

UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



Tesis profesional que, en cumplimiento parcial para obtener el título de:

Doctor en Ciencia del Agua

Presenta:

M.I. Paul Hernández Romero

Santa Catarina Mártir, Puebla

Otoño 2019

UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA

Escuela de Ingeniería



Índice de Seguridad Hídrica en México

Tesis presentada por:

Paul Hernández Romero

Como requisito parcial para obtener el título de:

Doctor en Ciencias del Agua

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE

VOCAL Y DIRECTOR

SECRETARIO

Otoño 2019

ACTA DE EXAMEN E GRADO DE DOCTORADO



Acta de Examen de Grado de Doctorado

Acuerdo/RVOE SEP de fecha 30-07-2014 con número SEP-SES/21/119/04/117/2014

En la **Fundación Universidad de las Américas Puebla**, ubicada en la Ex Hacienda Santa Catarina Mártir, Cholula, Puebla, y con fecha

19 de Diciembre de 2019

Se reunieron en las instalaciones de la Escuela de:

Ingeniería

Los señores profesores asignados como miembros del Jurado:

Presidente	<u>DR. POLIÓPTRO F. MARTÍNEZ AUSTRIA</u>
Secretario	<u>DR. BENITO CORONA VÁSQUEZ</u>
Vocal	<u>DR. CARLOS PATIÑO GÓMEZ</u>
Vocal	<u>DR. JOSÉ MANUEL CABRERA MIRANDA</u>
Vocal	<u>DR. JOSÉ LUIS SÁNCHEZ SALAS</u>



Para proceder a realizar el examen que para obtener el grado de:

Doctorado en Ciencias del Agua

Sustenta el (la) Sr. (Srita):

Paul Hernández Romero

Los señores sinodales, después de interrogar al sustentante y debatir entre sí reservada y libremente, resolvieron:

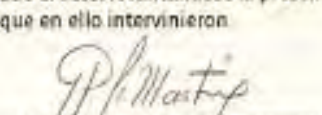
Aprobarlo (a) por UNANIMIDAD

Acto continuo, el Presidente del Jurado le hizo saber el resultado de su examen profesional, con lo cual se dio por terminado el acto, levantándose la presente acta para dar constancia, y firmando los que en ello intervinieron.


Decano


Secretario


Vocal


Presidente


Vocal


Vocal

ÍNDICE

ÍNDICE	i
AGRADECIMIENTOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE GRÁFICAS	xiii
LISTA DE TABLAS	xv
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 EL PROBLEMA	1
1.2 HIPÓTESIS.....	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 GENERAL	5
1.3.2 ESPECÍFICOS	5
CAPITULO 2: ANTECEDENTES	6
2.1 CONCEPTO DE SEGURIDAD HÍDRICA	6
2.2 RETOS DE LA SEGURIDAD HÍDRICA	8
2.2.1 DEMOGRAFÍA Y URBANIZACIÓN	10
2.2.2 PRODUCCIÓN ALIMENTARIA	12
2.2.3 ENERGÍA	12
2.2.4 CAMBIO CLIMÁTICO	13
2.2.5 CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	14
2.2.6 SOBREENPLOTAÇÃO DE ACUÍFEROS	15
2.2.7 GOBERNANZA DEFICIENTE	15
2.3 SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO.....	16
2.3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMA.....	16
2.3.2 CRECIMIENTO POBLACIONAL Y URBANIZACIÓN.....	17
2.3.3 CAMBIO CLIMÁTICO	18
2.3.4 SOBREENPLOTAÇÃO DE ACUÍFEROS.....	19
2.3.5 GOBERNANZA HÍDRICA.....	20
2.3.6 DISPONIBILIDAD EN CUENCAS.....	21
2.4 TRABAJOS PREVIOS	22

2.4.1	REVISIÓN DE ÍNDICES E INDICADORES A NIVEL MUNDIAL	22
2.4.2	ÍNDICES DE SEGURIDAD HÍDRICA.....	25
2.4.2.1	A nivel Mundial.....	25
2.4.2.2	En México.	34
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA		40
3.1	MODELO DE DATOS RELACIONAL (MDR).....	40
3.1.1	INTRODUCCIÓN.....	40
3.1.2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	42
3.1.2.1	Información geográfica	42
3.1.2.2	Información histórica	44
3.1.2.2.1	Climatológica.	44
3.1.2.2.2	Hidrométrica	45
3.2	PROPUESTA DE ÍNDICE DE SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO (ISHM)	45
3.2.1	COMPONENTES, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN.....	45
3.2.1.1	Componentes.	46
3.2.1.2	Características.....	47
3.2.1.3	Clasificación	49
3.2.2	CÁLCULO DE COMPONENTES.	50
3.2.2.1	Cantidad (ISHM _i).....	50
3.2.2.1.1	Índice de Escasez de agua (ISHM _{WSI}).....	51
3.2.2.1.1.1	Demanda de agua anual (W _i).....	53
3.2.2.1.1.2	Disponibilidad anual de agua superficial y subterránea (WA _i)... 53	
3.2.2.1.1.2.1	Superficial.....	53
3.2.2.1.1.2.1.1	Precipitación media anual (P _i)	54
3.2.2.1.1.2.1.2	Área de la cuenca (A _i)	56
3.2.2.1.1.2.1.3	Coefficiente de escurrimiento (C _e)	56
3.2.2.1.1.2.2	Subterránea	57
3.2.2.1.1.3	Requerimientos Ambientales de Agua (EWR _i).....	57
3.2.2.1.2	Índice de Disponibilidad de Agua Subterránea (ISHM _{Idas}).....	58
3.2.2.1.2.1	Disponibilidad media anual (D _{ma}), Recarga natural (R), Descargas comprometidas aguas abajo (D _{nc}).....	59
3.2.2.1.3	Clasificación de indicadores de Cantidad.	60
3.2.2.1.3.1	ISHM _{WSI}	60
3.2.2.1.3.2	ISHM _{Idas}	61

3.2.2.1.4	Factores de Ponderación del <i>ISHM_i</i>	62
3.2.2.1.5	Normalización de Datos.....	62
3.2.2.1.6	Clasificación del <i>ISHM_i</i>	64
3.2.2.2	Calidad (<i>ISHM_j</i>).....	64
3.2.2.2.1	Método de CONAGUA	65
3.2.2.2.2	Método del Índice de Calidad de Agua (<i>WQI</i>).....	67
3.2.2.2.3	Método de Battelle-Columbus	68
3.2.2.2.4	Metodología utilizada como indicador del <i>ISHM</i>	69
3.2.2.2.5	Clasificación del <i>ISHM_j</i>	69
3.2.2.3	Vulnerabilidad Hídrica (<i>ISHM_k</i>)	70
3.2.2.3.1	Índice de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático (<i>IE_{cc}</i>) 71	
3.2.2.3.1.1	Volumen de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático (<i>VES_{cc}</i>)	71
3.2.2.3.1.1.1	Precipitación anual estimada (<i>P_{cc}</i>).....	72
3.2.2.3.1.1.2	Coeficiente de escurrimiento estimado (<i>C_{cc}</i>).....	72
3.2.2.3.1.2	Volumen de Escurrimiento Superficial Histórico (<i>VES_H</i>).....	72
3.2.2.3.2	Índice de Población (<i>IP</i>).....	73
3.2.2.3.3	Índice de Marginación Social (<i>IM</i>).....	73
3.2.2.3.4	Grado de Explotación de Acuíferos (<i>IA</i>)	73
3.2.2.3.5	Clasificación del <i>ISHM_k</i>	73
3.2.3	RESUMEN DE LA PROPUESTA DEL <i>ISHM</i>	74
CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL <i>ISHM</i> : CUENCA DEL RÍO CONCHOS		75
4.1	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	76
4.1.1	CUENCA DEL RÍO CONCHOS.....	76
4.1.2	RECURSO HÍDRICO	78
4.1.3.1	Clasificación de los usos de agua	78
4.1.3.2	Aprovechamiento del Recurso Hídrico.....	79
4.1.3.3	Situación del Recurso Hídrico.....	81
4.1.3.3.1	Incremento poblacional y aumento en la demanda de alimento.	81
4.1.3.3.2	Creciente Urbanización.....	84
4.1.3.3.3	Contaminación de los cuerpos de agua.....	84
4.1.3.3.4	Impactos del Cambio Climático.....	85
4.1.3.3.5	Sobreexplotación de acuíferos	86
4.1.3.3.6	Disponibilidad en subcuencas	87
4.1.3	TRATADOS INTERNACIONALES.....	88

4.2	CÁLCULO DEL $ISHM_i$	90
4.2.1	ÍNDICE DE ESCASEZ DE AGUA ($ISHM_{WSI}$)	90
4.2.1.1	Demanda de agua anual (W_i).....	90
4.2.1.2	Disponibilidad anual de agua (WA_i).....	92
4.2.1.2.1	Superficial.	92
4.2.1.2.2	Subterránea.....	95
4.2.1.3	Requerimientos Ambientales de Agua (EWR_i).....	97
4.2.1.4	Análisis y discusión de resultados del $ISHM_{WSI}$	98
4.2.2	ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA ($ISHM_{Idas}$)	103
4.2.1.5	Análisis y discusión de resultados del $ISHM_{Idas}$	104
4.2.3	RESULTADOS DEL $ISHM_i$	110
4.2.1.6	Análisis y discusión de resultados por subcuenca	110
4.2.1.6.1	Río Conchos – P. de la Colina	110
4.2.1.6.2	Río Parral.	111
4.2.1.6.3	Río Florido.	111
4.2.1.6.4	Río San Pedro.....	111
4.2.1.6.5	Río Conchos 2.	112
4.2.1.6.6	R. Conchos 3.	112
4.2.1.6.7	Río Conchos 4.	112
4.3	CÁLCULO DEL $ISHM_j$	114
4.3.1	ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA.....	114
4.3.1.1	Ubicación de las estaciones de monitoreo.....	114
4.3.1.2	Recopilación de información.....	116
4.3.1.3	Consideraciones generales	117
4.3.1.4	Transformación de parámetros a Factores de Calidad Ambiental.....	118
4.3.2	RESULTADOS DEL $ISHM_j$	119
4.3.1.5	Análisis y discusión de resultados por subcuenca.	120
4.3.1.5.1	Río Conchos – P de la Colina.	120
4.3.1.5.2	Río Parral	120
4.3.1.5.3	Río Florido.	121
4.3.1.5.4	Río San Pedro.....	122
4.3.1.5.5	Río Conchos 2	122
4.3.1.5.6	Río Conchos 3.	123
4.3.1.5.7	Río Conchos 4.....	123

4.3.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	125
4.4	CÁLCULO DEL $ISHM_k$	126
4.4.1	VULNERABILIDAD HÍDRICA GLOBAL ($ISHM_{VHG}$)	126
4.4.1.1	Índice de Escurrimiento Superficial (IE_{cc}).....	126
4.4.1.1.1	VES_{cc}	126
4.4.1.1.2	VES_H	128
4.4.1.1.3	Resultados	128
4.4.1.2	Índice de Población (IP).....	129
4.4.1.3	Índice de Marginación Social (IM).....	130
4.4.1.4	Grado de explotación de acuíferos (IA).....	132
4.4.1.5	Consideraciones Generales.....	132
4.4.2	RESULTADOS DEL $ISHM_k$	133
4.4.1.6	Análisis y discusión de resultados por subcuenca	134
4.4.1.6.1	Río Conchos – Presa de la Colina.....	134
4.4.1.6.2	Río Parral.....	134
4.4.1.6.3	Río Florido.....	135
4.4.1.6.4	Río San Pedro.....	135
4.4.1.6.5	Río Conchos 2.....	135
4.4.1.6.6	Río Conchos 3.....	136
4.4.1.6.7	Río Conchos 4.....	136
CAPÍTULO 5: CALCULO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL $ISHM$		138
5.1	COMPONENTES.....	138
5.2	RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL $ISHM$	139
5.3	CALCULO DEL $ISHM$	141
5.3.1	RESULTADOS DEL $ISHM$	141
5.3.1.1	Análisis y discusión de resultados por subcuenca.	142
5.3.1.1.1	Río Conchos – P. de la Colina.....	142
5.3.1.1.2	Río Parral.....	144
5.3.1.1.3	Río Florido.....	147
5.3.1.1.4	Río San Pedro.....	149
5.3.1.1.5	Río Conchos 2.....	152
5.3.1.1.6	Río Conchos 3.....	155
5.3.1.1.7	Río Conchos 4.....	158
5.3.2	RESUMEN DE RESULTADOS.....	160

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS FUTUROS	162
5.4 CONCLUSIONES.....	162
APÉNDICES	165
APÉNDICE A.1: Construcción de la <i>Geodatabase</i>	165
Importación de archivos Shapefile a la <i>Geodatabase</i>	168
APÉNDICE A.2: Análisis de series de tiempo construidas con información del ERIC III y CLIMATESERV.	170
Distribución espacial de las series de tiempo.	170
Diferencia entre las precipitaciones acumuladas.	171
Coeficiente de correlación:.....	171
Resultados del análisis de varianza (ANOVA)	172
Conclusión del ANOVA:	172
Tabla sumaria.....	173
Conclusión Tabla Sumaria:	173
APÉNDICE A.3: Factores de ponderación de ICA según su orden de importancia relativa	174
APÉNDICE A.4: Ubicación geográfica de concesiones superficiales y subterráneas por subcuenca	175
APÉNDICE A.5: Series de tiempo y hietogramas de precipitación por subcuenca	179
R. Conchos – P. de la Colina	179
R. Parral.....	180
R. Florido.....	182
R. San Pedro	183
R. Conchos 2.....	185
R. Conchos 3.....	187
R. Conchos 4.....	188
APÉNDICE A.6: Hidrogramas del <i>VMAEN por subcuenca</i>	191
R. Conchos-P. de la Colina.....	191
R. Parral.....	191
R. Florido.....	192
R. San Pedro	192
R. Conchos 2.....	193
R. Conchos 3.....	193
R. Conchos 4.....	194
ANEXOS.....	195

ANEXO 1: Parámetros ambientales del método Battelle-Columbus y Funciones de Transformación.....	195
Distribución y ponderación de los PIU	195
Funciones de transformación.....	196
ANEXO 2: Publicaciones.....	198
Artículos	198
Capítulos de Libros	198
Memorias de Congresos	198
Notas Técnicas.....	198
Referencias	199

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la Universidad de las Américas de Puebla (UDLAP) por la oportunidad de estudiar en una de las mejores universidades de México, por el apoyo económico, además del desarrollo profesional que me brindaron durante este proceso en mi carrera. Agradezco al Dr. Carlos Patiño, al Dr. Benito Corona y al Dr. Polioptro Martínez por todo el soporte durante toda la investigación realizada y por los aportes realizados en cada sección de esta tesis.

Agradezco con mi vida a mi amada Esposa y mis hijos, quien desde el inicio de esta aventura llamada posgrado me brindaron todo el apoyo necesario para seguir en este proceso.

Agradezco a Dios porque reconozco que “Todos viene de Él, y Todo es para Él” (Colosense 1:16), y porque de él viene toda la capacidad y la fortaleza para poder cerrar ciclos tan importantes como esté.

RESUMEN

Desde el 2012, el Foro Económico Mundial ha considerado a la Crisis del Agua dentro de los cinco primeros riesgos globales que enfrenta la humanidad en términos de impacto, con una alta probabilidad de ocurrencia. En varios informes de distintas agencias alrededor del mundo establecen que todos los sectores involucrados en la manejo y uso del recurso hídrico deben consensuar una visión compartida que permita lograr un enfoque de gestión integrada para alcanzar y preservar la seguridad hídrica. Partiendo del concepto de seguridad hídrica, cuyo objetivo principal es responder a las demandas equitativas de agua, en cantidad y calidad, a precios accesibles sin dejar a un lado la sostenibilidad ambiental y asegurar crecimiento económico en beneficio de la sociedad; significa enfrentar desafíos de todo tipo a nivel global. Debido al hecho de que la presión sobre el recurso hídrico está aumentando, por diferentes factores, hasta ahora no se ha llegado a un acuerdo para establecer un indicador, o un grupo de ellos, que pueda integrar cada una de las variables involucradas en la seguridad hídrica. La creación de un Índice de Seguridad Hídrica, que debe representar las diferentes componentes de la gestión del agua en un indicador, podría ser posible si se revisan a fondo los diferentes aspectos y tendencias que implica el concepto antes mencionado. En este trabajo, se analizarán las tendencias y la relación entre los diferentes factores que afectan la disponibilidad y balance del agua, y se propone un Índice de Seguridad Hídrica para las regiones hidrológicas de México, considerando sus condiciones particulares. Tanto el índice como la información se incluyen en un Sistema de Información Geográfica que permite analizar los cambios en la seguridad hídrica en el espacio y en el tiempo.

ABSTRACT

Since 2012, the World Economic Forum has considered the Water Crisis within the first 5 global risks that humanity is facing in terms of impact, (WEF, 2018). Several reports from different agencies around the world establishes that all sectors involved in the management and use of water resources must agree with a shared vision that allows achieving an integrated management approach to succeed and preserve water security. From the concept of water security, which main purpose is to respond to the equitable demands for water, in quantity and quality, at affordable prices without neglecting environmental sustainability, and securing the economic growth for the benefit of society; that means facing challenges of all kinds at a global level. Due to the fact that the pressure on water resources is increasing, because of different factors, until now it hasn't been reached an agreement to establish an indicator, or a group of them, that can integrate each one of the variables involved in water security. The creation of a Water Security Index, which must represent the different stages of water management into an indicator, could be possible if the different aspects and trends of the aforementioned concept are thoroughly reviewed. In this project, authors will analyze the trends and the relationship between the different factors that affect the water availability and balance, and thereby propose a Water Security Index for the hydrological regions of Mexico, considering their conditions. Both, the index and the information, will be included into a Geographic Information System that will allow to analyze changes of the water security in space and time.

LISTA DE FIGURAS

Fig.1 Distribución latitudinal de recursos hídricos renovables. Población (derecha) y disponibilidad anual promedio de agua per cápita (izquierda). (Kummu & Varis, 2011).....	2
Fig.2 Retos de la seguridad hídrica y factores que aumentan el riesgo. (Figura reproducida del artículo “Los retos de la seguridad hídrica” (Martínez-Austria P. F., 2013)).	10
Fig.3 Mapa de cambios observados en la precipitación, entre 1901 y 2010 y entre 1951 y 2010, según la tendencia lineal correspondiente a un conjunto de datos (IPCC, 2013).	14
Fig.4 Precipitación media en México. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018a).	17
Fig.5 Anomalía de temperatura media bajo el escenario SRES A2 para el año 2030. Elaboración propia con información de Martínez-Austria y Patiño-Gómez (2010).	19
Fig.6 Condición de las cuencas hidrológicas en México. Elaboración propia con información de CONAGUA (2019).	22
Fig.7 Índice de estrés hídrico mundial considerando el 20% de los requisitos ambientales del agua. (Ruess, 2015).....	23
Fig.8 Resultados del Índice de Seguridad Hídrica (Lautze & Manthritlake, 2012).	27
Fig.9 Dimensiones claves del NSWI (ADB, 2016).....	28
Fig.10 Resultados del GWSI (Gain, Giupponi, & Wada, 2016).....	32
Fig.11 Indicadores y variables involucradas en el IDS (Salcedo, González, Espinoza, & Escalante, n/d).	35
Fig.12 Índice de seguridad hídrica municipal en la República Mexicana (Rodríguez, et al., 2017).	38
Fig.13 Índice de seguridad hídrica municipal en la República Mexicana (Rodríguez, et al., 2017).	39
Fig.14 Integración de información en el MDR (Patiño-Gómez, 2007).	42
Fig.15 Información base del MDR. Elaboración propia con información de diferentes agencias e institutos mexicanos.	43
Fig.16 Información de soporte del MDR. Elaboración propia con información de diferentes agencias e institutos mexicanos.	44
Fig.17 Factores de ponderación y clasificación de la calidad del agua. Elaboración propia con información del NFS (2018) y Canter (1998).	68
Fig.18 División oficial de las subcuencas de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2011).	77
Fig. 19 Subcuencas agrupadas de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2011).....	77
Fig.20 Anomalía de la temperatura para el año 2030 bajo el escenario SRES-A2. Elaboración propia con información de Montero et al. (2010).	86
Fig.21 Condición de acuíferos en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018b).....	87
Fig.22 Disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2016).	88
Fig.23 Aprovechamientos superficiales de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018d).....	91
Fig.24 Aprovechamientos subterráneos de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018d).....	91

Fig. 25 Áreas de las subcuencas que conforman la cuenca del río Conchos. Elaboración propia tomando como base información de CONAGUA (2016).	93
Fig. 26 Usos de suelo en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de INEGI (2014).	94
Fig. 27 Tipos de suelo en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de INEGI (2013).	94
Fig.28 Acuíferos dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018c).	96
Fig.29 Resultados del $ISHM_{WSI}$ por subcuenca. Elaboración propia.	102
Fig.30 Resultado del $ISHM_{WSI}$ dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.	103
Fig. 31 Resultado del $ISHM_{Idas}$ por acuífero dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.	109
Fig. 32 Resultado del $ISHM_{Idas}$ por subcuenca dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.	110
Fig.33 Resultado del $ISHM_i$ por subcuenca en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.	113
Fig.34 Ubicación de los PMCA dentro y a la salida de cada subcuenca en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2019b).	115
Fig.35 Ubicación de los PMCA a la salida de cada subcuenca en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2019b).	115
Fig.36 Resultados del $ISHM_j$ con la metodología actual de la CONAGUA dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.	124
Fig.37 Resultados del $ISHM_j$ con la metodología anterior de la CONAGUA dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.	125
Fig.38 Anomalía de precipitación anual (%) bajo el escenario RCP 8.5 en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información del INECC (2015).	126
Fig.39 Grado de marginación por subcuenca. Elaboración propia con información de CONAPO (CONAPO, 2015b).	131
Fig.40 Condición de acuíferos dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018b).	132
Fig.41 Resultado del $ISHM_k$ por subcuenca. Elaboración propia.	137
Fig.42 Resultado del componente de Cantidad o $ISHM_i$. Elaboración Propia.	140
Fig.43 Resultado del componente de Calidad o $ISHM_j$. Elaboración Propia.	140
Fig.44 Resultado del componente de Vulnerabilidad o $ISHM_k$. Elaboración Propia.	141
Fig. 45 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos – P. de la Colonia. Elaboración propia.	143
Fig.46 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Parral. Elaboración propia.	146
Fig. 47 Índice de Disponibilidad de agua subterránea en la subcuenca del R. Parral. Elaboración propia.	146
Fig. 48 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Florido. Elaboración propia.	148
Fig. 49 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. San Pedro. Elaboración propia.	151
Fig.50 Índice de Disponibilidad de agua subterránea en la subcuenca del R. San Pedro. Elaboración propia.	151

