianza explicada

En la AEPA ambiental se incluyeron 26 variables, resumidas en cinco componentes principales con una varianza explicada total de 82.6% (Figura 5.8). El Cp1 está relacionado con altas temperaturas, ya que el peso positivo más alto es la temperatura máxima anual (A8) y negativo la temperatura mínima del mes más frío del año (A15). En el Cp 2 está relacionado con temperaturas bajas, ya que la temperatura mínima anual (A7) tuvo mayor peso positivo y la temperatura máxima del mes más caliente (A16) el mayor negativo. El tercer Cp estuvo relacionado con las altas precipitaciones ya que fue explicado positivamente por la precipitación del cuarto más seco (A22) y de manera negativa por la estacionalidad de la precipitación (A20). Entre el cuarto y quinto Cp, contribuyeron con 10.2% de la varianza y se explicaron positivamente el porcentaje de degradación de suelo (A1), y el agua desinfectada suministrada por habitante (A3) y negativamente por la eficiencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales (A2) y la Demanda Bioquímica Oxígeno (*DBO*) calificada como contaminada (A5), respectivamente.

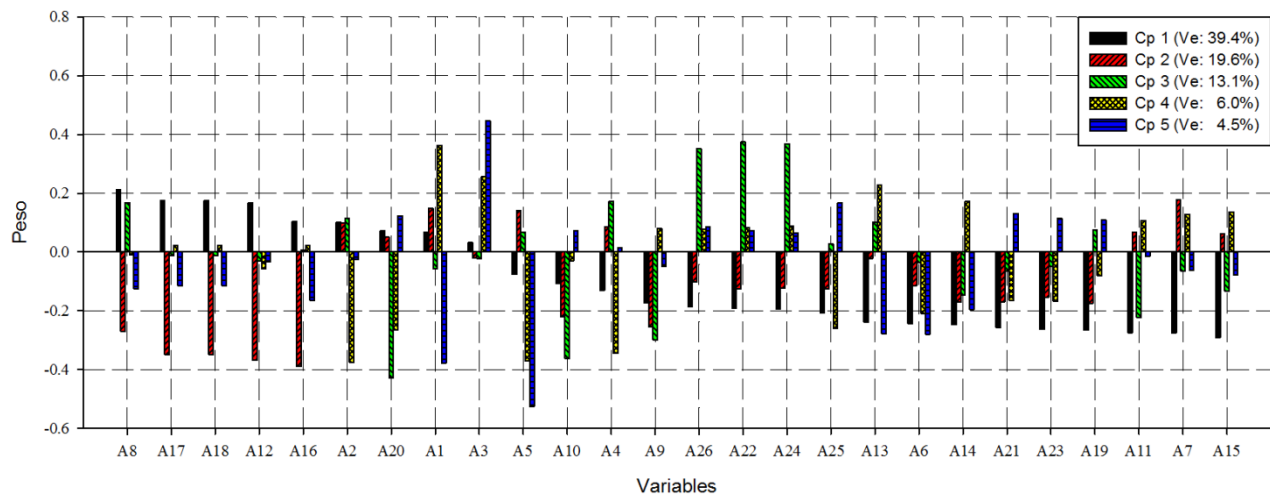


Figura 5.8. Pesos de los componentes principales de la AEPA ambiental. Ve: Varianza explicada del componente

5.3.2 Grupos homogéneos

El análisis *K medoides* fue efectuado con 14 variables de entrada (Cp): de la AEPA social (4), económica (2), ambiental (5) y de la AEPA institucional (3). Cabe destacar que, el índice de consistencia *Silhouette*, determinó que el número adecuado de regiones homogéneas para las cuencas urbanas analizadas, es 5 (Figura 5.9).

La condición de las regiones está representada con los promedios de las variables moduladas dentro de cada AEPA (Tabla 5.3). Los cuales ubican a las regiones en distinta posición, ya que los valores altos demuestran que la región tiene mejor condición sobre las demás porque tiene más variables con valores cercanos a 1. De este modo, la región 1 tiene en promedio, la mejor condición dentro de las cuatro AEPA's evaluadas (0.49) y la región 5 la peor condición (0.42), pero este promedio no refleja las características particulares dentro de cada región.

La descripción detallada de las regiones se hizo con las variables más representativas, ya que dentro de las AEPA's, algunas tienen comportamientos similares, por lo que por cuestiones gráficas, sólo se eligieron aquellas que proporcionaran mayor información (Figuras 5.10 - 5.13).

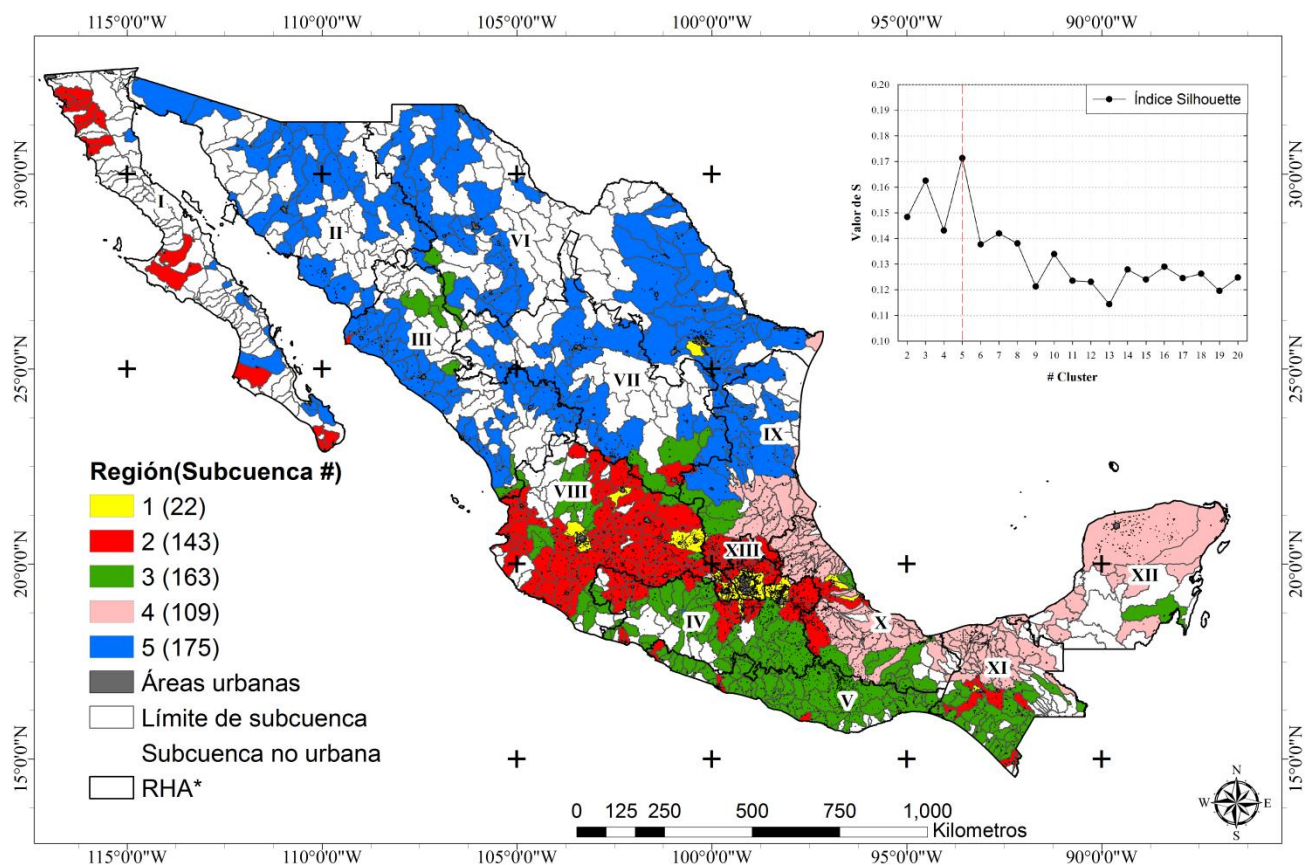


Figura 5.9. Mapa de regionalización de las 614 subcuencas urbanas de México. *Región Hidrológico-Administrativa (Números romanos). La gráfica superior derecha, muestra los valores del Índice *Silhouette* para cada número de grupos definidos (2 a 20), la línea roja representa la mejor división según el índice. (Subcuenca #): Número de subcuencas dentro de la región.

Tabla 5.3. Promedio y coeficiente de variación de las regiones en cada AEPA. CV: Coeficiente de variación. * Mejor región, ** Peor región.

Región	Económica		Social		Ambiental		Institucional		Media Global
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV	
1	0.52*	0.57	0.51*	0.62	0.44	0.64	0.49	0.71	0.49*
2	0.50	0.87	0.46	0.91	0.43	0.64	0.54*	0.82	0.48
3	0.46**	0.98	0.41**	1.01	0.48	0.62	0.53	0.85	0.47
4	0.47	0.93	0.44	0.89	0.51*	0.54	0.48**	0.95	0.48
5	0.48	0.93	0.47	0.95	0.36**	0.78	0.37	1.20	0.42**

5.3.2.3 AEPA económica

Como era esperado, la mejor condición económica se encuentra en la región 1 (0.52). El PIB anual (Ec 4) es el más alto (95,175 pesos/ km²), al igual que la población económicamente activa (Ec 8) y la tasa

de participación económica (Ec 1) (472 hab/ km² y 52.7% respectivamente), la diferencia mayor se presenta con la región 5, en la que los valores de estas variables son bajos (Ec 4: 614 pesos/km² y Ec 8: 14 hab/ km²) (Figura 5.10). Indudablemente, concuerda con lo presentado en el trabajo de Monroy-Ortiz (2013), donde más del 90% del PIB anual nacional se produce en la región que contiene las zonas metropolitanas más grandes del país.

Del lado contrario, en la región 3, la tasa de participación económica (Ec1) es la más baja del país (44%), aunque el PIB anual no es menor, si es bajo (3,032 pesos/km²), así la densidad de población económicamente activa también es muy baja (13 hab/km²), reflejando la pobreza de esta región.

Debido a que la región 2 es la que contiene mayor número de centros urbanos, después de la región uno, las condiciones económicas también ocupan el segundo lugar. La tasa de participación económica (Ec1) es de 51%, el PIB anual de 20,252 pesos/ km² y la población económicamente activa de 50 hab/ km² (Figura 5.10).

Aunque la región 5 es la que genera el menor PIB anual (612 pesos/ km²), la población económicamente activa y la tasa de participación económica, son mayores que en la región más pobre del país (Ec8: 14 hab/ km² y Ec1: 49%). Aunado a esto, en la región 5 el suministro de agua clorada (E3) y disponibilidad natural de agua (S24) son las limitantes principales para el desarrollo socioeconómico. Villanueva et al. (Villanueva-Díaz et al., 2007) mencionan que la tendencia en el norte del país, es extraer agua de acuíferos a profundidades cercanas a 500 m de profundidad, lo que se ve reflejado en la alta intensidad de uso de agua subterránea (E6:59%) y construir presas alrededor de cauces superficiales, para soportar la demanda de la agricultura, el uso público urbano e industrial principalmente. Sin embargo, estas acciones son estrategias que demandan grandes recursos económicos y ponen el riesgo la sustentabilidad del agua.

Por último, en la región 4 la tasa de participación económica es de 46%, el PIB anual es de 6,931 pesos/ km² y la población económicamente activa es de 35 hab/ km². La densidad de empresas por km² es de 0.4 (Figura 5.10)

De acuerdo con Nieto (Nieto, 2013), las ciudades son centros en donde se concentran las oportunidades y se traducen en bienestar económico y social. No obstante, en la regionalización de subcuencas urbanas estos datos sólo subrayan que, sin lugar a dudas, la brecha económica y social en México es un tema preocupante y es evidente que son ejes decisivos para separar las regiones.

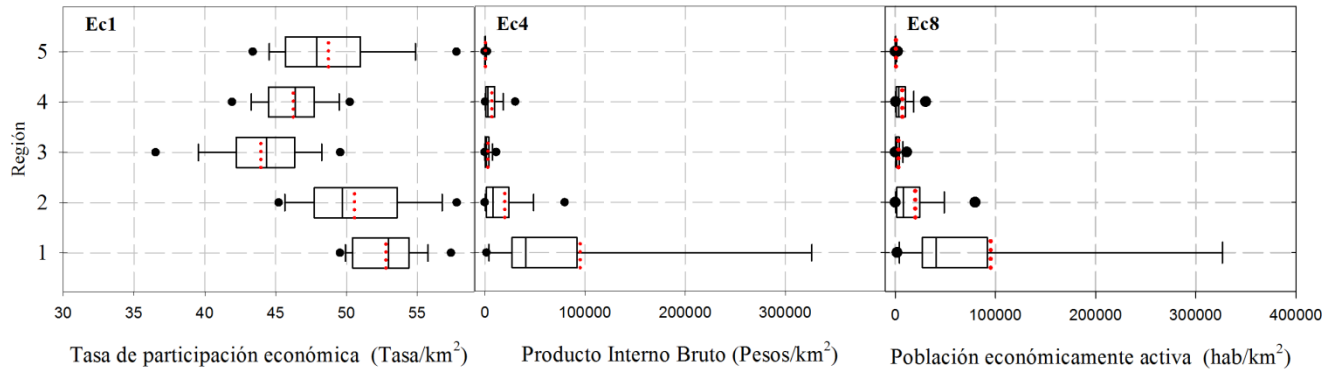


Figura 5.10. Características económicas de las regiones del país. La línea roja es el valor promedio.

5.3.2.2 AEPA social

Dentro de la clasificación de subcuencas urbanas, la región 1 es la más pequeña, incluye únicamente, 23 subcuencas, que principalmente comparten atributos económicos y sociales. Esta región, concentra subcuencas que albergan total o parcialmente áreas urbanas de gran tamaño (Zonas metropolitanas), como la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Monterrey, Puebla, Guadalajara, Toluca, por mencionar algunas. En consecuencia, el panorama de la región 1 es prometedor en el sentido de servicios básicos en las viviendas y la gama de oportunidades que puede llegar a tener la población, demostrado por el mayor promedio en los valores modulados del eje social (0.51).

Aunque, esta región incluye subcuencas con alta densidad de población que habla lengua indígena (S9) como la subcuenca “Miguel Ávila Camacho” (79 hab/ km²) en Puebla y la del “Río Oztolotepec” (69 hab/ km²) en el Estado de México, también tiene subcuencas en donde este atributo tiene los valores más bajos (1 hab/ km²) y por eso, la variabilidad es considerable. Como en toda urbe, el grado de escolaridad (S5: 8.5 años) y la población que asiste a la escuela (S2: 322 hab/ km²) tienen valores altos. La misma situación ocurre para las viviendas particulares que tienen acceso a servicios básicos (agua, luz, drenaje y electricidad) (S17: 252 casas/km²) y el bajo nivel de marginación (S8: 16/km²) (Figura 5.11).

La disponibilidad natural media de agua (S24) se encuentra entre 124 y 302 m³/hab/año, el cual es un valor bajo según Monroy-Ortiz (2013) que reporta niveles entre los 168 y 5,155 m³/hab/año. Posiblemente las diferencias residen en que la región de dicho autor incluye más subcuencas, debido a que agrupa todas aquellas que contienen zonas metropolitanas.

Un caso especial de la región 1 es la subcuenca que alberga parte de la Zona Metropolitana del Valle de México (RHA XIII), la cual sufre de gran presión sobre los recursos hídricos. A pesar de pertenecer a la región que genera el mayor PIB anual a nivel nacional (95,176 pesos/ km²), presenta la mayor

concentración de población (1,124 hab/ km²) y en general buenas condiciones de vida (en servicios básicos en la vivienda) (Figura 5.11). Sin embargo, esta zona tiene que importar alrededor del 30% del agua que consume de los sistemas Lerma y Cutzamala (Legorreta, 2006). Este es un problema común en las grandes metrópolis de México y en definitiva es un indicador fundamental del estado de los recursos hídricos en cuencas urbanas, la desventaja es que las bases de datos nacionales no lo consideran y sólo se encuentran registrados algunos datos puntuales a nivel nacional. Las regiones 2 y 5 tienen promedios sociales similares (0.46 y 0.47, respectivamente).

Los datos de la AEPA social, demuestran que las condiciones sociales son buenas para la región 2. Después de la región 1, el porcentaje de zona urbana (S1) dentro de la región 2 es el mayor (3.2%). Seguramente a consecuencia de la gran expansión económica y social del sistema Lerma-Chapala-Santiago (LCS). Al respecto, dentro de la AEPA económica, la región 2 cuenta con la mejor condición económica después de la región 1 (Tabla 5.3).

En la región 2 aunque la densidad de población (S6) es de 128 hab/ km², sólo el 28% asiste a la escuela (S2: 36 hab/ km²) acumulando un grado de escolaridad de 7.4 años (S5). De igual forma, después de la región 1, las viviendas particulares habitadas (S12: 32 casas/ km²) y las viviendas que cuentan con agua, drenaje y electricidad (S17: 26 casas/ km²) tienen los valores más altos (Figura 5.11).

La región 5 cuenta con mejores condiciones sociales promedio comparada con la región 2 (0.47). Esto debido a que la densidad de población (S6) es la más baja del país (34 hab/ km²), entonces, las viviendas particulares habitadas (S12: 8 casas/ km²) y las que cuentan con servicios básicos (S17: 6.5 casas/ km²) también tienen niveles bajos comparadas con el resto de las regiones. Pero, es la región menos marginada del país (S8: 19), y con un IDH igual al de la región 1 (0.8) la escolaridad es de 7.7 años y la proporción de personas que asiste a la escuela (20%). Sin embargo, la desventaja social de esta región está asociada a que la disponibilidad de agua natural es la menor de todo el país (55,765 m³/ km²/año).

La región 3 abarca los Estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y gran parte de Chiapas, dentro de las RHA IV, V y XI (Figura 5.9). Estos estados contienen el mayor porcentaje de población en situación de pobreza del país (CONEVAL, 2014). La región 3 se caracteriza principalmente por la deplorable situación social y económica. El uso del suelo urbano (S1) no llega al 1.5%, y el grado de escolaridad es el más bajo de las regiones (S5: 6 años). Del mismo modo, el IDH (S7) es de 0.6/ km², la marginación (S8) de 38/ km² y las viviendas que cuentan con servicios básicos (S17) son 5.5 casas/ km², Figura 5.11). Seguramente el alto número de muertes por enfermedades intestinales (S23: 15 hab * 10,000) relacionadas con el agua, se deba a que los servicios médicos se encuentran ubicados cerca de las principales ciudades, pero la mayor parte de esta población se encuentra en localidades no urbanas.

No obstante, la disponibilidad natural media per cápita de agua es alta para la región (entre 334 y 52,649 m³/hab/año).

Finalmente, en la región 4 el uso de suelo urbano ocupa el 1.8% de la región y el porcentaje restante es territorio rural, en donde habitan gran cantidad de comunidades que hablan algún tipo de lengua indígena (16 hab/ km²). En esta región, la disponibilidad natural de agua tiene el promedio más alto para el país (S24: 331, 890 m³/ km²/año). Sin embargo, el nivel de marginación es alto (29/ km²) y el AVAD también lo es con 12 personas de cada 10,000. El grado de escolaridad promedio en la región es de 6.8 años y la densidad de personas que asisten a la escuela es de 28 por km².

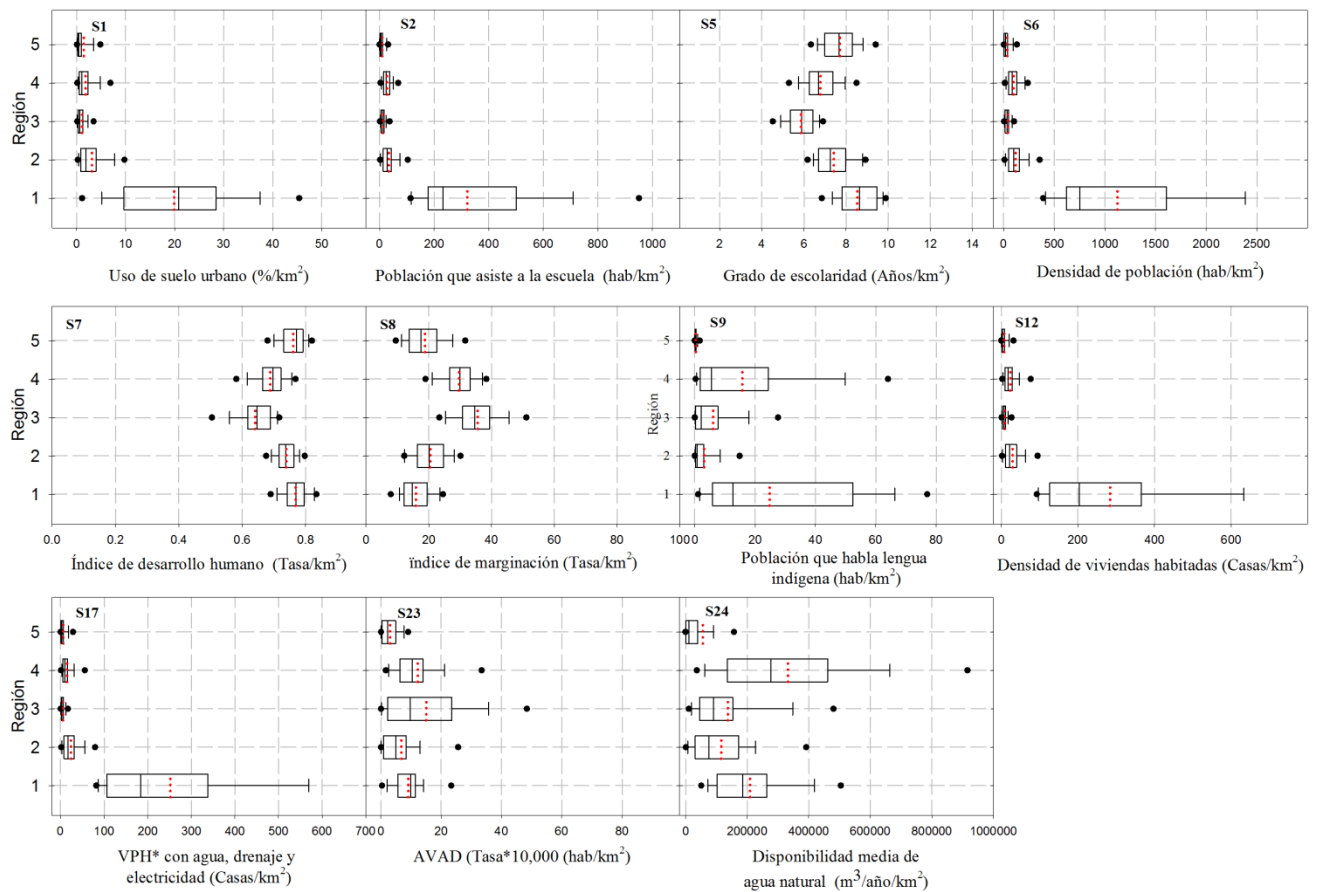


Figura 5.11. Características sociales de las regiones del país. * Viviendas particulares habitadas. La línea roja es el valor promedio.

5.3.2.1 AEPA ambiental

La zona del golfo y la península de Yucatán, forman parte de la región 4, que se caracteriza por tener las mejores condiciones ambientales (0.51) (Tabla 5.3). La temperatura mínima es la más alta del país (18°C), mientras que la máxima promedio es de 29°C. Es la región más húmeda, con un promedio

anual de precipitación de 1,819 mm. Existe gran variabilidad en la precipitación (A20: 66%) por lo que la estación de lluvia y estiaje no está claramente definida, ya que inclusive en el trimestre más seco del año, la precipitación es considerable (A22:152 mm). El exceso de agua en esta región ha permitido que la intensidad de uso de agua subterránea sea baja (7.8%). Además, posiblemente el efecto de las precipitaciones, aunado a la pérdida de vegetación, ocasione que la degradación del suelo en esta región sea la mayor del país (56%) (Figura 5.12).

De manera contrastante, la región 5 que cubre en su mayoría la parte norte del país y se caracteriza por presentar la peor condición ambiental (0.36). Aunque las temperaturas mínimas no son las más bajas (A7: 12.5°C) y las máximas no son las más altas (A8: 28°C), la variabilidad de la temperatura es la mayor (A9: 48%). El rango de temperatura anual (A14) refleja que existe una diferencia de 29°C entre la temperatura mínima del mes más frío y la máxima del mes más caliente, lo que convierte a la región 5 en la más extrema en temperatura del país. Las malas condiciones de temperatura se resaltan con la baja precipitación anual (A19:542 mm), y las condiciones de déficit hídrico generalizado ya que la precipitación en los trimestres, más húmedo y en el más seco del año, es la menor del país (A21: 325 mm, A22: 28 mm), de igual forma la condición de déficit hídrico se muestra en las variables A23 a A26 (Figura 5.12), estos datos coinciden con lo reportado por CONAGUA (CONAGUA, 2012). El efecto de la baja precipitación ocasiona que la erosión hídrica del suelo sea baja (A1:46%). De tal forma que, el panorama cambia en cuestión del tratamiento de aguas residuales y la calidad del agua, ya que la eficiencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales (A2: 77%) y el porcentaje de agua calificada con *DBO* fuertemente contaminada (A5: 0.4%) en esta región, presentan la mejor condición en el país.

La región 3 presenta buenas condiciones ambientales (0.48). El clima es cálido en su mayoría, con temperaturas máximas que llegan hasta los 36°C y mínimas desde 3.6°C. La estacionalidad de la temperatura (A9) es de 16%, lo que indica que esta región no tiene gran amplitud de variabilidad en la temperatura, sino más bien se mantiene con altas temperaturas durante todo el año (Figura 5.9), parámetros A15, A16, A17 y A18). Aunque no es la región más húmeda, el promedio de precipitación anual es importante (1,266 mm año⁻¹), así como los parámetros de precipitación en el trimestre húmedo (A21: 721 mm año⁻¹) y el mes húmedo (A23: 286 mm/año). Las buenas condiciones climáticas de la región se ven reflejadas en la calidad del agua (A4 y A5) cuyos valores no rebasan el 4.5% de contaminación. Del mismo modo, la intensidad de uso de agua subterránea (A6) es baja (20%) y la degradación del suelo por erosión hídrica (A1) es del 50% (Figura 5.12).

Las regiones 1 y 2 se encuentran casi en la misma posición en cuestión ambiental. La región 1 no tiene buenas condiciones ambientales (0.44), es la más fría de las cinco (A7: 9.2 °C), además, la temperatura mínima del mes más frío presenta la peor condición (promedio de 5.1 °C), la degradación del suelo

(A1) y la intensidad de uso de agua subterránea (A6) también muestran valores desfavorables (A1: 54.4% y A6:52.1%).

Mientras que, el clima de la región 2 se puede catalogar como templado (INE, 2006) y abarca gran extensión del Eje Neovolcánico transversal. Esta región, cubre casi en su totalidad del sistema de cuencas LCS, con excepción de las zonas metropolitanas de Toluca, Querétaro, Guanajuato y Jalisco. Probablemente el sistema LCS sea la región hidrológica, económica y social, más importante del país, sin embargo el significativo crecimiento económico de la región se ha dado a expensas del medio ambiente, teniendo como consecuencias el deterioro de los ecosistemas, la pérdida de servicios ambientales y el incremento en la vulnerabilidad de la cuenca (INE, 2006), es decir, se ha generado un pasivo ambiental de gran envergadura.

En la región 2, la temperatura mínima promedio (A7) es de 11.9°C, mientras que la máxima promedio (A8) es de 26.8°C. El rango de temperatura anual (A14) es de 23°C, lo que significa que existen 23 grados de amplitud entre la temperatura mínima del mes más frío (A15: 7.6°C) y la máxima del mes más caliente (A16: 30.3°C). La precipitación promedio (E19) es de 862 mm, muy similar a la de la región 1. La precipitación del mes más seco del año (A24) es de 5.4 mm, mientras que la que ocurre en el trimestre más frío del año (A26) es de 47 mm, ambos representan los valores más bajos del país (Figura 5.12). En la región 2, el promedio en la eficiencia de las plantas de tratamiento (A2) es alto con respecto a las demás regiones (67.5%). Pero, el tratamiento de aguas residuales no se refleja en la calidad de agua, medida por el porcentaje de *DBO* calificada como contaminada (A4) ya que en esta región es el mayor (12%). Posiblemente derivado del impacto que causan las zonas metropolitanas (no incluidas en esta región) en los recursos naturales de la cuenca.

5.3.2.4 AEPA institucional

Sin duda, la densidad de instituciones de educación superior (I1) y de empresas (I2) por km², es mayor en la región 1 (I1: 0.1, I2: 10) (Figura 5.12). En el resto del país, la densidad de instituciones de educación superior (IES) es menor a 0.1. Esto último, es debido a que México es un país centralizado, en donde los recursos económicos son destinados a las zonas más urbanizadas (Parnreiter, 2002). A pesar de esto, la región 1 no tiene la mejor condición institucional (Tabla 5.3).

La mejor condición en la AEPA institucional, del país la tiene la región 2 (0.54). Aunque tiene poca densidad de IES (0.02 instituciones/ km²), ya que éstas están ubicadas dentro de la región 1, la densidad de empresas es baja (I2: 1 empresas/ km²) y el número de organismos operadores de agua es mayor (I3: 12) (Figura 5.13). Es por la buena condición de las dos últimas variables, que la región 2, obtiene el promedio más alto de bienestar institucional.

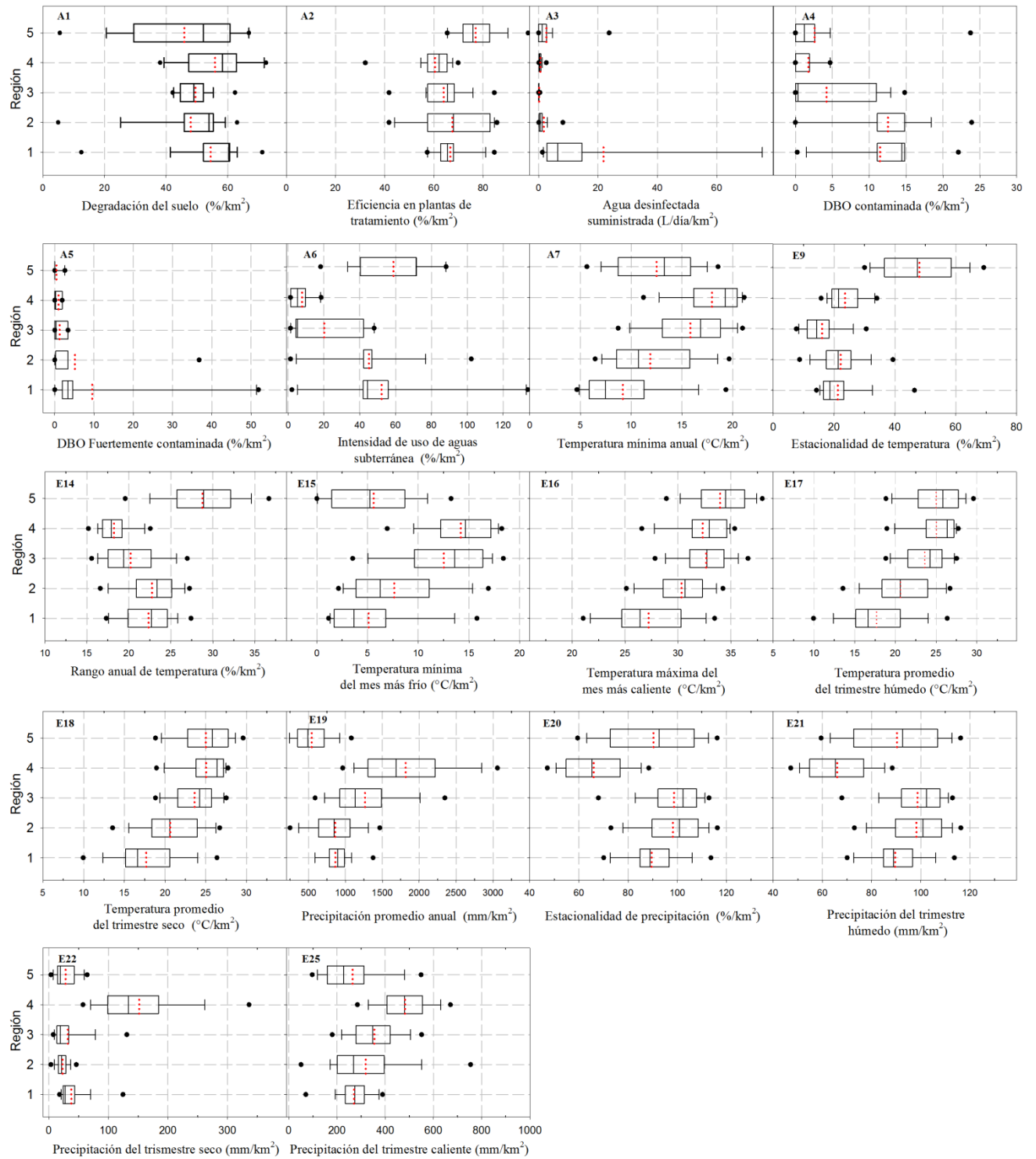


Figura 5.12. Características ambientales de las regiones del país. La línea roja es el valor promedio.

La región 3 tiene la menor densidad de empresas (0.1 empresas/ km²) además tiene un alto número de organismos operadores de agua (11) (Figura 5.13). Por su parte, la región 4 tiene una densidad de empresas de 0.4 por km², y cuenta con 11 organismos operadores de agua por km². La región con peor condición institucional (0.37) es la 5, que aunque tiene una densidad de empresas baja (0.2 empresas/ km²), así como de organismos operadores de agua (I3: 4 Oc/ km²).

Es claro que, aun cuando las variables de esta AEPA no son suficientes, debido a la poca disponibilidad de información digital, por parte de las instituciones gestoras de agua, este estudio proporciona un primer acercamiento con información clave en la representación de la AEPA institucional de México.

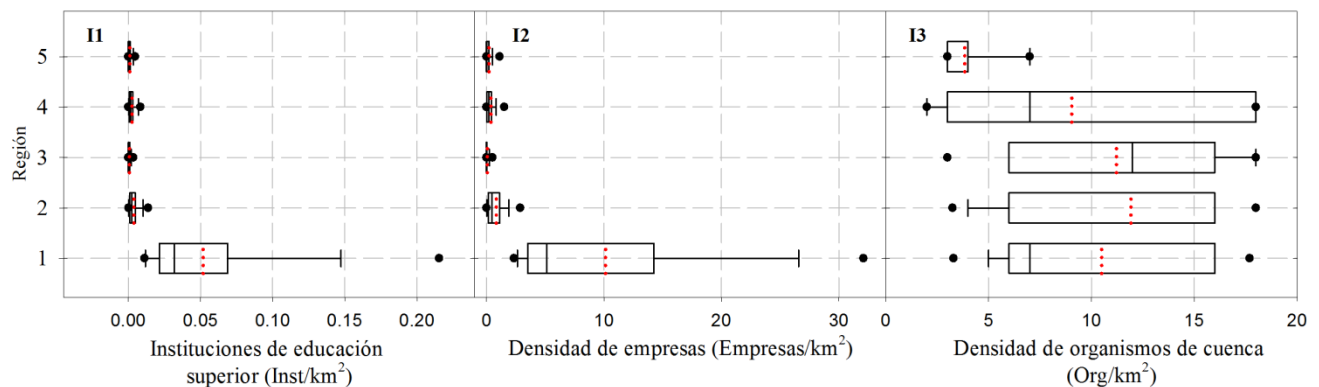


Figura 5.13. Características sociales de las regiones del país. La línea roja es el valor promedio.

5.4. Conclusiones del capítulo

El presente trabajo ha permitido la identificación de cinco regiones homogéneas con base en la simultaneidad de condiciones prevalentes de cada uno de las cuatro AEPA's consideradas como modelo conceptual del sistema hídrico de las cuencas urbanas en México. La cartografía obtenida bajo la metodología aquí propuesta, muestra el panorama general de las condiciones de los recursos hídricos en las cuencas urbanas del país. Es difícil e incluso, poco acertado pretender hacer una comparación de los resultados obtenidos, con otros estudios locales reportados en la literatura correspondiente, ya que en cuestión de determinar regiones homogéneas, los esfuerzos en el país se han enfocado únicamente a fenómenos de precipitación, temperatura (Pineda-Martínez et al., 2007) y parámetros hidrogeográficos (Allende et al., 2009) principalmente, que tienen una relación parcial con las variables incluidas en este estudio y finalidades distintas. Sin embargo, gracias al análisis realizado y a partir de las variables usadas fue posible describir adecuadamente las 5 regiones encontradas (Figuras 5.10-5.13).

Las AEPA's social y económica ha separado a las regiones 1 y 2, que tienen las mejores condiciones por tener el porcentaje más alto de urbanización. De este modo, la región 3 presenta las peores condiciones y resulta ser la región más pobre, coincidente con los Estados más rezagados del país. La AEPA ambiental señala la región 4, con la mejor condición y la región 5 con la peor condición. Esta última condición, generada por las temperaturas extremas, la escasa precipitación y la gran variabilidad de ambas variables. Finalmente, la AEPA institucional destaca a la región 2, con la mejor condición debido a que es la segunda dotada con más IES, y se ha identificado a la región 5 como la más desfavorecida.

Así, este trabajo integra AEPA's que son claves para la GIRH en México. Cabe destacar que, para la AEPA institucional existe una gran carencia de información que refleje las debilidades o fortalezas de la interacción entre instituciones y la sociedad civil. Particularmente, porque la GIRH implica una eficiente y continua comunicación intra e inter instituciones, por lo que, el número de organismos operadores, no refleja la eficiencia de la gestión del agua en México. De igual forma, la GIRH enfatiza la participación pública en el diseño de políticas públicas, estableciendo una buena gobernanza, a través de la creación de regulaciones y arreglos institucionales eficaces para tomar decisiones más equitativas y sustentables, aspectos que no quedan suficientemente modelados en este estudio por falta de información espacial a nivel nacional. Sería interesante que en estudios futuros se pudiera integrar como parte del análisis de la AEPA institucional, el número de Comités de agua locales u ONG's relacionadas con la gestión del agua, ya que a pesar de no ser organismos oficiales (lo que dificulta su censo), constituyen una vía alterna para la gestión del agua en México.

Finalmente, la heterogeneidad ambiental, social, económica y cultural de México exige un enfoque regional para proponer mejores soluciones y estrategias para el manejo del agua, ya que las políticas públicas no atienden problemas heterogéneos, sino que se enfocan en problemas particulares (Huang et al., 2013) y se pretende una aplicación uniforme para cualquier región. Lo anterior conduce a la construcción de paradigmas imposibles de implementar, generando una autorregulación del sistema y con ello, favoreciendo la falta de integridad en la gestión hídrica. Lo anterior justifica y explica ampliamente la necesidad de elaborar planes estratégicos de GIRH con características particulares para cada región homogénea encontrada. Igualmente estas diferencias entre regiones explica la inoperatividad de un plan único para todo el país.

Como etapa futura en la investigación, se ha vislumbrado la caracterización del socioecosistema, por región homogénea, con la finalidad de encontrar con mayor detalle las características que habrán de ser objeto del plan de gestión estratégica por región homogénea.

CAPÍTULO 6: Índice de sustentabilidad hidrológica de subcuencas urbanas de México

Este capítulo está redactado a manera de artículo científico, será la base para preparar su envío a una revista indexada. Sin embargo, la metodología está acotada a la sección 3 indicada en el capítulo 4 de metodología general, con la finalidad de no repetir información y presentarse de manera clara en la presente tesis.

6.1 Introducción

Las actividades humanas han alterado los procesos hidrológicos de las cuencas. Estas modificaciones han llevado a que en la actualidad, la administración del socio-ecosistema sea un foco de atención para la toma de decisiones.

El entendimiento de los procesos que manejan estos cambios es limitado, debido a que las disciplinas científicas usan diferentes metodologías y conceptos para describir y explicar los socio-ecosistemas (Jujnovsky et al., 2012). La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), considera un marco común con base en una perspectiva sustentable, con la finalidad de administrar los recursos para las sociedades del presente, sin comprometer los recursos necesarios para las futuras generaciones (IUCN, 1980). Esencialmente, el término “sustentabilidad”, consiste en la interrelación de procesos dentro de los subsistemas económico, social y ambiental, que auxiliados por el institucional (O’Connor, 2006) procuran la equidad intergeneracional a través del tiempo (Berkes & Folke, 1998b).

La GIRH demanda el diagnóstico de los sectores involucrados en el manejo y administración del agua, para considerar una visión a largo plazo del aprovechamiento de recursos hídricos (Jefferies & Duffy, 2011). Sin embargo, evaluar de manera global, el proceso de gestión del agua, es un aspecto que aún no es atendido con un marco de indicadores establecidos, en su lugar, se mide la sustentabilidad del agua en niveles particulares (Hoekstra, 2011; Sullivan et al., 2003).

Mori & Christodoulou (2012), mencionan que los indicadores de sustentabilidad hídrica tienen que distinguirse y compararse en distintas áreas. Según (Díaz-Delgado et al., 2009) en la práctica se requiere más de un indicador para abarcar todos los aspectos importantes de una situación.

En el mundo, parámetros hídricos se han considerado a nivel local como indicadores de la calidad del agua y las concentraciones de nutrientes o sólidos suspendidos (van Leeuwen et al., 2012). En México, además de los anteriores, se han identificado indicadores clave relacionados con el agua que reflejan el grado de presión en el recurso, la infraestructura de abastecimiento, el tratamiento de agua residual y la calidad del agua subterránea (SNIA, 2013).

Los índices, por otro lado, son una agregación de indicadores que combinan una serie de variables relacionadas con diferentes dimensiones del desarrollo sustentable y que involucran técnicas de ponderación para asignar una importancia a los indicadores que lo conforman (Geniaux et al., 2006). En el mundo, se han aplicado una gran variedad de índices para medir la sustentabilidad a distintos niveles. Algunos países están desarrollando indicadores ambientales, mientras que otros, lo están haciendo desde el enfoque de desarrollo sustentable, esto es, incorporando (pero no necesariamente vinculando) las dimensiones económica, social, ambiental e institucional del desarrollo.

Los esfuerzos a nivel internacional para definir índices que describan la sustentabilidad a diferentes escalas han sido diversos, y en ellos se ha probado con la combinación de distintos métodos e indicadores (Böhringer & Jochem, 2007; Singh et al., 2009). Precisamente, 45 ciudades del mundo se clasificaron con base en un índice de gestión del agua (Van Leeuwen, 2013). En Arabia se aplicó un índice de sustentabilidad de agua ponderado ocho indicadores con un Análisis de Componentes Principales (ACP) (Ali, 2008). El *Water Poverty Index* es una medida holística para medir el estrés hídrico a nivel de vivienda o comunidad (Sullivan et al., 2003). *The Water footprint* es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por recurso y los volúmenes de contaminación por tipo de contaminante, todos los componentes son especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra, 2011).

Buscar el manejo sustentable de los recursos dentro de las cuencas es un reto que implica la caracterización de los puntos locales de atención y de inversión para apoyar el soporte de la toma de decisiones. De este modo, la construcción de índices que permitan la evaluación de las condiciones locales a partir de indicadores confiables, es una herramienta de gran valor que facilita el análisis comparativo y proporciona un mecanismo para la toma de decisiones en cuestión de GIRH y con base en técnicas empíricas y sistemáticas (Esty & Porter, 2005; Myllyviita et al., 2011). Es por eso que en este trabajo se propone un Índice de Sustentabilidad Hidrológica (ISH) para subcuencas de México que servirá de guía para la atención de problemas particulares y la planeación estratégica de desarrollo a nivel local.

6.2 Metodología

En este capítulo se describe la metodología de la sección 3 (Análisis de Factores), especificada en el capítulo 4 de metodología general. Haciendo énfasis en que la sección 1 (Preparación de variables), es la base para los procesos que se explican a continuación (Figura 6.1).

Aunque el enfoque de esta investigación es definir una metodología para la sustentabilidad hídrica en subcuencas urbanas, en esta sección el análisis de factores se hizo considerando todas las subcuencas del país, sin discriminar las urbanas (< 2,500 habitantes), esto debido a que el objetivo es tener una visión de la situación actual del país, considerando las subcuencas que pueden llegar a ser urbanas. Además, es importante analizar la situación en estas sub-cuencas para determinar el efecto que ejerce la población sobre la sustentabilidad de los recursos hídricos.

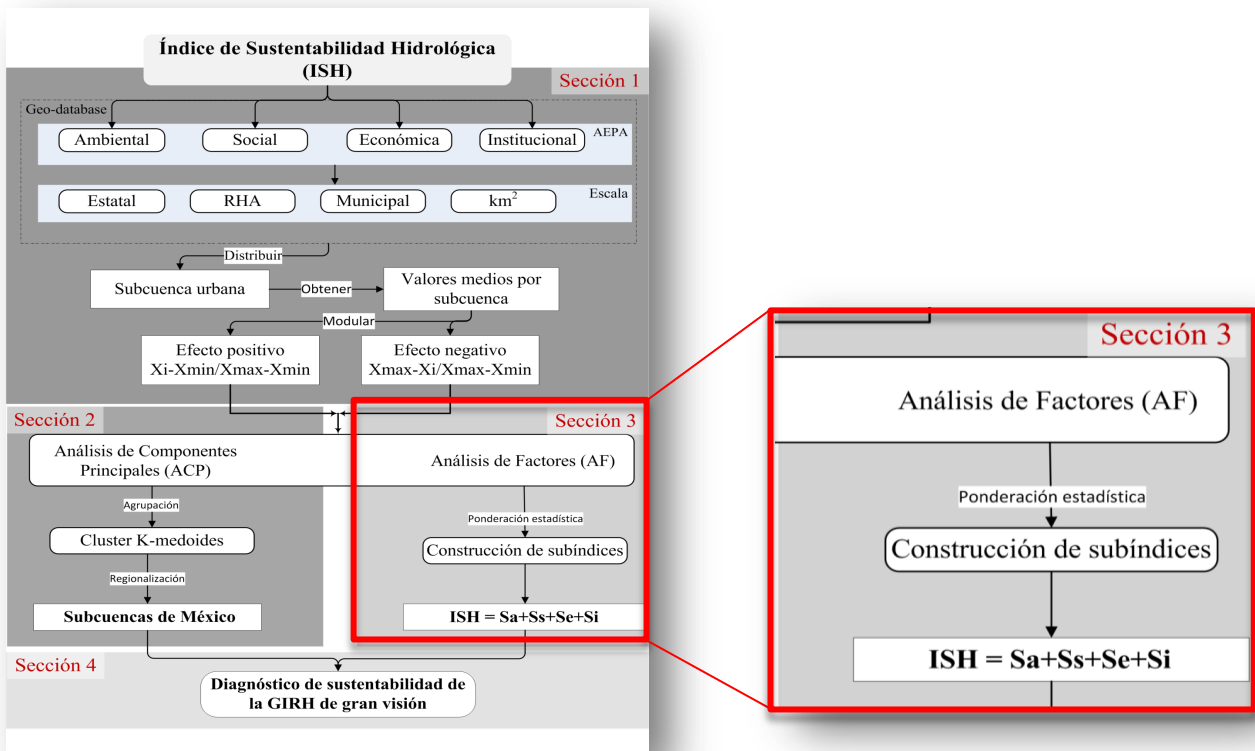


Figura 6.1. Método del Índice de Sustentabilidad Hídrica para subcuencas urbanas sección 3. *Sa, Ss, Se, Si:* subíndices de las AEPA ambiental, social, económica e institucional, respectivamente. RHA: Región Hidrológico-Administrativa.

6.2.3 Análisis de factores (AF)

Se aplicó un AF con rotación de matriz (*varimax*) en cada subsistema, para obtener una interpretación más sencilla de los factores. La rotación *varimax* maximiza la varianza de las cargas cuadradas en cada columna. El procedimiento se hizo en el software Systat V 12 (“Systat Software, Inc,” n.d.), para los subsistemas ambiental, social y económico, el subsistema institucional no se aplicó dicha técnica debido a que sus variables no estuvieron correlacionadas.

La pertinencia del análisis se verificó con el criterio Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), se usó el paquete *Psych* en el software estadístico R (R Development Core Team, 2009), para determinar el KMO de cada AEPA con la siguiente instrucción:

```
var<-read.table("C:/A_Monica/Media      subcnc/VarKMOSoc.csv",      header=TRUE,
sep=" ",na.strings="NA",strip.white=TRUE, dec=".")

data(var)

KMO(var)
```

Figura 6.2. Código de programación del criterio Kaiser-Meyer-Olkin en el software R.

Se eligieron los factores con eigenvalor igual o mayor a 1 (Kaiser, 1960). Esto con el fin de reducir el conjunto de variables correlacionadas a la dimensión más simplificada (Shlens, 2003).

Los factores se construyeron de la siguiente forma:

$$f_{sx} = C_1V_1 + C_2V_2 + \dots + c_nV_n \quad \text{Ec 6.1}$$

donde f_s es el factor del subsistema x , C es el coeficiente de factor para cada variable i antes de la rotación de la matriz en dicho componente y V es el valor estandarizado de cada variable en cada subcuenca (media = 0 y desviación estándar = 1).

El balance de los pesos dentro de los AF para cada AEPA, representa la dirección del Fp , es decir, si la suma es positiva, las variables que mayor peso tienen, son positivas y por tanto, mientras mayor sea el valor calculado de un Fp para la subcuenca, mejor condición tiene. De manera contraria, si el balance es negativo, la cuenca con mejor condición será la que tenga el valor calculado del factor más negativo. La modulación de los Factores principales se hizo usando las formulas 5.1a y 5.1b (Capítulo 5).

6.2.4 Construcción de subíndices

El análisis de factores es capaz de modelar cada uno de los subsistemas, ordenando con la varianza la importancia de las variables en cada factor extraído. Tal que, se construyeron cuatro subíndices ponderados estadísticamente con la contribución de la varianza en cada factor (ecuación 6.2).

$$S_i = \sum_{i=1}^n f_i V e_i \quad \text{Ec. 6.2}$$

donde S_i representa el subíndice para cada subsistema (S_a ambiental, S_s social, S_e económico e S_i institucional). f_i es el valor del factor para la AEPA i y $V e_i$ es el porcentaje de varianza explicado por ese factor principal para la AEPA i .

La ponderación dentro de cada subíndice se hizo tomando como referencia la proporción de varianza explicada encontrada para cada factor principal dentro de cada AEPA.

6.2.5 Ponderación y agregación de subíndices

Indudablemente, la asignación de pesos es un paso clave en la determinación del índice. En este trabajo en particular, los pesos no pueden ser asignados a partir del AF ya que cada subsistema fue manipulado de manera independiente, y los pesos están asignados dentro de cada una de ellas. Es por esta razón que se dio un peso subjetivo a cada una de ellas, el ISH está conformado por la aportación igualitaria de los

cuatros subsistemas, por lo que cada uno de éstos contribuye de la misma manera a la sustentabilidad y por tanto el peso asignado dentro del sistema fue equivalente (Ecuación 4).

$$ISH = \left(\frac{S_a}{0.25} + \frac{S_s}{0.25} + \frac{S_e}{0.25} + \frac{S_i}{0.25} \right) * 100 \quad \text{Ec. 6.3}$$

donde 0.25 es el peso asignado a cada una de los subsistemas dentro del índice.

Dado esto, el rango de valores del ISH varía entre 0 y 1, donde 0 es la peor condición y 1 la mejor. Esta interpretación fue simplificada subdividiendo el rango en subcategorías:

Tabla 6.1. Categorías de ISH.

Valor de ISH	Categoría
0 – 20	Malo
21 – 40	Deficiente
41 - 60	Aceptable
61 - 80	Bueno
81- 100	Excelente

Sin embargo, dentro de las categorías del ISH, no es posible identificar la AEPA que necesita más atención, esto es importante para orientar los planes de ordenamiento y proponer acciones de rehabilitación y manejo dentro de las subcuencas.

Por tal motivo, para identificar el estado de las AEPA's para cada subcuenca, se diseñó una matriz de combinación de códigos ESAI (Económico, Social, Ambiental e Institucional), en donde se representan las categorías de los subíndices, por medio de un código. De manera tal, que si el subíndice tuvo un valor de 0 a 0.05 en la AEPA institucional, le corresponde el código 1, si tuvo un valor entre 0.06 y 1 el código asignado fue 2 y así sucesivamente. Agregando un cero a la derecha a los códigos, para cada AEPA (Tabla 6.4).

Tabla 6.2. Matriz de asignación de códigos para subíndices de sustentabilidad.

Valores de subíndice		Código ESAI				
Min	Max	Económico	Social	Ambiental	Institucional	Categoría
0	0.05	1000	100	10	1	Malo
0.05	0.1	2000	200	20	2	Deficiente
0.1	0.15	3000	300	30	3	Aceptable
0.15	0.2	4000	400	40	4	Bueno
0.2	0.25	5000	500	50	5	Excelente

De manera tal, que la agregación de códigos de cada subcuenca, puede llegar a 1,024 combinaciones distintas en el país. El código ideal en una subcuenca hidrológicamente sustentable sería 5555, en el que la condición en los cuatro subíndices fuera excelente. Del mismo modo, la condición más preocupante sería 1111.

El diseño del ISH incluyó con un reporte para cada subcuenca, diseñado de manera dinámica en Excel (ANEXO V). La finalidad es que el usuario introduzca el identificador de la subcuenca (ID), proporcionado en la base de datos digital (ANEXO V) y que el programa genere un reporte con las características generales de la subcuenca, la ubicación, los valores obtenidos para los subíndices, la ponderación de los mismos, el valor del ISH y finalmente una tabla con el valor obtenido de cada variable de origen, comparada con los mínimos y máximos del país.

6.3 Resultados

6.3.1 Análisis factorial

6.3.2.3 Económica

En esta AEPA, inicialmente fueron 16 variables, sin embargo, al hacer la prueba de KMO, resultó en un sistema *singular* (KMO = 0.5), lo que quiere decir que posiblemente alguna de las variables es una combinación lineal de otra. Por lo que se analizó la matriz de datos y se eliminaron las variables relativas al género (Ec2, Ec3, Ec6, Ec7, Ec9, Ec10, Ec12, Ec13, Ec15 y Ec16) y sólo se aplicó para las seis variables restantes.

El primer *Fp* se construye de la siguiente forma:

$$Fp_{1e} = Ec_1 * 0.05 + Ec_{11} * 0.22 + Ec_{14} * -0.22 + Ec_4 * 0.16 + Ec_5 * -0.22 + Ec_8 * 0.22$$

En esta AEPA se incluyeron 6 variables el KMO fue de 0.84. El *Fp* resultante explica el 73.5% de la varianza de la AEPA y se relaciona con una buena condición de la fuerza laboral (Ec14 y Ec8) y la baja participación de la población en la economía (Ec5 y Ec14).

Tabla 6.3. Pesos de los factores principales de la AEPA económica. Ve: Varianza explicada (%). *Mayor contribución.

ID	Variables	Factor principal	
		Ve: 73.5	
		Sin varimax	Con varimax
Ec1	Tasa de participación económica	0.05	0.19
Ec11	Población económicamente activa ocupada (PEAO)	0.22*	0.99
Ec14	Población económicamente activa desocupada (PEAD)	-0.22*	-0.99
Ec4	PIB total	0.16	0.69
Ec5	Población económicamente inactiva (PEI)	-0.22*	-0.99
Ec8	Población económicamente activa (PEA)	0.22*	0.99
TOTAL		0.201	0.691

6.3.1.2 Social

Esta AEPA presentó el mismo caso que la económica, el KMO inicial de las 24 variables fue de 0.5, lo que quiere decir que posiblemente alguna de las variables es una combinación lineal de otra. Analizando la geo-database, la variable de Viviendas Particulares Habitadas (VPH) que cuentan con agua, drenaje y electricidad, incluye a las variables de VPH que cuentan con agua, las VPH que cuentan con drenaje y las VPH que cuentan con electricidad, que son tres variables distintas. Por tanto

se tomó la decisión de prescindir de la variable VPH con agua, drenaje y electricidad para el *AF*. El KMO fue de 0.82 para las 23 variables analizadas, por lo que se llevó a cabo el *AF*.

La construcción del primer *Fp* se muestra a continuación, como ejemplo para construir los *Fp* 2 y 3.

$$\begin{aligned}
 Fp_{1s} = & S_{15} * 0.13 + S_{13} * 0.13 + S_{18} * 0.13 + S_{22} * 0.13 + S_{20} * 0.13 + S_2 * 0.13 \\
 & + S_{19} * 0.05 + S_{16} * 0.04 + S_{23} * 0.02 + S_{21} * 0.01 + S_{18} * 0.13 + S_7 \\
 & * -0.02 + S_8 * -0.03 + S_3 * -0.04 + S_{14} * -0.04 + S_5 * -0.04 + S_{24} \\
 & * -0.04 + S_4 * -0.05 + S_{10} * -0.06 + S_9 * -0.06 + S_{11} * -0.06 + S_1 \\
 & * -0.09 + S_6 * -0.12 + S_{12} * -0.13
 \end{aligned}$$

donde S_i es el valor estandarizado (menos media entre desviación estándar) de la variable i de la AEPA social, multiplicada por el peso del factor principal resultado del análisis de factores, antes de la rotación *varimax*.

Las variables se agregaron en tres *Fp* que explicaron el 84.5% de la varianza grupal (Tabla 6.5 y 6.6). El primer factor principal contribuyó con el 39.1% de la varianza explicada de la AEPA, se relaciona con las subcuencas que tienen alta densidad de población (S6) y gran número de Viviendas Particulares Habitadas (VPH), así mismo, se consideran subcuencas con buena condición de servicios de agua (S13), drenaje (S15), electricidad (S20) y sanitario (S22). En el segundo *Fp*, se consideran las subcuencas con alto grado de escolaridad (S4 y S5) y desarrollo humano (S7). Por último, el tercer *Fp* describe a las subcuencas más marginadas, ya que incluye las que no cuentan con servicios en la vivienda (S14, S16, S19, S21), además de que existe baja población que habla alguna lengua indígena (S9, S10 y S11).

Tabla 6.4. Pesos de los factores principales de la AEPA social sin *varimax*. Ve: Varianza explicada (%). *Mayor contribución.

ID	Variable	Factor principal		
		1 (Ve:39.1)	2 (Ve: 20.3)	3 (Ve:24.4)
S15	VPH con drenaje	0.13*	-0.03	0.06
S13	VPH con servicio de agua entubada	0.13*	-0.03	0.06
S18	VPH con bienes	0.13*	-0.03	0.05
S22	VPH con sanitario	0.13*	-0.03	0.05
S20	VPH con electricidad	0.13*	-0.03	0.05
S2	Población de 3 a 30 años y más que asiste a la escuela	0.13*	-0.03	0.04
S19	VPH sin bienes	0.05	-0.04	0.20
S16	VPH sin drenaje	0.04	-0.06	0.18
S23	Años Vida Ajustados por Discapacidad por enfermedades intestinales	0.02	0.07	0.07
S21	VPH sin electricidad	0.01	-0.02	0.15
S7	IDH	-0.02	0.20	-0.02

Tabla 6.5. Pesos de los factores principales de la AEPA social sin varimax. Ve: Varianza explicada (%). *Mayor contribución (Continuación).

ID	Variable	Factor principal		
		1 (Ve:39.1)	2 (Ve: 20.3)	3 (Ve:24.4)
S8	Índice de marginación	-0.03	0.21	-0.03
S3	Grado de escolaridad mujeres	-0.04	0.23*	-0.05
S14	VPH sin servicio de agua entubada	-0.04	-0.01	0.07
S5	Grado de escolaridad promedio	-0.04	0.24*	-0.07
S24	Disponibilidad natural media per cápita	-0.04	0.01	-0.12
S4	Grado de escolaridad hombres	-0.05	0.24*	-0.09
S10	Población masculina de 3 años y más que habla lengua indígena	-0.06	0.05	-0.21*
S9	Población de 3 años y más que hablan lengua indígena	-0.06	0.05	-0.21*
S11	Población femenina de 3 años y más que habla lengua indígena	-0.06	0.05	-0.21*
S1	Porcentaje de uso de suelo urbano por subcuenca	-0.09	0.00	-0.01
S6	Densidad de población	-0.12	0.02	-0.04
S12	Viviendas particulares habitadas (VPH)	-0.13	0.03	-0.05
TOTAL		0.14	1.10	-0.13

Tabla 6.6. Pesos de los factores principales de la AEPA ambiental después de varimax. Ve: Varianza explicada (%).