Fig. 51 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos 2. Elaboración propia.....	153
Fig. 52 Índice de Disponibilidad de agua subterránea en la subcuenca del R. Conchos 2. Elaboración propia.....	154
Fig. 53 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos 3. Elaboración propia.....	156
Fig. 54 Índice de Disponibilidad de agua subterránea en la subcuenca del R. Conchos 3. Elaboración propia.....	157
Fig. 55 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos 4. Elaboración propia.....	159
Fig.56 Resultado del ISHM por subcuenca. Elaboración Propia.....	161
Fig.57 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos – P. de la Colina. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).	175
Fig.58 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Parral. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).	175
Fig.59 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Florido. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).	176
Fig.60 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).	176
Fig.61 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).	177
Fig.62 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).	177
Fig.63 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos 4. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).	178

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Artículos que contienen el término "Seguridad Hídrica" en la literatura en el periodo 1990-2010 (Cook & Bakker, 2012).	6
Gráfica 2 Población mundial y su proyección hasta el año 2050, Elaboración propia con información del Banco Mundial (2016).	11
Gráfica 3 Población urbana y rural en el mundo en el periodo 1960-2050. Elaboración propia con información del Banco Mundial (2016).	11
Gráfica 4 Proyección de crecimiento de la población en México: 2010-2050. Elaboración propia con información de CONAPO (2017).	18
Gráfica 5. Comparación de los resultados del NSWI del año 2013 y 2016 (ADB, 2016)..	28
Gráfica 6 Volúmenes concesionado para la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2011).	80
Gráfica 7 Dinámica de población de la cuenca del río Conchos del periodo 2010-2030. Elaboración propia con datos de CONAPO (2017a).	82
Gráfica 8 Usuarios y volúmenes distribuidos a los DR asentados en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con datos del CONAGUA (2016c).	83
Gráfica 9 Proyección de la población por subcuenca. Elaboración propia con información de INEGI (2017c).	130

Gráfica 10 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos- P. de la Colina. Elaboración propia.....	142
Gráfica 11 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos – P. de la Colina. Elaboración Propia.....	144
Gráfica 12 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Parral. Elaboración propia.....	145
Gráfica 13 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Parral. Elaboración Propia.	147
Gráfica 14 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Florido. Elaboración propia.....	148
Gráfica 15 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Florido. Elaboración Propia.	149
Gráfica 16 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia.	150
Gráfica 17 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración Propia.	152
Gráfica 18 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia.....	153
Gráfica 19 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración Propia	155
Gráfica 20 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia.....	155
Gráfica 21 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración Propia	158
Gráfica 22 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos 4. Elaboración propia.....	158
Gráfica 23 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración Propia	160
Gráfica 24 Comparación de distribución espacial y temporal de las Series de tiempo de precipitación a partir del ERIC III y la base de datos CLIMATESERV. Elaboración propia.	170
Gráfica 25 Hietograma anual de la subcuenca R. Conchos-P. de la Colina. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).....	180
Gráfica 26 Hietograma anual de la subcuenca R. Parral. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).....	182
Gráfica 27 Hietograma anual de la subcuenca R. Florido. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).....	183
Gráfica 28 Hietograma anual de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).....	185
Gráfica 29 Hietograma anual de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).....	186
Gráfica 30 Hietograma anual de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).....	188
Gráfica 31 Hietograma anual de la subcuenca R. Conchos 4. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).....	190
Gráfica 32 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos-P. de la Colina. Elaboración propia.....	191

Gráfica 33 Hidrograma anual de la subcuenca R. Parral. Elaboración propia.....	191
Gráfica 34 Hidrograma anual de la subcuenca R. Florido. Elaboración propia.	192
Gráfica 35 Hidrograma anual de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia.....	192
Gráfica 36 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia.....	193
Gráfica 37 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia.....	193
Gráfica 38 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos 4. Elaboración propia.....	194

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Brechas de gobernanza en México. Elaboración propia con información de la OCDE (2013).....	21
Tabla 2 Componentes y propuesta de cálculo del índice de seguridad hídrica (Lautze & Manthritlake, 2012).....	26
Tabla 3 Componentes e indicadores que conforman el CWSI (PRI, 2007).....	30
Tabla 4 Resultados del caso de estudio del CWSI (PRI, 2007).....	30
Tabla 5 Jerarquías y ponderaciones del GWSI (Gain, Giupponi, & Wada, 2016).....	31
Tabla 6 Indicadores desarrollados y calculados para evaluar el uso sustentable del agua en Cd. Juárez. (Cervera-Gómez, 2007).	34
Tabla 7 Resultados del IDS (Salcedo, González, Espinoza, & Escalante, n/d).....	35
Tabla 8 Indicadores y variables del WSI (Aparicio-Mijares, Guitron-De los Reyes, & Preciado-Jimenez, 2011).	36
Tabla 9 Resultados del WSI por subcuenca (Aparicio-Mijares, Guitron-De los Reyes, & Preciado-Jimenez, 2011).	37
Tabla 10 Propuesta de componentes del ISHM. Elaboración Propia.	47
Tabla 11 Clasificación del ISHM para valores de -1 a 1. Elaboración propia.	49
Tabla 12 Clasificación del ISHM para valores de 0 a 1. Elaboración propia.	49
Tabla 13 Clasificación del ISHM _{WSI} . Elaboración propia.	61
Tabla 14 Clasificación del ISHM _{Idas} . Elaboración propia en base a CONAGUA (2018). .	62
Tabla 15 Clasificación normalizada del ISHM _{WSI} . Elaboración propia.....	63
Tabla 16 Clasificación normalizada del ISHM _{Idas} . Elaboración propia.....	63
Tabla 17 clasificación de los valores del ISHM _i . Elaboración propia.	64
Tabla 18 Escala de clasificación de calidad del agua. Elaboración propia con información de CONAGUA (2019).....	67
Tabla 19 Clasificación del ISHM _j . Elaboración propia.	70
Tabla 20 Clasificación del índice de VHG. Elaboración propia de acuerdo con Rivas & Montero (2013; 2014).	74
Tabla 21 Clasificación normalizada del ISHM _{VGH} . Elaboración propia.....	74
Tabla 22 Componentes e indicadores para la construcción del ISHM.....	74
Tabla 23 Fuentes de abastecimiento de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información del CONAGUA (2011).	80
Tabla 24 Volumen concesionado de cada una de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información del CONAGUA (2018d).	92
Tabla 25 Precipitación media anual en el periodo 1981-2015 de las subcuencas del río Conchos. Elaboración propia con información de SERVIRGLOBAL (2018).	93
Tabla 26 Coeficiente de escurrimiento (C _e) calculados para las subcuencas del río Conchos. Elaboración propia.	95

Tabla 27 VMAEN calculado para cada una de las subcuencas del río Conchos. Elaboración propia.....	95
Tabla 28 Disponibilidad de agua subterránea por subcuenca. Elaboración propia.	97
Tabla 29 Disponibilidad de total de agua (WA_i) por subcuenca. Elaboración propia.....	97
Tabla 30 Requerimientos Ambientales (EWR) de agua por subcuenca. Elaboración propia.	98
<i>Tabla 31</i> Resultado del $ISHM_{WSI}$ por subcuenca. Elaboración propia.	98
<i>Tabla 32</i> Resultado del $ISHM_{WSI}$ por subcuenca. Elaboración propia.	102
Tabla 33 Disponibilidad media anual de los acuíferos ubicados dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.....	104
Tabla 34 Resultado del $ISHM_{Idas}$ por acuífero. Elaboración propia.	105
Tabla 35 Resultado del $ISHM_{Idas}$ por subcuenca. Elaboración propia.....	109
Tabla 36 Resultado del $ISHM_i$ por subcuenca. Elaboración propia.	113
<i>Tabla 37</i> Estaciones seleccionadas para la evaluación del $ISHM_{ICA}$ por subcuenca. Elaboración propia.	116
Tabla 38 Valores monitoreados de los PMCA en el periodo 2012-2017. Elaboración propia con información de CONAGUA (2019b).	117
<i>Tabla 39</i> Transformación de los parámetros a su factor de Calidad de Ambiental. Elaboración propia.	119
Tabla 40 Resultados del $ISHM_j$ actual y anterior por subcuenca. Elaboración propia.....	119
Tabla 41 Comparación de resultados del $ISHM_j$ con los métodos propuestos en esta investigación. Elaboración propia.....	126
Tabla 42 Proyección de precipitación al año 2039 bajo el escenario RCP8.5 por subcuenca. Elaboración propia.	127
Tabla 43 Estimación del Coeficiente de Esguerrimiento para el año 2039. Elaboración propia.	128
Tabla 44 Volumen de esguerrimiento histórico y estimado por subcuenca. Elaboración propia.	128
Tabla 45 Resultados de IES_{cc} por subcuenca. Elaboración propia.	129
Tabla 46 Tasa de crecimiento por subcuenca. Elaboración propia con información de INEGI (2017b; 2017c).....	129
Tabla 47 Índice de Población por subcuenca. Elaboración propia.	130
Tabla 48 Índice de Marginación por subcuenca. Elaboración propia con información de CONAPO (CONAPO, 2015b).....	132
Tabla 49 Grado de sobreexplotación de acuíferos. Elaboración propia.....	133
Tabla 50 Resultados del $ISHM_k$ de cada una de las subcuencas. Elaboración propia.	134
Tabla 51 Resumen de componentes y ecuaciones para el cálculo del ISHM. Elaboración propia.....	138
Tabla 52 Resumen de resultados de los tres componentes del ISHM. Elaboración propia.	139
Tabla 53 Resultados del ISHM. Elaboración propia.....	142
Tabla 54 Diferencia de precipitación en mm. Elaboración propia.	171
Tabla 55 Análisis de Varianza. Elaboración propia.....	172
Tabla 56 Tabla Sumaria. Elaboración propia.	173
Tabla 57 Parámetros y factores de ponderación. Elaboración propia.....	174
Tabla 58 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos-P. de la Colina. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).....	180

Tabla 59 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Parral. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).	181
Tabla 60 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Florido. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).	183
Tabla 61 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. San Pedro. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).	184
Tabla 62 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos 2. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).	186
Tabla 63 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos 3. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).	188
Tabla 64 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos 4. Elaboración propia con información de SERVICGLOBAL (2018).	189

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 EL PROBLEMA

Desde 2012, El Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés) ha considerado a la *Crisis del Agua*¹ dentro de los cinco primeros riesgos globales que enfrenta la humanidad en términos de impacto (WEF, 2019). El año 2015 este foro consideró que la *Crisis del Agua* era el *riesgo global más grande que enfrentaba la humanidad*, también en términos de impacto (WEF, 2015). Pero esta *crisis* no es un problema que se haya estado abordando solamente en los últimos años, en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente realizada en Dublín Irlanda el año 1992 ya se hablaba de como atacar este problema centrándose en el desarrollo, la utilización y gestión de los recursos hídricos, considerando la conservación del medio ambiente y el concepto de sostenibilidad.

El agua es un recurso *finito* que es de suma importancia para la humanidad y el medio ambiente. De acuerdo con Falkenmark & Rockström (2006) el recurso hídrico puede dividirse de manera general en dos categorías: agua azul y agua verde. La primera categoría tiene que ver con el escurrimiento y la infiltración que alcanza el acuífero; la segunda con la precipitación que se infiltra en el suelo, que no llega a escurrir y que regresa a la atmósfera en forma de vapor y de la evapotranspiración de las plantas (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mesfin, 2011). El agua azul se utiliza dentro de una múltiple gama de sectores, siendo sus principales usos la agricultura, el abastecimiento urbano y la industria. El agua verde, por su parte se utiliza únicamente para la producción agrícola.

¹ Una disminución significativa de la calidad y cantidad de agua potable disponible, lo que resulta en efectos nocivos para la salud humana y/o la actividad económica (WEF, 2019).

El recurso hídrico es único, ya que además de ser indispensable para para la vida, no cuenta con un sustituto equiparable hasta ahora, ya que para la elaboración de todos los bienes y servicios es utilizada, no teniendo ningún recurso natural o sintético que la pueda remplazar (Martínez-Austria, Díaz-Delgado, & Moeller-Chávez, 2017). Con base en esto y debido que a que las condiciones climáticas e hidrológicas, así como la distribución de la población varían totalmente de una región a otra, frecuentemente ocurre un desajuste entre la disponibilidad y la demanda del agua. Un ejemplo claro se muestra en la Figura 1, donde se aprecia que la escasez de agua en el mundo se presenta en las latitudes más pobladas del planeta, donde el uso de la tierra se ha focalizado para la agricultura en un porcentaje mucho mayor que en otras partes alrededor del mundo (Kummu & Varis, 2011).

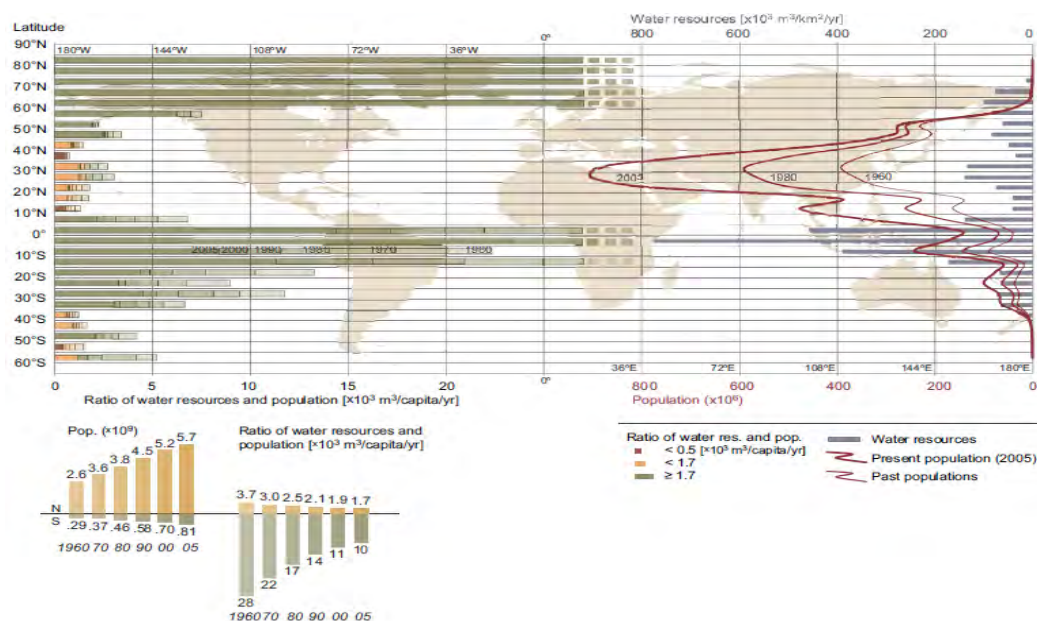


Fig.1 Distribución latitudinal de recursos hídricos renovables. Población (derecha) y disponibilidad anual promedio de agua per cápita (izquierda). (Kummu & Varis, 2011).

Partiendo de lo anterior surgen una serie de preguntas: ¿Es posible cuantificar y medir la sostenibilidad² o seguridad hídrica de una región o cuenca? Siendo la respuesta afirmativa ¿Qué se mediría? ¿Cuáles serán los objetivos adecuados y sus limitaciones? ¿Se buscan medidas que permitan comparar y evaluar cambios o mejoras hídricas? ¿Cómo y cuándo de utilizaría? ¿Podrá ser replicable a otras cuencas? A estas preguntas buscan respuestas los administradores del agua, que son responsables de la toma de decisiones e inversiones en una región o cuenca, ya que dichas respuestas serían estratégicas y esenciales para consolidar la Seguridad Hídrica.

Para ello es necesario contar con herramientas que ayuden a cuantificar el concepto de Seguridad Hídrica vinculado con la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) en una zona o región. Un índice puede ser una de estas herramientas, cuyo objetivo es cuantificar una serie parámetros para describir la condición de referencia del sistema analizado, el cual cuenta con fronteras determinadas, y con ello comparar la condición actual del sistema con respecto al estado de referencia, analizar su progreso con respecto al tiempo y representar su posible condición futura (Aparicio-Mijares, Guitron-De los Reyes, & Preciado-Jimenez, 2011).

Con el objetivo de medir la disponibilidad del recurso hídrico que supla las necesidades humanas y ambientales, así como establecer fronteras de vulnerabilidad, se han establecido una serie de índices cuantitativos (basados en: recursos hídricos per cápita, retiros de agua, consumo de agua y compuestos) muy específicos y para diferentes escalas en los últimos 30 años (Xu & Wu, 2017).

²Definido como: *La satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias* (UN, 1987).

Cada uno de los índices mencionados anteriormente no fueron diseñados para abordar de manera sistémica el concepto de seguridad hídrica. El problema de establecer índices es que hay aspectos importantes que no pueden quedar fuera cuando se habla de disponibilidad, demanda, usos, escasez de agua y Seguridad Hídrica.

Brown (2011) comenta que *seleccionar los criterios por los cuales se avalúa el agua puede ser tanto una decisión política como una decisión científica*. Por ello, el tratar de establecer un indicador o índice genérico de escasez o disponibilidad de agua es bastante difícil y complicado. Por ejemplo, la definición de “disponibilidad”³ varía de un país a otro (Averyt, et al., 2013; CONAGUA, 2018) y de un enfoque a otro, como ya se mencionó.

Tomando en consideración lo planteado y vislumbrando la carencia de un Índice de Seguridad Hídrica para México a nivel de cuenca hidrológica, el objetivo de esta investigación es el desarrollo de un índice que represente la Seguridad Hídrica de un región o cuenca analizando componentes de Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad, los cuales podrán ser representados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su análisis de manera georreferenciada.

1.2 HIPÓTESIS

Es posible la creación de un Índice de Seguridad Hídrica para México (*ISHM*) que represente la Seguridad Hídrica de una región o cuenca, si se analiza la relación entre los componentes del recurso hídrico que interactúan como la Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad Hídrica.

³De acuerdo con Averyt, et al (2013) en Estados Unidos la disponibilidad de agua se define en función de la oferta y la demanda relativas. En México es la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento y el volumen anual comprometido (CONAGUA,2018).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Diseñar, proponer y representar un Índice de Seguridad Hídrica para México en un sistema de información geográfica que describa el estado actual de la Seguridad Hídrica tomando en consideración los componentes de Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad Hídrica para los distintos sectores que conlleven a mejorar la gestión del agua.

1.3.2 ESPECÍFICOS

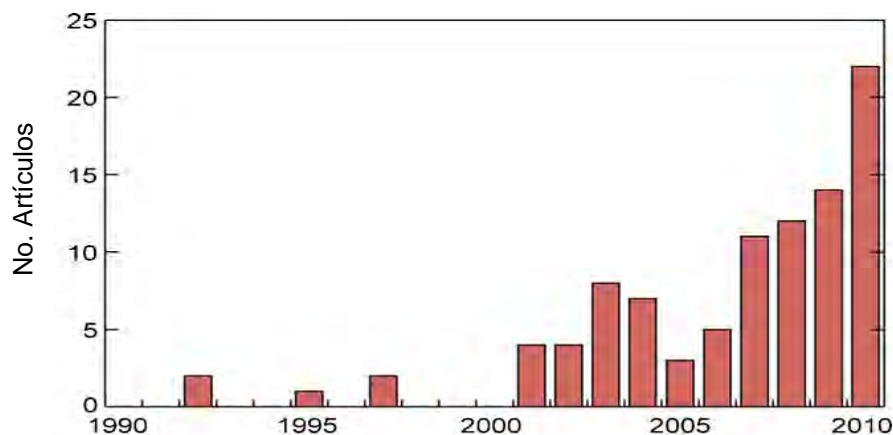
- ♦ Desarrollar un modelo de datos relacional que incluya el análisis de la información necesaria para la creación del Índice de Seguridad Hídrica.
- ♦ Proponer la metodología del cálculo del *ISHM*.
- ♦ Evaluar el estado actual en Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad del recurso hídrico por cuenca hidrológica.
- ♦ Implementar el *ISHM* en una cuenca piloto.
- ♦ Crear y representar dentro de un SIG el *ISHM* que sirva como una herramienta para la gestión integrada del agua.

CAPITULO 2: ANTECEDENTES

2.1 CONCEPTO DE SEGURIDAD HÍDRICA

Desde la década de los noventa del siglo pasado, el uso del concepto de seguridad hídrica utilizado en diferentes disciplinas (más de 10 disciplinas agrupadas) ha aumentado en una manera significativa. Solo en la primera década del siglo XXI más de 80 artículos de revistas revisadas por pares utilizó el término “*Seguridad Hídrica*” (Gráfica 1). De acuerdo con Cook & Bakker (2012) se pueden identificar tópicos y tendencias comunes dentro de esta variedad de términos.