ID	Variable	Factor principal		
		1 (Ve:39.1)	2 (Ve: 20.3)	3 (Ve:24.4)
S19	VPH sin bienes			0.90
S16	VPH sin drenaje			0.78
S21	VPH sin electricidad			0.75
S14	VPH sin servicio de agua entubada	-0.61		0.52
S23	Años Vida Ajustados por Discapacidad por enfermedades intestinales			
S15	VPH con drenaje	0.98		
S13	VPH con servicio de agua entubada	0.97		
S18	VPH con bienes	0.97		
S22	VPH con sanitario	0.97		
S20	VPH con electricidad	0.97		
S2	Población de 3 a 30 años y más que asiste a la escuela	0.96		
S1	Porcentaje de uso de suelo urbano por subcuenca	-0.75		
S7	IDH		0.87	
S8	Índice de marginación		0.89	
S6	Densidad de población	-0.96		
S12	Viviendas particulares habitadas (VPH)	-0.97		
S3	Grado de escolaridad mujeres		0.96	
S5	Grado de escolaridad promedio		0.96	
S4	Grado de escolaridad hombres		0.94	
S24	Disponibilidad natural media per cápita			-0.51
S10	Población masculina de 3 años y más que habla lengua indígena			-0.90
S9	Población de 3 años y más que hablan lengua indígena			-0.90
S11	Población femenina de 3 años y más que habla lengua indígena			-0.90
TOTAL		3.00	5.10	0.47

6.3.1.1 Ambiental

Se incluyeron 26 variables en esta AEPA, para las cuales, el criterio KMO fue de 0.86, por lo que se consideró pertinente para el *AF*. Los factores con eigenvalor mayor a 1 fueron 5 que explicaron el 83.8% de la varianza. El *Fp* 1 se relacionó con la estacionalidad de temperatura, el *Fp* 2 con la temperatura mínima anual y la temperatura máxima del mes más caliente. El *Fp* 3 fue explicado con la precipitación del mes más seco del año y con la estacionalidad de precipitación. El *Fp* 4 se relacionó con la *DBO* calificada como contaminada y con la degradación del suelo. Finalmente, el *Fp* 5 fue explicado por la cantidad de agua desinfectada suministrada y la *DBO* fuertemente contaminada (Tabla 6.3 y 6.4).

Los pesos son la correlación de las variables con el *Fp* y los que se muestran antes del análisis *varimax* (Tabla 6.7), son los relativos a la construcción de los *Fp*. Dado esto, el *Fp* 1 ambiental se construye de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Fp_{1a} = & A_9 * 0.19 + A_{10} * 0.18 + A_{14} * 0.17 + A_{11} * 0.12 + A_{15} * 0.1 + A_6 * 0.1 \\ & + A_{16} * 0.01 + A_{17} * 0.09 + A_{12} * 0.07 + A_{14} * 0.17 + A_1 * 0.07 + A_{13} \\ & * 0.07 + A_{21} * 0.06 + A_{23} * 0.06 + A_{20} * 0.05 + A_7 * 0.05 + A_{19} * 0.04 \\ & + A_5 * 0.02 + A_{25} * 0.01 + A_8 * -0.01 + A_{26} * -0.04 + A_{24} * -0.04 \\ & + A_3 * -0.04 + A_{22} * -0.04 + A_{18} * -0.07 + A_2 * -0.08 + A_4 * -0.12 \end{aligned}$$

donde A_i es el valor estandarizado (menos media entre desviación estándar) de la variable i de la AEPA ambiental, multiplicada por el peso del factor principal resultado del análisis de factores, antes de la rotación *varimax*.

Los pesos resultados de la rotación *varimax* (Tabla 6.4), se usan para facilitar la interpretación de los *Fp* y es por esto que sólo se presentan los mayores a 0.5 en valor absoluto. El *Fp* 1 tiene mejor condición (mayores valores) en subcuencas en donde las variaciones de temperatura durante el año no son extremas, es decir, donde la diferencia entre temperatura máxima del mes más caliente y la mínima del mes más frío (A_{14}), es corta. El *Fp* 2 tiene valores menores (mejor condición), en las cuencas con temperatura estable, es decir en las que la temperatura promedio del mes más frío del año aumenta (A_{11}) y la temperatura promedio del mes más cálido (A_{12}), disminuye. El *Fp* 3 tiene valores altos en subcuencas donde la precipitación es abundante (A_{22} , A_{24} y A_{26}) y además los periodos de sequía son cortos (A_{20}).

Tabla 6.7. Pesos de los factores principales de la AEPA ambiental sin *varimax*. Ve: Varianza explicada (%). *Mayor contribución.

ID	Variable	Factor Principal				
		1(Ve:28)	2(Ve:21.4)	3(Ve:16.3)	4(Ve:12.1)	5(Ve:5.8)
A9	Estacionalidad de temperatura	0.19*	-0.08	-0.06	-0.06	-0.00
A1	Isotermalidad	0.18	-0.06	-0.13	-0.03	0.02
A1	Rango de temperatura anual	0.17	-0.05	0.02	-0.10	-0.05
A1	Tprom del mes más frío	0.12	0.08	-0.04	-0.06	0.01
A1	Tmin del mes más frío	0.10	0.07	0.01	-0.07	-0.02
A6	Intensidad de uso de acuíferos	0.10	-0.06	-0.01	0.05	-0.24
A1	Tmax del mes más caliente	0.01	-0.20*	0.02	-0.03	-0.05
A1	Tprom del cuarto más húmedo	0.09	-0.12	0.04	-0.14	-0.06
A1	Tprom del mes más caliente	0.07	-0.12	-0.02	0.01	-0.01
A1	Superficie con degradación de suelo	0.07	0.01	0.01	-0.4	-0.08
A1	Rango medio de temperatura diurna	0.07	0.00	0.12	-0.09	-0.07
A2	Precipitación del cuarto más húmedo	0.06	-0.01	-0.02	0.14	0.04
A2	Precipitación del mes más húmedo	0.06	-0.00	-0.01	0.15	0.03
A2	Estacionalidad de precipitación	0.05	0.03	-0.30	0.18	0.03
A7	Temperatura mínima promedio 50 años	0.05	0.12	0.02	-0.04	-0.01
A1	Precipitación promedio anual	0.04	-0.01	0.07	0.10	0.04
A5	Demanda bioquímica de Oxígeno calificada como fuertemente contaminada	0.02	-0.03	-0.02	-0.01	-0.56
A2	Precipitación del cuarto más caliente	0.01	-0.01	-0.03	0.22	0.01
A8	Temperatura máxima promedio 50 años (Tmax)	-0.01	-0.18	0.07	-0.02	-0.04
A2	Precipitación del cuarto más frío	-0.04	-0.01	0.23	-0.01	0.04
A2	Precipitación del mes más seco	-0.04	-0.01	0.24	0.01	0.05
A3	Agua desinfectada suministrada	-0.04	0.06	0.02	0.05	0.51
A2	Precipitación del cuarto más seco	-0.04	-0.01	0.24	0.02	0.05
A1	Tprom del cuarto más seco	-0.07	-0.12	0.01	0.09	-0.01
A2	Eficiencia en las Plantas de tratamiento	-0.08	-0.03	-0.04	0.121	-0.203
A4	Demanda bioquímica de Oxígeno calificada como	-0.12	0.05	-0.04	0.328	-0.044
TOTAL		1.20	-0.89	0.50	0.13	-0.58

El *Fp* 4 aumenta en subcuencas en las que la calidad del agua es buena (A4), pero la degradación del suelo es alta (A1). Para finalizar, el *Fp* 5 tiene una mejor condición en subcuencas donde la calidad de agua es mala (A5), pero la cantidad de agua clorada suministrada es alta (A3) (Tabla 6.8).

Tabla 6.8. Pesos de los factores principales de la AEPA ambiental después de *varimax*. Ve: Varianza explicada (%).

ID	Variable	Factor Principal				
		1 (Ve:28.0)	2 (Ve:21.4)	3 (Ve:16.3)	4 (Ve:12.1)	5 (Ve:5.8)
A9	Estacionalidad de temperatura	0.97				
A14	Rango de temperatura anual	0.92				

Tabla 6.8. Pesos de los factores principales de la AEPA ambiental después de *varimax*. Ve: Varianza explicada (%)
(Continuación).

ID	Variable	Factor Principal				
		1 (Ve:28.0)	2(Ve:21.4)	3 (Ve:16.3)	4(Ve:12.1)	5(Ve:5.8)
A10	Isotermalidad	0.85				
A11	Tprom del mes más frío	0.78	0.60			
A15	Tmin del mes más frío	0.76	0.59			
A21	Precipitación del cuarto más húmedo	0.71			0.55	
A6	Intensidad de uso de acuíferos	0.71				
A23	Precipitación del mes más húmedo	0.70			0.56	
A19	Precipitación promedio anual	0.63		0.51	0.50	
A13	Rango medio de temperatura diurna	0.56		0.53		
A7	Temperatura mínima promedio 50 años	0.53	0.78			
A25	Precipitación del cuarto más caliente				0.67	
A16	Tmax del mes más caliente		-0.91			
A24	Precipitación del mes más seco			0.89		
A22	Precipitación del cuarto más seco			0.90		
A26	Precipitación del cuarto más frío			0.86		
A20	Estacionalidad de precipitación			-0.85		
A12	Tprom del mes más caliente		-0.97			
A17	Tprom del cuarto más húmedo		-0.90			
A3	Agua desinfectada suministrada					0.72
A5	Demanda bioquímica de Oxígeno fuertemente contaminada					-0.83
A4	Demanda bioquímica de Oxígeno Contaminada				0.75	
A1	Superficie con degradación de suelo				-0.83	
A8	Temperatura máxima promedio 50 años (Tmax)		-0.91			
A2	Eficiencia en las Plantas de tratamiento					
A18	Tprom del cuarto más seco	-0.55	-0.75			
TOTAL		8.20	-1.38	4.44	4.38	-0.53

6.3.2.4 Institucional

Esta AEPA el KMO fue de 0.5, sin embargo, no se eliminó ninguna variable ya que sólo se incluyeron 3, por lo que no se aplicó el *AF*.

6.3.3. Índice de Sustentabilidad Hídrica

El subíndice ambiental (S_a) muestra que las condiciones en el país varían entre deficientes (0.06 - 0.1) y buenas (0.16 - 0.2). Las condiciones deficientes prevalecen en el norte del país, debido a los climas extremos. Mientras que las buenas condiciones climáticas se presentan al sur del país a causa de las altas precipitaciones. El subíndice social (S_s) califica el territorio mexicano dentro de las categorías de malo (0 - 0.05) y aceptable (0.11 - 0.15). Evidentemente, el S_s califica a las subcuencas urbanas más representativas del país, en la categoría de bueno. El subíndice económico (S_e), califica a la mayor parte del país en la categoría de malo, sin embargo en las subcuencas urbanas, de nuevo, la condición es un poco más favorable, entretanto la subcuenca del Valle de México, presenta una excelente condición. El subíndice institucional (S_i) varía entre las categorías de deficiente y bueno, además de que no destacan las subcuencas urbanas más importantes (Figura 6.1).

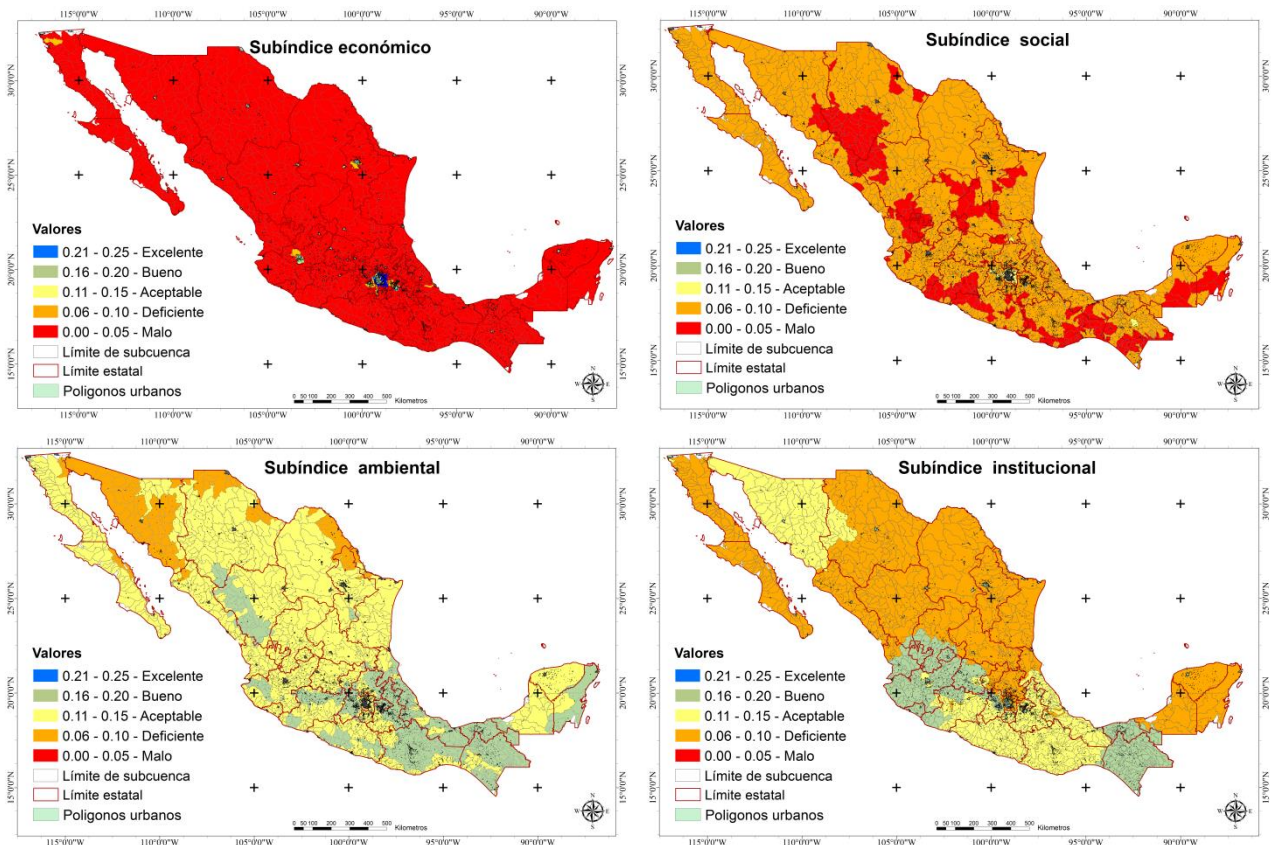


Figura 6.1. Subíndices de sustentabilidad hídrica.

Al agregar los subíndices, el ISH cataloga al país en las categorías de deficiente (20 - 40) y aceptable (40 - 60) de sustentabilidad hídrica. No obstante, la descripción con los valores del ISH es muy burda, ya que no se determinan las condiciones para cada AEPA.

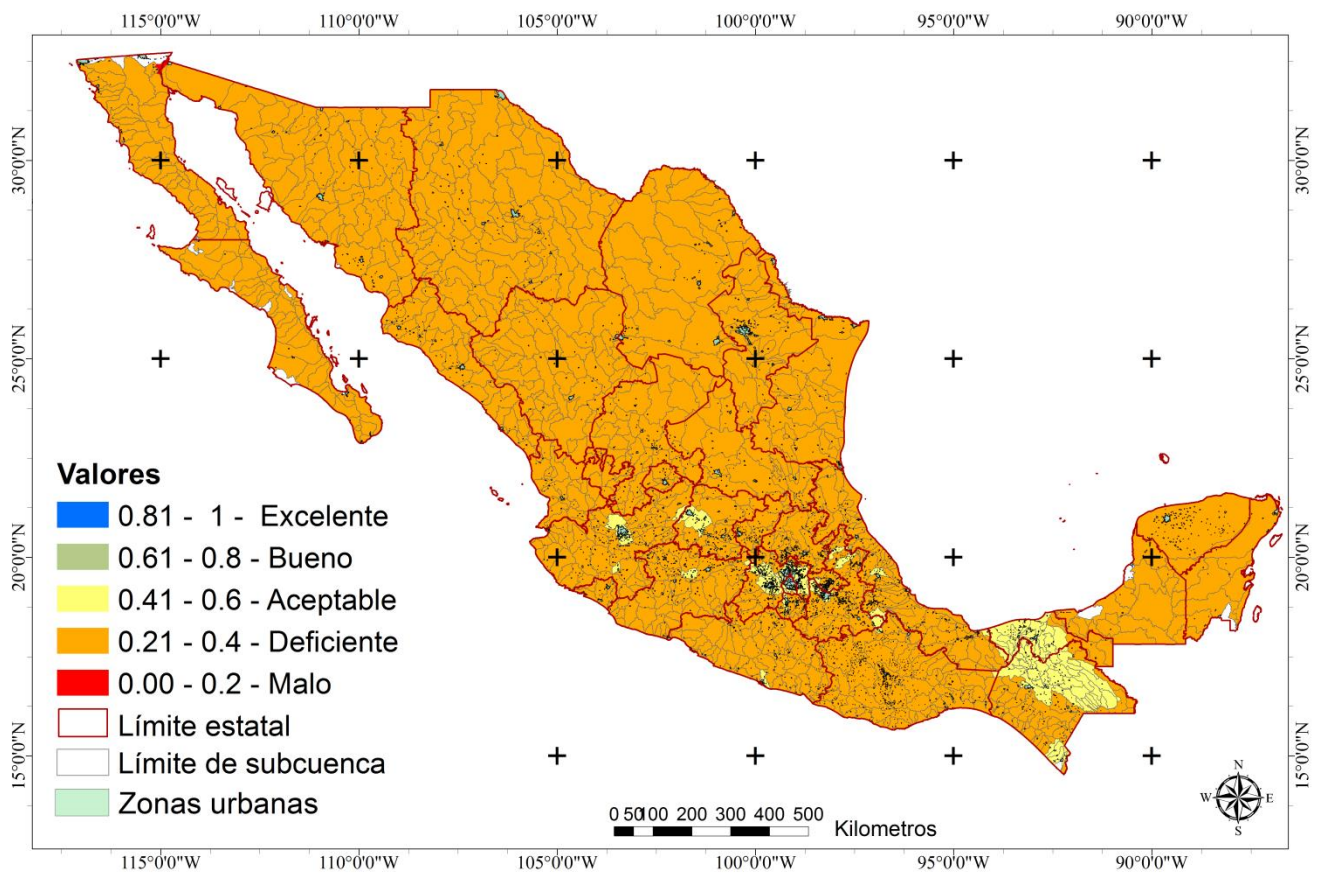


Figura 6.2. Índice de Sustentabilidad Hídrica para México.

El 97% del territorio mexicano se encuentra clasificado dentro de 14 códigos ESAI distintos (Figura 6.3). El país se distingue porque la condición socio-económica (mostrada en los dos primeros dígitos del código ESAI), es deficiente y mala para las subcuencas mostradas en la figura 6.3. Inclusive, estas dos AEPA's son las que atraen el ISH hacia valores tan similares en la mayor parte del territorio (ISH = 21 y 40). Pero, los valores de las AEPA's ambiental e institucional son más heterogéneos en el país, por lo que en conjunto, los códigos ESAI revelan un panorama general de las condiciones específicas de las subcuencas de México. .

De acuerdo con la categorización de códigos el código más ocurrente es el 1232 (276 subcuencas), lo que significa que la condición en la AEPA económica tiene valor categorizado como malo (con valores en Se entre 0.0 y 0.05), mientras que en la AEPA social es deficiente (Ss entre 0.06 y 0.10), la AEPA ambiental es aceptable (con valores en Sa entre 0.1 y 0.15) y la AEPA institucional tiene valores de 2 clasificado como deficiente (Si entre 0.06 y 0.10).

Aunque la mayor parte del territorio mexicano se puede agrupar en las categorías mostradas en la figura 6.3, el 3% restante (35 subcuencas), presenta condiciones particulares que merecen especial atención (Categoría de especiales en Figura 6.3).

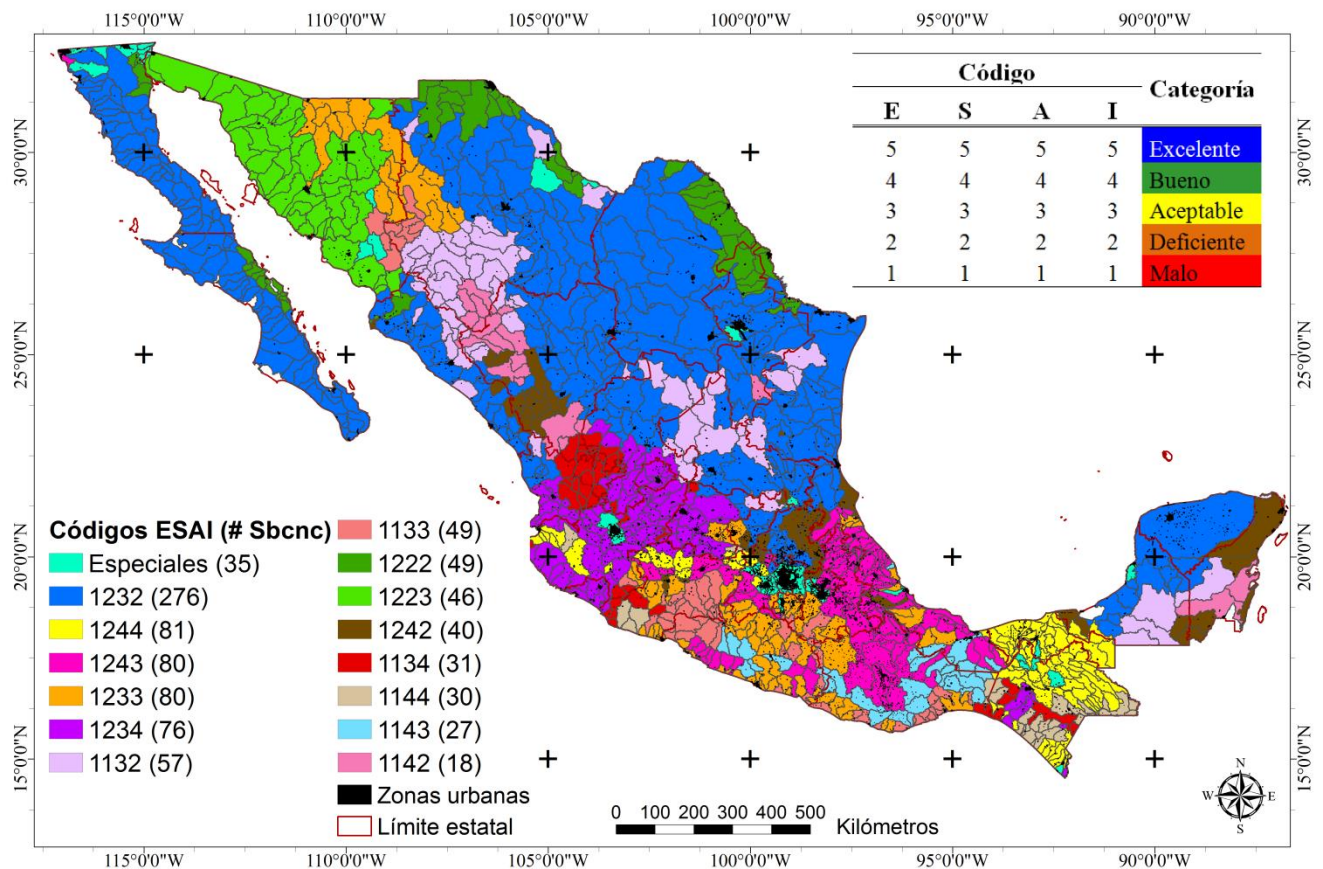


Figura 6.3. Caracterización de sustentabilidad hídrica para subcuencas de México usando códigos ESAI. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

La categoría de “especiales” agrupa subcuencas que albergan grandes ciudades, que muestran casos específicos de sustentabilidad hídrica. Por ejemplo, las subcuencas que incluye a las Zona Metropolitanas: del Valle de México (ZMVM), Toluca, Guadalajara, Puebla y Monterrey (Tabla 6.6) (Figura 6.4).

Como se describió en el capítulo anterior, las subcuencas urbanas con mayor densidad de población, muestran valores altos en los indicadores sociales y económicos. A pesar de esto, la evaluación del ISH para estas subcuencas es mejor que el resto, pero aun así se encuentran en la categoría de aceptable (ISH 41 – 60). Los valores de los códigos ESAI para estas subcuencas, revelan también el alto nivel de desigualdad socio-económica del país, mientras que el 0.72% del territorio (7 subcuencas) tienen valores económicos y sociales arriba de 3, el resto están por debajo de 2 para los dos AEPA’s (Tabla 6.6)

Partiendo del análisis de códigos ESAI, las subcuencas que tienen el código con mayor valor, se encuentran dentro del 3% del territorio en las RHA Grijalva-Usumacinta, Papaloapan y Lerma-Santiago. En definitiva este resultado es influenciado por la alta cantidad de precipitación en dichas áreas, lo que hace que el valor del Sa sea alto (Tabla 6.6).

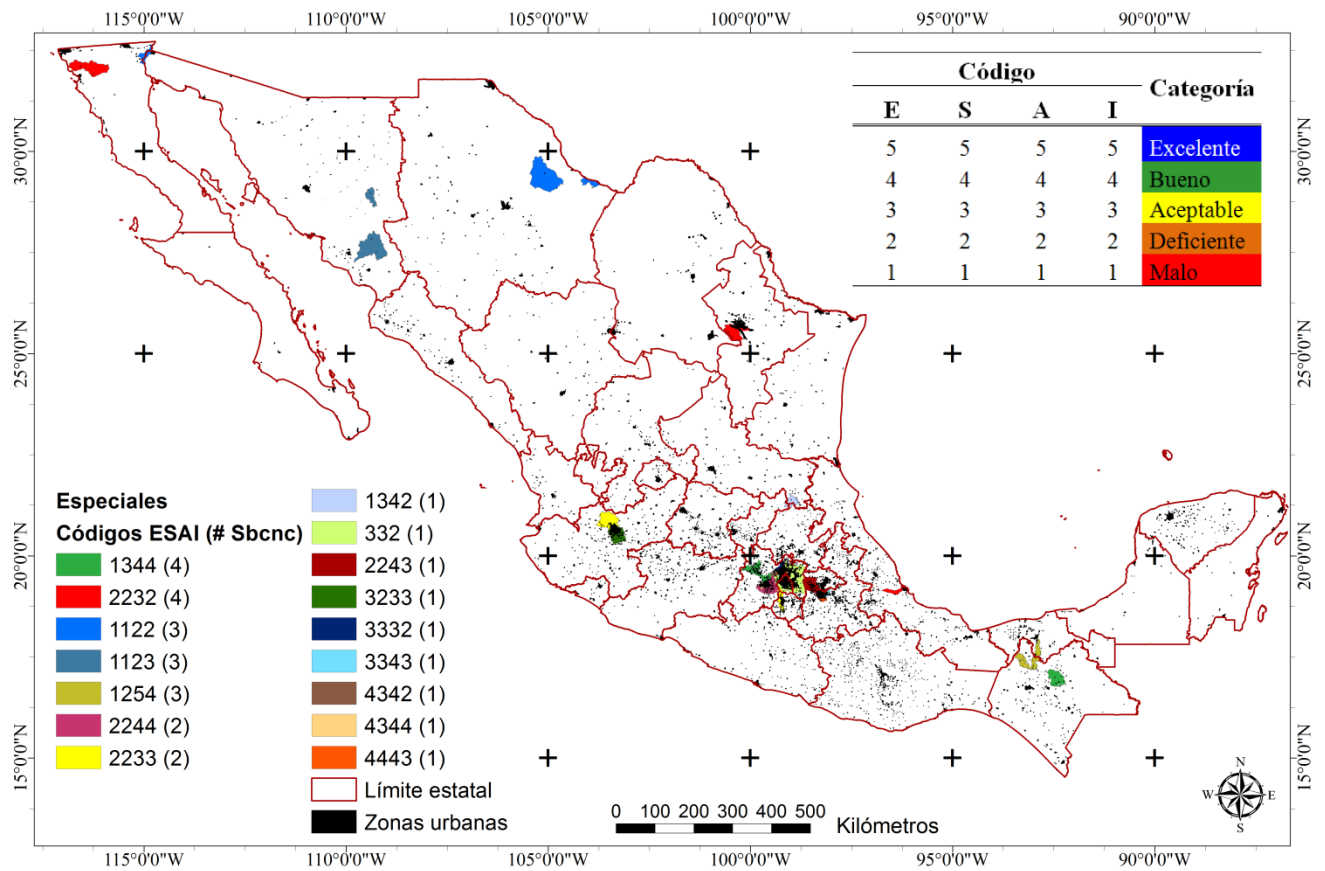


Figura 6.4. Caracterización de sustentabilidad hídrica para subcuencas “Especiales” de México usando códigos ESAI. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

Tabla 6.6. Códigos ESAI para el 3% del territorio mexicano. *RHA: Región Hidrológico-Administrativa

Subcuenca	Ciudad	ID	RHA*	Código ESAI
R. Zayula		127	Grijalva - Usumacinta	1254
R. Platanar		141	Grijalva - Usumacinta	
R. La Sierra		170	Grijalva - Usumacinta	
Alvarado	Puebla	265	Papaloapan	4443
R. Verdiguél	Toluca	286	Lerma-Santiago	4344
R. Cuautitlan	Valle de México	319	Pánuco	4342
R. Nautla		378	Tuxpan - Nautla	3343
R. Oztolotepec	Toluca	304	Lerma-Santiago	1344
R- Jaltepec	Toluca	326	Lerma-Santiago	
R. Oztolotepec - R. Atlacomulco	Toluca	336	Lerma-Santiago	
R. Chacté		108	Grijalva - Usumacinta	
R. Axtla		455	Pánuco	1342

Tabla 6.6. Códigos ESAI para el 3% del territorio mexicano. *RHA: Región Hidrológico-Administrativa.
(Continuación)

Subcuenca	Ciudad	ID	RHA*	Código ESAI
R. Tejalpa	Toluca	290	Lerma-Santiago	2244
R. Almoloya - R. Oztolotepec	Toluca	302	Lerma-Santiago	
R. Atoyac - R. San Martín Texmelucan	Puebla	298	Balsas	2243
L. Texcoco y Zumpango	Valle de México	333	Pánuco	5332
Tepotzotlán	Valle de México	338	Pánuco	3332
R. Corona - R. Verde	Guadalajara	407	Lerma-Santiago	3233
R. Apatlaco	Cuernavaca	279	Balsas	2233
R. verde - Santa Rosa	Guadalajara	430	Lerma-Santiago	
R. Monterrey	Monterrey	658	Bravo - Conchos	2232
R. San Francisco - Puerto de Veracruz	Puerto de Veracruz	285	Papaloapan	
R. Guadalupe		962	Baja California	3222
R. Cocoraque		772	Sonora sur	1123
R. Cedro		780	Sonora sur	2123
R. Bacanora		836	Sonora sur	1123
R. Colorado	Mexicali	974	Río Colorado	1122
R. Bravo - Ventanas		849	Bravo - Conchos	
R. Conchos - Cuchillo parado		879	Bravo - Conchos	

6.3.2 Bases de datos en México

En México, la generación de información estadística y geográfica, se encuentra a cargo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Las bases estadísticas se integran con la información generada en los censos; 1) de población y vivienda (cada 10 años), 2) económico (cada 5 años) y 3) agrícola, ganadero y forestal (cada 10 años). Mientras que los productos geográficos se enfocan en la geográfica del relieve, la vegetación, clima, suelo, agua, etc.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través del Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA), ofrece una visión breve de los cambios y la situación actual del medio ambiente y los recursos naturales del país (SEMARNAT, 2010). Los indicadores de agua en este sistema se enfocan en proporcionar información relacionada con la extracción superficial, la

disponibilidad, el grado de presión sobre el recurso, el re uso de agua residual, etc. Sin embargo, aunque la recolección de información abarca más de diez años, el nivel de detalle espacial aún es muy grueso (RHA o Estado).