Así, ellos comentan que el enfoque del término de Seguridad Hídrica en los años noventa estaba asociado a temas particulares como seguridad alimentaria, seguridad humana, seguridad militar y seguridad ambiental. En el año 2000, la Asociación Mundial del Agua (*GWP*, por sus siglas en inglés) estableció una definición integral de Seguridad Hídrica, la cual toma en cuenta el acceso y la asequibilidad del agua, además de introducir las necesidades humanas y el medio ambiente (Cook & Bakker, 2012).



Gráfica 1 Artículos que contienen el término "Seguridad Hídrica" en la literatura en el periodo 1990-2010 (Cook & Bakker, 2012).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) desarrolló una definición operativa de Seguridad Hídrica en base a las aportaciones realizadas por una extensa gama de

instituciones, organizaciones y agencias que conforman la ONU-Agua, quedando de la siguiente manera:

“La seguridad hídrica se define aquí como la capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para mantener los medios de subsistencia, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con el agua, y para preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política” (UN-WATER, 2013).

Otros autores han definido este concepto de la siguiente manera:

“La disponibilidad de agua en cantidad y de calidad aceptables para la salud, la subsistencia, los ecosistemas y la producción, combinado con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua para las personas, los ambientes y las economías” (Grey & Sadoff, 2007).

“Seguridad hídrica significa tener suficiente agua, en cantidad, calidad, para las necesidades humanas (salud, sustento y actividades productivas) y los ecosistemas, acompañadas de la capacidad de acceso y aprovechamiento, para equilibrar los distintos sectores, y gestionar los riesgos asociados al agua, incluyendo inundaciones, sequías y contaminación” (Mason & Calow, 2012).

“Aquella que asegura el abastecimiento sustentable del agua para todos los usos, en condiciones de equidad y a precios asequibles, para promover la salud, el desarrollo económico, la producción de alimentos, energía y la conservación del medio ambiente. Protege con un riesgo aceptable, a la población y a los sistemas productivos contra los efectos de eventos hidrometeorológicos extremos; mitiga sus efectos e incluye medidas de adaptación frente a los efectos de cambio climático” (Martínez-Austria P. F., 2013).

Desde hace décadas se han establecidos dos enfoques con respecto a este término, uno basado en definiciones disciplinarias particulares y otro basado en enfoques multidisciplinario e integrador.

Sea cual fuese el enfoque, el alcanzar la seguridad hídrica ésta definido por muchos factores, destacando tres en particular:

- 1) Entorno hidrológico, este se refiere a la disponibilidad natural del agua, así como su incertidumbre interanual y la distribución espacial.
- 2) El entorno socioeconómico, el cual se refiere al comportamiento de los actores involucrados, aumento de población, creciente urbanización, cambio de usos de suelo, por mencionar algunos.
- 3) Cambios futuros esperados, con evidencia fundamentada de que el agua es unos de los recursos naturales más sensibles ante el cambio climático (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2010).

Estos factores tendrán un papel importante en la toma de decisiones para alcanzar y conservar la seguridad hídrica (Grey & Sadoff, 2007).

2.2 RETOS DE LA SEGURIDAD HÍDRICA

Uno de los retos más importantes de los países es responder de manera eficiente y eficaz a la crisis del agua que azota nuestros días, y el reto es más grande en aquellos países que se encuentran en regiones desérticas y semidesérticas, así como aquellos que se encuentran en zonas con fenómenos hidrometeorológicos extremos recurrentes (Martínez-Austria P. F., 2013).

En cada país el recurso hídrico está distribuido de manera totalmente diferente y esto representa un reto particular para cada uno de ellos. Los problemas relacionados con el agua

pueden variar de lo regional a lo local en su origen, pero son predominantemente locales en todos sus efectos; por ello el impulso de las instituciones políticas, económicas y legales son, en gran medida, determinantes en la habilidad de un país para hacer una gestión eficaz del agua (GWP, 2013).

Martínez-Austria (2013) establece que *“los principales retos para alcanzar la seguridad hídrica se manifiestan en la escasez de agua, la contaminación de los cuerpos de agua, los efectos adversos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (inundaciones y sequías), los crecientes conflictos por el agua y el deterioro ambiental de cuencas y acuíferos”*.

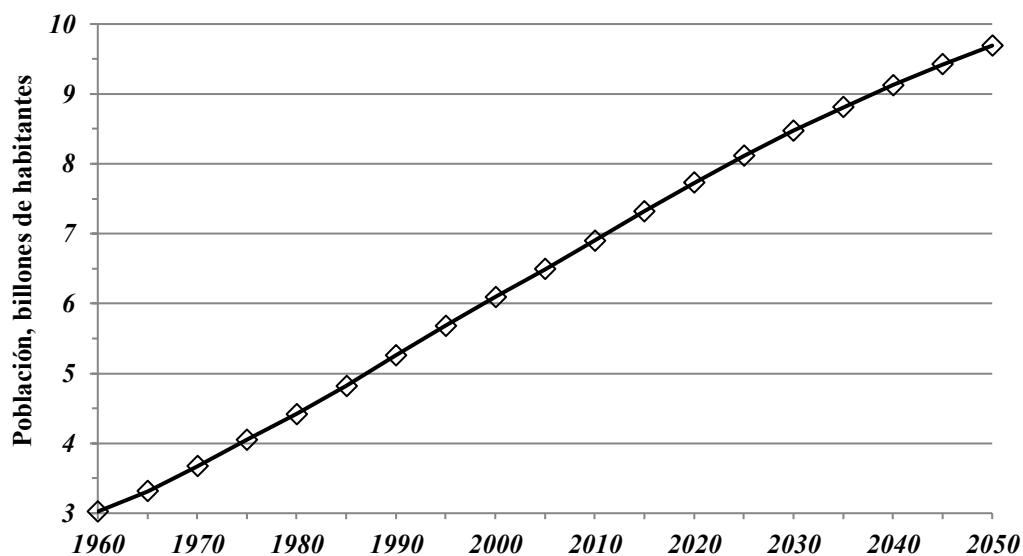
Con base en estos retos (ver figura 3), los factores principales que aumentan los riesgos de no alcanzar una Seguridad Hídrica son: demografía (crecimiento demográfico, creciente urbanización), producción de alimentación (crecimiento en la demanda de alimento y cambios en la dieta), energía (crecimiento en la demanda y desarrollo de biocombustibles), cambio climático (menor precipitación en latitudes medias, derretimiento de glaciares, eventos meteorológicos extremos y elevación del nivel del mar (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008)) y una deficiente gestión del agua (contaminación del agua, deficiencias en el marco legal, deficiencias institucionales y una gobernanza deficiente).



Fig.2 Retos de la seguridad hídrica y factores que aumentan el riesgo. (Figura reproducida del artículo “Los retos de la seguridad hídrica” (Martínez-Austria P. F., 2013)).

2.2.1 DEMOGRAFÍA Y URBANIZACIÓN

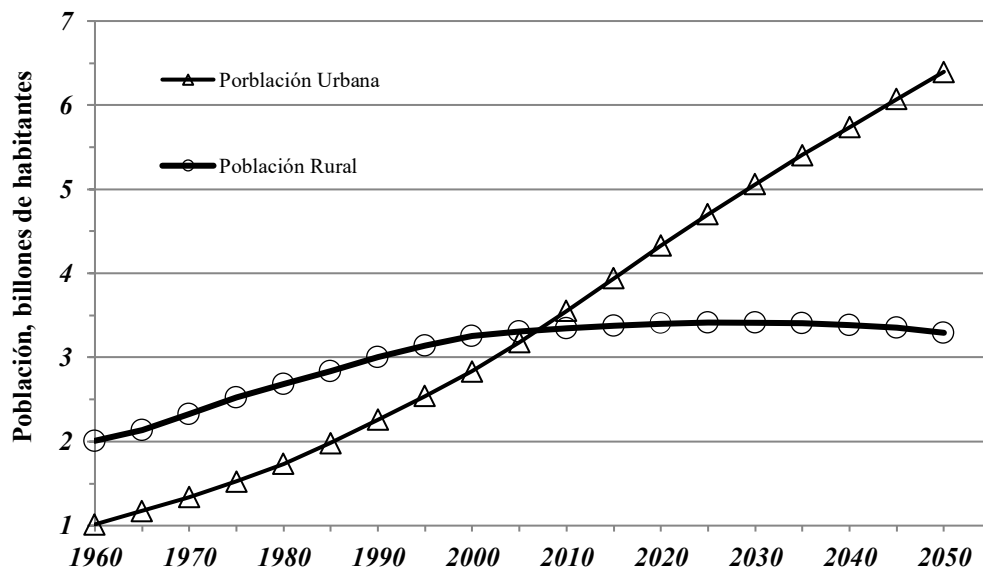
La perspectiva para el año 2050 es que la población mundial superará los 9.5 billones de personas (UN, 2014). En la gráfica 2 se presenta la proyección de la población mundial en el periodo 1960 a 2050.



Gráfica 2 Población mundial y su proyección hasta el año 2050, Elaboración propia con información del Banco Mundial (2016).

Asimismo, la urbanización se ha incrementado rápidamente en las últimas décadas. En 1960, más del 66% de las personas alrededor del mundo vivían en regiones rurales y un 33.5% en zonas urbanas. Para el año 2015, el 54% de la población mundial ya estaba asentada en regiones urbanas.

Según la Organización de las Naciones Unidas (2015) en el año 2050, en el mundo 34% de las personas estarán asentadas en regiones rurales y el 66% en zonas urbanas, pasando de 3.94 billones en 2015 a 6.40 billones en 2050 (gráfica 3) Dichos cambios en la urbanización mundial crearán grandes retos para la gestión del agua a nivel regional y local, dado que la naturaleza no es capaz de abastecer el agua necesaria para cubrir localmente esta gran concentración de personas (Martínez-Austria P. F., 2013).



Gráfica 3 Población urbana y rural en el mundo en el periodo 1960-2050. Elaboración propia con información del Banco Mundial (2016).

2.2.2 PRODUCCIÓN ALIMENTARIA

Con el aumento previsto de la población para el año 2050, se necesitará un 60 % más de alimento para cubrir la demanda de toda la población. El resultado será el aumento del uso del agua para la agricultura y con ello la escasez de agua en muchas regiones alrededor del mundo, causando un estrés hídrico incluso en áreas con una buena reserva de este recurso (FAO, 2013). Dentro de las economías de los países, la agricultura es el sector en el que la escasez de agua tiene más relevancia, ya que es la responsable de aproximadamente el 70% de las extracciones de agua dulce y de un poco más del 90% de su uso consuntivo alrededor del mundo (Siebert, et al., 2010).

2.2.3 ENERGÍA

El agua y la energía están interrelacionadas profundamente. Se requiere energía para el suministro de agua para el consumo humano, es necesaria para el bombeo, el transporte, distribución, riego, tratamiento, desalación, generación eléctrica, entre otras necesidades. Los problemas entre las interacciones de estos dos recursos se perciben claramente, ya que, a pesar del éxito de algunas alternativas de energía a corto plazo para tratar de no contaminar el medio ambiente, como la creación de biocombustibles, los cuales necesitan alrededor de 2 mil quinientos litros de agua para producir un litro de este (UNESCO, 2009), son respuestas parciales que están destinadas a fracasar a largo plazo, ya que se requiere una respuesta integral para enfrentar los desafíos del agua.

Enfrentar la escasez de agua está demandando un aumento en el consumo de energía, lo que incrementa la presión sobre este recurso que ya es insuficiente en muchas regiones alrededor del mundo. Las soluciones para estos desafíos no pueden consistir en seguir alternativas que resuelvan los problemas de energía aumentando el estrés hídrico o, mejorar la seguridad

hídrica agravando los problemas energéticos, o llegar al caso extremo, el tratar de resolver estos problemas a expensas del medio ambiente (UNESCO, 2009).

2.2.4 CAMBIO CLIMÁTICO

Uno de los grandes retos para la humanidad a nivel mundial en este siglo es el cambio climático. El aumento de la temperatura en el planeta está produciendo grandes efectos ambientales, económicos y sociales (Martínez-Austria, Patiño-Gómez, & Tamayo-Escobar, 2014). Una de las consecuencias principales de este fenómeno antropogénico, se observa en el ciclo hidrológico y el clima, los cuales están profundamente relacionados; siendo el agua uno de los recursos naturales más sensibles al cambio climático (Aleksanyan, Khudaverdyan, & Vaseashta, 2014).

El calentamiento global observado en los últimos años está relacionado fuertemente con los cambios en el ciclo hidrológico y por lo tanto con los sistemas hidrológicos, como por ejemplo el cambio en las intensidades de lluvia y eventos extraordinarios de precipitación (figura 3). Además del derretimiento extendido de la nieve y hielo, incremento del vapor de agua en la atmósfera, incremento del proceso de la evaporación, cambios en la humedad del suelo, efectos en el escurrimiento superficial y disminución en la recarga de acuíferos (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008).

Estos últimos están estrechamente relacionados directamente con una menor disponibilidad del recurso, ya que parte de la precipitación no alcanza ríos, cuerpos de agua o acuíferos por la creciente evaporación del suelo y la vegetación. La variabilidad climática también tendrá efectos en la agricultura ya que con el incremento de la temperatura se va a necesitar más agua para los cultivos por el efecto de la evapotranspiración.

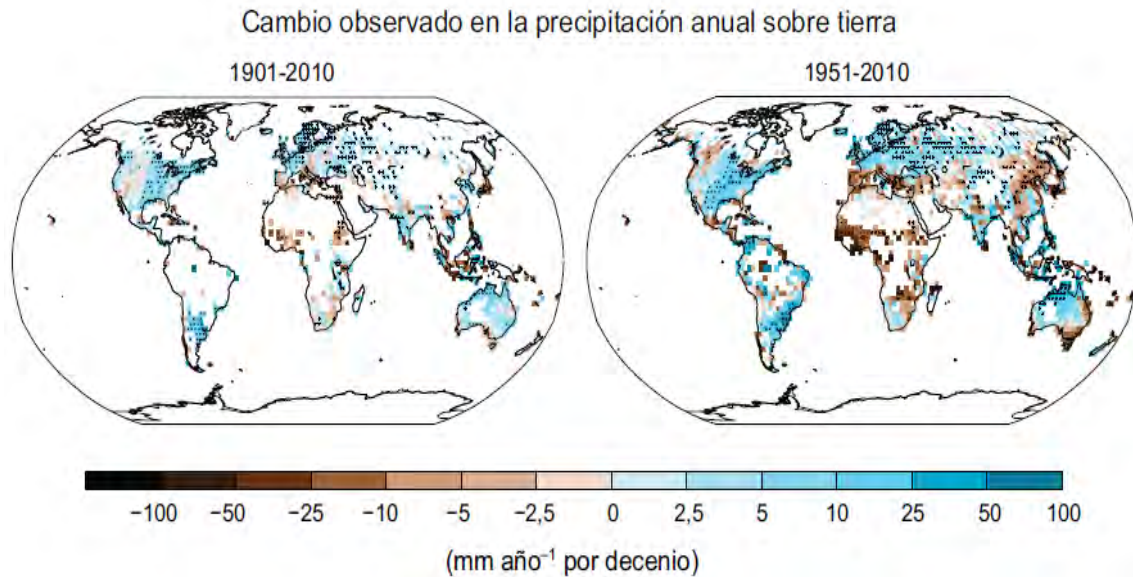


Fig.3 Mapa de cambios observados en la precipitación, entre 1901 y 2010 y entre 1951 y 2010, según la tendencia lineal correspondiente a un conjunto de datos (IPCC, 2013).

2.2.5 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación a la que están expuestos los cuerpos de agua representa uno de los principales retos para el alcanzar la seguridad hídrica, ya que produce riesgos de salud y medioambientales de manera directa y afecta la disponibilidad del recurso de manera indirecta (Martínez-Austria P. F., 2013). Debido a la creciente reutilización y recirculación del agua, como una manera de afrontar la escasez, la calidad de ésta se deteriora, haciendo que la disponibilidad de agua de calidad para algunos usos se reduzca notablemente.

En ciertas regiones alrededor del mundo existe el problema de contaminantes naturales como fluoruros y arsénico, que están estrechamente relacionados con la extracción de aguas subterráneas usadas como respuesta de la escasez del agua superficial. Por ello la contaminación se vuelve un problema aún mayor cuando se tiene una mala administración del recurso hídrico (FAO, 2013).

2.2.6 SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS

En las últimas décadas la sobreexplotación de las aguas subterráneas está en constante aumento. Alrededor del mundo se ha tomado al agua subterránea como una buena opción de suministro para cubrir las diferentes necesidades. Se estima que el 20 % de los acuíferos mundiales están siendo sobreexplotados (Gleeson, Wada, Bierkens, & Beek, 2012). Se calcula que 21 de los 37 acuíferos más grandes del mundo están sobreexplotados en regiones como Asia, Europa y Norte América (Richey , et al., 2015).

Las regiones con estrés severo de agua subterránea están en muchos de los lugares donde el agua superficial tiene un alto grado de presión (WWAP, 2016). Si bien el aumento de la extracción y uso de agua subterránea ha ayudado en el desarrollo de muchas regiones alrededor del mundo, también ha resultado en la disminución de muchos acuíferos, que a mediano plazo se va ver reflejado en el estrés o en el agotamiento de los mismos, así como en la contaminación y en la intrusión salina en acuíferos costeros (FAO, 2013).

2.2.7 GOBERNANZA DEFICIENTE

“Las sociedades actuales enfrentan una crisis en el manejo del agua, misma que podría caracterizarse como una crisis de gobernanza” (Martínez-Austria P. F., 2013). La gestión integrada de los recursos hídricos en nuestros días juega un papel fundamental en lo relacionado con la salud, el bienestar humano, la lucha contra la pobreza y en el desarrollo económico. En ese sentido, los planes actuales de manejo o planes de gestión del agua en muchos países no responden a las expectativas de aprovechamiento para los distintos usuarios del agua, medio ambiente y, en muchos casos, para las responsabilidades internacionales.

En base a esto, se hace evidente la necesidad de una mayor inversión económica en todos los sentidos. Sin embargo, muchas de las soluciones técnicas para mejorar la eficiencia del uso del agua ya han sido desarrolladas, pero no han sido adoptadas en muchas regiones alrededor del mundo por la falta de recursos. Expertos en este tema coinciden en que la razón principal de una mala gestión del agua es consecuencia, en gran medida, de una pobre gobernanza del agua (Martínez-Austria P. F., 2013).

2.3 SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO

En los últimos años México ha enfrentado problemas sin precedentes en términos de seguridad hídrica. El objetivo global del Programa Hídrico Nacional 2014-2018 fue: ***“Lograr la seguridad y la sustentabilidad hídrica de México”*** (CONAGUA, 2014). Sin embargo, para que se pueda cumplir este objetivo se tiene que analizar y enfrentar una serie de retos y factores físicos, demográficos y socioeconómicos, como, por ejemplo: ubicación geográfica, clima, crecimiento poblacional, urbanización, cambio climático, sobreexplotación de acuíferos y gobernanza hídrica, ya que estos factores aumentan el riesgo de no alcanzar o mantener la seguridad hídrica en el país.

2.3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMA.

Existen factores físicos que determinan el clima en nuestro país. Por un lado, está la ubicación geográfica, ya que la parte norte del país se localiza en una zona árida y semiárida mientras que la parte sur se ubica en una zona intertropical. México se encuentra a la misma latitud que los desiertos Sahara y Árabe.

Por otro lado, está el relieve que caracteriza a nuestro país. Además, México está expuesto a fenómenos extremos como huracanes. Desde 1970 ha sido impactado por más de 20 huracanes intensos (H3 a H5 según la clasificación Saffir-Simpson) (CONAGUA, 2018b) y

sequías extraordinarias en la región norte, como la sequía más severa y prolongada de la cual se tiene registro en la cuenca del río Bravo la cuál duró prácticamente 14 años, de 1992 a 2005 (Ortega-Gaucin, 2013). Estos factores inciden directamente sobre la disponibilidad del agua.

Se considera que más de la mitad del país se integra por zonas áridas y semiáridas, las cuales tienen una precipitación anual menor de 500 mm, mientras que la región sureste, es una zona húmeda con precipitaciones mayores a los 2,000 mm por año. En la figura 4 se muestra la distribución de la precipitación media en México.