El sistema nacional de información municipal, se basa en estadísticas censales para proporcionar estadísticas de cada municipio cubriendo periodos de cinco años a partir de 2005, o en su defecto 2010. Sin embargo, la base de datos no ha sido acuatizada para 2015. La diferencia entre esta base de datos y la de INEGI, es que en la segunda, la información se mide a nivel de manzana, pero se presenta a nivel estatal o por Región Hidrológico-Administrativa.

En México, la información climática no ha sido actualizada de manera espacial, para fines de investigación se utiliza la clasificación climática de Köppen (modificada por García). Sin embargo, ésta es obsoleta cuando se trata de tomar en cuenta variabilidad climática o condiciones actuales en los parámetros de temperatura y precipitación. Se cuenta con una red de estaciones climatológicas que registran datos cada minuto, pero aún no se ha hecho el esfuerzo de interpolar la información a nivel nacional.

El Índice de Sustentabilidad Hidrológica (ISH) representa las condiciones de los subsistemas de sustentabilidad con base en un marco de referencia espacial y temporal. Con la finalidad de monitorear y retroalimentar las estrategias de gestión del agua a nivel subcuenca. Por tal motivo, se eligieron variables relacionadas con el agua que cumplieran con dichas características, correspondientes a los subsistemas: ambiental, social, económico e institucional, mismas que fueron descritas en el capítulo 5.

6.3.3 Reporte digital

El reporte digital consiste en un archivo de Excel (Reporte.xls) que engloba en cada hoja un paso de la metodología para construir el ISH. En el reporte el usuario tiene que consultar primero la hoja *localización*, que consiste en una serie de imágenes de México, el usuario debe elegir la imagen que concuerde con el estado en donde se encuentra la subcuenca que quiere caracterizar. Una vez elegida la imagen, al click sobre ésta se abrirá un acercamiento en donde se puede identificar las subcuencas y sus identificadores (ID). Este paso es quizá el más importante que debe conocer el usuario, ya que si no se tiene el ID de la subcuenca, no es posible generar el reporte de sustentabilidad hídrica. El ID es insertado pues en la casilla “*ID Subcuenca*” de la hoja *reporte* y automáticamente se genera el reporte para dicha subcuenca (Figura 6.5).

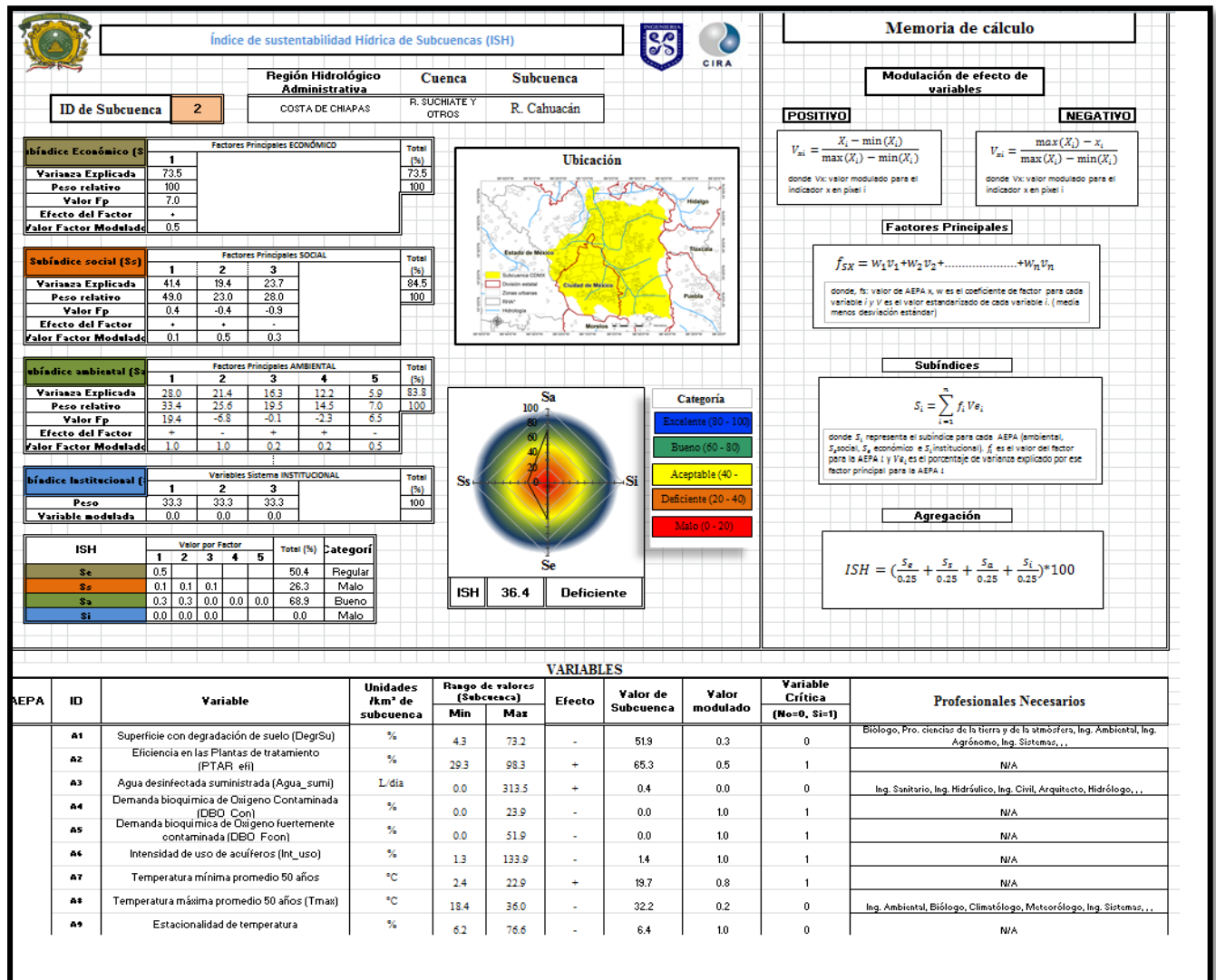


Figura 6.5. Hoja de reporte digital del Índice de Sustentabilidad Hídrica.

6.4 Conclusiones del capítulo

El método diseñado para el Índice de Sustentabilidad Hidrológica (ISH), resultó ser una herramienta eficaz para hacer un diagnóstico de gran visión del manejo de los recursos hídricos en subcuencas de México, ya que ofrece un panorama general de los aspectos relacionados con la sustentabilidad hídrica.

Los resultados del ISH concuerdan en general con la regionalización de subcuencas urbanas. Aunque en este caso, con el índice complementado con los códigos ESAI, se pueden identificar las condiciones específicas de cada subcuenca dentro de cada AEPAs, lo que es la base para definir estrategias de acción en la Gestión local de Recursos Hídricos

A pesar de que existen 1,024 posibles combinaciones de códigos ESAI que caracterizan las condiciones particulares de las subcuencas, el 97% del territorio puede ser englobado en 14 códigos, lo que denota que hay condiciones muy repetidas y claramente marcadas, por ejemplo las condiciones sociales y económicas, con valores menores a 0.05 en los subíndices y códigos de 1 y 2.

Una ventaja del índice propuesto es que puede ser actualizado en la medida que se actualicen las bases de datos empleadas. Sin embargo, es necesario enriquecer la alimentación del ISH con indicadores robustos dentro de las cuatro AEPA's.

Aunque el ISH es la herramienta principal, es necesario interpretarla usando los códigos ESAI ya que extraen de manera sencilla información acerca de las fortalezas y debilidades de cada subcuenca y permite plantear estrategias y necesidades de trabajo para distintos panoramas.

CAPÍTULO 7: Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las discusiones, conclusiones y recomendaciones derivadas del presente trabajo. Además de las perspectivas y aportaciones futuras.

7.1 Diagnóstico de sustentabilidad de la GIRH a gran visión

Es importante caracterizar las regiones del país usando la información del ISH. Por tal motivo, se preparó cartografía para cada región con la información generada por los códigos ESAI.

Como aportación extra, se considera importante definir el equipo mínimo de trabajo para la elaboración de planes GIRH para las subcuencas. Este equipo está definido por los expertos que deben ser considerados para atender los problemas específicos de las subcuencas. Se eligieron profesiones de expertos para atender cada una de las variables, los expertos fueron incluidos en el equipo cuando el valor modulado de la variable en cuestión estuvo por debajo del umbral aceptable (0.5). Del mismo modo, considerando el umbral anterior, se seleccionó un equipo de trabajo básico, los cuales son los expertos mínimos necesarios para atender los problemas que ocurren con mayor frecuencia en el país.

El usuario tiene la opción de marcar variables críticas, es decir, aquéllas que considere que son los problemas más importantes para dicha subcuenca.

7.2 Discusión

7.2.1 Índice de Sustentabilidad Hidrológica regional

La sustentabilidad hídrica en México, presenta diferentes panoramas, dependiendo de la región que se analice.

Las condiciones hidrológicas de la región 1 son características de las subcuencas mayormente urbanizadas (Figura 7.1) ya que los índices económico y social del código ESAI, presentan los valores más altos a nivel nacional. El ISH es capaz de reconocer como diferentes las condiciones de las subcuencas urbanas más importantes, ya que en cada una, el código es distinto, mostrando que, aunque pertenecen a la misma región, los aspectos que deben ser atendidos dentro de cada una, difieren.

Aunque las condiciones ambientales en las zonas urbanas, no son las mejores del país, el subíndice ambiental del ISH no muestra valores menores de 3. Esta característica denota que no existe gran variabilidad climática en las ciudades, en comparación con otras regiones del país.

Con relación a los centros urbanos, la GIRH debe ser enfocada sobre los aspectos que tienen menor desempeño, lo que significa, fortalecer el sistema institucional de gestión hídrica, mejorando la articulación interinstitucional y con base en un esquema participativo y multidisciplinario. Por el otro lado, es importante robustecer los indicadores ambientales de manera espacial a nivel local, éstos podrán ser integrados al ISH para diagnosticar de manera precisa las condiciones de las subcuencas y enfocar las inversiones en los aspectos que realmente necesitan atención.

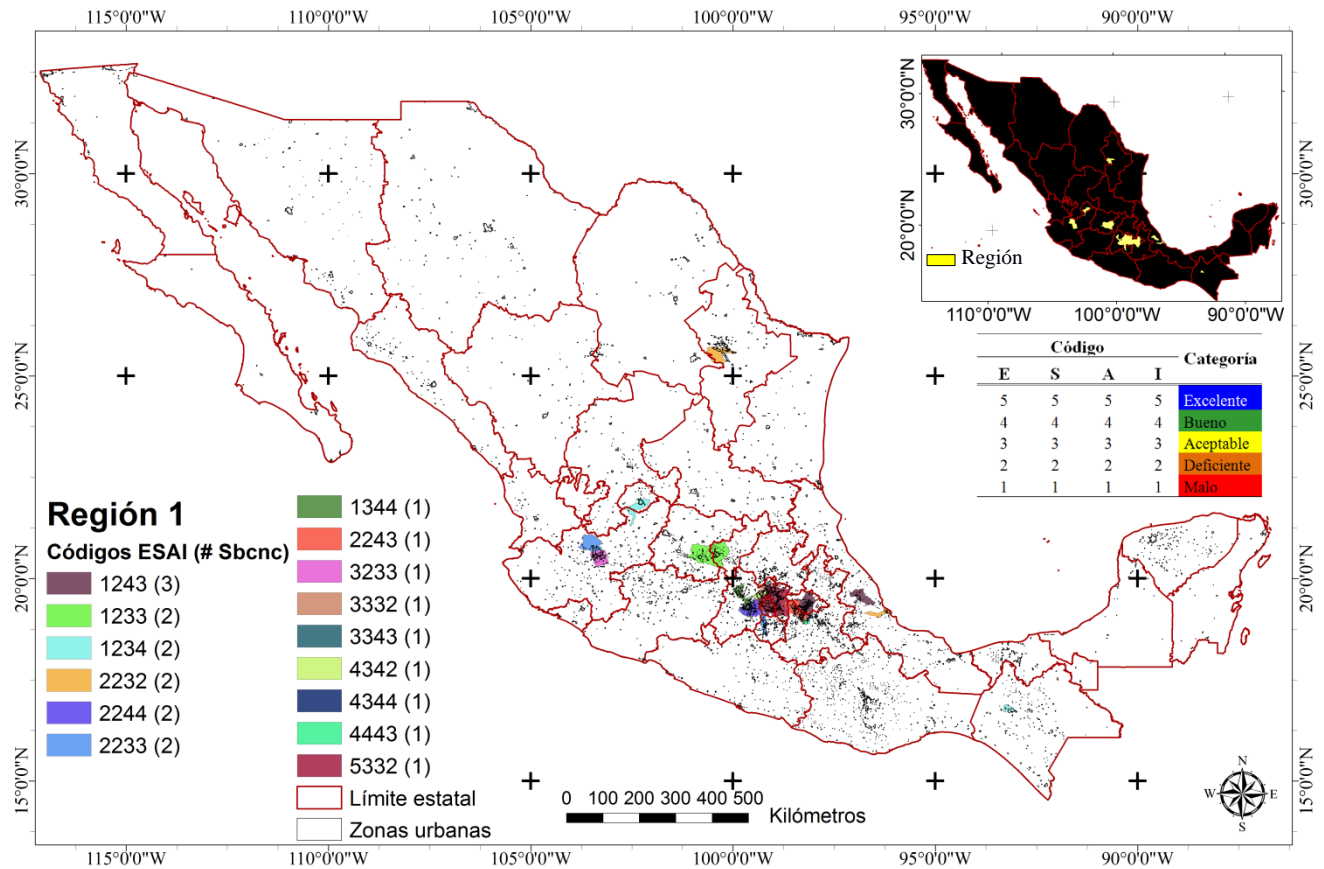


Figura 7.1. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 1 de México. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

La región 2 cubre en su mayoría las subcuencas del sistema Lerma-Chapala-Santiago (Figura 7.2). Mientras que, anteriormente se presentaron las condiciones sociales y económicas más sobresalientes (Figura 7.1), y posteriormente, se profundizará en las subcuencas que presentan las condiciones que necesitan mayor atención (Figura 7.3), el escenario en este tema para la región 2, corresponde al contexto nacional intermedio.

El escenario ambiental refleja las condiciones de estabilidad en la temperatura y precipitación. No obstante, como se mencionó en párrafos anteriores, la necesidad de fortalecer el sistema de medición de esta AEPA, es imperiosa. Aspectos como la intensidad de uso de agua en los acuíferos, la importación-exportación de agua en las subcuencas, la calidad y los puntos de contaminación del recurso, los tipos de reúso y consumo a nivel vivienda, son aspectos que no son tomados en cuenta por el ISH, y si se integraron, la escala de medida es muy grande (estatal o RHA), por lo que el ISH no interpreta las características específicas de las subcuencas, sino que las agrupa en regiones similares.

Las subcuencas de la parte norte de esta región (Baja California), discrepan del resto en que las condiciones institucionales son deficientes, debido primordialmente a que la densidad de población es sumamente baja y por tanto el indicador de Instituciones de Educación Superior (I1), no resultó favorable.

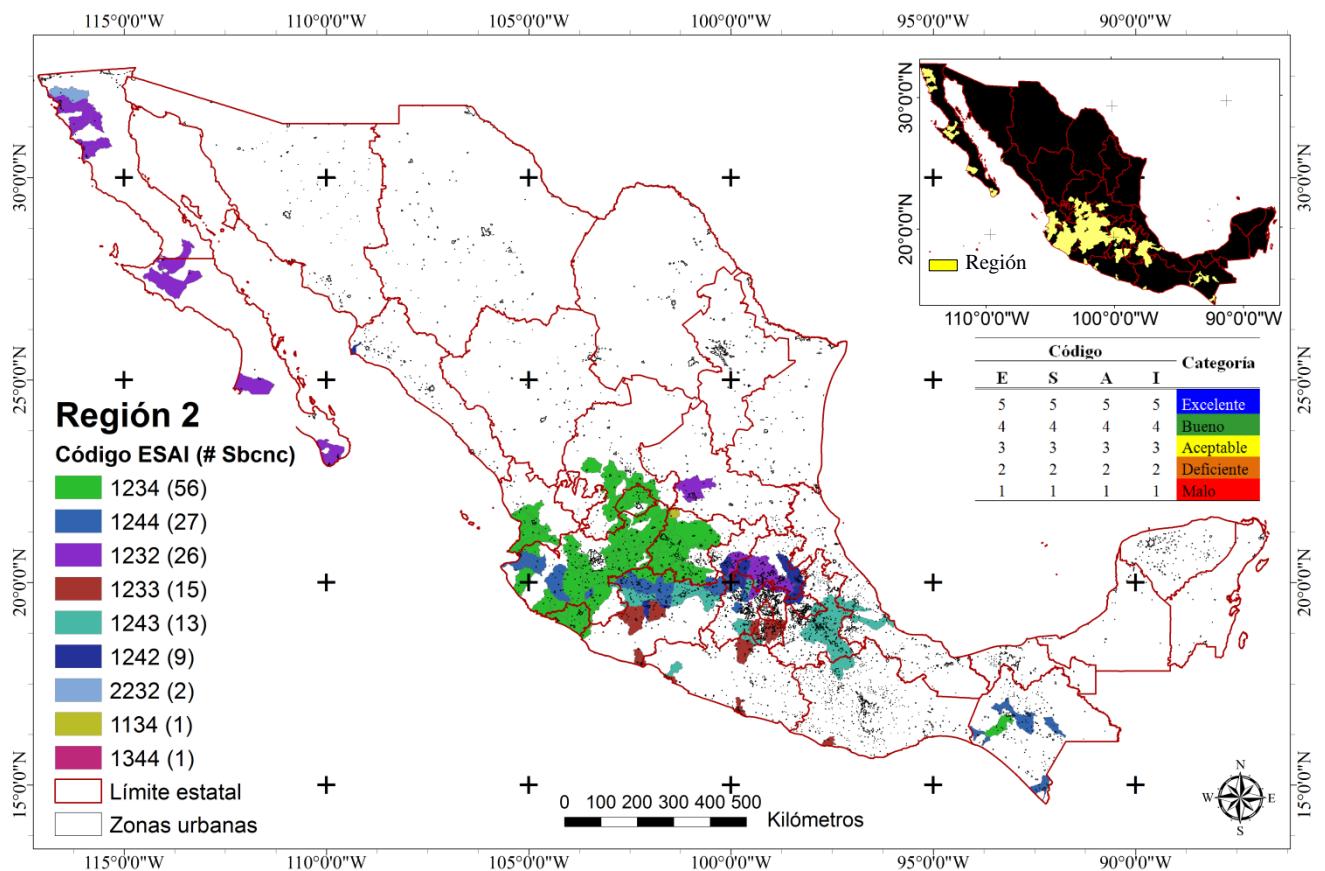


Figura 7.2. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 2 de México. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

Aunque las condiciones socioeconómicas en general no son favorables para la región 3 (Figura 7.3), es posible diferenciar las subcuencas que necesitan mayor atención en este tema. La totalidad de las

subcuencas que integran esta región, necesitan apoyo en el sistema institucional, en definitiva, la estrategia debe ser enfocada a desarrollar y fortalecer las economías locales, ya que es evidente que el sistema macroeconómico, no integra a las regiones menos urbanizadas. Los indicadores económicos deben estar enfocados pues, a la prosperidad del socioecosistema de la subcuenca, el nivel de desarrollo económico local, el cooperativismo, los mecanismos de intercambio de bienes comunitarios y, en general, en las estrategias locales de crecimiento económico.

De igual forma, los indicadores institucionales deben representar de alguna manera la capacidad de las instituciones para gestionar de manera eficiente el agua, la capacidad también, de colaborar con otras instituciones para desarrollar programas y proyectos eficaces considerando los rubros con menor desempeño del ISH.

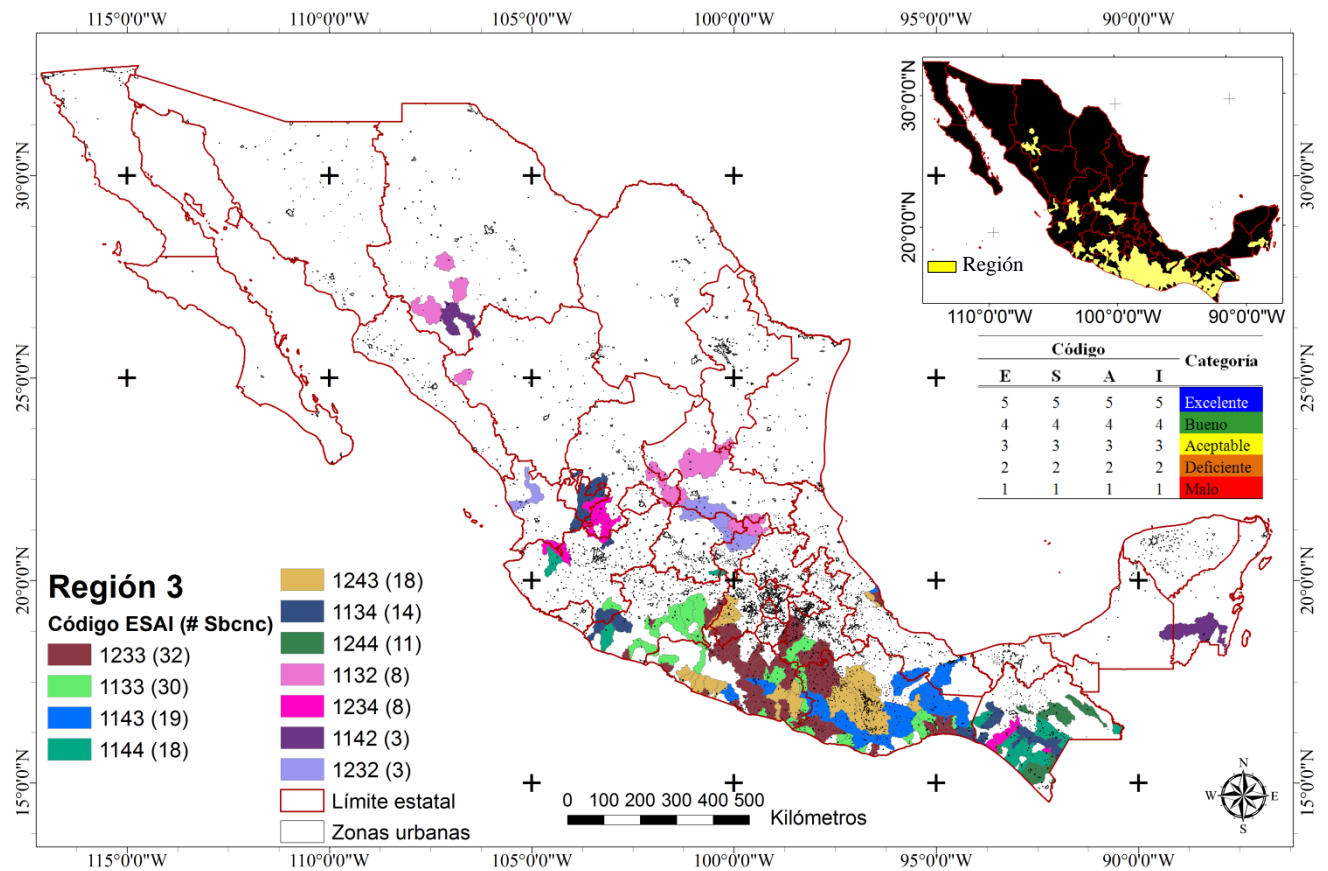


Figura 7.3. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 3 de México. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

Las subcuencas con mejor condición ambiental se agrupan en la región 4 (Figura 7.4). Debido a las altas precipitaciones (A19) y la disponibilidad de agua (S24) es mayor en esta región que en otras (A19: 1,819 mm y S24: 331,890 m³/año/km² subcuenca). Esta condición se convierte en una oportunidad de aprovechar el excedente hídrico para la generación de bienestar social y económico de

manera sustentable. Por ejemplo, con el uso de ecotecnologías, indicador que sería útil para el ISH de manera local.

Si bien, las condiciones sociales en esta región no son excelentes, resaltan casos particulares de dos subcuencas que tienen valores aceptables en los códigos ESAI: 1342 (RH Grijalva-Usumacinta) y 1344 (RH Lerma-Chapala), la diferencia entre estas subcuencas es que la perteneciente a la región Lerma-Chapala incluye una parte de la zona metropolitana de Toluca y es por esto que el número de IES (I1) es mayor (0.001 IES/km² subcuenca), mientras que la subcuenca del Grijalva-Usumacinta no incluye ningún centro de población importante y el número de IES es menor (I1: 0.0002 IES/km² subcuenca).

No obstante, aspectos sociales no integrados en el ISH son los relacionados con la educación ambiental y las estrategias locales de conservación, recuperación y manejo del agua, estos aspectos fortalecerán el diagnóstico de las subcuencas y será necesario incluirlos a manera de indicadores a nivel nacional. Aun así, el panorama general del ISH para las subcuencas es útil para la caracterización e identificación de los aspectos que necesitan atención prioritaria.

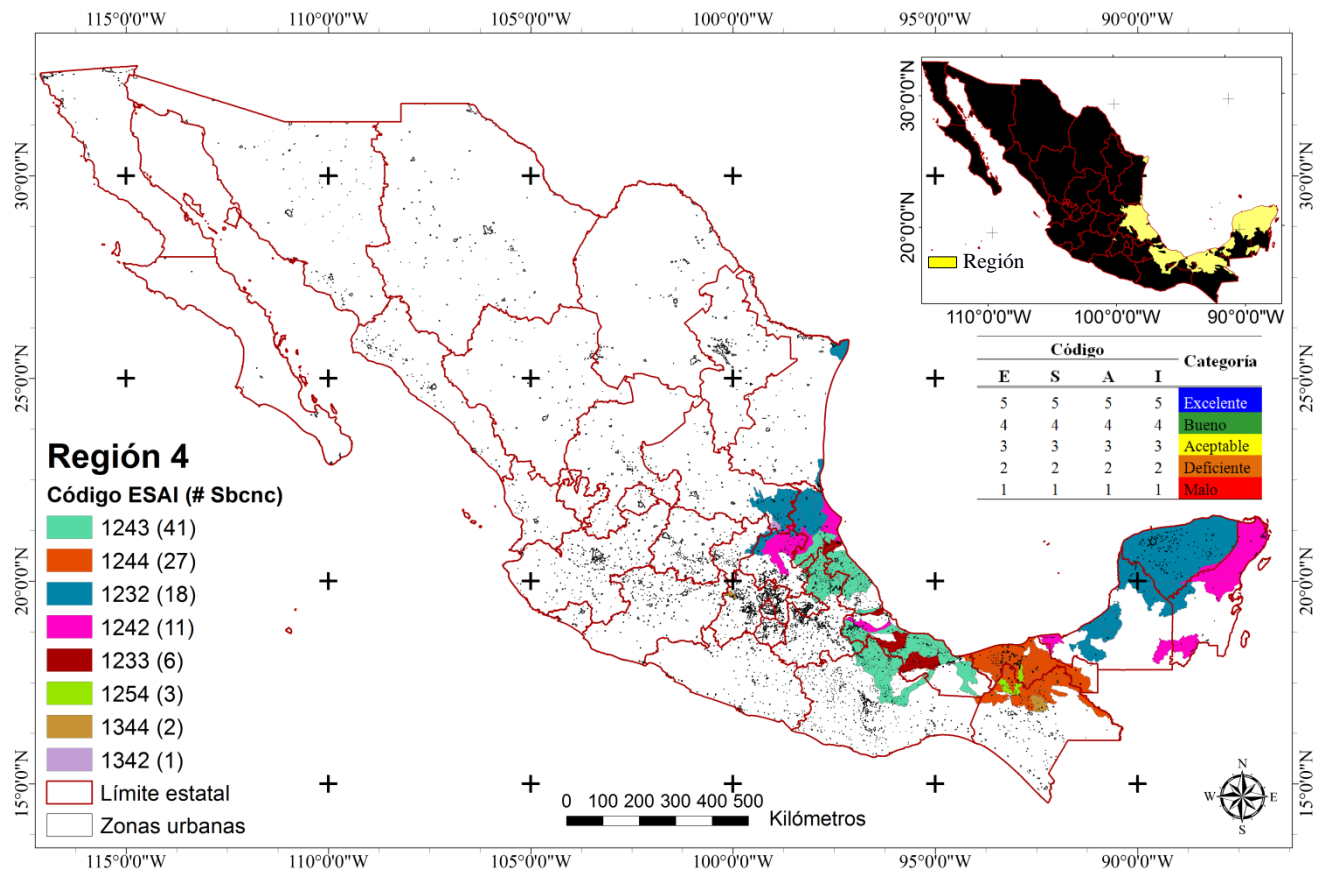


Figura 7.4. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 4 de México. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

Por otra parte, las subcuencas no urbanas cubren el 36.6% del territorio mexicano. En esta región, las condiciones son similares a la región 5 mostrada en la regionalización del país (Figura 7.5). Inclusive, el código ESAI que aparece con mayor frecuencia en las cuencas no urbanas en el 1232 con 138 subcuencas (Figura 7.6), mientras que, cuando se cruza la región 5 con los códigos ESAI este mismo código (1232) es el que contiene más subcuencas (100).