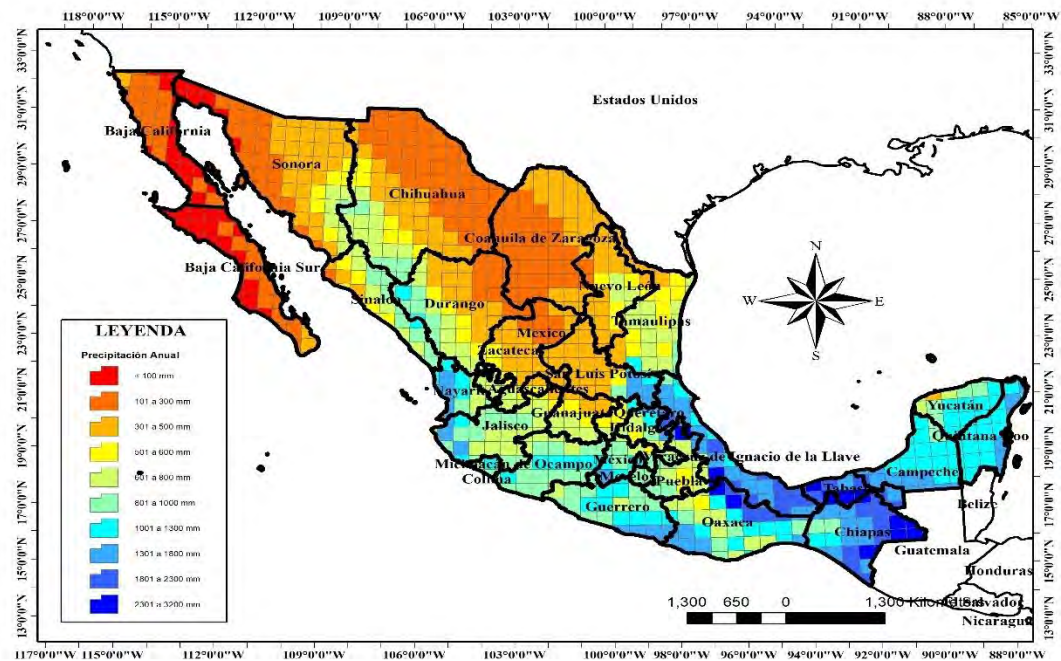
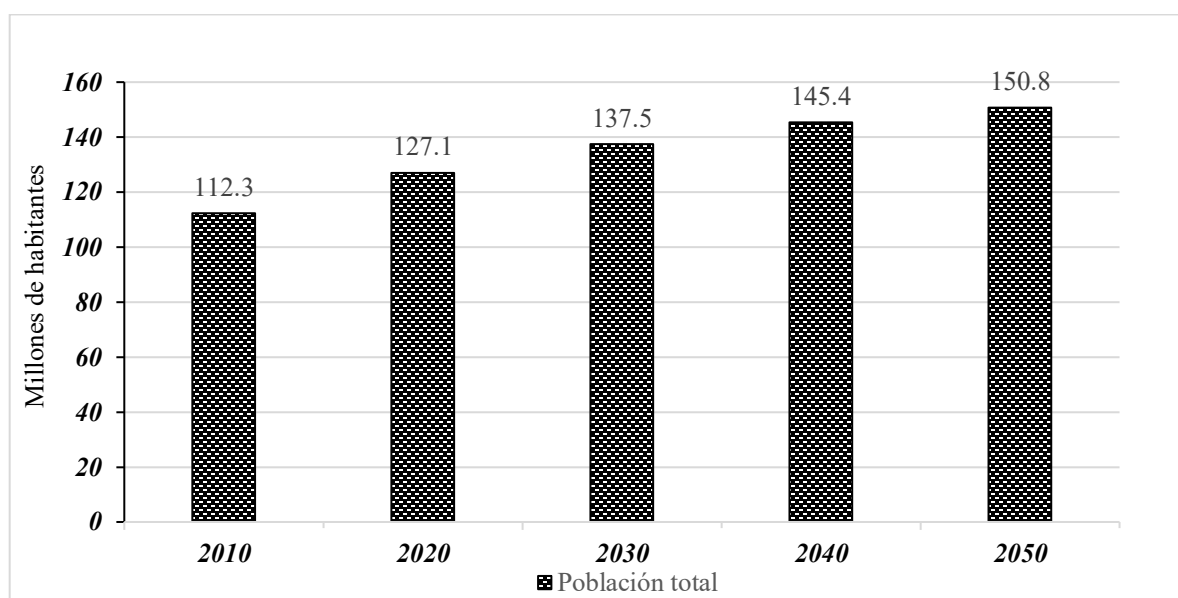


Fig.4 Precipitación media en México. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018a).

2.3.2 CRECIMIENTO POBLACIONAL Y URBANIZACIÓN.

En México habitaban alrededor de 25.8 millones de personas en 1950 (INEGI, 2017a). En el año 2010 la cifra alcanzó un poco más de 112 millones de habitantes (INEGI, 2017b). Dicha población pasó de ser mayoritariamente rural a predominantemente urbana a partir de 1970.

Se proyecta que para el año 2030 la población supere los 137 millones de habitantes y los 150 en el año 2050 (CONAPO, 2017) ; lo que va a representar una mayor presión sobre el agua en el país. En la gráfica 4 se muestra la proyección de la población en México en el periodo 2010-2050.



Gráfica 4 Proyección de crecimiento de la población en México: 2010-2050. Elaboración propia con información de CONAPO (2017).

2.3.3 CAMBIO CLIMÁTICO

En México se elaboraron escenarios regionalizados del impacto del cambio climático, incluidos en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el Cambio Climático (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2010). En base a ellos, el aumento que se espera en la temperatura media para el año 2030, bajo el escenario SRES-A2⁴ es entre 0.6 y 1.6 °C (figura 5), y aproximadamente de 3 y 4 °C para finales de siglo. Con respecto al impacto en la

⁴La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante, así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas **Fuente especificada no válida.** .

precipitación y tomando como base la precipitación histórica de 1961-1990, la anomalía de precipitación anual muestra que se reducirá aproximadamente en un 15% para finales del siglo, por lo cual se espera una reducción en el escurrimiento de alrededor del 25% en el país (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2010).

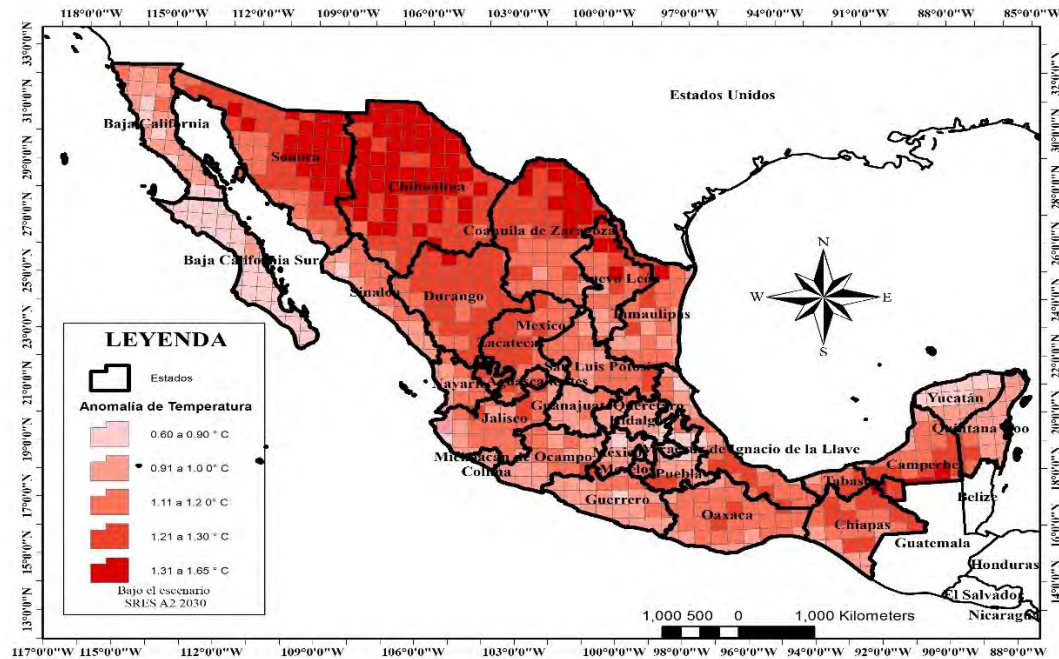


Fig.5 Anomalía de temperatura media bajo el escenario SRES A2 para el año 2030. Elaboración propia con información de Martínez-Austria y Patiño-Gómez (2010).

2.3.4 SOBREPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS

De acuerdo con Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) están definidos 653 acuíferos en el territorio nacional, que representan aproximadamente el 50% de la extracción de agua para todos los usos (CONAGUA, 2018a). Las aguas subterráneas están siendo sobreexplotadas en grado e intensidad, ya que el índice de explotación ha estado aumentando durante las últimas décadas. En 2003, se tenían 97 acuíferos sobreexplotados en el país (CONAGUA, 2003) y hoy en día son 105 (CONAGUA, 2018a). En México, se ha tomado al agua subterránea como

una buena opción de suministro para cubrir las diferentes necesidades, pero el resultado es el abatimiento de los acuíferos de una manera desmedida.

2.3.5 GOBERNANZA HÍDRICA

En México, la visión de la gestión de los recursos hídricos no se ha tomado de manera integral; el trabajo individual y aislado de los diferentes sectores e instituciones, la deficiente coordinación entre los órdenes de gobierno, la concentración de funciones en una sola autoridad (Guerrero, 2004), la escasa o nula participación de la sociedad, la falta de armonía de políticas públicas, los deficientes arreglos institucionales y la contaminación, están propiciando el mal aprovechamiento del recurso, incluso poniendo en riesgo la seguridad hídrica.

Las brechas de gobernanza del agua en el país no son especialmente del sector del agua, ya que se relacionan con retos de gobernanza más amplios. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) determinó las brechas más importantes de acuerdo con un estudio realizado en México en el año 2013 (OCDE, 2013) . En la tabla 1 se muestran las brechas encontradas.

	Tipo	Descripción
Brecha	Administrativa	Desajuste entre unidades administrativas, funcionales (entidades de gestión del agua, municipios, áreas metropolitanas, regiones, estados) y fronteras hidrológicas e imperativas.
	de información	Información asimétrica entre partes interesadas, estandarización limitada, REPDA y sistemas de monitoreo incompleto, divulgación pública y armonización de los intereses clave.
	de políticas	Políticas de agua, energía, agricultura y desarrollo territorial desalineadas. Tareas de planeación y capacitación fragmentadas.
	de capacidades	Rotación alta de profesionales del agua, programas de entrenamiento/capacitación limitados para personal técnico, administrativo y directivos.
	de financiamiento	Ingresos propios muy limitados a nivel subnacional. Gran dependencia de programas federales y de los recursos de CONAGUA.
	de objetivos	Falta de continuidad/convergencia de políticas públicas a nivel subnacional por causa de mandatos políticos limitados (3 años en alcaldes) motivaciones contradictorias ante consejos y organismos de cuenca.

	De rendición de cuentas	Participación/compromiso limitado de las partes interesadas de la gestión del recurso hídrico (agriculturas y comunidades indígenas) y de los servicios de agua y saneamiento (usuarios y consumidores); mecanismos oficiales limitados para canalizar la demanda.
--	-------------------------	--

Tabla 1 Brechas de gobernanza en México. Elaboración propia con información de la OCDE (2013).

En el país, en el marco institucional del agua, de acuerdo con lo establecido en el artículo 27 constitucional está es propiedad de la nación, permitiendo el uso y aprovechamiento mediante concesiones las cuales administra el gobierno federal. Según el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) existen actualmente 409,586 títulos de concesión de aguas nacionales con un volumen concesionado de más de 269 mil hm³/año. Sin embargo, dicha asignación depende en gran medida de la disponibilidad de las presas y cuerpos de agua, ya que más del 87% del volumen proviene de fuentes superficiales (CONAGUA, 2018b).

Si bien si existe una *gobernanza hídrica* en México, esta cuenta con importantes brechas siendo una de las más importantes la brecha de información. Es específico se deben de vincular diferentes sectores con el sector del agua, como el sector económico y el de energía, además de fortalecer los esquemas de participación regional y nacional (Martínez-Austria P. F., 2014).

2.3.6 DISPONIBILIDAD EN CUENCAS.

Según CONAGUA (2019) el déficit hídrico en el 14% de las cuencas en México ya es una realidad (Figura 6), necesitando así, una evaluación integral de la Seguridad Hídrica para hacer frente a cada uno de estos retos.

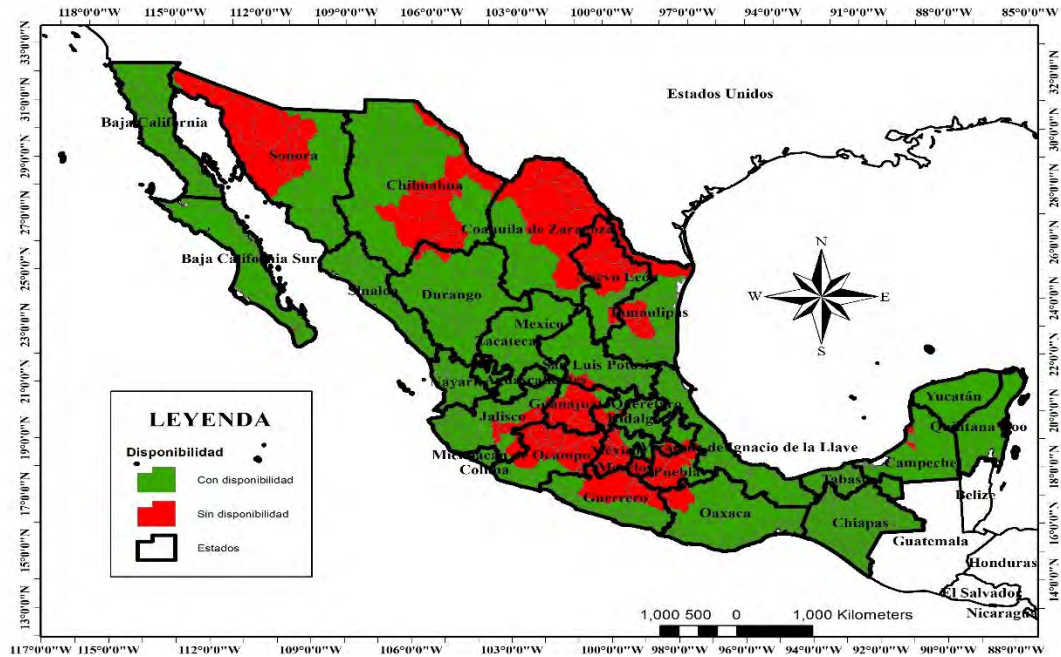


Fig.6 Condición de las cuencas hidrológicas en México. Elaboración propia con información de CONAGUA (2019).

2.4 TRABAJOS PREVIOS

2.4.1 REVISIÓN DE ÍNDICES E INDICADORES A NIVEL MUNDIAL

Desde los ochentas se han elaborado índices para cuantificar y analizar la vulnerabilidad del agua. Se han desarrollado **índices basados en requerimientos humanos** (disponibilidad de agua per cápita), como el Indicador Falkenmark (1989), el cual estableció una base trascendental para evaluar la seguridad hídrica alrededor del mundo. Sobre el fundamento del indicador anterior, Ohlsson (2000) creó el Índice de Estrés Hídrico Social (*SWSI* por sus siglas en inglés) el cual sirve para destacar la capacidad de adaptación de la sociedad bajo condiciones de escasez de agua.

También se han desarrollado **índices basados en extracciones de agua** o extracción-disponibilidad (*WTA* por sus siglas en inglés), como el Índice de Estrés Hídrico (*WSI*, por sus siglas en inglés), también denominado Uso de Agua Relativa Local (Vörösmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005).

Pfister et al. (2009) realizó una modificación al *WSI*, el cual tomó, por un lado, un factor para tener en cuenta la variabilidad climática, y por otro se clasificó el flujo como fuertemente regulado (*SRF*, por sus siglas en inglés).

Smakhtin (2005), por su parte, intentó considerar dentro del índice de estrés hídrico, las extracciones de agua superficial disponible y un caudal necesario para el sostenimiento ambiental del agua, y le llamo Índice de Estrés Hídrico con Requerimientos Ambientales. En base a este trabajo, Ruess (2015) elaboró un mapa mundial (figura 7) considerando un 20% del escurrimiento para los Requerimientos Ambientales del Agua (*EWR*, por sus siglas en inglés).

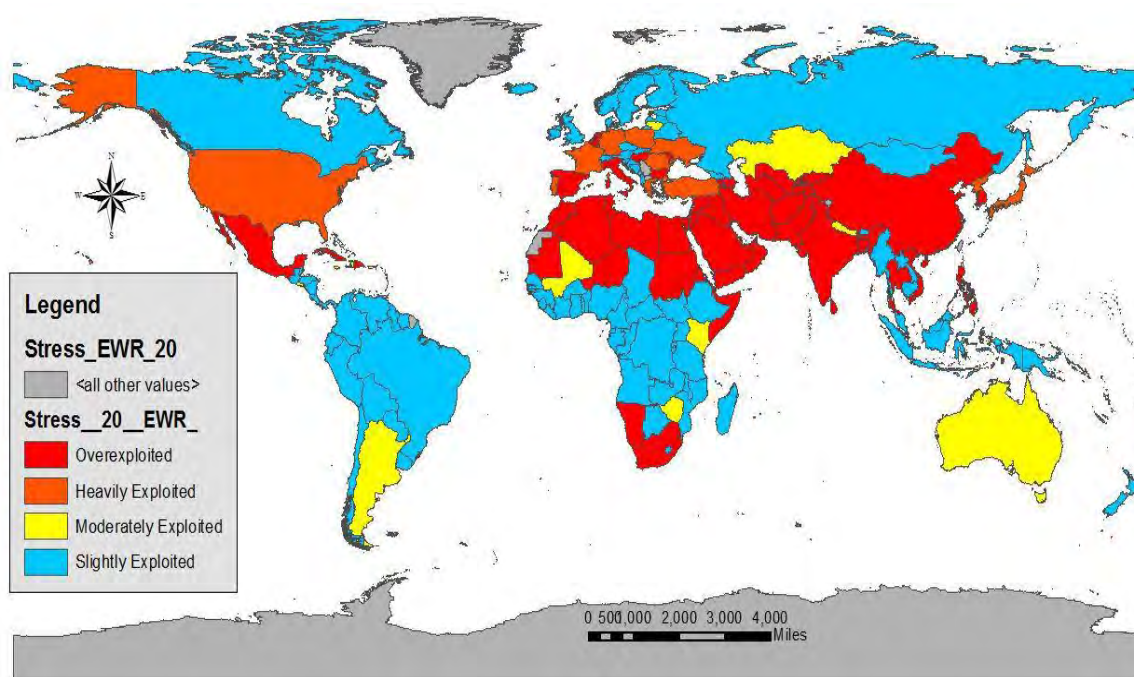


Fig. 7 Índice de estrés hídrico mundial considerando el 20% de los requisitos ambientales del agua. (Ruess, 2015)

A nivel de cuenca, con base en el código de unidad hidrológica (*HUC*, por sus siglas en inglés), como se denomina en Estados Unidos de América, Sun et al. (2008) elaboró el Índice de Estrés del Suministro de Agua (*WaSSI*, por sus siglas en inglés) con el cual evaluó las

condiciones de estrés hídrico en cada una de los *HUCs* de este país. Con base en este índice se desarrolló el Índice Sectorial de Estrés Hídrico (*WaSSI_{i,s}*, por sus siglas en inglés) por Averyt, et al. (2013).

Además, se han desarrollado **Índices basados en el consumo de agua**, como el Índice basado en el flujo (Tidwell, Kobos, Malczynski, Klise, & Castillo, 2012), Índice de Recarga de caudal subterráneo (Brauman, Richter, Postel, Malsy, & Flörke, 2016), Índice de escurrimiento (Moore, Coleman, Wigmosta, Skaggs, & Venteris, 2015), Índice de escasez de agua azul (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mesfin, 2011), Índice de recursos de agua no renovable (Wada, Human and climate impacts on global water resources, 2013) y índice de agua disponible restante (Boulay, et al., 2017).

Por último, están los **índices compuestos**, los cuales se componen por diferentes factores. Si bien estos son más completos, los requisitos a cumplir puede ser un gran reto para regiones grandes o con poca información.

Dentro de estos se encuentra el Índice de Riesgo de Sostenibilidad del suministro de agua (*WSSRI*, por sus siglas en inglés), el cual se calcula como la suma de cinco parámetros (precipitación disponible, susceptibilidad a la sequía, aumento en la extracción de agua, mayor necesidad de almacenamiento y el uso de agua subterránea) (Roy, et al., 2012).

Chavez y Alipaz (2007) desarrollaron el Índice de Sostenibilidad de Cuencas (*WSI*, por sus siglas en inglés), que se calcula como el valor medio de 4 indicadores: Hidrológico, Ambiental, Vida y Políticas (*HELP*, por sus siglas en inglés).

Por otro lado, El Índice de Pobreza de Agua (*WPI*, por sus siglas en inglés), fue propuesto por Sullivan (2002) el cual incluyó dentro de los indicadores a la disponibilidad del agua, el acceso al agua y saneamiento, así como el tiempo medido para la recolección.

En México los indicadores oficiales que se utilizan actualmente como herramientas para medir la disponibilidad del recurso hídrico son: el Grado de Presión, Índice de Explotación de acuíferos y el Índice Falkenmark o Disponibilidad de agua per cápita (CONAGUA, 2012; CONAGUA, 2018a; CONAGUA, 2018b).

2.4.2 ÍNDICES DE SEGURIDAD HÍDRICA.

Con el objetivo de alcanzar y preservar la seguridad hídrica es necesaria una evaluación integral del recurso hídrico tomando en consideración los múltiples factores involucrados. No obstante, como se mencionó anteriormente, son pocas las investigaciones que se han desarrollado tomando en consideración evaluaciones integradas, las cuales se describen a continuación.

2.4.2.1 A nivel Mundial.

Lautze & Manthritilake (2012) propusieron un índice para evaluar la Seguridad Hídrica a nivel país. A este índice lo conforman 5 componentes, que los autores consideraron críticos, para abarcar todo el concepto establecido:

- 1) Necesidades básicas (Porcentaje de la población que cuenta con acceso a una fuente de agua),
- 2) Producción agrícola (Medición del agua disponible y aprovechada para la producción agrícola),
- 3) Caudal Ambiental (Porcentaje disponible del recurso hídrico renovable (*RWR*, por sus siglas en inglés)),
- 4) Gestión de riesgo (Medición de la protección de los efectos de la variabilidad de las precipitaciones a través de almacenamiento en presas) y

5) Independencia (Medición de las fronteras de protección de los suministros de agua y alimento por efectos de cambios externos).

La Tabla 2 muestra el resumen de los componentes establecidos, así como su propuesta de cálculo.

Overall Water Security = A + B + C + D + E			
Component	Definition	Scoring System	Source
A = Basic Household Needs	Percentage of Population with Sustainable Access to an Improved Water Source	High percentage of population with access to improved water source = 5 to low percentage of population with access to improved water source = 1	WHO (2009)
B = Food Production	The extent to which water is available and harnessed for agricultural production	Water security for agricultural production = (a + b)/2 a. Water availability (RWR/population) From low availability = 1 to high availability = 5 b. Water use (Withdrawal/population) From low withdrawal = 1 to high withdrawal = 5	FAO AQUASTAT (2007)
C = Environmental Flows	Percentage of Renewable Water Resources (RWR) available in excess of environmental water requirement (EWR). That is, [RWR - (environmental water requirement + withdrawn water)]/RWR.	High percentage above EWR = 5 to low percentage above EWR = 1	converted from Smakhtin <i>et al.</i> (2004)
D = Risk Management	Risk Management measures the extent to which countries are buffered from the effects of rainfall variability through large dam storage	Risk Management = (a + b)/2 a. Inter-annual CV From low CV = 5 to high CV=1 b. Storage From high storage = 5 to low storage = 1	Mitchell <i>et al.</i> (2002); ICOLD (2003); FAO AQUASTAT (2007)
E = Independence	Independence measures the extent to which countries water and food supplies are safe and secure from external changes or shocks	From low dependence on external waters = 5 to high dependence = 1	WRI (2009)

Tabla 2 Componentes y propuesta de cálculo del índice de seguridad hídrica (Lautze & Manthritilake, 2012).

Para la cuantificación de este índice, a cada indicador se le asignó una puntuación de 1 al 5, teniendo la misma ponderación cada uno, y el resultado del índice era la suma de las puntuaciones de cada uno de los 5 componentes. El resultado del índice propuesto se muestra en la Figura 8.

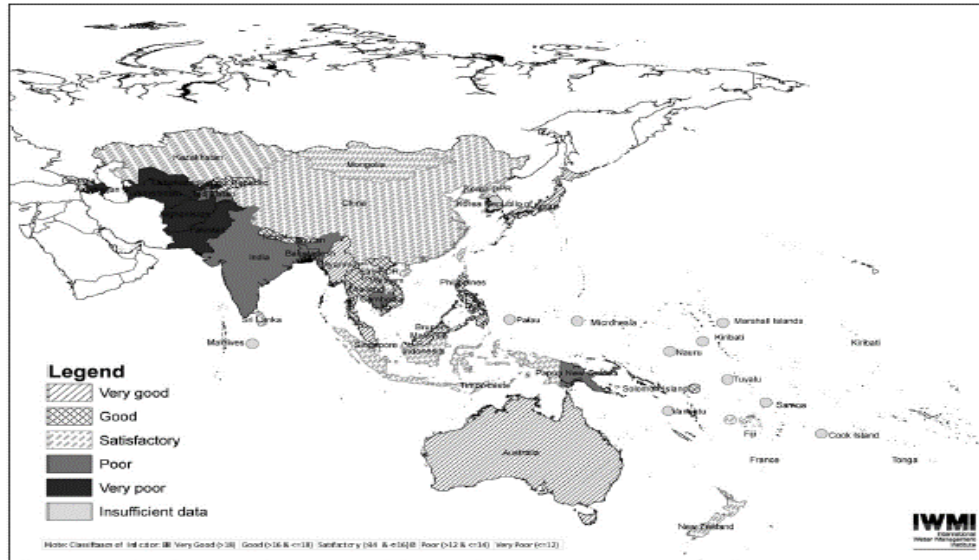


Fig.8 Resultados del Índice de Seguridad Hídrica (Lautze & Manthrilake, 2012).

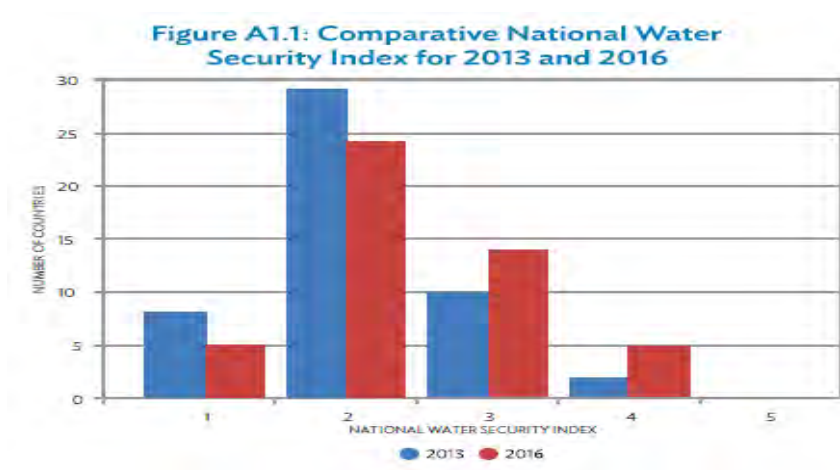
El Banco Asiático de Desarrollo (ADB, por sus siglas en inglés) desarrolló un método de evaluación integral para la seguridad hídrica como sustento para un futuro con agua para los países de Asia y el Pacífico, denominado Índice Nacional de Seguridad Hídrica (NSWI, por sus siglas en inglés).

Se enfocaron en cinco dimensiones claves: 1) Seguridad del agua doméstica, 2) Seguridad económica del agua, 3) Seguridad del agua urbana, 4) Seguridad ambiental y 5) Resiliencia a desastres relacionados con el agua. En la Figura 9 se describen las cinco dimensiones claves propuestas por el ADB.



Fig.9 Dimensiones claves del NSWI (ADB, 2016)

En el informe de 2013 se determinaron subindicadores con sus correspondientes subíndices, los cuales cambiaron para la edición del 2016⁵ de este informe (ADB, 2013; ADB, 2016). La puntuación del *NSWI* es calculada del 1 al 5 con la ponderación de la puntuación de cada uno de los subíndices de los cinco componentes arriba mencionadas. En la Gráfica 5 se muestra la comparativa de los resultados del *NSWI* del año 2013 y el año 2016.



Gráfica 5. Comparación de los resultados del NSWI del año 2013 y 2016 (ADB, 2016)

A nivel de comunidad Dickson et al. (2016) propuso elementos fundamentales para el desarrollo de una evaluación holística e integrada de seguridad hídrica para las comunidades rurales, remotas y marginadas (*RRM*, por sus siglas en inglés). Estos investigadores se propusieron consolidar una lista de 6 indicadores a partir de una revisión de 176 índices seleccionados de la literatura. La agrupación de estos indicadores quedó de la siguiente manera:

- 1) Recursos de agua (Recursos naturales de agua disponibles para la comunidad),
- 2) Medio ambiente (Relación mutuamente dependiente entre el agua y la naturaleza),

⁵Para una descripción más detallada de cada uno de estos cambios remitirse al documento *Asian Water Development Outlook: strengthening water security in Asia and the Pacific* Parte III (Pag. 18-19).

- 3) Sistema de suministro de agua (Infraestructura para la protección del agua, así como la recolección, transportación, tratamiento y administración de las aguas residuales resultantes),
- 4) Capacidad y capital de la comunidad (capital humano, los recursos dentro y fuera de la una comunidad disponibles para la seguridad hídrica sostenible),
- 5) Acceso y equidad (Capacidad de los usuarios para acceder a cantidades suficientes de agua (física y socialmente) y
- 6) Salud y bienestar (Conocimiento y comportamientos del hogar relacionados con el agua y la salud).

Si bien no se estableció una puntuación para evaluar la seguridad hídrica, si se estableció un marco de seguridad hídrica que puede ser replicado a comunidades *RRM*, de acuerdo con ciertas recomendaciones.

La Iniciativa de Investigación sobre Políticas (*PRI*, por sus siglas en inglés) del gobierno de Canadá (2007) presentó el proyecto Índice Canadiense de Sostenibilidad del Agua (*CWSI*, por sus siglas en inglés). Este índice consta de 5 componentes basados en temas: 1) Recursos (disponibilidad, suministro y demanda), 2) Salud de los ecosistemas (estrés, calidad y especies), 3) Infraestructura (demanda, condición y tratamiento), 4) Salud humana (acceso, confiabilidad, impacto) y 5) Capacidad (financiera, educación y entrenamiento). En la Tabla 3 se muestra los componentes, sus indicadores y una descripción breve. La puntuación para el índice final será igual a la puntuación promedio de los cinco componentes. Los resultados de esta evaluación aplicada a pequeñas cuencas se presentan en la tabla 4.

	Component	Indicator	Description
Canadian Water Sustainability Index	Resource	Availability	The amount of renewable fresh water that is available per person
		Supply	The vulnerability of the supply as caused by seasonal variations and/or depleting ground water resources
		Demand	The level of demand for water use based on water license allocations
	Ecosystem Health	Stress	The amount of water that is removed from the ecosystem
		Quality	The Water Quality Index score for the protection of aquatic life
		Fish	Population trends for economically and culturally significant fish species
	Infrastructure	Demand	How long before the capacity of water and waste water services will be exceeded due to population growth
		Condition	The physical condition of water mains and sewers as reflected by system losses
		Treatment	The level of waste water treatment
	Human Health	Access	The amount of potable water that is accessible per person
		Reliability	The number of service disruption days per person
		Impact	The number of waterborne illness incidences
	Capacity	Financial	The financial capacity of the community to manage water resources and respond to local challenges
		Education	The human capacity of the community to manage water resources and address local water issues
		Training	The level of training that water and waste water operators have received

Tabla 3 Componentes e indicadores que conforman el CWSI (PRI, 2007).

	Resource	Ecosystem	Infrastructure	Human Health	Capacity	Final CWSI
Tsuu T'ina	50	n/a	12	100	50	53
Pelican Lake	100	n/a	67	65	25	64
Moose Cree	33	100	56	60	80	66
Chetwynd	67	100	86	100	41	79
Three Hills	67	100	70	100	100	87
Gimli	100	n/a	52	100	67	80

Tabla 4 Resultados del caso de estudio del CWSI (PRI, 2007).

Por último, Gain et al. (2016) propuso un marco de análisis espacial multicriterio (*MCA*, por sus siglas en inglés) con el cual tenía como objetivo proporcionar una comprensión global del estado de Seguridad Hídrica. Así, este estudio abordó dimensiones físicas y socioeconómicas de seguridad hídrica agrupándolas dentro de un índice.

Lo denominaron Índice Global de Seguridad Hídrica (*GWSI*, por sus siglas en inglés). Los indicadores seleccionados están basados en el ODS 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Así el concepto de

Seguridad Hídrica está en función de 4 componentes los cuales a su vez están ponderados por indicadores:

- 1) Disponibilidad (**45%**): Índice de escasez de agua (70%), índice de sequía (15%) y Agotamiento de agua subterránea (15%),
- 2) Accesibilidad (**20%**): Acceso a agua potable (60%) y saneamiento (40%),
- 3) Seguridad y calidad (**20%**): Índice de calidad de agua (50%) y Frecuencia de inundación global (50%) y,
- 4) Gestión (**15%**): Índice de gobernanza mundial (70%), Marco legal transfronterizo (15%) y Tensión política transfronteriza (15%).

En la tabla 5 se muestran las jerarquías y ponderaciones para evaluar la seguridad hídrica global.

Main components (weight)	Security criteria (weights)	Indicators (weights)
Global water security index	Availability (45%)	Water scarcity index (70%)
		Drought index (15%)
		Groundwater depletion (15%)
	Accessibility to water services (20%)	Access to sanitation (40%)
		Access to drinking water (60%)
	Safety and quality (20%)	Water quality index (50%)
		Global flood frequency (50%)
	Management (15%)	World governance index (70%)
		Transboundary legal framework (15%)
		Transboundary political tension (15%)

Ordered weights (indicators/criteria ordered in decreasing order): (i) aggregation of 2 indicators/criteria: 0.8; 0.2, (ii) aggregation of 3 indicators/criteria: 0.6; 0.2; 0.2; (iii) aggregation of 4 indicators/criteria: 0.55; 0.15; 0.15; 0.15.

Tabla 5 Jerarquías y ponderaciones del GWSI (Gain, Giupponi, & Wada, 2016).

Este índice se calcula sumando las 4 ponderaciones de los componentes (puntuación de cada indicador multiplicada por cada ponderación asignada al componente). En la figura 10 se muestran los resultados calculados del GWSI.

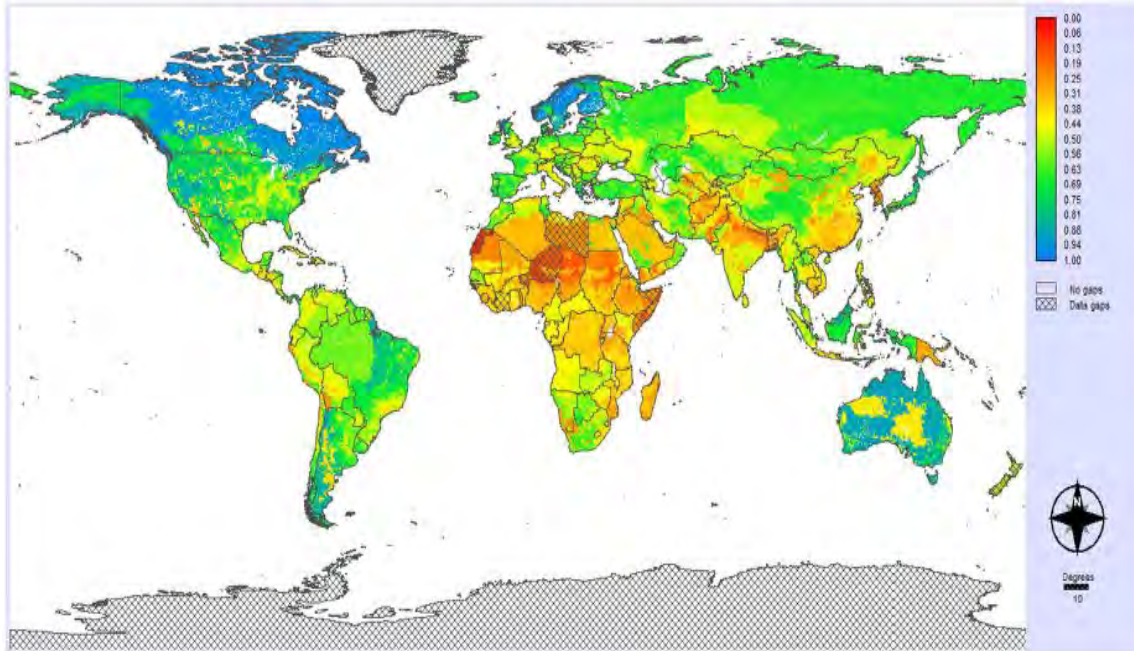


Fig.10 Resultados del GWSI (Gain, Giupponi, & Wada, 2016).

Srinivasan, Konar & Sivapalan (2017) propusieron tener una visión dinámica de la Seguridad Hídrica involucrando la constante evaluación y adaptación humana en respuesta a los cambios ambientales. Establecían que la Seguridad Hídrica no se puede cuantificar con un solo índice, sino en base a un “mapa tridimensional”: disponibilidad del recurso hídrico, infraestructura y opciones económicas.

Jensen & Wu (2018) se enfocaron en la implementación de indicadores de Seguridad Hídrica Urbana como una herramienta en el establecimiento de políticas públicas. Así, ellos establecieron 4 indicadores: Recursos, Acceso, Riesgos y Gobernanza. Estos indicadores a su vez tenían sus propios indicadores, como, por ejemplo: Disponibilidad, Calidad, Servicio, Riesgos de Salud Pública, Gestión, etc.

Shrestha, et al (2018) prepararon un índice objetivo de la Seguridad Hídrica que medía la dimensión física del agua el cual utilizaba un modelo enfocado en el comportamiento del uso del recurso en los hogares de las zonas urbanas de países en desarrollo. Fue utilizado un

cuestionario estructurado el cual consideraba características sociodemográficas, fuentes de agua, cantidad del uso de agua, frecuencias de abastecimiento, etc. un total de 15 componentes que median la dimensión subjetiva y experiencial de la inseguridad del agua, para así identificar las dimensiones específicas del área de estudio que deben mejorarse y con ello diseñar programas y políticas públicas que suplan las necesidades hídricas de comunidades bajo estudio.

Babel & Shinde (2018) desarrollaron un marco operacional de análisis de la Seguridad Hídrica considerando la cuenca como unidad de estudio, en lugar de la evaluación tradicional a nivel país. Su metodología se estableció con base a cinco indicadores: disponibilidad del agua, productividad del agua, salud de la cuenca, desastres provocados por el agua y la gobernanza del agua. Además, llevaron a cabo reuniones con las partes interesadas del sector público para tomar en cuenta su punto de vista haciendo operativa e implementable la metodología.

Por último, Assefa, Babel, Susnik, & Shinde (2018) desarrollaron una evaluación de la Seguridad Hídrica a una escala doméstica aplicada a la ciudad de Addis Abeba, Etiopía. Ellos consideraron 12 indicadores que giraban en torno al abastecimiento de agua, saneamiento e higiene. El índice fue desarrollado de manera genérica y puede ser usado en otras zonas urbanas proveyendo a los administradores de políticas públicas un análisis sobre la Seguridad Hídrica doméstica en base a sus componentes claves.

Como se puede apreciar, las propuestas establecidas de indicadores de Seguridad Hídrica a nivel mundial son a una escala nacional o regional, con excepciones de las más recientes que consideran regiones domésticas y cuenca hidrológicas. También, se aprecia la especificidad de los componentes propuestos y el enfoque particular de cada uno de los indicadores

desarrollados hasta la fecha. El reto sin duda será establecer una herramienta como indicador de la Seguridad Hídrica que tenga la capacidad de ser genérica, para que pueda ser replicable, así como que focalice en los componentes más sensibles para identificar que debe de mejorar y con ello proponer y planificar respuestas específicas para alcanzar y preservar la Seguridad Hídrica de acuerdo con la región evaluada.

2.4.2.2 En México.

En México existen en la literatura pocas propuestas de índices o indicadores compuestos. .

Uno de ellos lo planteó Cervera-Gómez (2007), el cual generó una serie de indicadores para evaluar el uso sustentable del agua en Ciudad Juárez. En él, se propuso involucrar a componentes como sociedad, infraestructura, instituciones y medios ambiente. Estos indicadores fueron: 1) Acceso al agua segura, 2) Acceso a instalaciones sanitarias adecuadas, 3) Conexiones domiciliarias, 4) Precios de agua, 5) Consumo de agua y 6) Aguas residuales tratadas. En la tabla 6 se presentan los indicadores desarrollados y calculados. De acuerdo con los resultados obtenidos de la propuesta, Ciudad Juárez presenta buenos indicadores sobre el uso sustentable del agua.

Indicador	Estimación
I. Acceso a agua segura (AAS)	96.44%
II. Acceso a instalaciones sanitarias adecuadas (AISA)	92.43%
III. Conexiones domiciliarias (CD)	86.7%
IV. Precio del agua (PA)	8.5 pesos/metro cúbico
V. Consumo de agua (CA)	278.26 litros/hab./día.
VI. Aguas residuales tratadas (ART)	87%

Tabla 6 Indicadores desarrollados y calculados para evaluar el uso sustentable del agua en Cd. Juárez. (Cervera-Gómez, 2007).

Salcedo et al. (n/d) propuso la evaluación de la sustentabilidad del recurso hídrico en la cuenca del lago Pátzcuaro por medio de indicadores, el cual toma en cuenta el desempeño de

uso, aprovechamiento y manejo del agua, utilizando el modelo PER (Presión-Estado-Respuesta) propuesto por la OCDE.

Este índice denominado Índice de Desarrollo Sostenible (IDS) se basa en la Teoría de Decisiones de Atributos Múltiples, la cual permite fragmentar el problema a analizar. El esquema de los indicadores de sustentabilidad, así como las variables propuestas se muestra en la Figura 11. Como se aprecia se tomaron en cuenta doce variables en total (dos económicas, tres sociales y siete ambientales). Cabe mencionar que cada una de las variables cuentan con indicadores particulares.

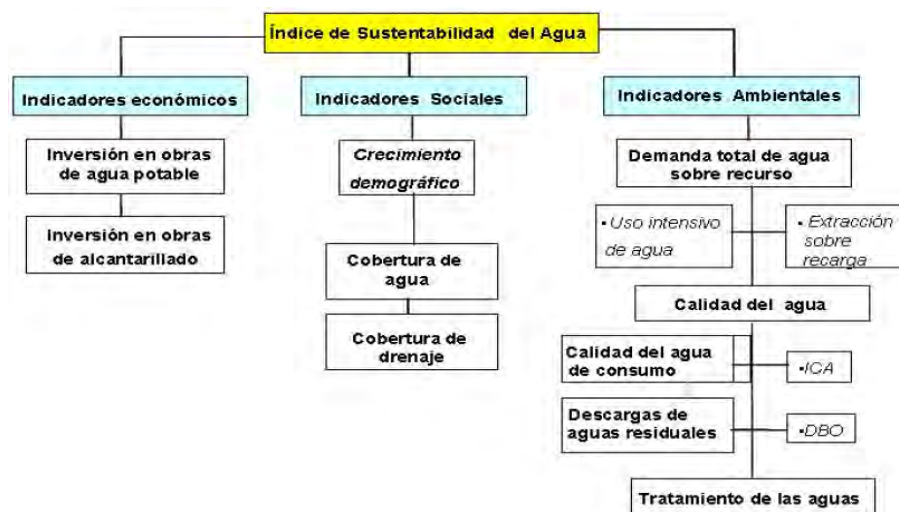


Fig.11 Indicadores y variables involucradas en el IDS (Salcedo, González, Espinoza, & Escalante, n/d).