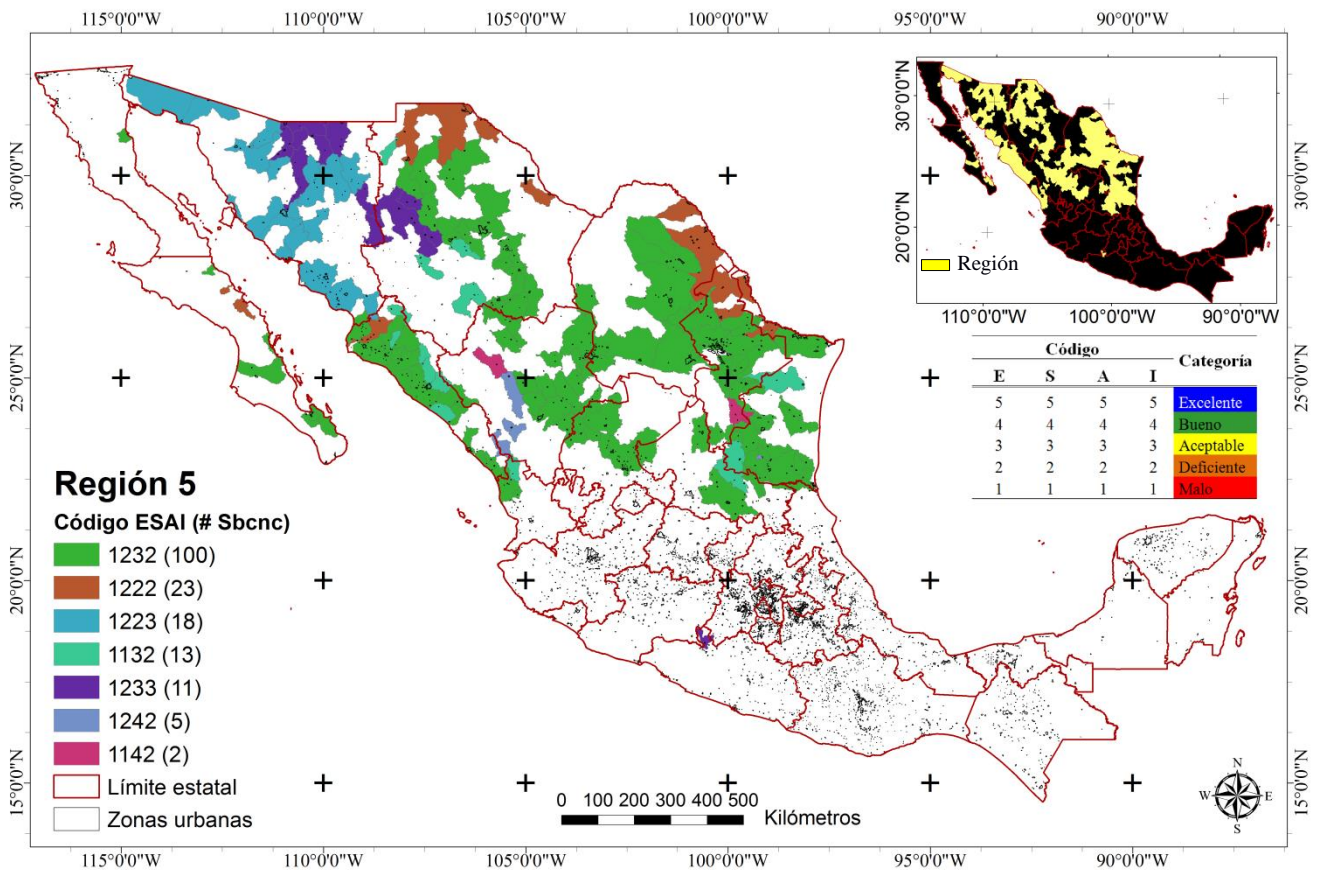


Figura 7.5. Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas urbanas de la región 5 de México. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

Las condiciones sociales y económicas en estas dos regiones no son las deseables, por un lado, porque en las subcuencas no urbanas, los servicios de agua, drenaje y electricidad son escasos (S17). Por el otro, la región 5 cuenta con las densidades de población más bajas del país (S6: 34 hab/ km²), entonces, las viviendas particulares habitadas (S12: 8 casas/ km²) y las que cuentan con servicios básicos (S17:6.5 casas/ km²) también tienen niveles bajos comparadas con el resto de las regiones. Pese a esto, la región 5 es la región menos marginada del país (S8: 19), con un IDH (S7) de 0.8, escolaridad (S5) es de 7.7 años y la proporción de personas que asiste a la escuela es de 20% (S2). Aun así, las condiciones sociales y económicas no se comparan con la región 1, la ventaja es que los códigos ESAI muestran las condiciones específicas para cada AEPA dentro de la región y aunque en general la situación es

preocupante en estas AEPAS, las estrategias deben ser adecuadas a las características de cada subcuenca.

Posiblemente el ISH no es capaz de encontrar diferencias en la AEPA ambiental, entre las regiones identificadas, en comparación con el método de agrupación (Capítulo 5). Aunque en la presente investigación se demuestra que cada una de las subcuencas tiene condiciones distintas a pesar de que se agrupen en la misma región. Es probable que el ISH aminore el efecto de las variables climáticas debido a que las condiciones en el país son menos contrastantes comparadas con las variables socio-económicas.

La misma situación ocurre con las variables institucionales, ya que la mejor condición en dos de éstas (densidad de empresas: I2 y de escuelas de educación superior: I1) se encuentra en la región 1 y minimiza el efecto de estas variables en las otras regiones.

Por estas razones, es imperioso tener como prioridad el fortalecimiento del sistema de indicadores de calidad a nivel nacional, que cumplan con las necesidades de atención de las subcuencas, para soportar los planes locales de desarrollo y gestión del agua.

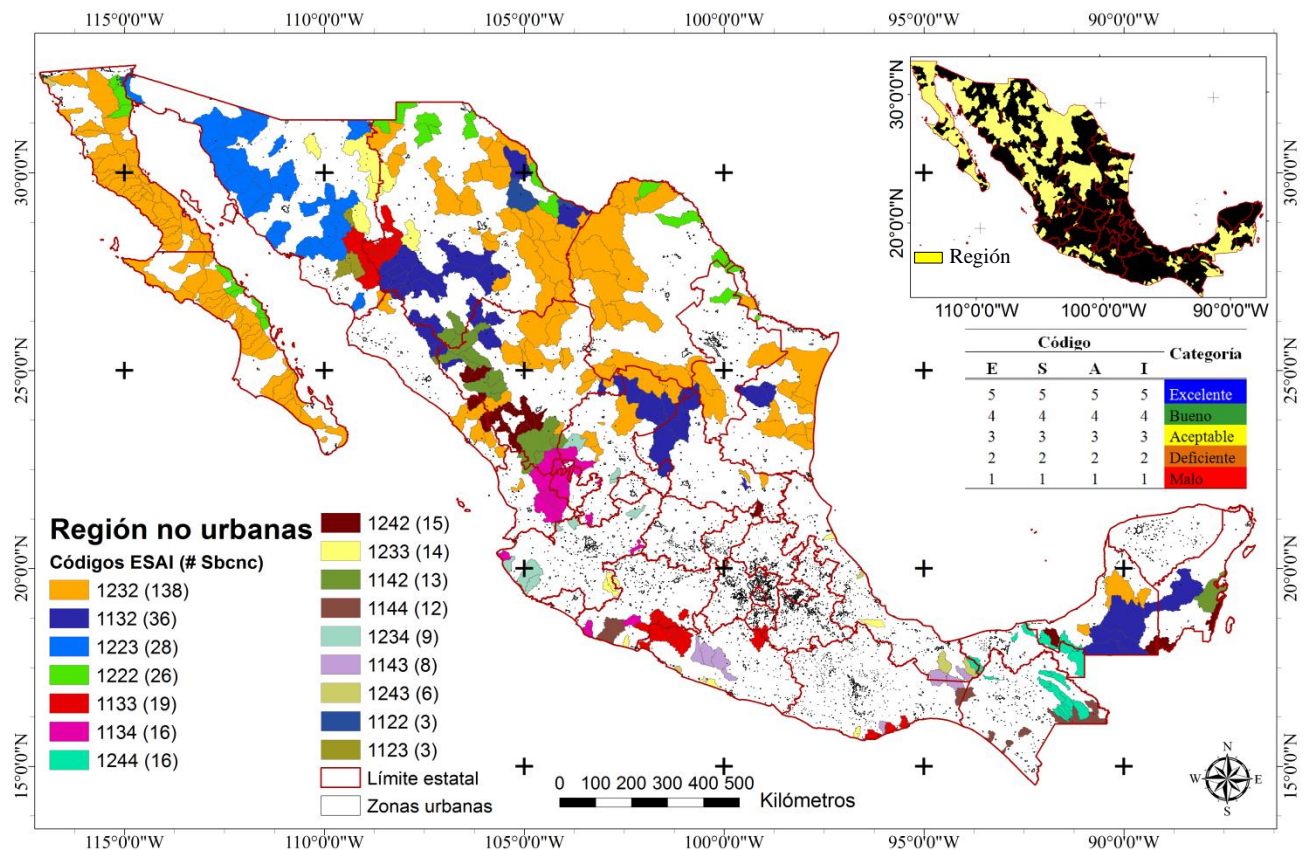


Figura 7.6. Índice de Sustentabilidad Hidrológica de la región de subcuencas no urbanas de México. (# Sbcnc): número de subcuencas pertenecientes a cada categoría.

La primera hoja del reporte contiene las instrucciones generales de manejo del archivo, también explica la correspondencia de cada paso de metodología con las hojas del archivo de Excel.

Esta herramienta es de gran utilidad para el diagnóstico de sustentabilidad hídrica de subcuencas y para la actualización del ISH en el tiempo. Sin embargo, es necesario en estudios futuros, diseñar una herramienta más eficaz que soporte gran cantidad de información (Geo-databases y cartografía), para que el diagnóstico de las subcuencas sea más interactivo.

7.2.2 Equipo de trabajo

Los problemas específicos de cada subcuenca, requieren profesionistas especializados en ellos, éstos se enlistan en el reporte dinámico de cada subcuenca (ANEXO V). Aunque el equipo que inicialmente se debería considerar de base, considerando los valores más preocupantes de las variables a nivel nacional, se muestra a continuación.

- Ingeniero en sistemas
- Biólogo
- Climatólogo/meteorólogo
- Hidrólogo
- Demógrafo
- Arquitecto
- Ingeniero civil
- Urbanista
- Especialista en desarrollo sustentable
- Profesor en educación básica
- Sociólogo
- Psicólogo social
- Antropólogo
- Economista
- Administrador
- Comunicólogo

Estos perfiles son los deseables para el equipo básico de trabajo en una subcuenca y por tal motivo, es necesario incluirlos en los planes de desarrollo y gestión de las mismas, para que los procesos de gestión del agua se vean fortalecidos en los aspectos que presentan mayores preocupaciones con más frecuencia en las subcuencas del país.

7.3 Conclusiones generales y recomendaciones

El diseño de la metodología del ISH se analizó exhaustivamente, con la finalidad de elegir la mejor combinación de técnicas estadísticas, para condensar las variables en un índice. En otras palabras, se probó la hipótesis de que es posible diseñar un índice de sustentabilidad hídrica, con enfoque de GIRH, utilizando indicadores ponderados estadísticamente.

De igual manera, los objetivos planteados en la presente investigación se llevaron a cabo de la mejor manera. El primer objetivo se describió en el capítulo 5 y forma parte de la sección 1 de la metodología: Preparación de variables, en la cual, se describe la elección de 69 variables pertenecientes a cuatro AEPA's que representan el funcionamiento del socioecosistema de las subcuencas.

El objetivo dos se llevó a cabo utilizando la metodología explicada en el capítulo 5 (Sección 2: Análisis de Componentes Principales), en donde, las variables originales fueron procesadas y agrupadas en regiones con características cuantificables. Las regiones del país exhiben pues, un panorama general de las condiciones de los recursos hídricos en subcuencas urbanas de México.

El tercer objetivo, es atendido en los capítulos 5 y 6, usando como base la metodología de la sección 1 (preparación de variables) y sección 3 (Análisis de factores). En conjunto, se describe la metodología diseñada para el cálculo del ISH a nivel de subcuenca.

El ISH refleja pues, la condición de sustentabilidad hídrica actual de las subcuencas en México. El equilibrio entre las AEPA's económica, institucional, ambiental y social, debe ser de tal manera que, el socioecosistema de la subcuenca refleje el bienestar social, la prosperidad y la estabilidad ambiental por medio de mediciones cuantificables.

La necesidad entonces de generar información relativa a estos aspectos es trascendental, principalmente, una base de datos de indicadores espaciales actualizables de manera sistemática y congruentes con las necesidades de las subcuencas, que pueda ser integrada al ISH para tener un diagnóstico más preciso.

El método del ISH permite identificar las variables críticas dentro de cada AEPA, además de priorizarlas y mostrar el resultado espacial, de manera tal que, es posible agrupar las subcuencas que comparten características similares en grandes regiones y al mismo tiempo, evaluar las condiciones específicas dentro de cada subcuenca usando los códigos ESAI.

Una de las principales limitantes del método del ISH, es que no es posible evaluar las condiciones a nivel localidad, ni tampoco las estrategias de conservación, manejo o explotación del agua en esta escala. Además, la escala temporal de las bases de datos seleccionadas, es de 5 años por lo menos, razón por la que el ISH no es una medida para evaluar los planes de acción a corto plazo. A pesar de

esto, el método puede ser aplicado sustituyendo los indicadores de entrada por otros de las mismas AEPA's que reemplacen dichos aspectos. En este sentido, la definición de la dirección de los indicadores es primordial, ya que debe considerar diferentes perspectivas de expertos en los temas relacionados.

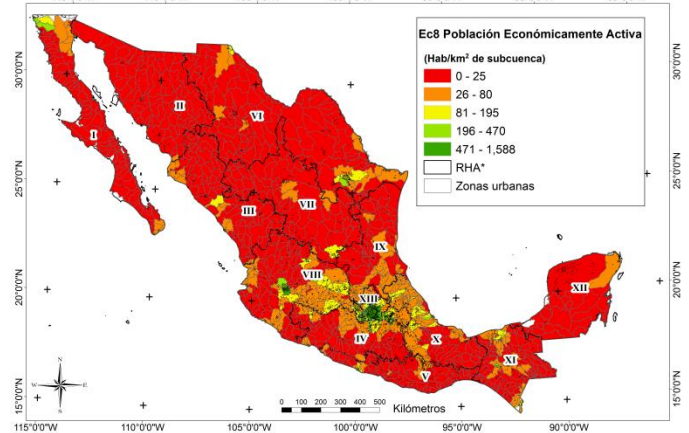
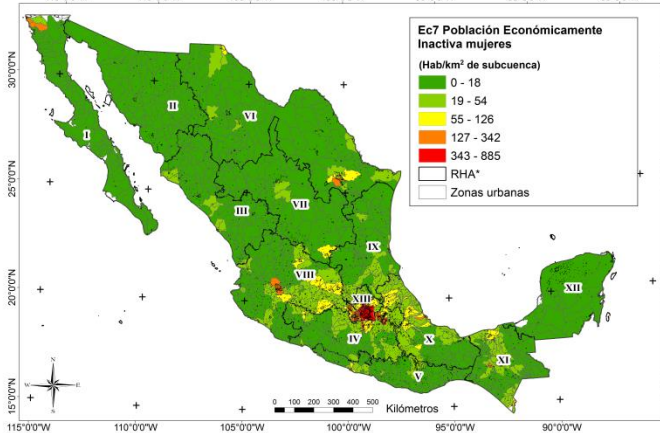
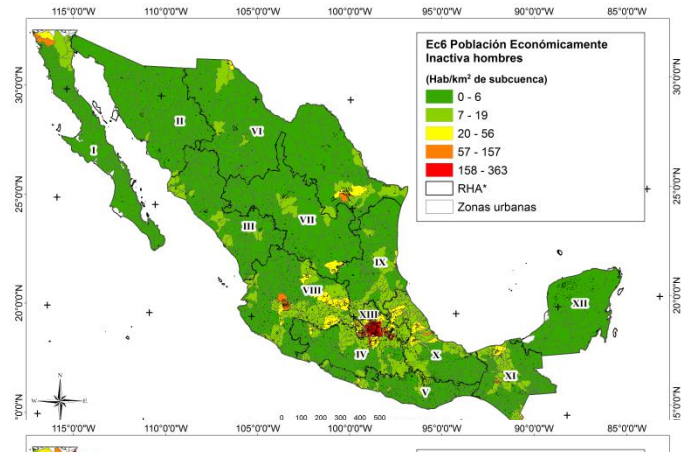
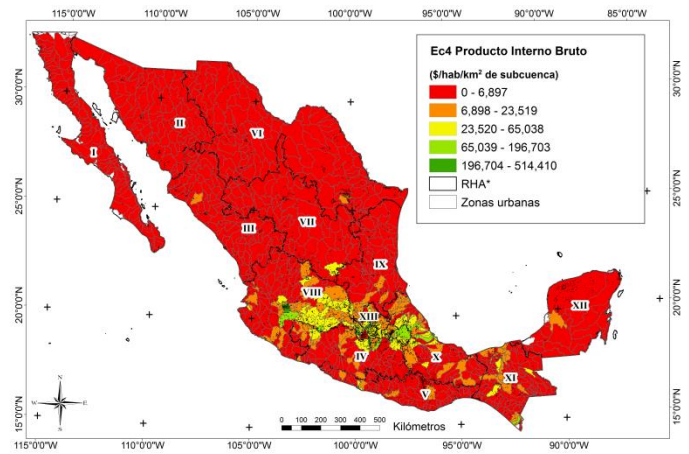
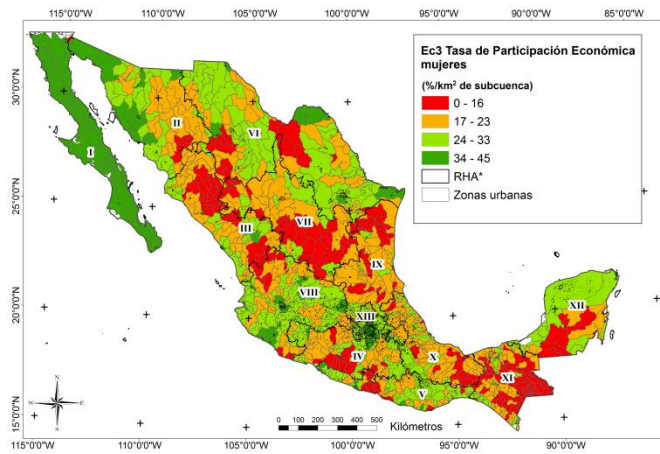
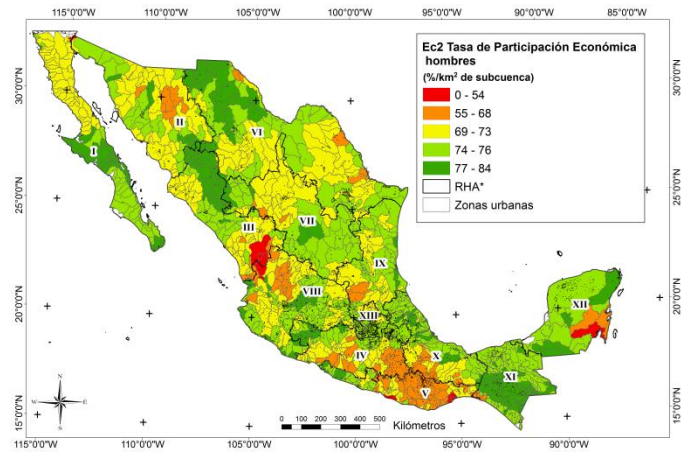
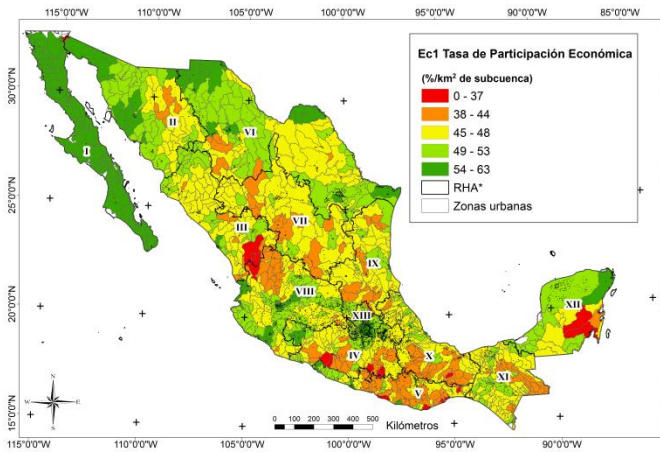
Por tal motivo, integrar el equipo de expertos base para las subcuencas es necesario en el sentido de que las estrategias, planeas, investigaciones y proyectos, deben por defecto tener la visión y la participación multidisciplinaria. Además de que la atención de los aspectos preocupantes de las subcuencas deben ser resueltos por personal capacitado en el tema y hacer un esfuerzo por trascender las barreras políticas y administrativas.

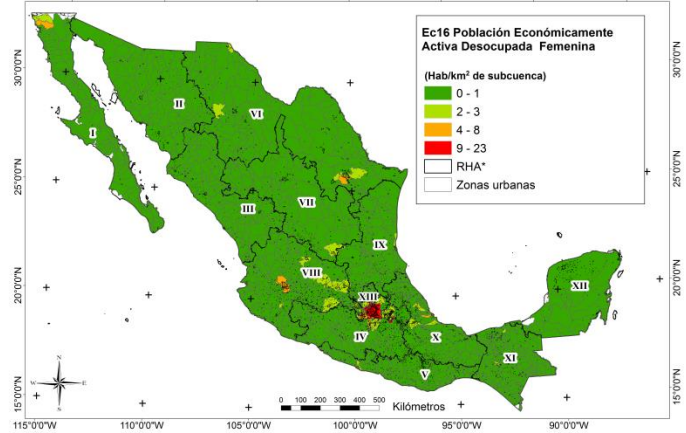
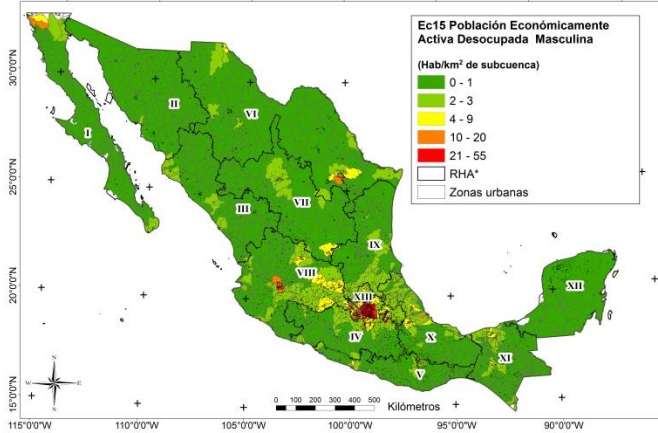
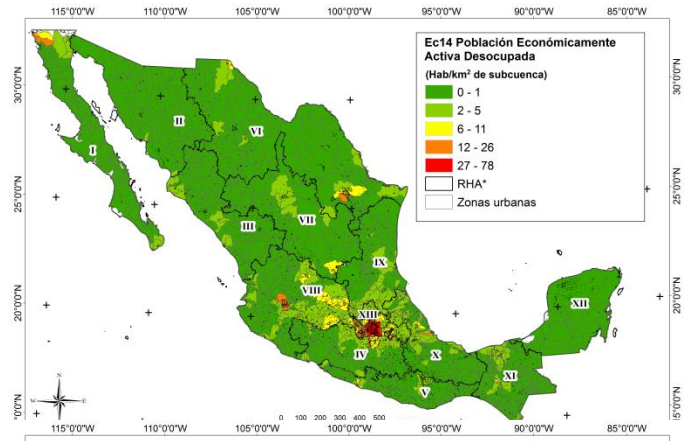
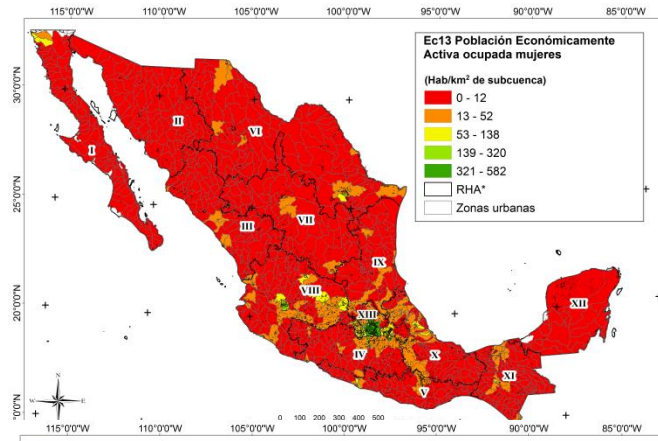
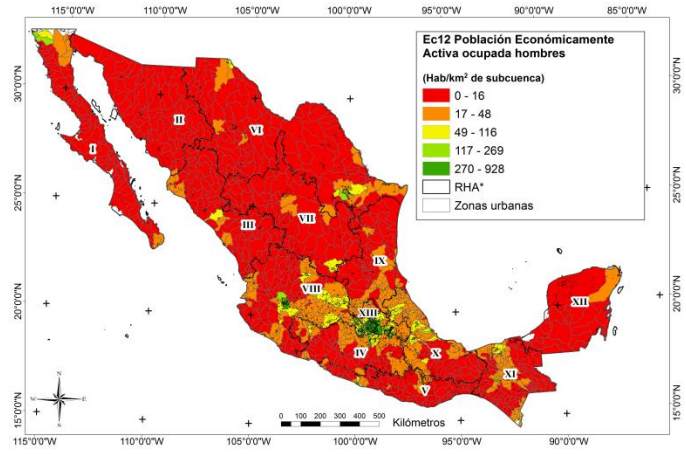
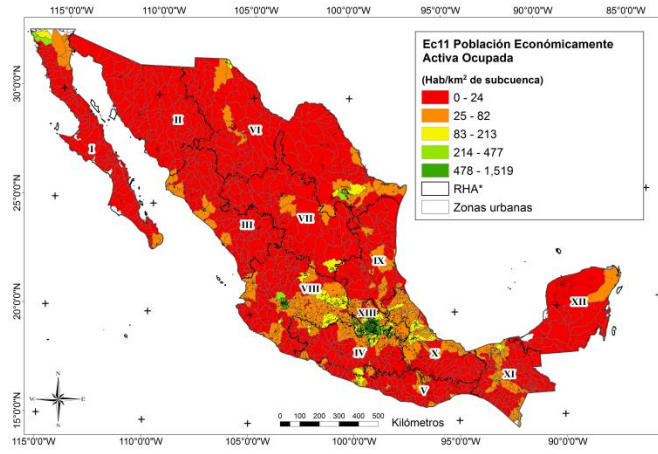
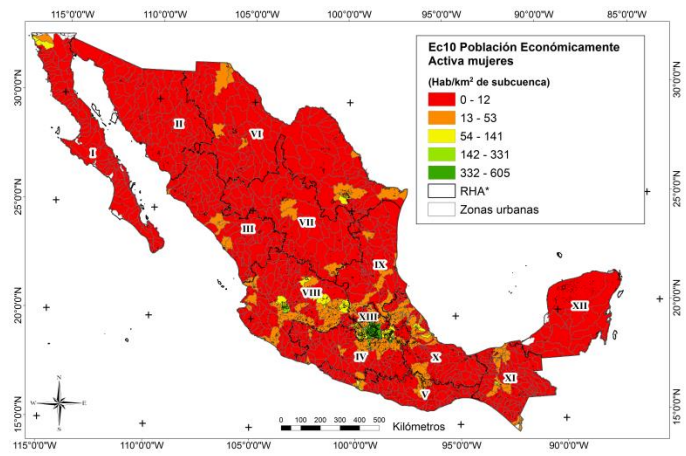
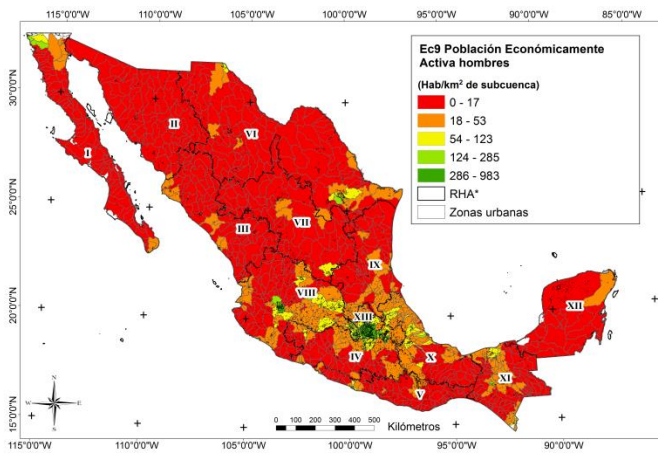
Es evidente que el ISH es el punto de partida para el monitoreo de la sustentabilidad hídrica, pero aun es carente de información que refleje las interacciones institucionales en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Siendo que éste aspecto es, probablemente, la limitante principal para el manejo adecuado del agua en las subcuencas de México, en este sentido, los indicadores relativos a la corrupción, la eficiencia de programas contrastados con resultados reales, la profesionalización de los servidores públicos, son indispensables para tener un panorama completo de la AEPA institucional.

El método para calcular la sustentabilidad hídrica mostrado en esta investigación, permite de manera cuantitativa, evaluar a gran escala, las acciones que se han llevado a cabo en las subcuencas de México, además de que se identifican los aspectos críticos para la atención y las regiones que pueden englobar acciones similares en cuestión de la gestión hídrica.

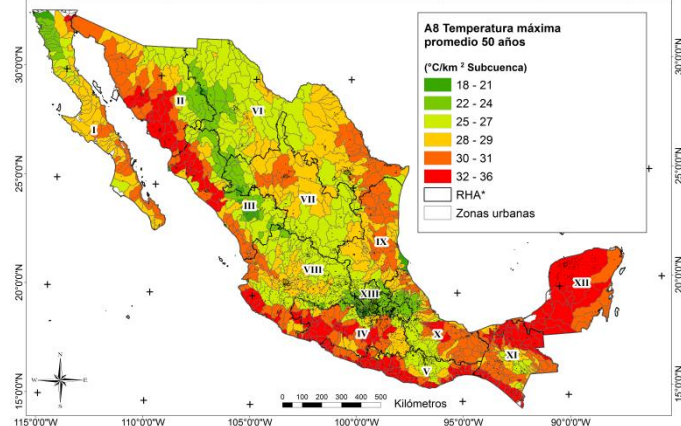
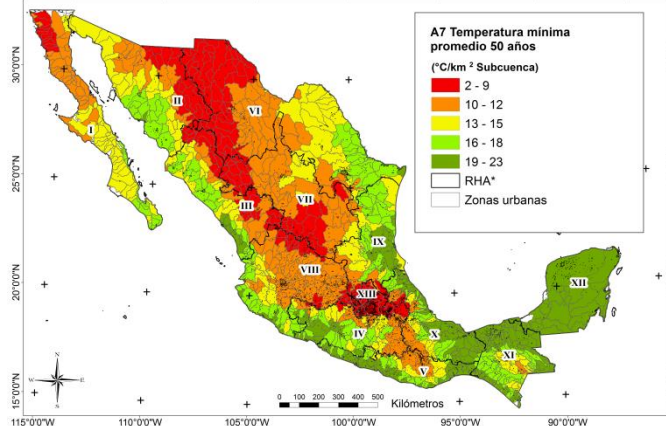
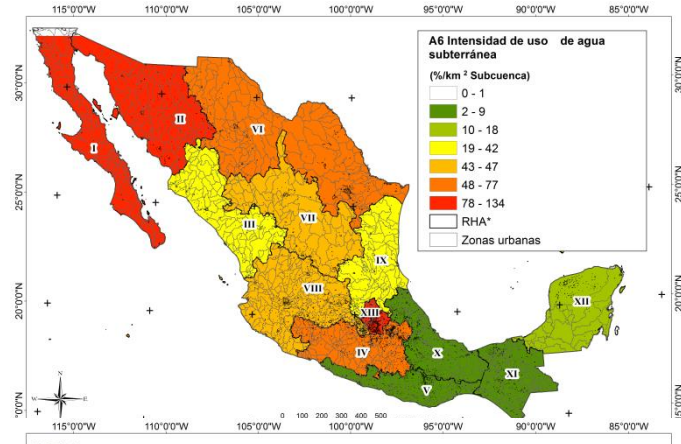
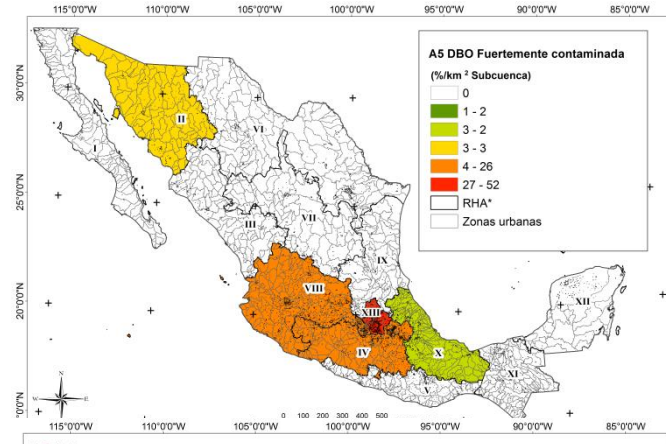
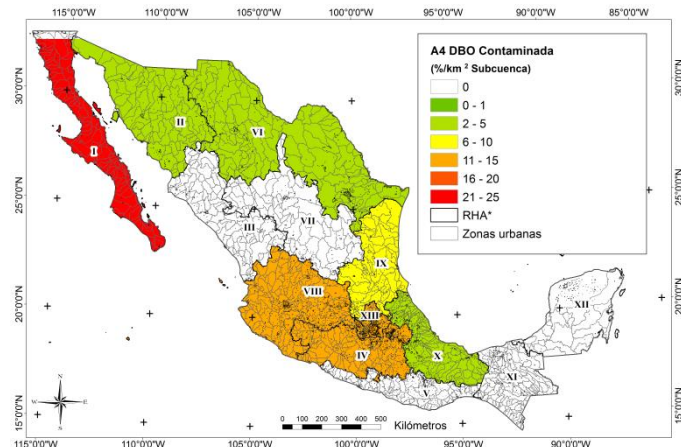
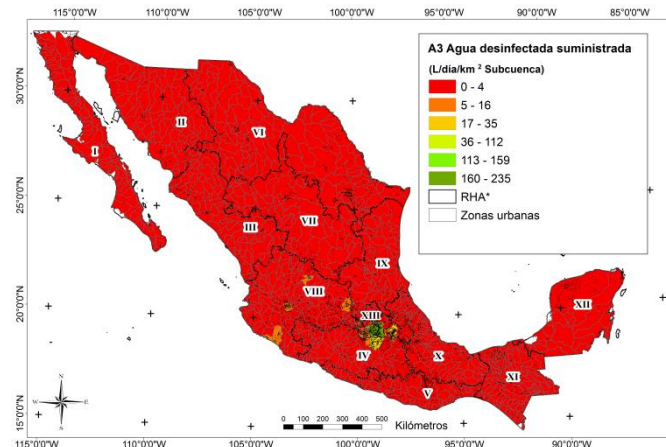
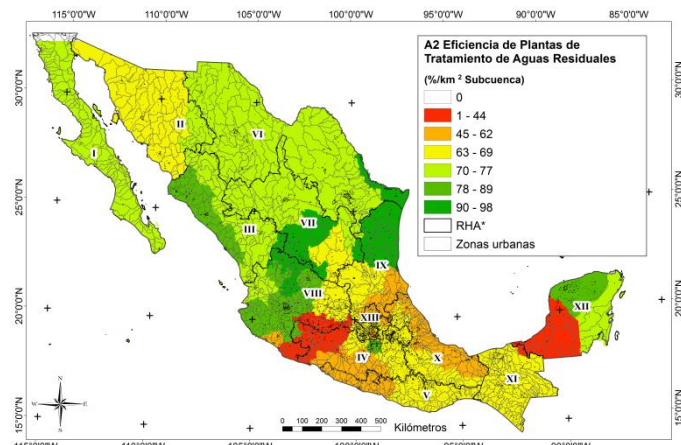
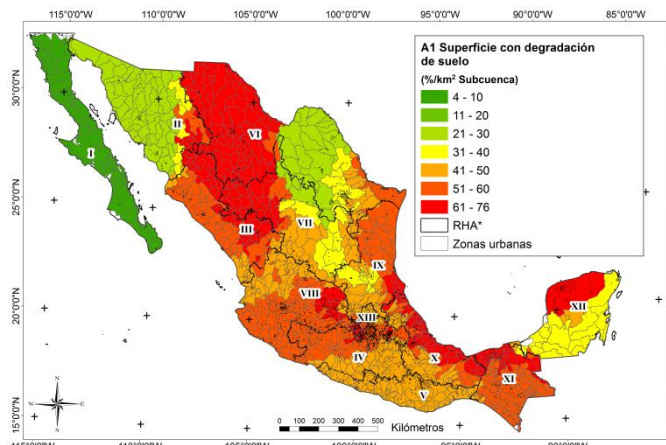
Finalmente, es necesario complementar este estudio con el diseño de indicadores locales que fortalezcan el diagnóstico a nivel de subcuenca. De igual manera, se necesita una herramienta digital (un programa por ejemplo), en donde el ISH sea calculado de manera automática y despliegue información del cálculo, así como su actualización a través del tiempo. Los primeros pasos de esta herramienta, se dan a conocer en la presente investigación (ANEXO V), pero aún falta su integración es un sistema de programación más robusto.

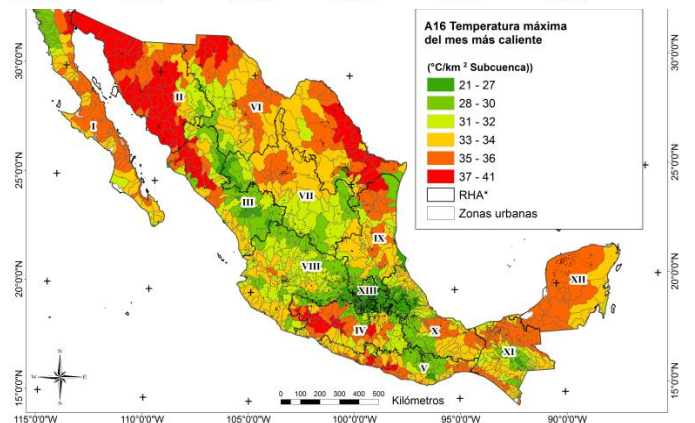
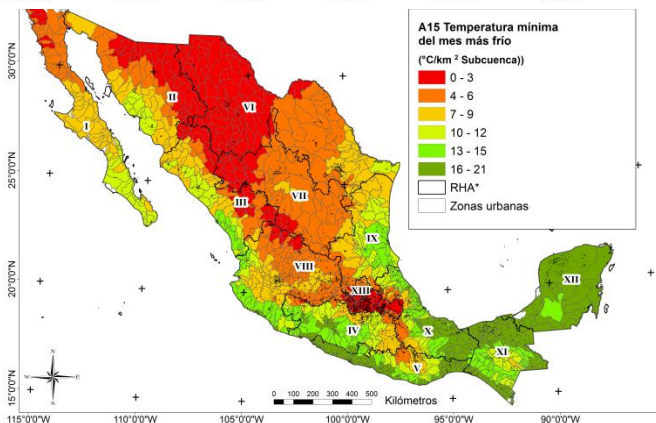
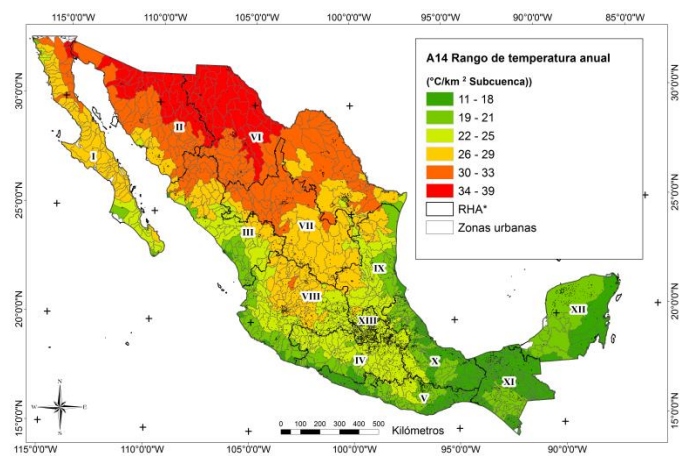
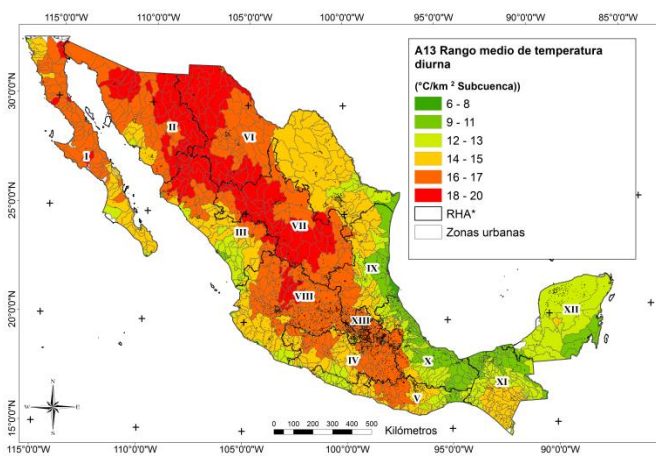
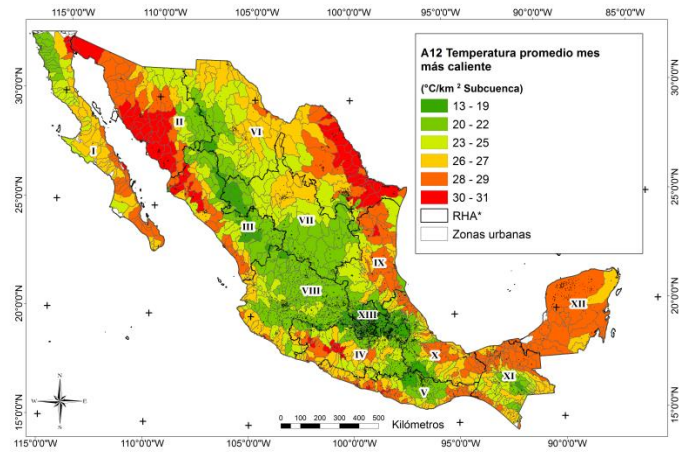
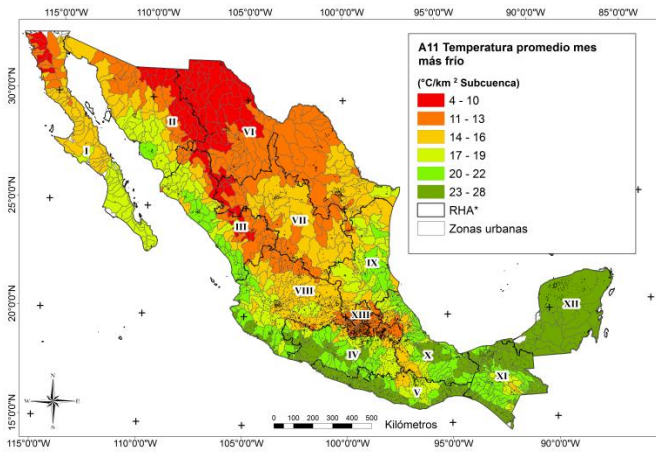
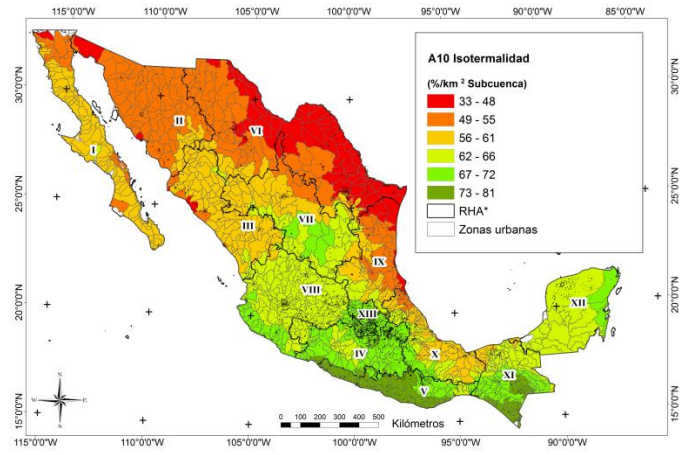
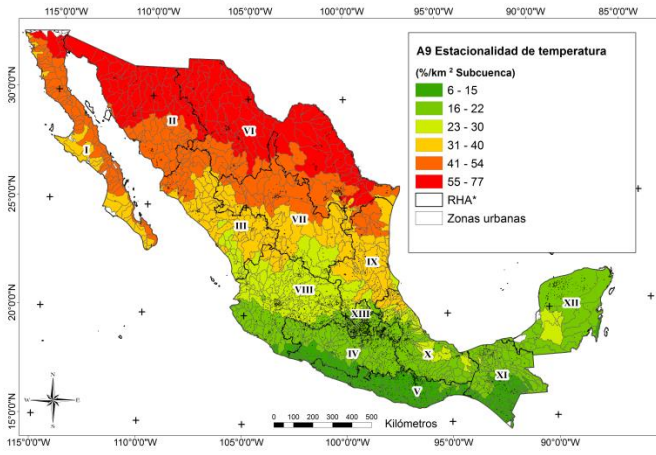
Anexo I: Variables económicas

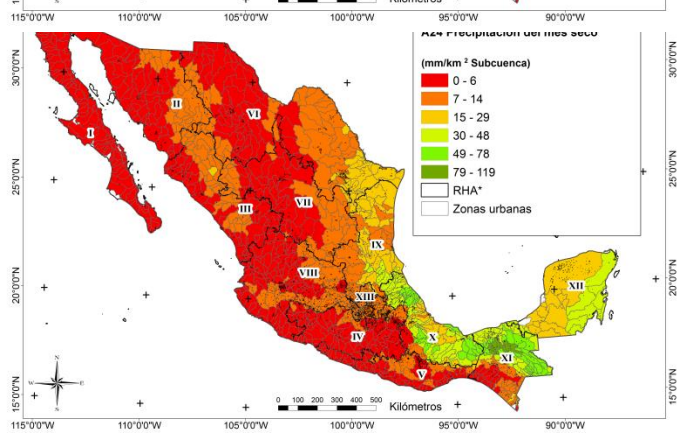
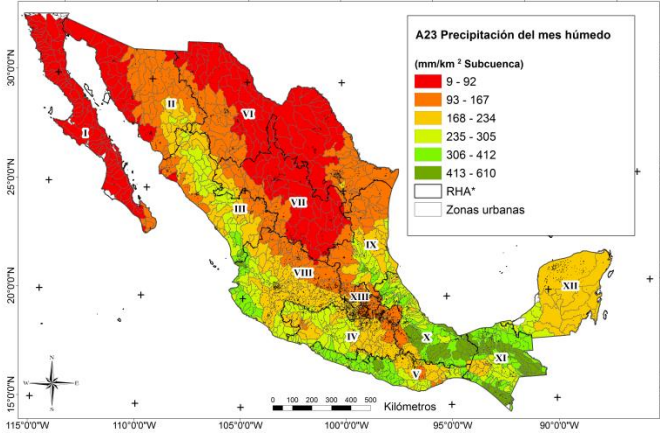
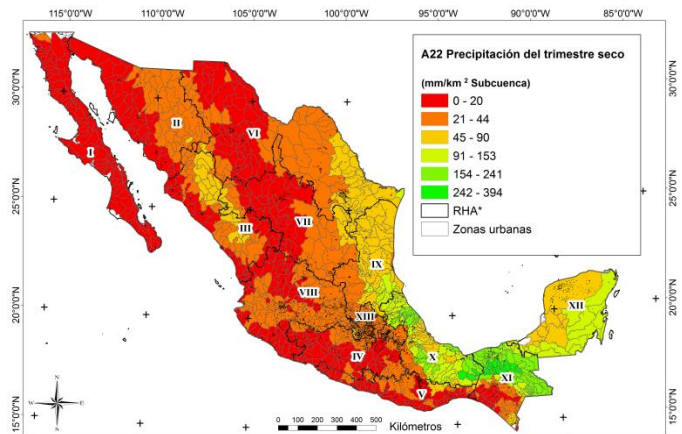
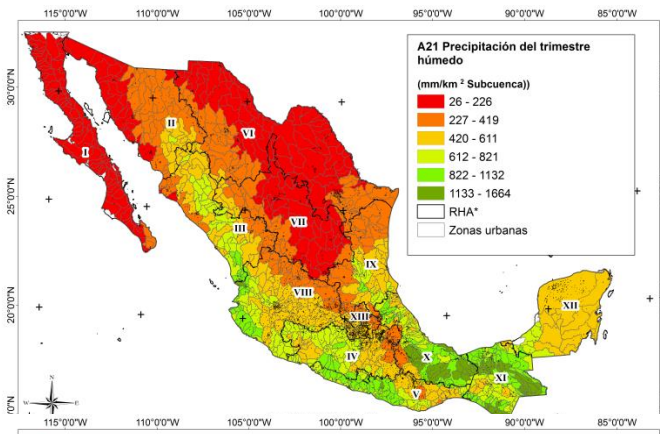
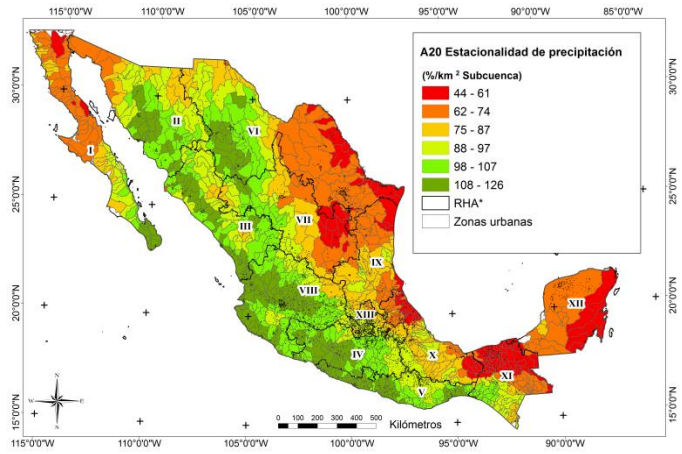
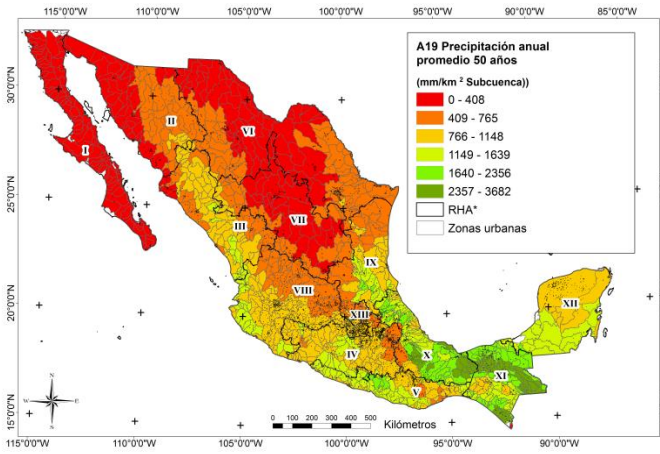
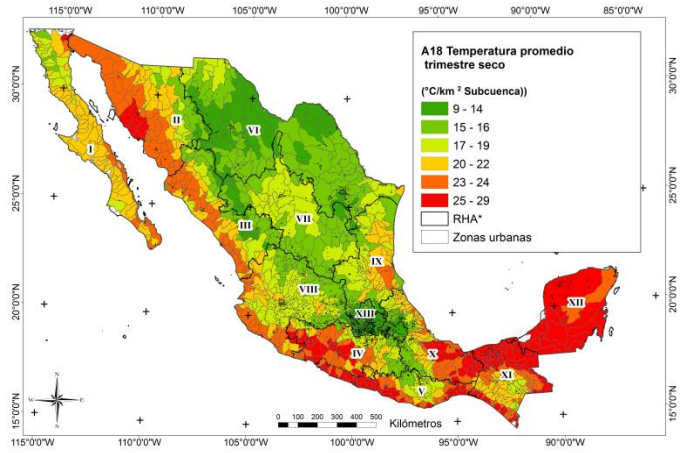
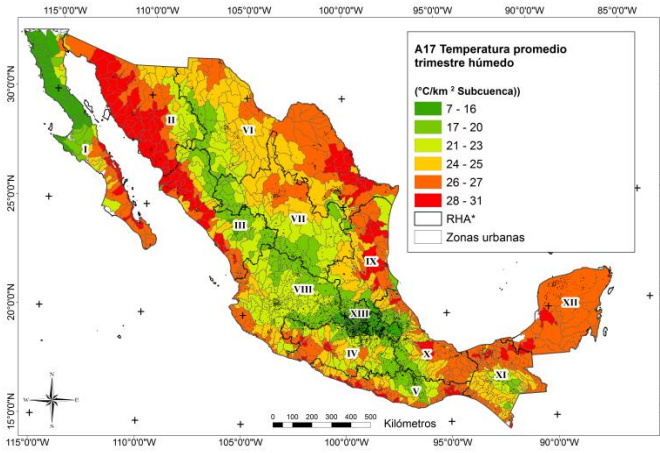


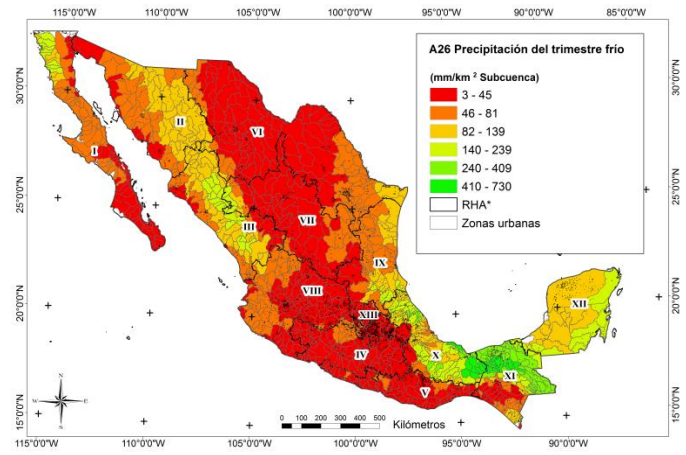
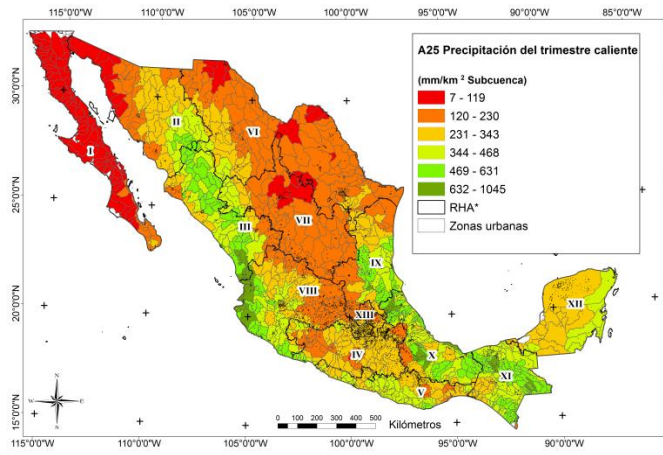


Anexo II: variables ambientales

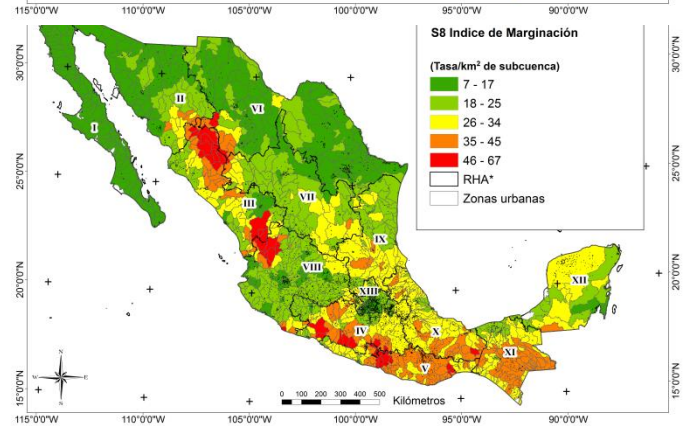
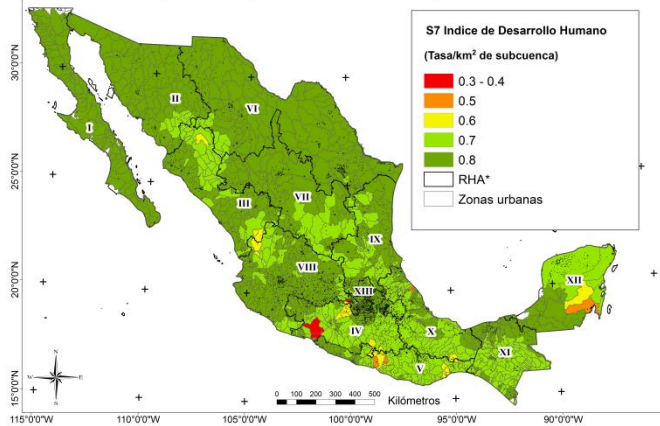
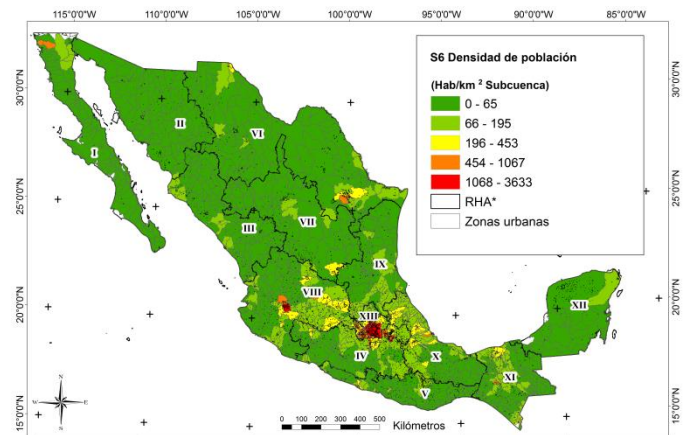
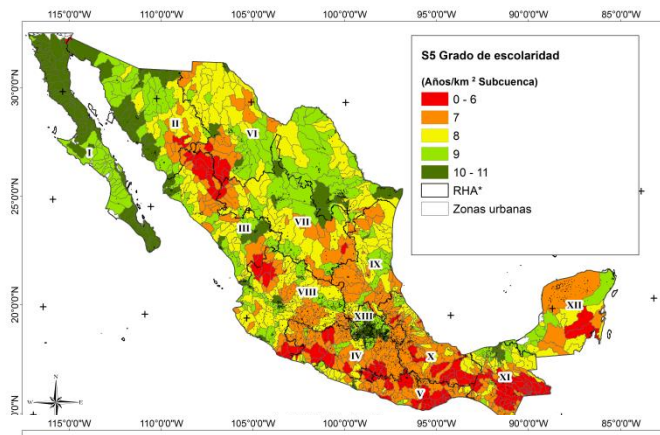
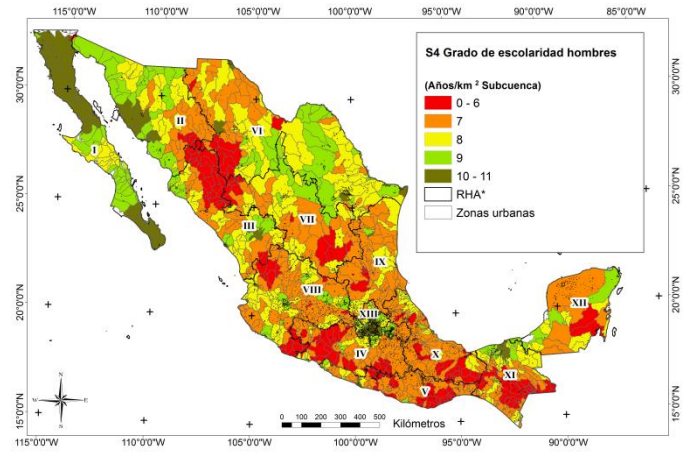
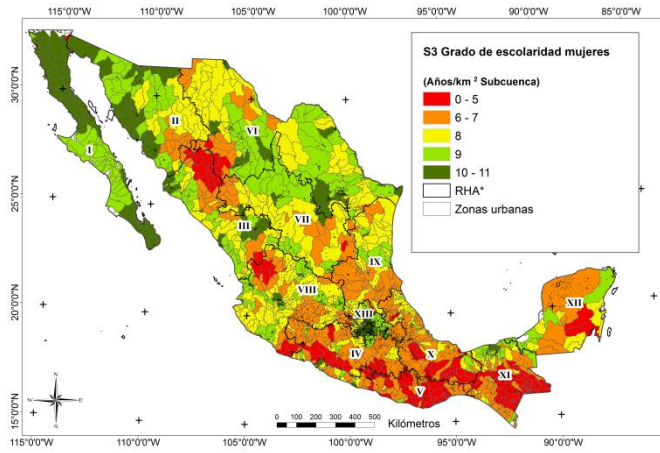
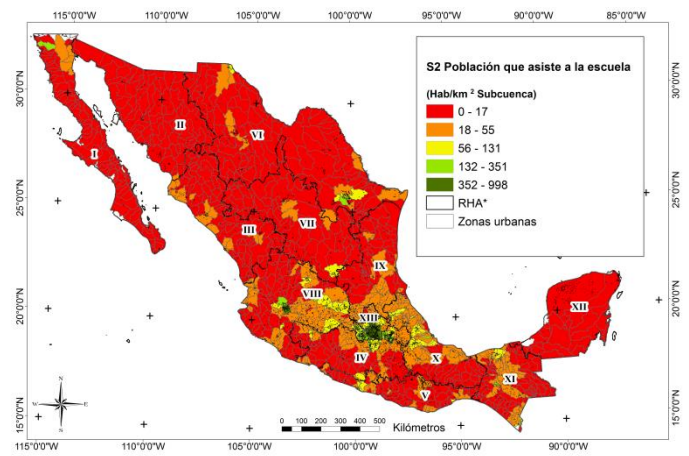
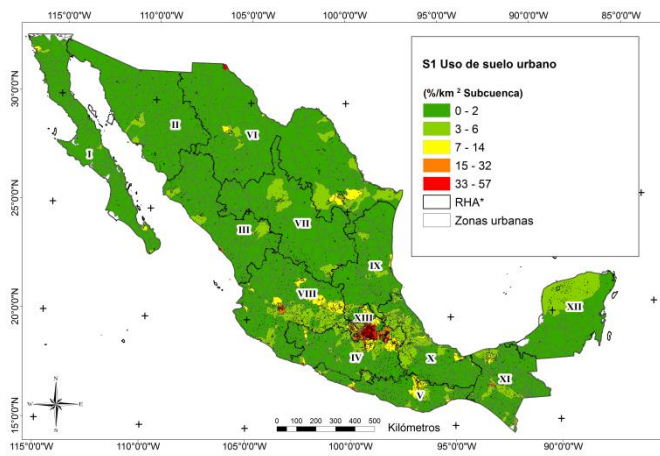