La puntuación del IDS, será el promedio ponderado de tres indicadores generales: Económico (IE), Social (IS), Ambiental (IA). El resultado muestra que se tiene que desarrollar políticas de conservación y una mejor gestión del recurso hídrico en la región. (Tabla 7).

Índice Sustentabilidad	Erongarícuaro	Pátzcuaro	Quiroga	Tzintzuntzan
Social	0.167	0.206	0.193	0.120
Ambiental	0.143	0.155	0.200	0.208
Económico	0.022	0.016	0.013	0.000
Índice sustentabilidad integrado	0.332	0.378	0.405	0.329

Tabla 7 Resultados del IDS (Salcedo, González, Espinoza, & Escalante, n/d).

Uno de los indicadores compuestos más recientes encontrados en la literatura fue el informe del proyecto: “Indicadores de Sustentabilidad Hídrica” realizado por Aparicio-Mijares et al. (2011).

En este proyecto se optó por utilizar el *WSI* propuesto por Chavez & Alipaz (2007), el cual considera componentes hidrológicos, medioambientales, de vida y políticas públicas, con el propósito de reflejar de manera integral la sustentabilidad y la gestión actual de la cuenca Lerma-Chapala y con ello construir mapas de indicadores de sustentabilidad para las 19 subcuencas de la región.

En la tabla 8 se presenta la descripción de los indicadores y las variables para cada uno de los niveles a evaluar.

INDICADOR	PRESION	ESTADO	RESPUESTA
	PARAMETROS		
Hidrología	Variación de la disponibilidad de agua per cápita en el periodo	Disponibilidad per cápita de agua en la cuenca	Evolución en la eficiencia del uso del agua en el periodo
	Variación de la conductividad hidráulica del agua en el periodo de análisis, con relación al promedio	DBO de la cuenca (promedio a largo plazo)	Evolución en el tratamiento/disposición de aguas servidas en el periodo
Ambiente	EPI de la cuenca en el periodo	% de la cuenca con vegetación natural	Evolución en áreas protegidas en la cuenca
Vida	Variación del IDH- Ingreso de la cuenca en el periodo	IDH de la cuenca en el periodo anterior (ponderado)	Evolución del IDH de la cuenca en el periodo
Políticas	Variación del IDH- Educación de la cuenca en el periodo	Capacidad legal e institucional en la cuenca en el periodo	Evolución de los gastos en GIRH en la cuenca en el periodo

Tabla 8 Indicadores y variables del *WSI* (Aparicio-Mijares, Guitron-De los Reyes, & Preciado-Jimenez, 2011).

La siguiente tabla muestra los resultados de los cálculos del *WSI* para cada una de las variables:

Nombre Oficial	WSI presión	WSI estado	WSI respuesta	WSI PER
Río Lerma 1	0.81	0.31	0.5	0.54
Río La Gavia	0.72	0.38	0.59	0.56
Río Jaltepec	0.78	0.38	0.53	0.56
Río Lerma 2	0.72	0.25	0.63	0.53
Río Lerma 3	0.75	0.31	0.53	0.53
Río La Laja 1	0.81	0.44	0.5	0.58
Río Querétaro	0.88	0.31	0.63	0.61
Río La Laja 2	0.81	0.41	0.47	0.56
Laguna de Yuriria	0.78	0.44	0.59	0.60
Río Lerma 4	0.88	0.44	0.47	0.60
Río Turbio	0.78	0.38	0.63	0.60
Río Angulo	0.72	0.44	0.5	0.55
<i>Río Lerma 5</i>	<i>0.94</i>	<i>0.44</i>	<i>0.56</i>	<i>0.65</i>
<i>Río Lerma 6</i>	<i>0.69</i>	<i>0.38</i>	<i>0.5</i>	<i>0.52</i>
Río Duero	0.66	0.5	0.44	0.53
Río Zula	0.88	0.38	0.53	0.60
Río Lerma 7	0.78	0.44	0.5	0.57
Lago de Pátzcuaro	0.78	0.38	0.5	0.55
Lago de Cuitzeo	0.75	0.38	0.47	0.53
promedio	0.79	0.59	0.46	0.61

Tabla 9 Resultados del WSI por subcuenca (Aparicio-Mijares, Guitron-De los Reyes, & Preciado-Jimenez, 2011).

Por último, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizó el proyecto “Índices de Seguridad Hídrica” (ISH), el cual tuvo como objetivo establecer a nivel municipal índices de Seguridad Hídrica de accesibilidad y disponibilidad a los servicios de agua potable y saneamiento, seguridad y calidad del agua ante fenómenos de inundaciones, sequías y de contaminación del recurso agua. Para lo cual, con base en una revisión del estado del arte, se identificaron al menos nueve definiciones de seguridad hídrica (Rodríguez, et al., 2017). Se identificaron varias metodologías internacionales y nacionales para medir la Seguridad Hídrica, incluyendo la del Programa Nacional Hídrico (PNH) con ocho indicadores en los que se incluyen dos índices (CONAGUA, 2014).

Se decidió trabajar sobre siete indicadores: 1) Índice global de acceso a los servicios básicos de agua (IGASA); 2) Índice de vulnerabilidad a la sequía; 3) Abatimientos de aguas subterráneas con métodos indirectos, como el experimento de recuperación de gravedad y clima; 4) Vulnerabilidad social; 5) Indicador municipal de seguridad hídrica; 6) Índice global

de seguridad hídrica a nivel estatal, y 7) Indicador de gestión del agua. Se analizó la metodología del *GWSI* propuesto por Gain et al. (2016), lo cual se hizo a nivel estatal con datos del año 2015, principalmente de la CONAGUA, así como datos internacionales en el componente de administración.

El resultado obtenido del Índice de Seguridad Hídrica Municipal se muestra en la Figura 12. En él se aprecia un *bajo* índice de seguridad hídrica (0.0 – 0.5) en un gran porcentaje del territorio de la república mexicana.

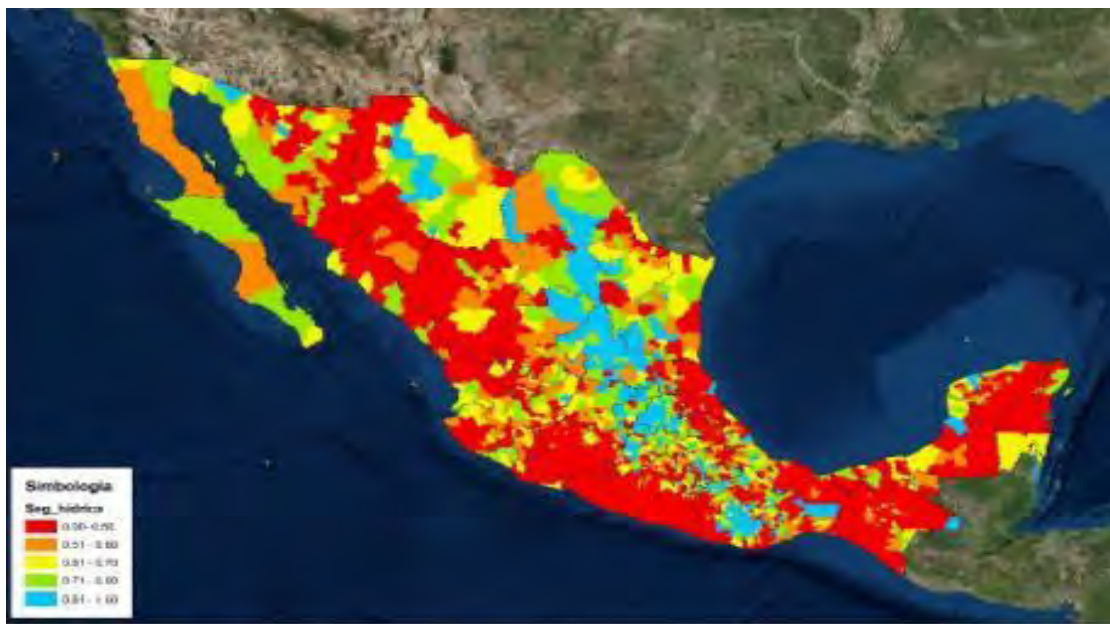


Fig.12 Índice de seguridad hídrica municipal en la República Mexicana (Rodríguez, et al., 2017).

Los resultados de *GWSI* se presentan en la Figura 13, donde se observa que los estados con situación crítica son Sonora, Baja California, Guanajuato, Cd. De México, Colima, Aguascalientes y Sinaloa.



Fig.13 Índice de seguridad hídrica municipal en la República Mexicana (Rodríguez, et al., 2017).

Tomando en consideración los trabajos mencionados se puede concluir que dichas propuestas fueron muy ambiciosas y cumplieron los objetivos particulares para los cuales fueron establecidos; pero ha faltado la integración holística de los componentes en un índice que responda a las políticas actuales de planeación y administración del agua a nivel de cuenca. Así, contemplando la carencia de un Índice de Seguridad Hídrica para México establecido por cuencas hidrológicas, el objetivo de esta investigación es el desarrollo de un índice que represente la sostenibilidad de un región hidrológica o cuenca analizando los componentes de Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad, los cuales podrán ser representados en un SIG

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En este capítulo se establece y delimita la metodología utilizada para la creación del *ISHM*. Esta metodología está dividida en 2 secciones: 1) El desarrollo de un Modelo de Datos Relacional (MDR) con información geográfica e histórica el cual tiene como objetivo tener una base de datos confiable con una estructura estándar para el análisis de información donde se pretenda implementar el *ISHM* y, 2) La propuesta del *ISHM* con sus componentes, indicadores y parámetros, así como la información necesaria para su desarrollo. En esta sección también se establece la propuesta de los rangos para clasificar el *ISHM*.

3.1 MODELO DE DATOS RELACIONAL (MDR)

3.1.1 INTRODUCCIÓN

El concepto de Seguridad Hídrica se ha convertido en un paradigma de los objetivos estratégicos de la gestión del agua. Por ello, una GIRH adecuada es fundamental para conservar la Seguridad Hídrica.

Este índice tiene como uno de sus objetivos evaluar la Seguridad Hídrica actual para poder proponer mejoras en la GIRH. Para ello, la GIRH toma como base numerosas herramientas y recurre a diferentes fuentes de información para determinar la disponibilidad y con ello evaluar diferentes escenarios sobre el manejo del recurso hídrico. Una herramienta excelente utiliza como plataforma los SIG para crear MDR (Patiño-Gómez, 2007).

Los MDR brindan un soporte básico para la GIRH debido a que administran y proporcionan información para su análisis y procesamiento. En base a este análisis se puede fortalecer el *ISHM* cuando se pretenda llevar a la práctica en una cuenca que se esté gestionando.

Una Base de Datos Geográfica, mejor conocida como *Geodatabase*, es un MDR orientado a objetos, la cual es utilizada por el conjunto de programas *ArcGIS* para su creación. Esta

Geodatabase tiene la capacidad de proveer un marco estandarizado y puede relacionar diferentes tipos de datos.

Este MDR da las características de Entidades (*features*) al SIG. En esta etapa del proyecto se incluyó toda la información oficial disponible dentro de la *Geodatabase*, la cual se dividió en conjunto de datos (*features dataset*) para facilitar la aplicación de las herramientas. Esta división, a su vez, facilitará la administración y análisis de la información contenida en el MDR.

Sin embargo, el principal reto para analizar información hidrológica se localiza en la disponibilidad de información confiable y en una organización estándar para generar una completa base de datos.

Por ello, el Centro de Investigación de Recursos Hidráulicos (*CRWR*, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas en Austin, ha creado un MDR Geo-referenciado el cual establece una estructura estándar para almacenar información espacial y temporal soportada por SIG denominada *ArcHydro*. Este MDR se crea utilizando un conjunto de programas denominado *ArcGIS*, arriba mencionado del Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (*ESRI*, por sus siglas en inglés).

El MDR fue diseñado para recopilar información hidrológica superficial (ríos, cuerpos de agua, cuencas etc.) y efectúa un esquema que crea relaciones muy específicas y topológicas entre dicha información (Patiño-Gómez, 2007). En la Figura 14 se muestra la integración de información geográfica en el MDR. En esta investigación se utilizó el conjunto de programas antes mencionado para análisis de información y soporte geográfico para cada uno de los componentes del índice propuesto.



Fig.14 Integración de información en el MDR (Patiño-Gómez, 2007).

3.1.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

3.1.2.1 Información geográfica

La información geográfica se encontró en su mayoría en escala 1: 50,000 y 1: 250,000, que son escalas comunes que manejan la CONAGUA y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Actualmente, esta información está disponible en archivos con extensión .shp (*Shapefile*) y en archivos tipo *raster* para los Modelos Digitales de Elevación (MDE), los cuales se encuentran en el sistema de coordenadas de proyección *Lambert Conformal Conic* (CCL_ITRF_1992), la cual utiliza el datum Marco de Referencia Terrestre Internacional 1992 (D_ITRF_1992).

Esta información fue procesada y re proyectada (dado que cierta información fue encontrada sin un sistema de coordenadas específico) con la ayuda del conjunto de programas *ArcGIS* en su versión 10.4.

La información geográfica más relevante recopilada para la construcción del MDR fue: cuencas, subcuencas, acuíferos, estaciones hidrométricas, estaciones climatológicas, hidrografía, ríos principales, lagos, edafología, regiones hidrológicas-administrativas,

regiones hidrológicas, subregiones hidrológicas, cobertura vegetal y uso de suelo, Modelos Digitales de Elevación (MDE), principalmente.

Cabe mencionar que la información hidrográfica digital oficial de México contiene información actualizada equivalente a aquella que contiene la carta topográfica en su edición tradicional (Versión en Papel). Con esta información fue posible crear un sistema muy completo de información base. La figura 15 muestra un ejemplo de la información recopilada.

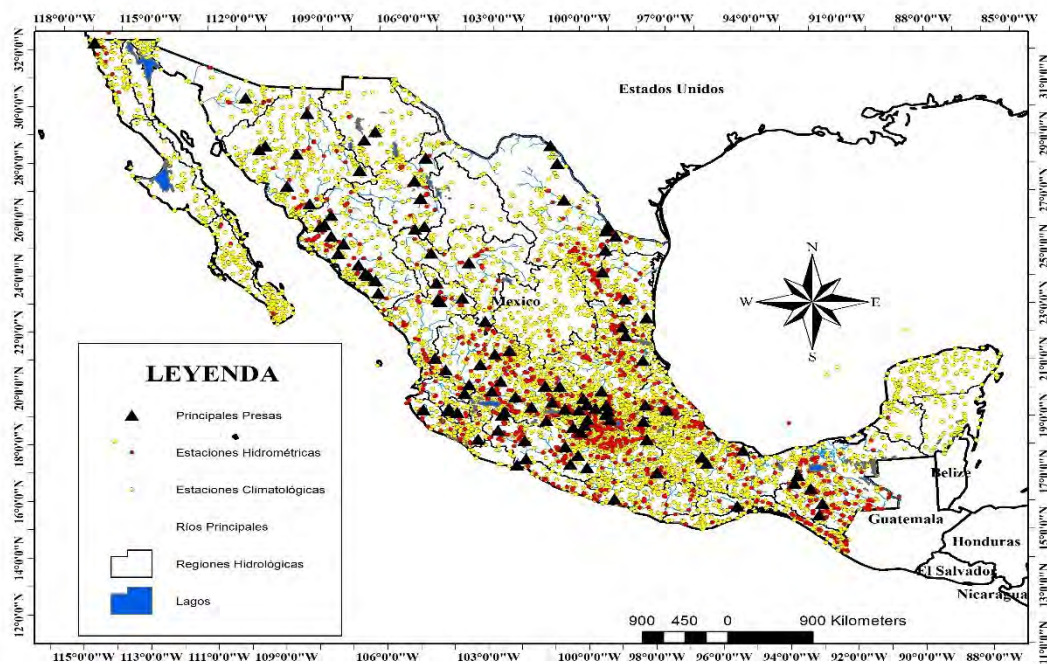


Fig.15 Información base del MDR. Elaboración propia con información de diferentes agencias e institutos mexicanos.

La información de estados, población, Área Geoadministrativa Básica (AGEB), zonas urbanas, zonas rurales, presas, puntos de monitoreo de calidad de agua, cambio climático, etc. Se encontró en las respectivas agencias que generan la información, como son: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Comisión

Internacional de Límites de Aguas (CILA), etc. La Figura 16 presenta la información compilada.

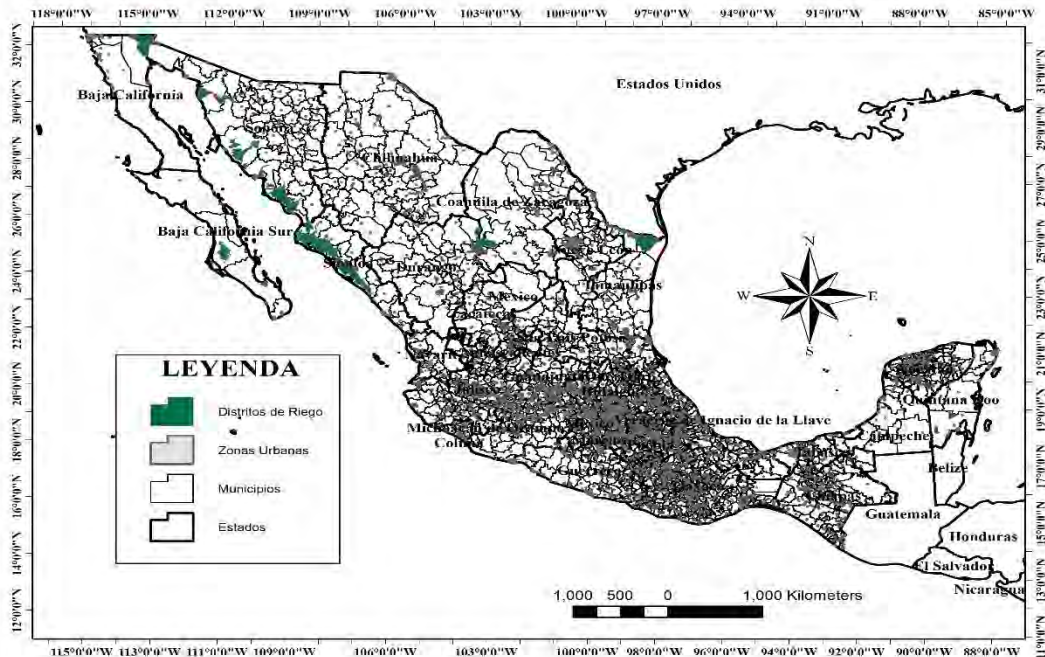


Fig.16 Información de soporte del MDR. Elaboración propia con información de diferentes agencias e institutos mexicanos.

3.1.2.2 Información histórica

3.1.2.2.1 Climatológica.

La información histórica de precipitación se obtuvo de la base de datos del Extractor Rápido de Información Meteorológica en su versión 3.0 (ERIC III 3.0) y de la base de datos CLICOM desarrollada por el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). Estas bases de datos contienen información del banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la CONAGUA (IMTA, 2009; CICESE, 2016).

3.1.2.2.2 Hidrométrica

La información hidrométrica fue obtenida de la CONAGUA (2017c), tomándola del Banco Nacional de Datos de aguas Superficiales (BANDAS). Además, para la región fronteriza Noroeste se utilizó la información de flujos naturalizados de la Comisión de Calidad Ambiental de Texas (*TCEQ*, por sus siglas en inglés) (R. J. Brandes Company, 2003).

En el **Anexo A.1** se describen los detalles de la creación de la *Geodatabase* utilizando el conjunto de programas de *ArcGIS* en su versión 10.4.

3.2 PROPUESTA DE ÍNDICE DE SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO (ISHM)

3.2.1 COMPONENTES, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN.

El concepto de Seguridad Hídrica ha sido el foco de atención en los últimos 20 años. Tanto la academia como las organizaciones vinculadas con el agua han presentado diferentes conceptos para poder establecer una definición universal que se pueda tomar como base para todos los sectores y con ello establecer cómo medirla. Esto se ha tornado más complejo de lo esperado, ya que los retos de la Seguridad Hídrica varían de manera particular en cada región, país, estado o cuenca.

En esta investigación se propone un índice para poder medir la Seguridad Hídrica en México a nivel de cuenca hidrológica, en otras palabras, se propone abordar el concepto de Seguridad Hídrica de tal manera que pueda ayudar a medir o cuantificar el recurso hídrico bajo un enfoque hidrológico en las cuencas del país. El objetivo es evaluar y monitorear la disponibilidad o cantidad de agua, su calidad y la vulnerabilidad hídrica, para establecer una condición o grado de Seguridad Hídrica.

Se reconoce que el enfoque cuantitativo por sí solo no es suficiente para medir de una manera integral la Seguridad Hídrica de una región o cuenca, ya que dicha seguridad comprende

otros aspectos que estresan el agua, los cuales necesitan una discusión detallada. Además, algunos de estos aspectos alcanzan grados que no pueden ser medidos o cuantificados en su totalidad, como, por ejemplo: deficiencias institucionales, impactos del Cambio Climático, pérdidas de agua en los sistemas de agua potable, la falta de mantenimiento de plantas de tratamiento, la falta de cultura del uso del agua, la migración, etc.

Así, esta propuesta del *ISHM* pretende ser la primera aproximación de cuantificación de la Seguridad Hídrica por cuencas hidrológicas para determinar el estado actual en Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad para determinar los componentes más sensibles y establecer recomendaciones y/o medidas preventivas y correctivas tanto para los usuarios como para los tomadores de decisiones.