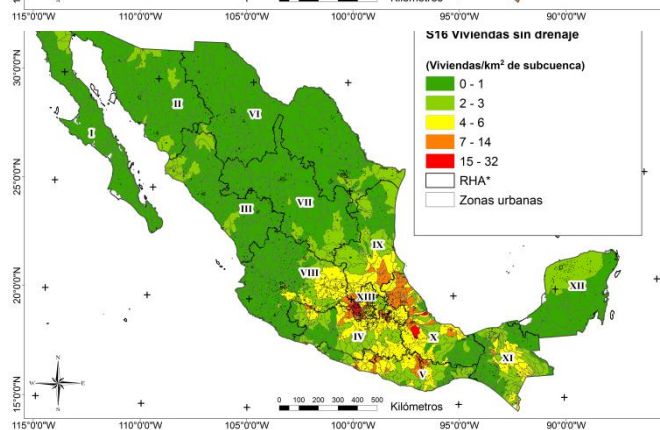
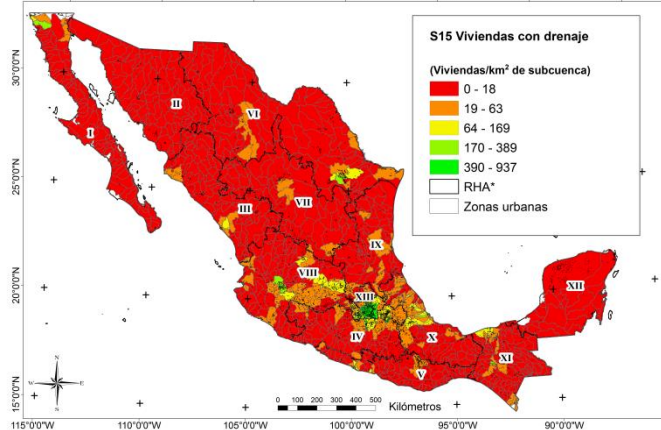
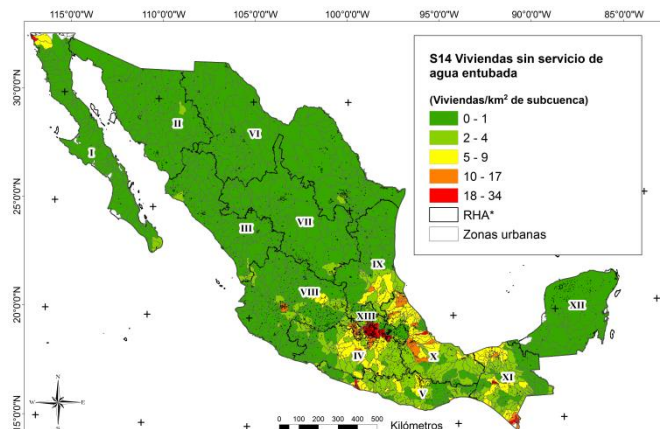
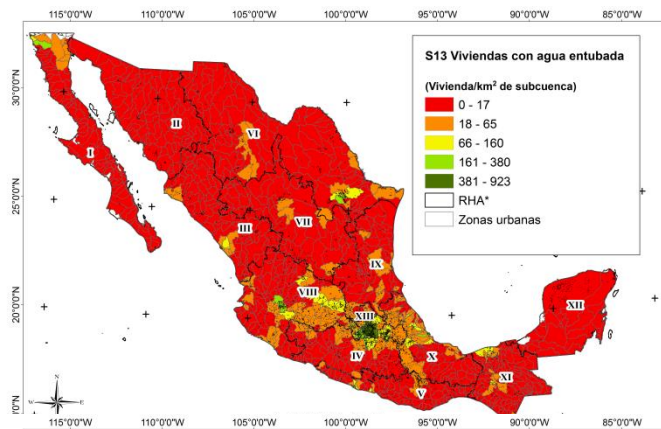
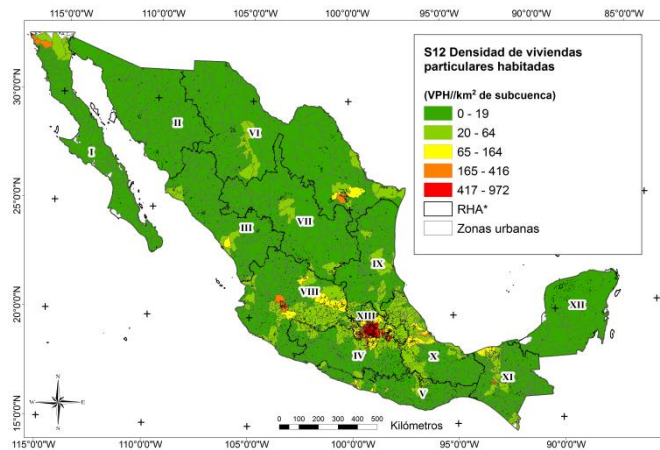
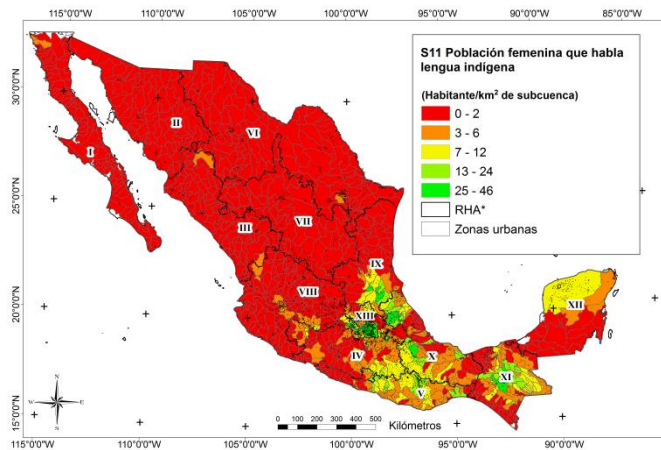
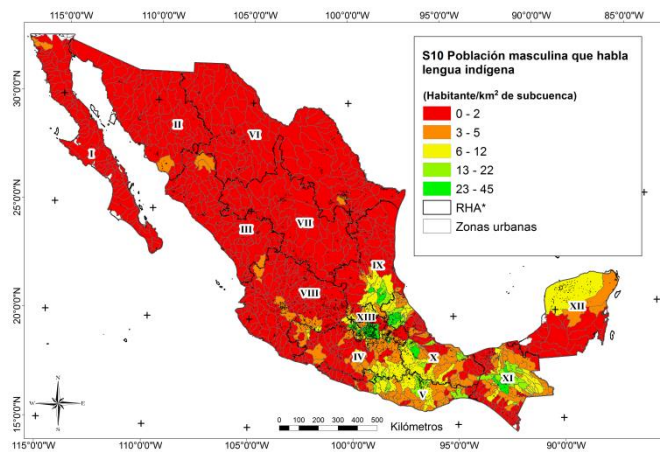
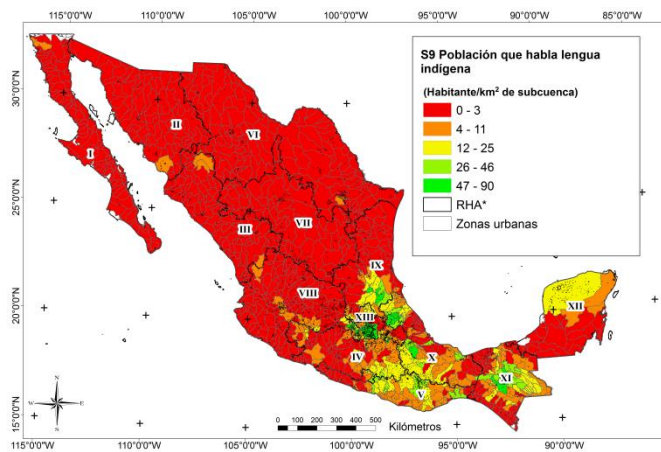


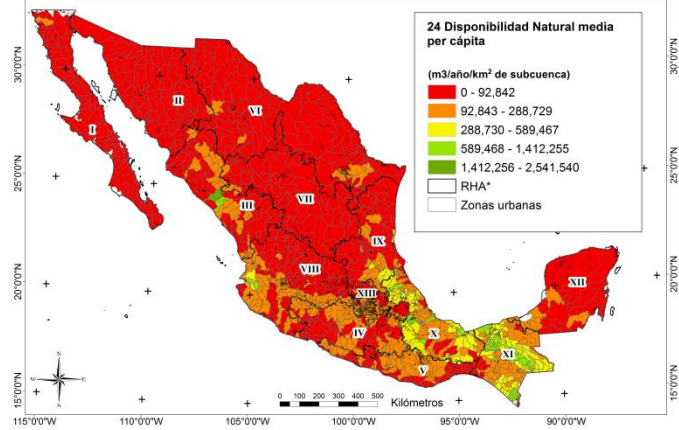
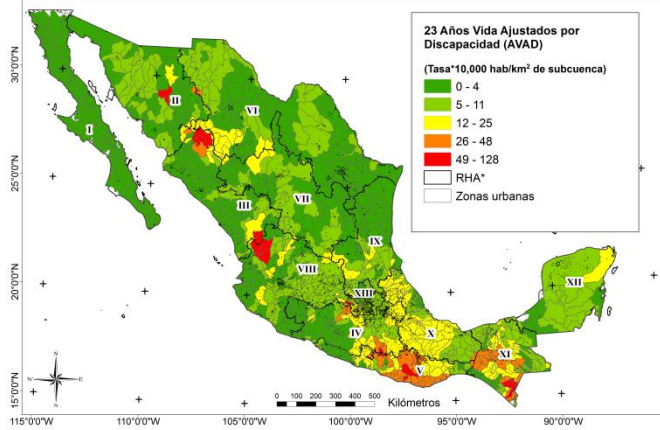
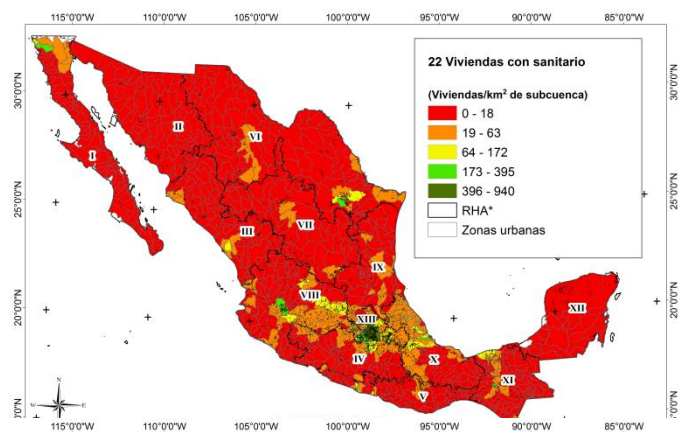
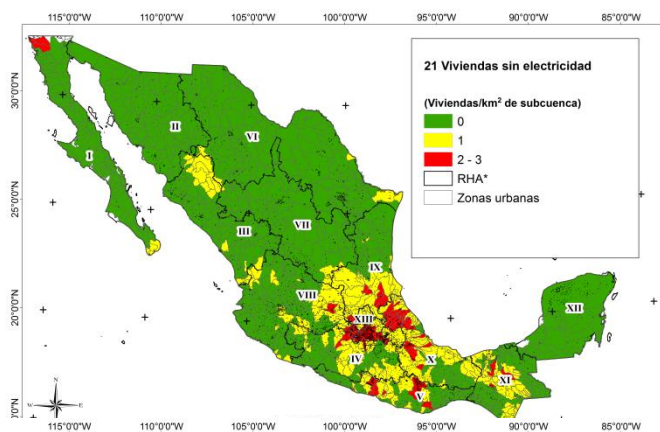
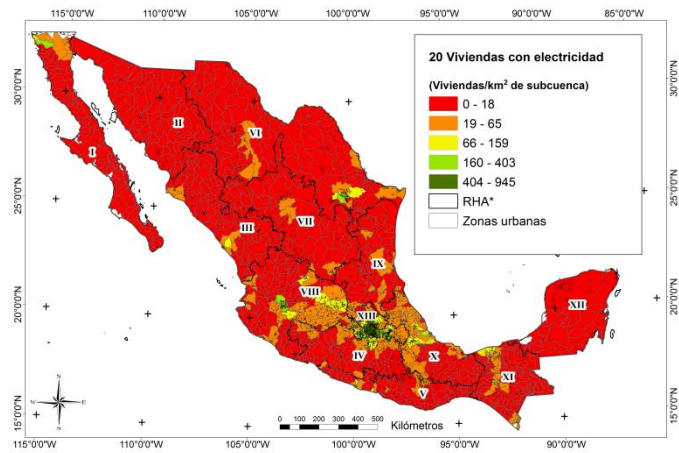
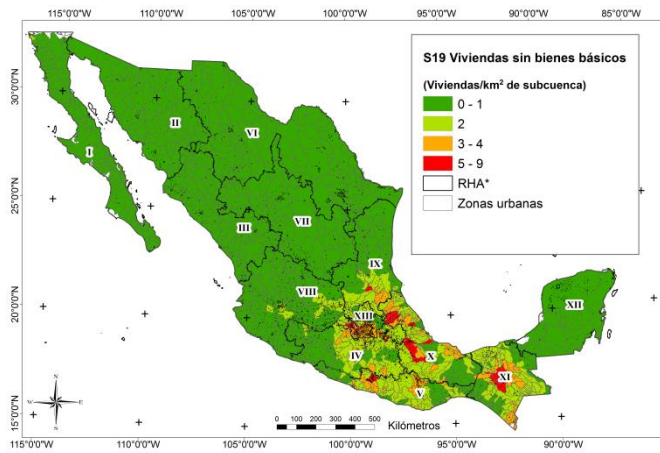
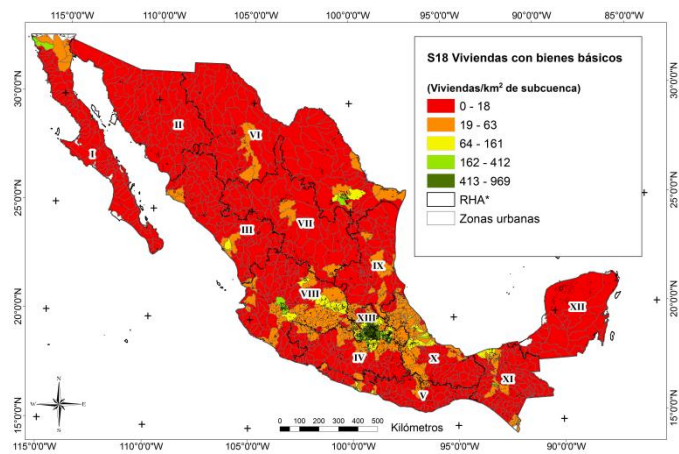
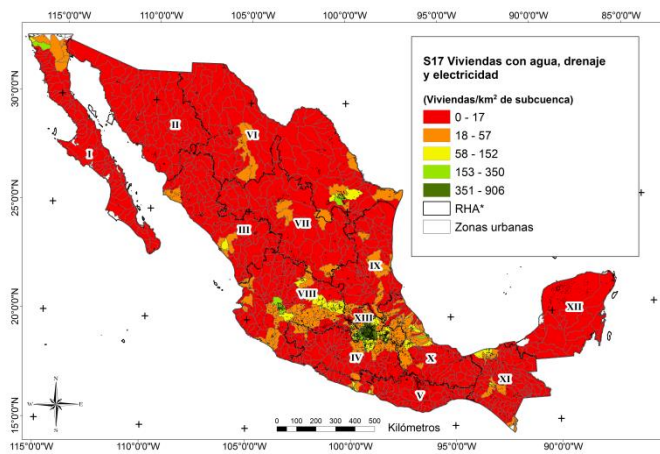




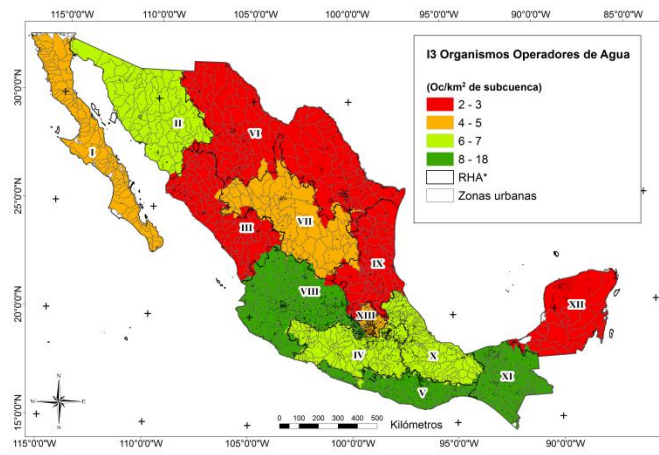
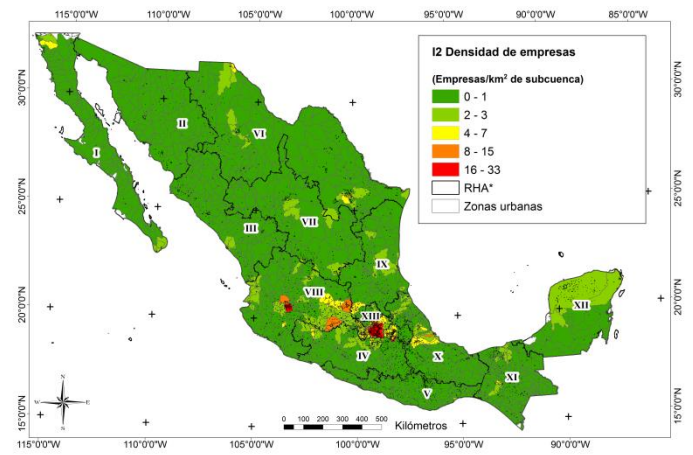
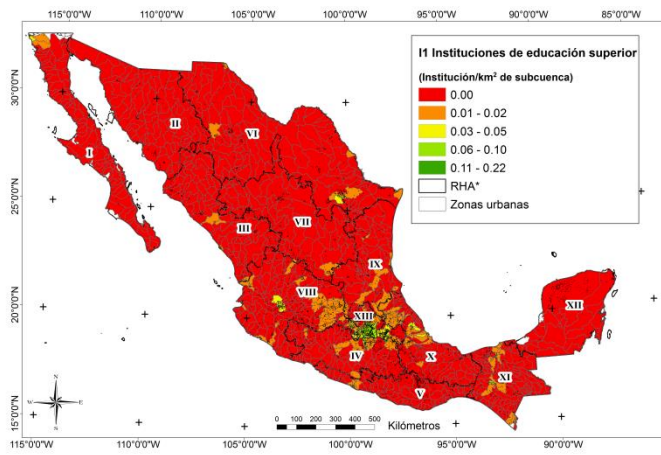
Anexo III: Variables sociales







Anexo IV: Variables Institucionales



Anexo V: Cartografía y archivos digitales

A continuación se presenta la definición de la cartografía, las geo-bases de datos y las imágenes que conforman el archivo digital.

ID	Variable	Archivo	
		Ruta: Anexo Digital\Variables	Ruta: Anexo Digital\Variables\Mapas
A1	Superficie con degradación de suelo	Var_A_SupDegr.RDC	A1_erosion.tif
		Var_A_SupDegr.rst	
A2	Eficiencia en las Plantas de tratamiento	Var_A_PTAREfi.rdc	A2_PTAREfi.tif
		Var_A_PTAREfi.rst	
A3	Agua desinfectada suministrada	Var_A_Sumini_pxl.rdc	A3_AguaSumini.tif
		Var_A_Sumini_pxl.rst	
A4	Demanda bioquímica de Oxígeno calificada como Contaminada	Var_A_DBOcon.rdc	A4_DBOCon.tif
		Var_A_DBOcon.rst	
A5	Demanda bioquímica de Oxígeno calificada como fuertemente contaminada	Var_A_DBOFcon.RDC	A5_DBOFcon.tif
		Var_A_DBOFcon.rst	
A6	Intensidad de uso de acuíferos	Var_A_GdoPres.RDC	A6_Intuso.tif
		Var_A_GdoPres.rst	
A7	Temperatura mínima promedio 50 años	Var_A_TMIN.rdc	A7_Tmin.tif
		Var_A_TMIN.RST	
A8	Temperatura máxima promedio 50 años (Tmax)	Var_A_TMAX.RDC	A8_Tmax.tif
		Var_A_TMAX.rst	
A9	Estacionalidad de temperatura	Var_A_Etemp.rdc	A9_Etemp.tif
		Var_A_Etemp.rst	
A10	Isotermalidad	Var_A_IsoT.rdc	A10_IsotT.tif
		Var_A_IsoT.rst	
A11	Tprom del mes más frío	Var_A_TprmFr.rdc	A11_TprmFr.tif
		Var_A_TprmFr.rst	
A12	Tprom del mes más caliente	Var_A_TprmC.rdc	A12_TprmCal.tif
		Var_A_TprmC.rst	
A13	Rango medio de temperatura diurna	Var_A_RDMT.rdc	A13_RMTD.tif
		Var_A_RDMT.rst	
A14	Rango de temperatura anual	Var_A_RTA.rdc	A14_RTA.tif
		Var_A_RTA.rst	
A15	Tmin del mes más frío	Var_A_TminFr.rdc	A15_TminFr.tif
		Var_A_TminFr.rst	
A16	Tmax del mes más caliente	Var_A_TmaxCal.rdc	A16_TmaxCal.tif
		Var_A_TmaxCal.rst	

ID	Variable	Archivo	
		Ruta: Anexo Digital\Variables	Ruta: Anexo Digital\Variables\Mapas
A17	Tprom del cuarto más húmedo	Var_A_TprCH.rdc	A17_TprCh.tif
		Var_A_TprCH.rst	
A18	Tprom del cuarto más seco	Var_A_TprCS.rdc	A18_TprCs.tif
		Var_A_TprCS.rst	
A19	Precipitación promedio anual	VAR_A_PRCPRM_2.RDC	A19_Pprom.tif
		VAR_A_PRCPRM_2.RST	
A20	Estacionalidad de precipitación	Var_A_Eprec.rdc	A20_Eprec.tif
		Var_A_Eprec.rst	
A21	Precipitación del cuarto más húmedo	Var_A_PcH.rdc	A21_PcH.tif
		Var_A_PcH.rst	
A22	Precipitación del cuarto más seco	Var_A_PcS.rdc	A22_Pcs.tif
		Var_A_PcS.rst	
A23	Precipitación del mes más húmedo	Var_A_PmH.rdc	A23_PcH.tif
		Var_A_PmH.rst	
A24	Precipitación del mes más seco	Var_A_PmS.rdc	A24_PmS.tif
		Var_A_PmS.rst	
A25	Precipitación del cuarto más caliente	Var_A_Pcc.rdc	A25_Pcc.tif
		Var_A_Pcc.rst	
A26	Precipitación del cuarto más frío	Var_A_Pcf.rdc	A26_Pcf.tif
		Var_A_Pcf.rst	
S1	Porcentaje de uso de suelo urbano por subcuenca	Uso_Suel_Urbano.xls	S1_Urbano.tif
S2	Población de 3 a 30 años y más que asiste a la escuela	Var_S_3a30esc2_SCNC.rdc	S2_PobEsc.tif
		Var_S_3a30esc2_SCNC.rst	
S3	Grado de escolaridad mujeres	Var_S_Grd_Esc_m.rdc	S3_Esco_M.tif
		Var_S_Grd_Esc_m.rst	
S4	Grado de escolaridad hombres	Var_S_Grd_Esc_h.rdc	S4_Esco_H.tif
		Var_S_Grd_Esc_h.rst	
S5	Grado de escolaridad promedio	Var_S_Grd_Esc.rdc	S5_Esco.tif
		Var_S_Grd_Esc.rst	
S6	Densidad de población	Var_S_DenPOB_SCNC2.rdc	S6_DenPob.tif
		Var_S_DenPOB_SCNC2.rst	
S7	IDH	Var_S_IDH.rdc	S7_IDH.tif
		Var_S_IDH.rst	
S8	Índice de marginación	Var_S_Margi.rdc	S8_Margi.tif
		Var_S_Margi.rst	
S9	Población de 3 años y más que hablan lengua indígena	Var_S_Pob_Li_SCNC.rdc	S9_PobLi.tif
		Var_S_Pob_Li_SCNC.rst	

ID	Variable	Archivo	
		Ruta: Anexo Digital\Variables	Ruta: Anexo Digital\Variables\Mapas
S10	Población masculina de 3 años y más que habla lengua indígena	Var_S_Pob_Li_H_SCNC.rdc	S10_PobLi_H.tif
		Var_S_Pob_Li_H_SCNC.rst	
S11	Población femenina de 3 años y más que habla lengua indígena	Var_S_Pob_Li_M_SCNC.rdc	S11_PobLi_M.tif
		Var_S_Pob_Li_M_SCNC.rst	
S12	Viviendas particulares habitadas (VPH)	Var_S_VPH_SCNC.rdc	S12_VPH.tif
		Var_S_VPH_SCNC.rst	
S13	VPH con servicio de agua entubada	Var_S_VPH_agua_SCNC.rdc	S13_VPH_Agua.tif
		Var_S_VPH_agua_SCNC.rst	
S14	VPH sin servicio de agua entubada	Var_S_VPH_NoAgua_SCNC.rdc	S14_VPH_NoAgua.tif
		Var_S_VPH_NoAgua_SCNC.rst	
S15	VPH con drenaje	Var_S_VPH_Dren_SCNC.rdc	S15_VPH_Dren.tif
		Var_S_VPH_Dren_SCNC.rst	
S16	VPH sin drenaje	Var_S_VPH_NoDren_SCNC.rdc	S16_VPH_NoDren.tif
		Var_S_VPH_NoDren_SCNC.rst	
S17	VPH con agua, drenaje y electricidad	Var_S_VPH_ADE_SCNC.rdc	S17_VPH_ADE.tif
		Var_S_VPH_ADE_SCNC.rst	
S18	VPH con bienes	Var_S_VPH_ConBien_SCNC.rdc	S18_VPH_Bien.tif
		Var_S_VPH_ConBien_SCNC.rst	
S19	VPH sin bienes	Var_S_VPH_SinBien_SCNC.rdc	S19_VPH_NoBien.tif
		Var_S_VPH_SinBien_SCNC.rst	
S20	VPH con electricidad	Var_S_VPH_Elec_SCNC.rdc	S20_VPH_Elec.tif
		Var_S_VPH_Elec_SCNC.rst	
S21	VPH sin electricidad	Var_S_VPH_NoElec_SCNC.rdc	S21_VPH_NoEle.tif
		Var_S_VPH_NoElec_SCNC.rst	
S22	VPH con sanitario	Var_S_VPH_Sani_SCNC.rdc	S22_VPHSani.tif
		Var_S_VPH_Sani_SCNC.rst	
S23	Años Vida Ajustados por Discapacidad por enfermedades intestinales	Var_S_AVAD.rdc	S23_AVAD.tif
		Var_S_AVAD.RST	
S24	Disponibilidad natural media per cápita	Var_S_DisNatPxl.rdc	S24_DisNat.tif
		Var_S_DisNatPxl.rst	
Ec1	Tasa de participación económica	Var_E_tpe.rdc	E1_TPE.tif
		Var_E_tpe.rst	
Ec2	Tasa de participación económica hombres	Var_E_tpe_h.rdc	E2_TPE_H.tif
		Var_E_tpe_h.rst	
Ec3	Tasa de participación económica mujeres	Var_E_tpe_m.rdc	E3_TPE_M.tif
		Var_E_tpe_m.rst	
Ec4	PIB anual	Var_E_PIB_SBCNC.RDC	E4_PIB.tif
		Var_E_PIB_SBCNC.rst	

ID	Variable	Archivo	
		Ruta: Anexo Digital\Variables	Ruta: Anexo Digital\Variables\Mapas
Ec5	Población económicamente inactiva	Var_E_PEI_SCNC.rdc	E5_PEI.tif
		Var_E_PEI_SCNC.rst	
Ec6	Población económicamente inactiva hombres	Var_E_PEI_H_SCNC.rdc	E6_PEI_H.tif
		Var_E_PEI_H_SCNC.rst	
Ec7	Población económicamente inactiva mujeres	Var_E_PEI_M_SCNC.rdc	E7_PEI_M.tif
		Var_E_PEI_M_SCNC.rst	
Ec8	Población económicamente activa total	Var_E_PEA_SCNC.rdc	E8_PEA.tif
		Var_E_PEA_SCNC.rst	
Ec9	Población económicamente activa hombres	Var_E_PEA_H_SCNC.rdc	E9_PEA_H.tif
		Var_E_PEA_H_SCNC.rst	
Ec10	Población económicamente activa mujeres	Var_E_PEA_M_SCNC.rdc	E10_PEA_M.tif
		Var_E_PEA_M_SCNC.rst	
Ec11	Población económicamente activa ocupada	Var_E_PEA_O_SCNC.rdc	E11_PEA_O.tif
		Var_E_PEA_O_SCNC.rst	
Ec12	Población económicamente activa ocupada hombres	Var_E_PEA_O_H_SCNC.rdc	E12_PEA_O_H.tif
		Var_E_PEA_O_H_SCNC.rst	
Ec13	Población económicamente activa ocupada mujeres	Var_E_PEA_O_M_SCNC.rdc	E13_PEA_O_M.tif
		Var_E_PEA_O_M_SCNC.rst	
Ec14	Población económicamente activa desocupada	Var_E_PEA_D_SCNC.rdc	E14_PEA_D.tif
		Var_E_PEA_D_SCNC.rst	
Ec15	Población económicamente activa desocupada hombres	Var_E_PEA_D_H_SCNC.rdc	E15_PEA_D_H.tif
		Var_E_PEA_D_H_SCNC.rst	
Ec16	Población económicamente activa desocupada mujeres	Var_E_PEA_D_M_SCNC.rdc	E16_PEA_D_M.tif
		Var_E_PEA_D_M_SCNC.rst	
I1	Instituciones de educación superior (IES)	Var_I_EducSup_SCNC.rdc	I1_Inst.tif
		Var_I_EducSup_SCNC.rst	
I2	Número de empresas	Var_I_Emp_SCNC.rdc	I2_Emp.tif
		Var_I_Emp_SCNC.rst	
I3	Organismos operadores	Var_I_OrgOp_RHA.rdc	I3_Op.tif
		Var_I_OrgOp_RHA.rst	

Ruta: Anexo Digital\Mapas	
Archivo	Descripción
ESAI_Especiales.tif	Códigos ESAI para subcuencas clasificadas como casos especiales
ISH_May16.tif	Índice de Sustentabilidad Hidrológica
ISH_R0.tif	Índice de Sustentabilidad Hidrológica en subcuencas no urbanas
ISH_R1.tif	Índice de Sustentabilidad Hidrológica en la región 1
ISH_R2.tif	Índice de Sustentabilidad Hidrológica en la región 2
ISH_R3.tif	Índice de Sustentabilidad Hidrológica en la región 3
ISH_R4.tif	Índice de Sustentabilidad Hidrológica en la región 4
ISH_R5.tif	Índice de Sustentabilidad Hidrológica en la región 5
Regiones.tif	Regionalización de subcuencas de México
Sa_May2016.tif	Subíndice ambiental
Sbcnc_urb.tif	Subcuencas urbanas de México
Se_May2016.tif	Subíndice económico
Si_May2016.tif	Subíndice institucional
Ss_May2016.tif	Subíndice social
Ruta: Anexo Digital\Cartografía\Subcuencas	
Archivo	Descripción
Carac_PAM5.xls	Regiones del país y valor de variables para cada una
ISH_Codigos.xls	Valores de índice de Sustentabilidad Hidrológico, subíndices de sustentabilidad hidrológica, códigos ESAI y valor de ISH por región
Ruta: Anexo Digital\Cartografía	
Archivo	Descripción
redsubciigw.dbf	Capa vectorial de subcuencas de México
redsubciigw.prj	
redsubciigw.sbn	
redsubciigw.sbx	
redsubciigw.shp	

Referencias

- Abeyasekera, S. (2005). Chapter XVIII Multivariate methods for index construction.
- Agostinho, F., Siche, J. R., & Ortega, E. (2007). True ecological footprint for small farms in Brazil. In *International Ecological Footprint Conference, Cardiff, UK*. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/228427334_True_ecological_footprint_for_small_farms_in_Brazil/file/9fcfd507dad08376d8.pdf
- Ahmed, R., Mahmood, K., & Kausar, A. (2014). Socio-Agricultural Correlation and Regionalization: A Case of the Districts of Pakistan. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 10, 7–19.
- Al Radif, A. (1999). Integrated water resources management (IWRM): an approach to face the challenges of the next century and to avert future crises. *Desalination*, 124(1), 145–153.
- Ali, H. M. (2008). Development of Arab water sustainability index using principal component analysis. Presented at the The 3rd International Conference on Water Resources and Arid Environments, Citeseer.
- Allende, C. T., Mendoza, M. E., López Granados, E. M., & Morales Manilla, L. M. (2009). Hydrogeographical Regionalisation: An Approach for Evaluating the Effects of Land Cover Change in Watersheds. A Case Study in the Cuitzeo Lake Watershed, Central Mexico. *Water Resources Management*, 23(12), 2587–2603. <http://doi.org/10.1007/s11269-008-9398-6>
- ANUIES, (Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior en México). (2010). Información estadística de educación superior. Retrieved October 14, 2015, from <http://www.anuies.mx/informacion-y-servicios/informacion-estadistica-de-educacion-superior>
- Ardón, D. L. R. V. (2010). Construcción de escenarios: escenarios al 2020 para el acuífero del valle de toluca. Retrieved from 132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3928
- Baarsch, J., & Celebi, M. E. (2012). Investigation of internal validity measures for K-means clustering (Vol. 1, pp. 14–16). Presented at the Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists.
- Baeriswyl, P.-A., & Rebetez, M. (1997). Regionalization of precipitation in Switzerland by means of principal component analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 58(1–2), 31–41.
- Balvanera, P., Cotler, H., Aburto, O., Aguilar, A., Aguilera, M., Aluja, M., ... Astier, M. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. *Capital Natural de México*, 2, 185–245.
- Banai, R. (2005). Land Resource Sustainability for Urban Development: Spatial Decision Support System Prototype. *Environmental Management*, 36(2), 282–296. <http://doi.org/10.1007/s00267-004-1047-0>
- Baril, C. F., Marion, S. T., & Reynaga, N. S. (2013). Huella de agua de uso público-urbano en México. *REVISTA INTERNACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA*, 58.
- Barrantes, G., & Vega, M. (2002). El Servicio Ambiental Hídrico: aspectos biofísicos y económicos. *Instituto de Políticas Para La Sostenibilidad (IPS). Costa Rica*.
- Bartlett, M. S. (1950). Tests of significance in factor analysis. *British Journal of Statistical Psychology*, 3(2), 77–85.

- Berkes, F., & Folke, C. (1998a). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*, 1, 13–20.
- Berkes, F., & Folke, C. (1998b). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*, 1, 13–20.
- Berkes, F., Folke, C., & Colding, J. (2000). *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press.
- Böhringer, C., & Jochem, P. E. (2007). Measuring the immeasurable—A survey of sustainability indices. *Ecological Economics*, 63(1), 1–8.
- Bórquez, R. (2006). *Glaciares chilenos: reservas estratégicas de agua dulce: para la sociedad, los ecosistemas y la economía*. Sociedad Nacional de Agricultura.
- Bossel, H. (1999). *Indicators for sustainable development: theory, method, applications*. International Institute for Sustainable Development Winnipeg.
- Bravo Cabrera, J., Azpra Romero, E., Zarraluqui Such, V., Gay García, C., & Estrada Porrúa, F. (2012). Cluster analysis for validated climatology stations using precipitation in Mexico. *Atmósfera*, 25(4), 339–354.
- Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2001). Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments. *Population and Environment*, 22(5), 471–501.
- Brown, M., & Ulgiati, S. (1997). Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 9(1), 51–69.
- Brown, M., & Ulgiati, S. (1999). Emergy evaluation of the biosphere and natural capital. *Ambio*, 486–493.
- Brown, R. R., & Farrelly, M. A. (2009). Delivering sustainable urban water management: a review of the hurdles we face. *Water Science & Technology*, 59(5), 839.
<http://doi.org/10.2166/wst.2009.028>
- Burn, D. H., Zrinji, Z., & Kowalchuk, M. (1997). Regionalization of Catchments for Regional Flood Frequency Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(2), 76–82.
[http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1997\)2:2\(76\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:2(76))
- Burton, J. (2003). *Integrated water resources management on a basin level: a training manual*. Unesco.
- Caliński, T., & Harabasz, J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 3(1), 1–27.
- Carabias, L., Julia, & Landa, R. (2005). Agua, medio ambiente y sociedad. hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México.
- Ceballos, G., Valenzuela, D., Ceballos, G., Martínez, L., García, A., Espinoza, E., ... Dirzo, R. (2010). Diversidad, ecología y conservación de los vertebrados de Latinoamérica. G. Ceballos, L. Martínez, A. García, E. Espinoza, J. Bezaury J., & R. Dirzo (Eds.), *Diversidad, Amenazas Y Áreas Prioritarias Para La Conservación de Las Selvas Secas Del Pacífico de México*, 94–118.

- Cicea, C., & Pirlogea, C. (2011). Green spaces and public health in urban areas. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 6(1), 83–92.
- Ciegis, R., Ramanauskiene, J., & Startiene, G. (2009). Theoretical reasoning of the use of indicators and indices for sustainable development assessment. *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 3(63), 33–40.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2012). Atlas digital del agua en Mexico. Retrieved April 25, 2015, from <http://www.CONAGUA.gob.mx/atlas/>
- CONEVAL, (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). (2014). Evolución de la pobreza en Mexico. Retrieved October 14, 2015, from http://www.coneval.gob.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2014.aspx
- Cotler, H. (2004). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales : Instituto Nacional de Ecología.
- Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización* (Primera).
- Cotler, H., & Caire, G. (2009). Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. *Instituto Nacional de Ecología, México*.
- Darand, M., & Daneshvar, M. M. R. (2014). Regionalization of Precipitation Regimes in Iran Using Principal Component Analysis and Hierarchical Clustering Analysis. *Environmental Processes*, 1(4), 517–532. <http://doi.org/10.1007/s40710-014-0039-1>
- Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (2), 224–227.
- Delgado, C. D., Alberich, M. V. E., & López-Vera, F. (2005). Recursos hídricos: conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica.
- Desa, M. N. M. (2006). Integrated urban water management and modelling approach: an overview. Presented at the Water for sustainable development towards to develop nation to 2020, Kuala Lumpur.
- Devuyst, D., Hens, L., & De Lannoy, W. (2001). *How green is the city?: sustainability assessment and the management of urban environments*. Columbia University Press.
- Di Giuseppe, E., Jona Lasinio, G., Esposito, S., & Pasqui, M. (2013). Functional clustering for Italian climate zones identification. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(1–2), 39–54. <http://doi.org/10.1007/s00704-012-0801-0>
- Díaz-Delgado, C., Esteller, M., Velasco-Chilpa, A., Arriaga-Jordán, C., Martínez-Vilchis, J., Colín-Mercado, M., ... Ramírez-Zierold, J. (2009). Guía de Planeación Estratégica Participativa para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago (Estado de México). *Centro Interamericano de Recursos Del Agua, Facultad de Ingeniería de La Universidad Autónoma Del Estado de México Y Red Interinstitucional E Interdisciplinaria de Investigación, Consulta Y Coordinación Científica Para La Recuperación de La Cuenca Lerma-Chapala-Santiago (RED LERMA)*.
- DOF, D. O. de la F. (2013). *Ley de Aguas Nacionales*.
- DOF, D. O. de la F. (2016). DECRETO por el que se declaran reformadas y derogadas diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de la

- reforma política de la Ciudad de México. Retrieved March 31, 2016, from http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5424043&fecha=29/01/2016
- Dudek, M. W. A. (2015). clusterSim: Searching for Optimal Clustering Procedure for a Data Set (Version 0.44-2). Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/clusterSim/index.html>
- Dziuban, C. D., & Shirkey, E. C. (1974). When is a correlation matrix appropriate for factor analysis? Some decision rules. *Psychological Bulletin*, 81(6), 358.
- Eastman, J. R. (2012). Guide to GIS and Image Processing Volume. *Clark University. USA*.
- Ernstson, H., van der Leeuw, S. E., Redman, C. L., Meffert, D. J., Davis, G., Alfsen, C., & Elmqvist, T. (2010). Urban transitions: on urban resilience and human-dominated ecosystems. *Ambio*, 39(8), 531–545.
- Esri, A. D. (2011). Release 10. *Documentation Manual. Redlands, CA, Environmental Systems Research Institute*.
- Esty, D. C., Levy, M., Srebotnjak, T., & De Sherbinin, A. (2005). Environmental sustainability index: benchmarking national environmental stewardship. *New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy*, 47–60.
- Esty, D. C., & Porter, M. E. (2005). National environmental performance: an empirical analysis of policy results and determinants. *Environment and Development Economics*, 10(4), 391–434.
- FCEA, F. para la E. y la C. A. A. C., & CEMDA, C. M. de D. A. A. C. (2006). Agua en México: lo que todos y todas debemos saber. In *Agua en México: lo que todos y todas debemos saber*. Fondo Educación Ambiental.
- FMA, (Foro Mundial del Agua). (2012). Proceso regional de las Américas, VI Foro Mundial del Agua. Hacia una buena gobernanza para la gestión integrada de los recursos hídricos. Retrieved March 10, 2016, from http://www.inegi.org.mx/RDE/RDE_08/Doctos/RDE_08_Art4.pdf
- Fonseca, O. C. R. (2010). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN CONTEXTO URBANO CON ENFOQUE TERMODINÁMICO*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de recursos del agua (CIRA), Estado de México.
- Franco, R. (2008). Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos. *Ph. Dissertation, Centro Interamericano de Recursos Del Agua, Universidad Autónoma Del Estado de México, Toluca*.
- García, E., & CONABIO, C. N. para el C. y U. de la B. (1998). Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). *Escala*, 1(1), 0.
- Geniaux, G., Bellon, S., Deverre, C., & Powell, B. (2006). System for Environmental and Agricultural Modelling; Linking European Science and Society. *Sustainable Development Indicator Frameworks and Initiatives*. [Http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/57937/2/Report_49_PD2, 2](Http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/57937/2/Report_49_PD2,2).
- Gómez-Albores, M. Á. (2012, Diciembre). *Modelación geomatica de medidas de frecuencia y de asociaciónn, aplicada a enfermedades vinculadas con el agua*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de recursos del agua (CIRA), Toluca de Lerdo.

- Graf, W. L. (2001). Dam age control: restoring the physical integrity of America's rivers. *Annals of the Association of American Geographers*, 91(1), 1–27.
- Graymore, M. L. M., Wallis, A. M., & Richards, A. J. (2009). An Index of Regional Sustainability: A GIS-based multiple criteria analysis decision support system for progressing sustainability. *Ecological Complexity*, 6(4), 453–462. <http://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.08.006>
- Gustavson, K. R., Lonergan, S. C., & Ruitenbeek, H. J. (1999). Selection and modeling of sustainable development indicators: a case study of the Fraser River Basin, British Columbia. *Ecological Economics*, 28(1), 117–132.
- GWP, G. W. P. (2009). A handbook for integrated water resources management in basins.
- Hák, T., Moldan, B., & Dahl, A. L. (2012). *Sustainability indicators: a scientific assessment* (Vol. 67). Island Press.
- Harmancioglu, N. B., Barbaros, F., & Cetinkaya, C. P. (2012). Sustainability Issues in Water Management. *Water Resources Management*, 27(6), 1867–1891. <http://doi.org/10.1007/s11269-012-0172-4>
- Hearne, R. R. (2004). Evolving water management institutions in Mexico. *Water Resources Research*, 40(12), W12S04. <http://doi.org/10.1029/2003WR002745>
- Herrick, C., & Pratt, J. (2013). Communication and the Narrative Basis of Sustainability: Observations from the Municipal Water Sector. *Sustainability*, 5(10), 4428–4443. <http://doi.org/10.3390/su5104428>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978.
- Hoekstra, A. Y. (2011). *The water footprint assessment manual: setting the global standard*. London; Washington, DC: Earthscan.
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417.
- Huang, B., Fan, T., Li, Y., & Wang, Y. (2013). Division scheme for environmental management regionalization in China. *Environmental Management*, 52(1), 289–307.
- Hubert, L. J., & Levin, J. R. (1976). Evaluating object set partitions: Free-sort analysis and some generalizations. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 15(4), 459–470.
- INAFED, (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). (2010). Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM). Retrieved October 14, 2015, from <http://www.snim.rami.gob.mx/>
- INE, I. N. de E. (2006). *Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala: construyendo una visión conjunta*. (H. Cotler Avalos, M. Mazari Hiriart, & J. de Anda Sánchez, Eds.). México, D.F: Instituto Nacional de Ecología.
- INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Retrieved August 13, 2015, from <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>
- INEGI. (2010). II Censo de población y vivienda 2010. *Indicadores Del Censo General de Población Y Vivienda*, Ed. INEGI, México.

- INEGI. (2010). *Referencias geográficas y extensión territorial de México* (p. 17). (Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/1-GeografiaDeMexico/man_refgeog_extterr_vs_enero_30_2088.pdf).
- Isik, S., & Singh, V. P. (2008). Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- IUCN. (1980). *World Conservation Strategy*. IUCN. Retrieved from <http://www.iucn.org/dbtw-wpd/html/WCS-004/cover.html>
- Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: a review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 31(3), 264–323.
- Jefferies, C., & Duffy, A. (2011). The SWITCH transitioning manual (Vol. 1016). Presented at the Proceedings of the 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Jha, R., & Murthy, K. V. (2003). A critique of the Environmental Sustainability Index. *Australian National University Division of Economics Working Paper*. Retrieved from http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=380160
- Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis and factor analysis. *Principal Component Analysis*, 150–166.
- Jujnovsky, J., González-Martínez, T. M., Cantoral-Uriza, E. A., & Almeida-Leñero, L. (2012). Assessment of Water Supply as an Ecosystem Service in a Rural-Urban Watershed in Southwestern Mexico City. *Environmental Management*, 49(3), 690–702. <http://doi.org/10.1007/s00267-011-9804-3>
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*.
- Kaiser, H. F. (1970). A second generation little jiffy. *Psychometrika*, 35(4), 401–415.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (1990). Partitioning around medoids (program pam). *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*, 68–125.
- Laaha, G., & Blöschl, G. (2006). A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323(1–4), 193–214. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.001>
- Landeta, J. (2006). Current validity of the Delphi method in social sciences. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(5), 467–482.
- Legorreta, J. (2006). El agua y la Ciudad de México de Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: Principios y aplicaciones*.
- Lletí, R., Ortiz, M. C., Sarabia, L. A., & Sánchez, M. S. (2004). Selecting variables for k-means cluster analysis by using a genetic algorithm that optimises the silhouettes. *Analytica Chimica Acta*, 515(1), 87–100.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations (Vol. 1, pp. 281–297). Presented at the Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, Oakland, CA, USA.

- Mendoza, G. A., & Prabhu, R. (2006). Participatory modeling and analysis for sustainable forest management: Overview of soft system dynamics models and applications. *Forest Policy and Economics*, 9(2), 179–196.
- Mertens, M., Nestler, I., & Huwe, B. (2002). GIS-based regionalization of soil profiles with Classification and Regression Trees (CART). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(1), 39. [http://doi.org/10.1002/1522-2624\(200202\)165:1<39::AID-JPLN39>3.0.CO;2-X](http://doi.org/10.1002/1522-2624(200202)165:1<39::AID-JPLN39>3.0.CO;2-X)
- Mingshun, Z. (2002). *Measuring urban sustainability in China*. Eburon.
- Mitchell, V. G. (2006). Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience. *Environmental Management*, 37(5), 589–605. <http://doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1>
- Monfreda, C., Wackernagel, M., & Deumling, D. (2004). Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, 21(3), 231–246.
- Monroy-Ortiz, R. (2013). Los sistemas urbanos de cuenca en México: Transitando a estrategias integrales de gestión hídrica. *Economía, Sociedad Y Territorio*, 13(41), 151–179.
- Mori, K., & Christodoulou, A. (2012). Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI). *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 94–106. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.001>
- Morrisey, G. L. (1996). *Pensamiento estratégico: construya los cimientos de su planeación*.
- Morse, S., & Fraser, E. D. G. (2005). Making “dirty” nations look clean? The nation state and the problem of selecting and weighting indices as tools for measuring progress towards sustainability. *Geoforum*, 36(5), 625–640. <http://doi.org/10.1016/j.geoforum.2004.10.005>
- Munda, G. (2006). Social multi-criteria evaluation for urban sustainability policies. *Land Use Policy*, 23(1), 86–94. <http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.08.012>
- Myllyviita, T., Hujala, T., Kangas, A., & Leskinen, P. (2011). Decision Support in Assessing the Sustainable Use of Forests and Other Natural Resources- A Comparative Review. *Open Forest Science Journal*, 4, 24–41.
- Naciones Unidas. (2002). *Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible*. Johannesburgo (Sudáfrica).
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., & Giovannini, E. (2005). Handbook on constructing composite indicators.
- Nederlof, M., & Frijns, J. (2010). Zero impact water use in the built environment. *Towards 0-Impact Buildings and Built Environments*, Techné Press, Amsterdam, 199–208.
- Ng, R. T., & Han, J. (2002). CLARANS: a method for clustering objects for spatial data mining. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 14(5), 1003–1016. <http://doi.org/10.1109/TKDE.2002.1033770>
- Nieto, A. T. (2013). Las economías de las zonas metropolitanas de México en los albores del siglo xxi. Retrieved August 13, 2015, from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31230011001>
- O’Connor, M. (2006). The “Four Spheres” framework for sustainability. *Ecological Complexity*, 3(4), 285–292.

- Odum, H. T. (1986). Emergy in ecosystems. *Ecosystem Theory and Application*, 337–369.
- Odum, H. T. (1996). Environmental accounting: EMERGY and environmental decision making.
- OECD. (2003). OECD Environmental Indicators: Development, Measurement and Use. [Http://www.oecd.org/environment/indicators-Modelling-outlooks/24993546.pdf](http://www.oecd.org/environment/indicators-Modelling-outlooks/24993546.pdf). Retrieved from <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>
- OECD, O. for E. C. and D. (1993). OECD core set of indicators for environmental performance reviews.
- Park, H.-S., & Jun, C.-H. (2009). A simple and fast algorithm for K-medoids clustering. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3336–3341. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.01.039>
- Parnreiter, C. (2002). Ciudad de México: el camino hacia una ciudad global. *EURE (Santiago)*, 28(85), 89–119. <http://doi.org/10.4067/S0250-71612002008500006>
- Pineda-Martínez, L. F., Carbajal, N., & Medina-Roldan, E. (2007). Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of México using principal component analysis (PCA). *Atmósfera*, 20(2), 133–145.
- Platt, R. H. (2006). Urban watershed management: Sustainability, one stream at a time. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 48(4), 26–42.
- Prescott-Allen, R. (2001). *The wellbeing of nations*. Island Press.
- Prüss-Ustün, A., Mathers, C., Corvalán, C., & Woodward, A. (2003). *Introduction and methods: assessing the environmental burden of disease at national and local levels* (Vol. 1). OMS.
- R Development Core Team. (2009). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Retrieved October 15, 2015, from <https://www.r-project.org>
- Rahaman, M. M., & Varis, O. (2005). Integrated water resources management: evolution, prospects and future challenges. *Sustainability: Science, Practice, & Policy*, 1(1).
- Rajsekhar, D., Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2012). Regionalization of drought characteristics using an entropy approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(7), 870–887.
- Rao, A. R., & Srinivas, V. V. (2006). Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 57–79. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.004>
- Rayén, Q. M. (2007). Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe. *CEPAL; Santiago de Chile, Diciembre*.
- Reyment, R. A., & Jvreskog, K. G. (1996). *Applied Factor Analysis in the Natural Sciences*. Cambridge University Press.
- Rodríguez, C. (2002). Diseño de indicadores de sustentabilidad por cuencas hidrograficas. *Instituto Nacional de Ecología Y Cambio Climático INECC. Fecha de Consulta, 16*.
- Rodríguez, C., & Flores, A. (2009). El Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA). *Desarrollo de Indicadores Ambientales Y de Sustentabilidad En México. México, Ciudad Universitaria/Instituto de Geografía/UNAM.[Links]*.
- Rosales, N. (2011). Towards the Modeling of Sustainability into Urban Planning: Using Indicators to Build Sustainable Cities. *Procedia Engineering*, 21, 641–647. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2060>

- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65.
- Scott, C. A., & Banister, J. M. (2008). The Dilemma of Water Management “Regionalization” in Mexico under Centralized Resource Allocation. *International Journal of Water Resources Development*, 24(1), 61–74. <http://doi.org/10.1080/07900620701723083>
- SE, (Secretaría de Economía). (2010). Sistema de Información Empresarial Mexicano. Retrieved October 14, 2015, from <http://www.siem.gob.mx/siem/portal/consultas/ligas.asp?Tem=1>
- Seghezzo, L., Iribarnegaray, M. A., Liberal, V. I., Copa, F. R., Munizaga, M. G., León, H. E., & Ruiz, C. Y. (2010). Un índice de sustentabilidad para la evaluación integral de los sistemas de gestión del agua y el saneamiento. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 14. Retrieved from <http://www.asades.org.ar/modulos/averma/trabajos/2010/2010-t001-a020.pdf>
- SEMARNAT, (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2010). Sistema Nacional de Indicadores Ambientales. Retrieved October 14, 2015, from http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores14/conjuntob/00_conjunto/temas.html?De=SNI
A
- Shamshirband, S., Gocić, M., Petković, D., Javidnia, H., Ab Hamid, S. H., Mansor, Z., & Qasem, S. N. (2015). Clustering project management for drought regions determination: A case study in Serbia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200, 57–65. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.020>
- Sharma, S. (1995). *Applied multivariate techniques*. John Wiley & Sons, Inc.
- Shlens, J. (2003). A tutorial on principal component analysis: Derivation, Discussion and Singular Value Decomposition. *Mar*, 25, 1–16.
- Siche, J. R., Agostinho, F., Ortega, E., & Romeiro, A. (2008a). Sustainability of nations by indices: Comparative study between environmental sustainability index, ecological footprint and the emergy performance indices. *Ecological Economics*, 66(4), 628–637. <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.10.023>
- Siche, J. R., Agostinho, F., Ortega, E., & Romeiro, A. (2008b). Sustainability of nations by indices: Comparative study between environmental sustainability index, ecological footprint and the emergy performance indices. *Ecological Economics*, 66(4), 628–637.
- Sinclair, A. J., & Smith, D. L. (1999). Policy Review The Model Forest Program in Canada: Building Consensus on Sustainable Forest Management? *Society & Natural Resources*, 12(2), 121–138.
- Singh, R. K., Murty, H., Gupta, S., & Dikshit, A. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 9(2), 189–212.
- Soto, H., & Schuschny, A. R. (2009). Guía metodológica: diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible.
- Stahl, K., & Demuth, S. (1999). Methods for regional classification of streamflow drought series: cluster analysis. *ARIDE, Technical Rep*, 1.
- Števková, A., Sabo, M., & Kohnová, S. (2012). Pooling of low flow regimes using cluster and principal component analysis. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 20(2), 19–27.

- Sullivan, C., Meigh, J., Giacomello, A., Fediw, T., Lawrence, P., Samad, M., ... Steyl, I. (2003). The water poverty index: development and application at the community scale. *Natural Resources Forum*, 189–199.
- Systat Software, Inc. (n.d.). Retrieved March 28, 2016, from <https://systatsoftware.com/>
- Tan, L., Liu, H., Ma, Y., Wu, L., Min, Q., Gao, S., & Liu, J. (2011a). Quantification of spatial difference of sustainability in the Taihang Mountain area of Hebei Province, China, with its information platform and GIS. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9(2), 740–747.
- Tan, L., Liu, H., Ma, Y., Wu, L., Min, Q., Gao, S., & Liu, J. (2011b). Quantification of spatial difference of sustainability in the Taihang Mountain area of Hebei Province, China, with its information platform and GIS. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9(2), 740–747.
- Tanaka, S. K., Zhu, T., Lund, J. R., Howitt, R. E., Jenkins, M. W., Pulido, M. A., ... Ferreira, I. C. (2006). Climate Warming and Water Management Adaptation for California. *Climatic Change*, 76(3–4), 361–387. <http://doi.org/10.1007/s10584-006-9079-5>
- Taylor, K. (2007). Urban environments. *Environmental Sedimentology*, 190–222.
- Timilsena, J., & Piechota, T. (2008). Regionalization and reconstruction of snow water equivalent in the upper Colorado River basin. *Journal of Hydrology*, 352(1–2), 94–106. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.024>
- United Nations. (2000). United Nations millennium declaration.
- United Nations, E. P. (2007). *Global Environment Outlook: Environment for Development, GEO 4*. UNEP/Earthprint.
- Vallianatos, E. G. (2006). Humanity's Ecological Footprint. *Mediterranean Quarterly*, 17(3), 65–85.
- Van Cauwenbergh, N., Pinte, D., Tilmant, A., Frances, I., Pulido-Bosch, A., & Vanclouster, M. (2007). Multi-objective, multiple participant decision support for water management in the Andarax catchment, Almeria. *Environmental Geology*, 54(3), 479–489. <http://doi.org/10.1007/s00254-007-0847-y>
- Van Dijk, M. P., & Mingshun, Z. (2005). Sustainability indices as a tool for urban managers, evidence from four medium-sized Chinese cities. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(6), 667–688.
- van Dijk, M. P., & Mingshun, Z. (2005). Sustainability indices as a tool for urban managers, evidence from four medium-sized Chinese cities. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(6), 667–688. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.10.001>
- Van Leeuwen, C. (2013). City Blueprints: Baseline Assessments of Sustainable Water Management in 11 Cities of the Future. *Water Resources Management*, 27(15), 5191–5206.
- van Leeuwen, C. J., Frijns, J., van Wezel, A., & van de Ven, F. H. M. (2012). City Blueprints: 24 Indicators to Assess the Sustainability of the Urban Water Cycle. *Water Resources Management*, 26(8), 2177–2197. <http://doi.org/10.1007/s11269-012-0009-1>
- Velmurugan, T., & Santhanam, T. (2010). Computational Complexity between K-Means and K-Medoids Clustering Algorithms for Normal and Uniform Distributions of Data Points. 6, 3, 363–368,.
- Ven, F. H. M., Gersonius, B., Graaf, R., Luijendijk, E., & Zevenbergen, C. (2011). Creating water robust urban environments in the Netherlands: linking spatial planning, design and asset

- management using a three-step approach: Creating water robust urban environments. *Journal of Flood Risk Management*, 4(4), 273–280. <http://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01109.x>
- Villanueva-Diaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1–2), 117–131.
- Vlassis, N., & Likas, A. (2002). A greedy EM algorithm for Gaussian mixture learning. *Neural Processing Letters*, 15(1), 77–87.
- Vrščaj, B., Poggio, L., & Marsan, F. A. (2008). A method for soil environmental quality evaluation for management and planning in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 88(2–4), 81–94. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.005>
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. New Society Publishers.
- World Health Organization. (1965). Cuestiones de higiene del medio relacionadas con la ordenación urbana y la urbanización: informe de un Comité de Expertos de la OMS [se reunió en Ginebra del 23 al 29 de junio de 1965].
- WWF. (2012). Huella Hídrica en México en el contexto de Norteamérica. Retrieved January 30, 2014, from <http://www.ccmss.org.mx/biblioteca/765-huella-hidrica-en-mexico-en-el-contexto-de-norteamerica.html>
- Zhang, Q., Wu, F., Wang, L., Yuan, L., & Zhao, L. (2011). Application of PCA integrated with CA and GIS in eco-economic regionalization of Chinese Loess Plateau. *Ecological Economics*, 70(6), 1051–1056. <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.01.016>
- Zurlini, G., Riitters, K., Zaccarelli, N., Petrosillo, I., Jones, K., & Rossi, L. (2006). Disturbance patterns in a socio-ecological system at multiple scales. *Ecological Complexity*, 3(2), 119–128.