Cabe mencionar que en esta investigación se evalúa y utiliza información disponible. Este enfoque limitado pretende que con la información actual se pueda avaluar la Seguridad Hídrica en cualquier cuenca del país sin necesidad de desarrollar proyectos o monitoreos de parámetros extras para su aplicación. Sin embargo, mientras más parámetros se tengan para la evaluación, mejor será el análisis e implementación del *ISHM*.

3.2.1.1 Componentes.

Con base en las definiciones del concepto de Seguridad Hídrica, en esta investigación se proponen los siguientes componentes e indicadores para la creación del *ISHM*. La Tabla 10 presenta esta propuesta.

<i>ISHM</i>	
COMPONENTES	INDICADORES
CANTIDAD	Índice de Escasez de Agua Azul (WSI)
	Índice de Disponibilidad (Idas)
CALIDAD	Índice de Calidad Ambiental (ICA)
VULNERABILIDAD	Índice de Vulnerabilidad Hídrica Global (IVS)

Tabla 10 Propuesta de componentes del ISHM. Elaboración Propia.

La propuesta para el cálculo del ISHM se define como una *media geométrica* de los componentes en una cuenca y su cálculo se realiza conforme a la siguiente expresión:

$$ISHM = (\prod_{i=1}^M ISHM_{i-n})^{1/M} \quad (1)$$

Donde:

$ISHM_{i-n}$ = Componentes para evaluar la Seguridad Hídrica, adimensional.

M = Número de componentes.

Para esta investigación $M = 3$: Cantidad ($ISHM_i$), Calidad ($ISHM_j$) y Vulnerabilidad Hídrica ($ISHM_k$). Así, el cálculo del ISHM para la cuenca n es igual a:

$$ISHM = (ISHM_i * ISHM_j * ISHM_k)^{1/3} \quad (2)$$

3.2.1.2 Características

El cálculo del ISHM tiene las siguientes características:

- 1) El resultado puede variar entre -1 a 1, siendo un valor de -1 (extremadamente Baja) el más bajo y un valor de 1 (Muy Alto) el óptimo, obviando que se podrían presentar valores intermedios. Los valores negativos muestran las implicaciones físicas de disponibilidad en la cuenca, los cuales muestran el grado de sobreexplotación y al presentar dichos valores automáticamente se clasifica como una Seguridad Hídrica *Muy Baja a Extremadamente Baja*,
- 2) Si un componente del índice es cero, la seguridad hídrica resultará en cero de igual forma, siendo implícitamente su clasificación como *Extremadamente Baja*,
- 3) Se considera de manera implícita un peso agregado al componente con un valor bajo. Un ejemplo de ello es que, si un componente tiende a cero, es probable que los demás componentes no sean lo bastante relevantes. Así, para que pueda resultar un valor alto

todos los componentes tiene que ser valores altos (Loucks, 1997; Sandoval Solis & McKinney, 2011).

Uno de los aspectos importantes a considerar es que los índices de Seguridad Hídrica actuales manejan la adición de sus componentes para el cálculo del valor final (PRI, 2007; Lautze & Manthrithilake, 2012; ADB, 2016; Gain, Giupponi, & Wada, 2016). Pero la adición de los componentes puede implicar una sustitución sin consecuencias considerables si un componente tiene un valor cercano a cero, lo cual se puede considerar como inapropiado (Desai, 1991).

Por ello en el *ISHM* que se desarrolla en este trabajo, se propone utilizar la multiplicación de componentes y más específicamente la *media geométrica* para su cálculo, por dos razones:

- 1) La multiplicación conceptualiza a cada componente como primordial y no sustituible, además de que orienta de una mejor manera para visualizar el componente más sensible para determinar la seguridad hídrica en una cuenca (Sagar & Najam, 1998; UNDP, 2019),
- 2) El resultado expresa valores más funcionales para interpretar. Por ejemplo, si una cuenca en un año determinado obtiene resultados de Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad de 0.80, 0.80 y 0.80, respectivamente, el resultado del *ISHM* solo por multiplicación será de 0.51, contrastando con el resultado de la *media geométrica* que será de 0.80. El resultado utilizando la multiplicación no parece muy adecuado. Si al año siguiente el componente de Calidad del agua baja en un 10%, que puede ser probable en muchas regiones en México, el resultado será de 0.448 y 0.765 respectivamente. Se muestra claramente que el primer resultado sigue siendo poco alentador, aun cuando hay disponibilidad de agua y una buena calidad en él recurso. El segundo resultado, por el contrario, se apega más a la realidad y es más factible de

explicar. Así, le *media geométrica* no encubre los valores bajos y evita que cada valor tenga la misma incidencia dentro el resultado final (UNDP, 2019).

3.2.1.3 Clasificación

Los rangos de clasificación propuestos para el *ISHM* para valores no normalizados, en otras palabras, de -1 a 1 son:

CLASIFICACIÓN ISHM		
Rango		Grado
-1.00	-0.40	Extremadamente Baja
-0.39	0.00	Muy Baja
0.01	0.40	Baja
0.41	0.60	Moderada
0.61	0.80	Alta
0.81	1.00	Muy Alta

Tabla 11 Clasificación del ISHM para valores de -1 a 1. Elaboración propia.

Para una mejor interpretación se propone una clasificación con valores normalizados, o se valores que van de 0 a 1:

CLASIFICACIÓN ISHM		
Rango		Grado
0.00	0.30	Extremadamente Baja
0.31	0.50	Muy Baja
0.51	0.70	Baja
0.71	0.80	Moderada
0.81	0.90	Alta
0.91	1.00	Muy Alta

Tabla 12 Clasificación del ISHM para valores de 0 a 1. Elaboración propia.

3.2.2 CÁLCULO DE COMPONENTES.

3.2.2.1 Cantidad (ISHM_i).

La escasez de agua en una región o cuenca se presenta cuando los suministros de agua ya no son adecuados para cubrir los requerimientos de este recurso natural para diferentes usos, incluyendo el medio ambiente. Es decir, cuando la cantidad demandada de los cuerpos de agua (superficial y subterránea) es mayor en cierto porcentaje que el escurrimiento y el volumen de agua de recarga natural de los acuíferos. Así, el estrés hídrico se agrava debido a la variabilidad climática en especial en regiones donde hay una alta tasa de crecimiento poblacional y cambios continuos en los esquemas de consumo (UN, 1997).

El recurso hídrico está cada vez más estresado con el aumento de la escasez en los diferentes niveles geográficos (regiones, países, estados, cuencas hidrológicas). De acuerdo con Vörösmarty et al. (2005) el uso global de agua aumentó en una tasa aproximada de 20% por década entre 1960 y el año 2000, y de 10% entre el año 2000 y el 2010, con claras diferencias cuando se hace un análisis regional, de entre 15 y 32%.

Dado que la disponibilidad de agua en cada región varía en el espacio y el tiempo, actualmente solo el 15% de la población mundial está asentada en cuencas con “abundancia” relativa de agua, quedando el 75% restante sujeto a un estrés hídrico de moderado a grave. Para el año 2050, se proyecta que la disponibilidad de agua per cápita se reduzca en promedio en un 50% con condiciones climáticas normales, solo como resultado del incremento poblacional (Vörösmarty, Lévêque, & Revenga, 2005; Ringler, Bryan, Biswas, & Cline, 2010).

Con base en lo anterior, uno de los criterios utilizados para establecer la disponibilidad de agua en una región o cuenca es conocer el grado de presión ejercido sobre el recurso hídrico

con base en algún índice de escasez (*WSI*, por sus siglas en inglés). No obstante, este indicador no considera la sobre explotación de acuíferos, por lo que en esta investigación se propone evaluar esta condición en un indicador aparte, con el índice de Disponibilidad de Acuíferos o *Idas* (CONAGUA, 2018). Así, para el cálculo del indicador de Cantidad de Agua (*ISHM_i*) se propone la siguiente ecuación:

$$ISHM_i = ISHM_{WSI} * W_a + ISHM_{Idas} * W_b \quad (3)$$

Donde:

$ISHM_{WSI}$ = Índice de escasez de agua (Adimensional).

$ISHM_{Idas}$ = Índice de disponibilidad de agua subterránea (Adimensional)

W_{a-b} = Factor de ponderación del indicador.

3.2.2.1.1 Índice de Escasez de agua ($ISHM_{WSI}$).

De los índices basados en extracciones de agua uno de los más utilizados es el *WSI* propuesto inicialmente por Vörösmarty et al. (2005) que también llamó Índice de Uso Relativo Local del Agua. Su fórmula es la siguiente:

$$WSI = \frac{DIA}{Q} \quad (4)$$

Donde:

DIA = Extracciones de agua anual para los sectores Doméstico, Industrial y Agrícola ($hm^3/año$).

Q = Volumen medio de escurrimiento anual ($hm^3/año$).

Esta primera propuesta consideró la relación Extracción-Disponibilidad (*WTA*, por sus siglas en inglés) ya que incluía cada una de las extracciones de agua y el volumen de escurrimiento

disponible. El procedimiento de cálculo consideró la división de la cuenca o el área de estudio en una cuadrícula homogénea, calculándose el *WSI* para cada uno de los cuadros y sumando cada uno de los resultados obtenidos (Vörösmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005).

La clasificación de esta primera propuesta del *WSI* consideró el planteamiento realizado por la ONU en su documento “*Evaluación integral de los recursos de agua dulce del mundo*” (UN, 1997). En él se comenta que el estrés hídrico inicia cuando las extracciones rebasan el 10% del volumen de escurrimiento disponible. Así, un *WSI* entre 20% y 40% considera la extracción de agua como un factor que limita el crecimiento económico, requiriendo una gestión integral entre la oferta y la demanda para proteger la sostenibilidad entre ambos. Cuando este índice sobrepasa el 40% del escurrimiento disponible denota una grave escasez, y generalmente cuando esto sucede, la región o cuenca empieza a depender más del agua subterránea, alcanzando incluso la sobreexplotación y abatimiento de acuíferos.

Sin embargo, el *WSI* de Vörösmarty no consideraba los Requerimientos Ambientales de Agua (*EWR*, por sus siglas en inglés) en su evaluación. Así, Smakhtin et al. (2004) con base en su trabajo previo sobre *EWR*, propuso agregar este componente a la ecuación del *WSI*.

Generalmente, en los documentos y análisis de la escasez hídrica en México no se toman en cuenta los requerimientos ambientales de agua (CONAGUA, 2018b). Sin embargo, considerando que un requisito indispensable para garantizar la sostenibilidad ambiental es la disponibilidad de agua para la naturaleza, en esta investigación se ha optado por emplear el *WSI* considerando los *EWR* (Smakhtin, Revenga, & Döll, 2004; Vörösmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005; Gain, Giupponi, & Wada, 2016). El $ISHM_{WSI}$ se calcula con la siguiente ecuación:

$$ISHM_{WSI} = \frac{W_i}{WA_i - EWR_i} \quad (5)$$

Donde:

W_i = Demanda de agua anual para diferentes usos ($hm^3/año$).

WA_i = Disponibilidad anual de agua superficial y subterránea ($hm^3/año$).

EWR_i = Requerimientos ambientales de agua ($hm^3/año$).

3.2.2.1.1.1 Demanda de agua anual (W_i)

El volumen de agua anual de demanda para diferentes usos se obtiene del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de acuerdo con la ubicación geográfica de las concesiones de los aprovechamientos y el tipo de fuente (superficiales y subterráneos) dentro de la cuenca evaluada. Con la ayuda de *ArcMap 10.4* se ubican las concesiones y se extraen de una capa previamente creada. Así, la W_i es igual a la siguiente ecuación:

$$W_i = \sum_{i=1}^n VC_{sup} + \sum_{i=1}^n VC_{sub} \quad (6)$$

Donde:

VC_{sup} = Volumen concesionado de agua superficial registrado en el REPDA ($hm^3/año$).

VC_{sub} = Volumen concesionado de agua subterráneo registrado en el REPDA ($hm^3/año$).

3.2.2.1.1.2 Disponibilidad anual de agua superficial y subterránea (WA_i)

3.2.2.1.1.2.1 Superficial

El Volumen Medio Anual de Esguerrimiento Natural (VMAEN) se determina por el método indirecto lluvia-esguerrimiento recomendado por la SEMARNAT (2015) en la NOM-011-CONAGUA-2015. Se utiliza el método indirecto, ya que, en México, en muchas cuencas

hidrológicas no se cuenta con información suficiente de registros hidrométricos para poder calcular la disponibilidad de agua por métodos directos⁶.

Así, de acuerdo con esta norma el *VMAEN* se calcula con la siguiente fórmula:

$$VMAEN = P_i * A_i * C_e \quad (7)$$

Donde:

P_i = Precipitación media anual (m).

A_i = Área de la cuenca (km²).

C_e = Coeficiente de escurrimiento (Adimensional).

3.2.2.1.1.2.1.1 Precipitación media anual (P_i)

La información de precipitación de la cuenca estudiada debe de abarcar un periodo de 20 años como mínimo. Para la generación de las series de tiempo se propone utilizar dos bases de datos. La primera es el Extractor Rápido de Información Meteorológica en su versión III (ERIC III). Esta contiene información del banco de datos histórico del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la CONAGUA (IMTA, 2009; CICESE, 2016). La segunda es la base de datos CLIMATESERV del catálogo de proyectos de SERVICIO GLOBAL. Esta base de datos contiene información de múltiples fuentes de datos satelitales y observaciones terrestres, que combinan la información para crear mallas de series de tiempo de precipitación (Funk, et al., 2015; SERVIR GLOBAL, 2018).

Con base en el ERIC III, se propone que la precipitación media se calcule por el método de los polígonos de *Thiessen*. De las estaciones climatológicas se extrae la precipitación diaria.

⁶Si se cuenta con información de estaciones hidrométricas en la cuenca evaluada se recomienda utilizar el método directo de la NOM-011-CONAGUA-2015.

Con la ayuda *ArcMap 10.4* se calcula el área de influencia de las estaciones climatológicas. Así, la precipitación media se calcula como el promedio ponderado de las precipitaciones registradas de cada estación, tomando como factor de peso el área de influencia y utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^j A_j P_j \quad (8)$$

Donde A_j es el área de influencia de las estaciones, P_j es la altura de precipitación registrada en la estación y $A = \sum_{j=1}^j A_j$ (Área total de la cuenca) (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

De la base de datos de CLIMATESERV se descarga la información de precipitación media diaria utilizando como entrada un archivo con extensión *GeoJSON*, el cual es un formato de intercambio de datos geoespaciales basado en la notación de objetos de *JavaScript* (Butler, et al., 2016). El archivo de descarga tiene extensión *.csv* el cual es compatible para visualizar y manipular en MS Excel.

Se recomienda realizar un análisis comparativo de distribución de datos y un análisis estadístico de las series de tiempo de precipitación para determinar su coeficiente de correlación, coeficiente de determinación, diferencia de precipitación acumulada y Análisis de Varianza (ANOVA).

Dado que la información del ERIC III solo cuenta con información hasta principios de siglo XXI, y con algunas brechas importantes en años recientes, este análisis comparativo se realizó en el año 1981 en una cuenca del norte del país. Se eligió este año para su análisis debido a que se observó que las lecturas e información de precipitación del ERIC III fueron constantes. Después de los resultados obtenidos de este análisis se optó por utilizar la base de datos CLIMATESERV para el cálculo del *VMAEN*, ya que cuenta con información más

reciente. En la **Anexo A.2** se muestra el informe del análisis comparativo y estadístico antes mencionado.

3.2.2.1.1.2.1.2 Área de la cuenca (A_i)

El Área de la cuenca a evaluar se obtiene con la ayuda del programa *ArcMap 10.4* tomando como base el archivo *.shp* de cuencas hidrológicas procedente del Sistema Nacional de Información (CONAGUA, 2016a).

3.2.2.1.1.2.1.3 Coeficiente de escurrimiento (C_e)

Para el cálculo del *VMAEN* por el método indirecto lluvia-escurrimiento, es necesario determinar un C_e . Este coeficiente está determinado por el tipo y uso de suelo, así como por el volumen de precipitación anual de la cuenca de estudio.

Para determinar el uso de suelo y vegetación se utiliza el conjunto de datos vectoriales escala 1:250,000 serie V o actual, la cual contiene información de usos de suelo y vegetación de México obtenidas en base a técnicas de fotointerpretación de imágenes satelitales y apoyada por trabajos de campo (INEGI, 2014).

Para establecer el tipo de suelo se utiliza el Conjunto de datos vectoriales edafológica escala 1:250,000 Serie II o actual de INEGI, el cual contiene información de los diferentes tipos de suelo que hay en México obtenidos al utilizar el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso del Suelo (WRB, por sus siglas en inglés) para su clasificación (INEGI, 2013).

En función del uso y tipo de suelo se establece un parámetro adimensional denominado K . Si en la cuenca analizada se encuentran diferentes tipos y usos de suelo, el valor del parámetro K se calcula subdividiendo la cuenca y obteniendo el promedio ponderado de cada una de

ellas (SEMARNAT, 2015). El C_e se determina de acuerdo con el valor obtenido de K . Si resulta menor o igual a 0.15 se utiliza la siguiente expresión:

$$C_e = \frac{K(P-250)}{2000} \quad (9)$$

Si K es mayor de 0.15, se utiliza la ecuación siguiente:

$$C_e = K \frac{(P-250)}{2000} + \frac{(K-0.15)}{1.5} \quad (10)$$

3.2.2.1.1.2.2 Subterránea

La disponibilidad de agua subterránea se evalúa en base a la información oficial de disponibilidad por acuíferos de la CONAGUA (2018b). En base a esta información se analiza la disponibilidad media anual de agua subterránea (*DMA*) con respecto a la recarga media anual (*R*) y el volumen de extracción de aguas subterráneas (*VEAS*). Cabe resaltar que se deben de tomar en cuenta únicamente los acuíferos con disponibilidad media positiva, en otras palabras, no se considera la sobreexplotación de los acuíferos.

3.2.2.1.1.3 Requerimientos Ambientales de Agua (*EWR_i*).

A causa de la brecha de información específica de los *EWR* para las cuencas hidrológicas del país, al evaluar el *WSI* se estima el volumen de los *EWR* como un porcentaje del *WA_i* de acuerdo con lo recomendado por la literatura. Se puede tomar el rango de 28% a 30% ya que se ha considerado el porcentaje recomendado mínimo para el mantenimiento en buenas condiciones y supervivencia de la mayoría de las formas de vida acuática de los ecosistemas dependientes del agua dulce (Tennant, 1976; Smakthin, Revenga, & Döll, 2004). Por último, se puede considerar el volumen recomendado por la CONAGUA (2018) de 9.46 hm³/año denominado de conservación ecológica.

3.2.2.1.2 Índice de Disponibilidad de Agua Subterránea (*ISHM_{Idas}*)

Desde hace décadas el agua subterránea es una fuente de abastecimiento que está tomando relevancia a nivel mundial. Para realizar balances de disponibilidad de agua a mediano y largo plazo es necesario evaluar el volumen de agua subterránea utilizada en relación con el agua disponible (Richey , et al., 2015).

En los últimos 50 años el aumento acelerado de la extracción de agua de los acuíferos ha sido evidente, ocasionado por las elevadas necesidades de alimento y la producción industrial por el aumento de la población. La extracción de agua subterránea es aproximadamente entre 600 a 750 km³/año, siendo los mayores dependientes el abastecimiento de agua potable de más de un tercio de la población mundial (65%) y la agricultura (20%), difiriendo totalmente al uso del agua superficial (Zektser & Everett, 2004; UN, 2009).

El 8% de los acuíferos transfronterizos están actualmente estresados por causa de la sobreexplotación. Asimismo, muchos de los acuíferos no estresados en muchas regiones en el mundo han aumentado su extracción en más del 100%, siendo evidente la disminución excesiva de los niveles freáticos (Shah, Molden, Sakthivadivel, & Seckler, 2000; Wada & Heinrich, 2013).

Actualmente la forma de evaluar la situación del recurso hídrico subterráneo es calculando que tan estresado está, relacionando la extracción total o uso del agua, la recarga natural o disponibilidad y la contribución del agua subterránea al flujo ambiental. Le han llamado *Grado de desarrollo de agua subterránea, estrés de agua subterránea, huella de agua subterránea, estrés de desarrollo de aguas subterráneas o estrés de agua subterránea renovable* (UN, 2007; IGRAC, 2011; Gleeson, Wada, Bierkens, & Beek, 2012; Richey , et al., 2015; Anher, 2016). Una modificación del indicador de *huella de agua subterránea* de Gleeson et al. lo propuso Wada & Heinrich (2013) y lo denominó *Indicador de estrés de*

acuíferos. El resultado de cada uno de ellos es adimensional y proveen información de la relación *WTA* mencionada anteriormente, con lo que puede saber la situación actual y su tendencia.

En México se utiliza generalmente el Índice de extracción y el Índice de explotación. El primero es la relación que existe entre el volumen de extracción de aguas subterráneas y el volumen de recarga total media anual. El segundo relaciona el volumen concesionado, la descarga anual comprometida y el volumen de recarga (CONAGUA, 2012; CONAGUA, 2018).

De acuerdo con las condiciones nacionales y por la información oficial disponible, para esta investigación se utiliza el Índice de Disponibilidad (I_{das}) propuesto por la CONAGUA (2018), el cual está definido por la relación que existe entre la disponibilidad media anual de agua subterránea (D_{ma}), la recarga natural (R) y las descargas comprometidas aguas abajo (D_{nc}), y se calcula con la siguiente ecuación:

$$ISHM_{I_{das}} = \frac{D_{ma}}{R - D_{nc}} \quad (11)$$

3.2.2.1.2.1 Disponibilidad media anual (D_{ma}), Recarga natural (R), Descargas comprometidas aguas abajo (D_{nc})

Cada uno de los volúmenes necesarios para la construcción del $ISHM_{I_{das}}$ son tomados de la información oficial emitida por la CONAGUA en el Diario Oficial de la Federación, documentos particulares y/o el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) (CONAGUA, 2018; CONAGUA, 2018b; CONAGUA, 2018c).

3.2.2.1.3 Clasificación de indicadores de Cantidad.

3.2.2.1.3.1 $ISHM_{WSI}$

Para clasificar el $ISHM_{WSI}$ se toma en consideración la relación uso/disponibilidad, a la cual se le ha denominado Relación Crítica o de Criticidad (CR , por sus siglas en inglés) (Kulshreshtha, 1993; Alcamo, Döll, Kaspar, & Siebert, 1997). Así, mientras más alto el CR , mayor es el estrés ejercido sobre la disponibilidad de agua y menor es la calidad de agua para los usuarios aguas abajo. También, mientras aumenta el valor de CR , aumenta la posibilidad de escasez absoluta del recurso hídrico durante los periodos secos. Alcamo et al. (2000) comenta:

“En este momento, no hay una base objetiva para seleccionar un umbral de CR entre la tensión alta y baja. Sin embargo, tales umbrales son necesarios para las evaluaciones globales y regionales del recurso hídrico y, por lo tanto, los investigadores deberían prestarles atención”.

En esta investigación se consideran los umbrales utilizados de manera general alrededor del mundo. Con base en ellos, un valor de $CR < 0.10$ (< 10%) indica que el área evaluada está *Sin Estrés*. Un valor de CR de entre 0.11 y 0.20 (11 – 20%) indica un estrés hídrico *Bajo*. Un valor de CR de entre 0.21 y 0.40 (21 – 40%) indica un estrés hídrico *Medio*. Un valor de CR entre 0.41 y 0.8 (41-80%) indica un *Alto* estrés hídrico. Un valor de CR de entre 0.81 y 1.0 (81 – 100%) indica un estrés hídrico *Muy Alto* y un valor de $CR > 1.0$ (100%), muestra un estrés hídrico *Extremadamente Alto* (UN, 1997; Alcamo, Henrichs, & Rösch, 2000; Smakhtin, Revenga, & Döll, 2004; Vörösmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005; Moore, Coleman, Wigmosta, Skaggs, & Venteris, 2015). En la Tabla 13 se muestra la clasificación completa del $ISHM_{WSI}$.

Grado	Valor
Sin Estrés	$ISHM_{WSI} \leq 0.1$
Bajo	$0.1 < ISHM_{WSI} \leq 0.2$
Medio	$0.2 < ISHM_{WSI} \leq 0.4$
Alto	$0.40 < ISHM_{WSI} \leq 0.8$
Muy Alto	$0.80 < ISHM_{WSI} \leq 1.0$
Extremadamente alto	$ISHM_{WSI} > 1.0$

Tabla 13 Clasificación del $ISHM_{WSI}$. Elaboración propia.

El umbral considerado del 41% para un *Alto* estrés de la relación uso/disponibilidad es soportado sobre la base de que dicha relación considera valores promedio anuales en un periodo de tiempo, pero en condiciones secas, esta relación puede variar entre ± 0.3 y 0.7 veces dependiendo de la variabilidad climática (Alcamo, Henrichs, & Rösch, 2000). En otras palabras, un $CR = 0.4$ es igual a un $CR = 0.34$ en cuencas con baja variabilidad y hasta $CR = 0.8$ en cuencas con alta variabilidad. Por ello, de acuerdo con la distribución espacial de las demandas dentro de la cuenca, un $CR \geq 0.41$ podría ser igual a una escasez absoluta de agua en diferentes zonas del río en el transcurso de un año seco, siendo un punto crítico o la frontera para el sostén de una parte importante de organismos acuáticos y el medioambiente (Tennant, 1976).

3.2.2.1.3.2 $ISHM_{Idas}$

Se toman como base los rangos establecido en la Ley Federal de Derechos, los cuales determinan la Zona de Disponibilidad (ZD) correspondiente a cada acuífero del país (CONAGUA, 2018). Además, en esta investigación se propone un código de colores utilizando la siguiente clasificación:

Grado	Valor
Abundantes	$ISHM_{Idas} > 0.8$
Suficiente	$0.1 < ISHM_{Idas} \leq 0.8$
Equilibrio	$-0.1 < ISHM_{Idas} \leq 0.1$
Escasez	$ISHM_{Idas} \leq -0.1$

Tabla 14 Clasificación del $ISHM_{Idas}$. Elaboración propia en base a CONAGUA (2018).

3.2.2.1.4 Factores de Ponderación del $ISHM_i$

Los factores de ponderación (W_{a-b}) de este componente se consideran de acuerdo con la región donde se requiera utilizarlo, tomando en cuenta el volumen concesionado por fuente de abastecimiento. Es decir, en base al porcentaje de volumen concesionado superficial y subterráneo que esté inscrito en el REPDA. Tomando en cuenta este registro se puede saber el porcentaje de volumen concesionado por fuente. Estos valores son considerados de la siguiente manera:

W_a = Porcentaje de volumen de agua superficial concesionado de la cuenca analizada.

W_b = Porcentaje de volumen de agua subterráneo concesionado de la cuenca analizada.

3.2.2.1.5 Normalización de Datos

Al ponderar el resultado de los indicadores arriba mencionados con su factor W_{a-b} no es posible realizar operaciones matemáticas entre sí, ya que estos se encuentran en unidades heterogéneas. Por ello es necesario normalizar los resultados calculados en unidades homogéneas. Por ello cada indicador se normaliza conforme a la recomendación de La OCDE (2008) para que sus valores queden en un rango entre 0 (valor más bajo) y 1 (valor más alto):

$$I_{qc}^t = \frac{x_{qc}^t - \min_c(x_q^{t_0})}{\max_c(x_q^{t_0}) - \min_c(x_q^{t_0})} \quad (12)$$

Donde:

I_{qc}^t = Variable normalizada.

x_{qc}^t = Variable no normalizada

$\min_c(x_q^{t_0})$ = Valor mínimo de la variable no normalizada.

$\max_c(x_q^{t_0})$ = Valor máximo de la variable no normalizada.

Una vez realizado este proceso las Tablas 15 y 16 muestran la clasificación normalizada del $ISHM_{WSI}$ y el $ISHM_{Idas}$, respectivamente.

<i>ISHM_{WSI}</i>	
Grado	Valor
Muy Alto	$ISHM_{WSI} > 0.95$
Alto	$0.90 < ISHM_{WSI} \leq 0.95$
Medio	$0.80 < ISHM_{WSI} \leq 0.90$
Bajo	$0.60 < ISHM_{WSI} \leq 0.80$
Muy Bajo	$0.50 < ISHM_{WSI} \leq 0.60$
Extremadamente Bajo	$ISHM_{WSI} \leq 0.50$

Tabla 15 Clasificación normalizada del $ISHM_{WSI}$. Elaboración propia.

<i>ISHM_{Idas}</i>	
Grado	Valor
Abundante	$ISHM_{Idas} > 0.90$
Suficiente	$0.55 < ISHM_{Idas} \leq 0.90$
Equilibrio	$0.45 < ISHM_{Idas} \leq 0.55$
Escasez	$ISHM_{Idas} \leq 0.45$

Tabla 16 Clasificación normalizada del $ISHM_{Idas}$. Elaboración propia.

3.2.2.1.6 Clasificación del $ISHM_i$

Como en este componente pueden resultar valores negativos por las implicaciones físicas de disponibilidad en la cuenca evaluada se propone una clasificación de -1 a 1 para distinguir la sobreexplotación en la cuenca. Esta clasificación queda por lo tanto de la siguiente manera:

$ISHM_i$	
Grado	Valores
Muy Alta	$ISHM_i > 0.90$
Alta	$0.70 < ISHM_i \leq 0.90$
Moderada	$0.40 < ISHM_i \leq 0.70$
Baja	$-0.20 < ISHM_i \leq 0.4$
Muy Baja	$ISHM_i < -0.20$

Tabla 17 clasificación de los valores del $ISHM_i$. Elaboración propia.

3.2.2.2 Calidad ($ISHM_j$)

La calidad de un cuerpo de agua es evaluada y clasificada de acuerdo con su uso. Por ejemplo, el agua para ciertos usos industriales, de transporte e hidroeléctricas no requieren altos estándares de calidad. Por el contrario, el uso para abastecimiento público-urbano, agricultura y pesca necesita estándares más elevados.

A nivel mundial la información referente a la calidad del agua está incompleta y en muchas regiones es complicado obtenerla. Los problemas relacionados con la calidad del agua superficial tienden a ser locales y varían de acuerdo con diferentes condiciones: ubicación geográfica, estacionalidad, temperatura durante el día. Por ello el querer establecer criterios generales como indicadores de calidad de agua es un trabajo complejo.

De manera general los índices de calidad ambiental integran varios parámetros y factores de ponderación; dichos factores dependen del sistema estudiado y una parte importante depende de los métodos de análisis utilizados por los investigadores. En esta investigación se proponen tres métodos para evaluar el Índice de Calidad de Agua (ICA) en el recurso hídrico, con el objetivo de valorar su pertinencia e identificar el apropiado para su utilización en el *ISHM*. El método del cálculo del ICA⁷ seleccionado será igual al indicador de Calidad de Agua propuesto en el *ISHM*, es decir:

$$ISHM_j = ISHM_{ICA} \quad (13)$$

En esta investigación solo se toman en cuenta los parámetros que oficialmente tiene monitoreados la CONAGUA en base a su Red Nacional de Monitoreo (CONAGUA, 2019). Estos parámetros son: Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Coliformes Fecales (CF), Oxígeno Disuelto (O₂) y Toxicidad Aguda (TA).

Los tres métodos mencionados se describen y detallan a continuación.

3.2.2.2.1 Método de CONAGUA

En México en los años ochenta se estableció un método homogéneo y consistente para evaluar la calidad del agua de acuerdo con la medición de parámetros considerados como contaminantes. También se estableció una escala estándar la cual expresaba la relación entre la presencia de diferentes contaminantes en los cuerpos de agua y un grado de impacto (I_i) en el mismo. Este método fue nombrado Índice de Calidad del Agua (ICA). Así, la SEMARNAT (2019) definió al ICA como: “*El grado de contaminación existente en el agua*

⁷ Existen más métodos para evaluar la calidad de agua que se pueden utilizar sin limitaciones.

a la fecha de muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura”. Se consideró que un ICA cercano a 0 (0%) sería un agua altamente contaminada, por el contrario, un ICA cercano a 1 (100%) sería un agua excelente.

Esta propuesta consideró para el cálculo del ICA un total de 18 parámetros con distintos pesos de ponderación relativos (W_i), de acuerdo con una importancia establecida. La fórmula para su cálculo fue la siguiente:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (14)$$

Donde el subíndice i es para identificar cada uno de los parámetros establecidos (SEMARNAT, 2019b). En el **Apéndice A.3** se muestran cada uno de los parámetros y sus pesos de ponderación.

Este método no consideraba en su análisis los contaminantes tóxicos, metales pesados ni compuestos orgánicos, por lo que se consideró como un índice parcial. En la actualidad para evaluar la Calidad del Agua se ha decidido utilizar de manera general cuatro parámetros que representen el grado de contaminación de los cuerpos de agua: DBO₅, DQO, SST y CF (CONAGUA, 2018; SEMARNAT, 2019).

Cada uno de estos parámetros tiene una escala de 5 rangos: Excelente, Buena Calidad, Aceptable, Contaminada y Fuertemente Contaminada. Para el cálculo del ICA final por este método se toma el parámetro más desfavorable para indicar la Calidad Ambiental del agua.

En la tabla 18 se muestra esta escala de cada uno de los indicadores utilizados.

ESCALA DE CLASIFICACIÓN				
Criterio, mg/l			Criterio, NMP/100 ml	Calidad
DBO ₅ < 3	DQO < 10	SST < 25	CF < 100	Excelente
3 < DBO ₅ < 6	10 < DQO < 20	25 < SST < 75	100 < CF < 200	Buena
6 < DBO ₅ < 30	20 < DQO < 40	75 < SST < 150	200 < CF < 1,000	Aceptable

30 < DBO ₅ < 120	40 < DQO < 200	150 < SST < 400	1,000 < 3 CF < 10,000	Contaminada
DBO ₅ > 120	DQO > 200	SST > 400	CF > 10,000	Fuertemente contaminada

Tabla 18 Escala de clasificación de calidad del agua. Elaboración propia con información de CONAGUA (2019).

3.2.2.2.2 Método del Índice de Calidad de Agua (*WQI*)

El método del *WQI* fue desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento (*NFS*, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos en 1970. Fue desarrollado mediante el método *Delphi* con base en 142 expertos lo cuales identificaron los parámetros de mayor importancia, quedando 9 de los 35 propuestos (Canter, 1998). Los nueve parámetros para el cálculo del ICA son: Oxígeno Disuelto (O₂), Coliformes Fecales, Potencial de Hidrogeno (pH), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Nitratos (NO₄), Fosfatos (PO₄), Variación Térmica, Turbidez y Solidos Totales (*NFS*, 2018). Este método está basado en calcular un Índice de Calidad de Agua (ICA) en una escala de 0 a 100 puntos.

El *WQI* se calcula con la siguiente ecuación:

$$NSF\ WQI = \frac{\sum I_i W_i}{\sum W_i} \quad (15)$$

Donde:

W_i = Factor de ponderación de cada parámetro.

I_i = Valor del Subíndice expresado en Índice de Calidad del Agua (ICA).

Los subíndices expresados en ICA's son valores resultantes de la relación entre la concentración (unidades de acuerdo con cada variable en las abscisas) y los niveles de Calidad del Agua (0 a 100% en las ordenadas) dentro de las curvas con puntuaciones medias desarrolladas para los nueve parámetros denominadas *Curvas Funcionales o Funciones de Transformación* (Canter, 1998).

En la Figura 17 se muestran los factores de ponderación y la clasificación del *WQI*.

Parámetros y Factores de Ponderación	
Oxígeno Disuelto (O ₂)	0.17
Coliformes Fecales	0.16
Potencial de Hidrogeno (pH)	0.11
Demanda Bioquímica de Oxígeno	0.11
Variación Térmica	0.10
Fosfatos Totales	0.10
Nitratos	0.10
Turbiedad	0.08
Sólidos Totales	0.07

Leyenda WQI	
Rango	Calidad
90 - 100	Excelente
70 - 90	Buena
50 - 70	Media
25-50	Mala
0 - 25	Muy Mala

Fig.17 Factores de ponderación y clasificación de la calidad del agua. Elaboración propia con información del NFS (2018) y Canter (1998).

3.2.2.2.3 Método de Battelle-Columbus

En 1972 el laboratorio Battelle-Columbus entregó al gobierno de Estados Unidos el informe final sobre el desarrollo del Sistema de Evaluación Ambiental (*EES*, por sus siglas en inglés) el cual evaluaba los impactos ambientales de proyectos relacionados con los recursos hídricos. El *EES* está basado en prácticas jerárquicas de indicadores de calidad ambiental, evaluando el impacto ambiental en cuatro categorías principales: Ecología, Contaminación Ambiental, Estética e Interés humano. Dichas categorías se dividen en 18 componentes los cuales se dividen a su vez en 78 parámetros o factores ambientales (Dee, Baker, Drobny, Duke, & Fahringer, 1972).

Dado que las propiedades del medio ambiente no se miden en unidades equivalentes, es difícil poder evaluar los impactos en el ecosistema. Las medidas de impacto del *EES* son expresadas en Unidades de Impacto Ambiental (*EIU*, por sus siglas en inglés) para cada una de las categorías. Para ello, se desarrolló una técnica para transformar los parámetros (con unidades de acuerdo con cada variable) en unidades comunes o equivalentes en Calidad Ambiental (*EQ*, por sus siglas en inglés) entre 0 (0%) y 1 (100%). Siendo 1 el valor óptimo y 0 el valor más bajo, considerando que entre ambos extremos hay valores intermedios que definen el *EQ*.

La transformación de parámetros se realiza utilizando una *Función de Transformación* o de evaluación, la cual relaciona las unidades de cada variable con Unidades de Importancia de Parámetros (*PIU*, por sus siglas en inglés). Las *Funciones de Transformación* utilizadas fueron las propuestas por Conesa-Fernández (2010), ya que tienen como base el informe de *EES de Battelle-Columbus* y por ello, se acoplan a este método (Dee, Baker, Drobny, Duke, & Fahringer, 1972; Conesa-Fernández, 2010).

De manera general el cálculo de *EIU* se compone de tres pasos: 1) Transformar cada uno de los parámetros en su equivalencia de *EQ*, 2) Ponderar los parámetros en proporción a su importancia relativa o *PIU* y 3) Obtener el *EIU* con la siguiente ecuación:

$$EIU = \frac{\sum EQ * PIU}{\sum PIU} \quad (16)$$

En el **Anexo 2** se muestran los 1,000 *PIU* distribuidos en los 78 parámetros establecidos y las *Funciones de Transformación* utilizadas.

3.2.2.2.4 Metodología utilizada como indicador del *ISHM*

En relación con la información de calidad de agua con la que se cuente, se puede utilizar cualquier de los tres métodos arriba descritos. Mientras más parámetros se tengan monitoreados mejor será la evaluación del *ISHM_{ICA}*. Esta evaluación se puede enriquecer si se cuentan con monitoreo *in situ* de otros parámetros, como complemento de los medido por CONAGUA para fortalecer el análisis. En esta investigación se opta por considerar la metodología de establecida por la CONAGUA, ya que se considera adecuada tomando como base la información oficial disponible.

3.2.2.2.5 Clasificación del *ISHM_j*

Esta clasificación se propone de la siguiente manera:

<i>ISHM_j</i>	
Calidad	Valores
Excelente	$ISHM_j > 0.90$
Buena	$0.70 < ISHM_j \leq 0.90$
Aceptable	$0.50 < ISHM_j \leq 0.70$
Contaminada	$0.25 < ISHM_j \leq 0.50$
Fuertemente contaminada	$ISHM_j \leq 0.25$

Tabla 19 Clasificación del $ISHM_j$. Elaboración propia.

3.2.2.3 Vulnerabilidad Hídrica ($ISHM_k$)

El IPCC (2007) define la vulnerabilidad como “*El grado en que un sistema es susceptible y no puede hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad del clima y sus extremos*”. Teniendo como fundamento esta definición, el objetivo de este indicador es evaluar el impacto que pueda tener la variabilidad climática en los escurrimientos superficiales de las cuencas hidrológicas. Esta evaluación tiene como base el efecto futuro del Cambio Climático en la precipitación. Hablando de Vulnerabilidad Hídrica, el impacto que se espera sobre el recurso hídrico se relaciona con el cambio de volumen, calidad y extracción en los ríos y acuíferos del país. Por ello es importante identificar las cuencas o regiones vulnerables ante este efecto. (Rivas-Acosta, Güitron de los Reyes, & Ballinas-González, 2010).

Para la evaluación de la Vulnerabilidad Hídrica se procede conforme a la metodología propuesta por Rivas et al. (2010) la cual consta de etapas⁸ secuenciales: 1) Cálculo de índices y su normalización, 2) Cálculo de la VHG y 3) Creación de mapas con los resultados obtenidos.

⁸La metodología completa consta de 4 etapas: A) Cálculo de índices y normalización de datos, B) Asignación de pesos Específicos (prioridades), C) Cálculo de la vulnerabilidad hídrica global y D) Mapeo de la vulnerabilidad hídrica global. La segunda etapa en esta investigación no se realizó, ya que se tomaron los pesos ponderados resultantes del trabajo de Rivas et al. (2010).

Entonces, la Vulnerabilidad Hídrica se calcula conforme a la ecuación:

$$ISHM_k = 1 - ISHM_{VHG} = 1 - IE_{cc} * W_S + IP * W_P + IM * W_M + IA * W_A \quad (17)$$

Donde:

IE_{cc} = Índice de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático (adimensional)

IP = Índice de Población Municipal,

IM = Índice de marginación social

IA = Índice de grado de explotación de acuíferos

W_{S-A} = Pesos específicos determinados a cada una de las variables ($W_S = 0.71$, $W_P = 0.13$, $W_M = 0.09$ y $W_A = 0.07$).

3.2.2.3.1 Índice de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático (IE_{cc})

El resultado del IE_{cc} anual se ubica entre valores entre 0 y 1, por lo que no es necesario normalizar y, se determina con la ecuación siguiente:

$$IE_{cc} = 1 - \frac{VES_{cc}}{VES_H} \quad (18)$$

Donde:

VES_{cc} = Volumen de escurrimiento superficial ante el Cambio Climático ($\text{hm}^3/\text{año}$)

VES_H = Volumen de escurrimiento superficial histórico ($\text{hm}^3/\text{año}$).

3.2.2.3.1.1 Volumen de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático (VES_{cc})

El VES_{cc} se determina por el método indirecto lluvia-escurrimiento y conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015 de la SEMARNAT (SEMARNAT, 2015). En esta estimación se considera la anomalía de precipitación ante el cambio climático bajo el escenario RCP 8.5 en

el periodo 2015-2039 y el cálculo del coeficiente de escurrimiento por el cambio de uso de suelo estimado para este periodo. Se utiliza, entonces la siguiente ecuación:

$$VES_{cc} = P_{cc} * A_i * C_{cc} \quad (19)$$

Donde:

P_{cc} = Precipitación anual estimada (m).

A_i = Área de la cuenca (km²).

C_{cc} = Coeficiente de escurrimiento estimado (Adimensional).

3.2.2.3.1.1.1 Precipitación anual estimada (P_{cc})

Para construir las series de tiempo de la precipitación anual estimada ante el Cambio Climático se considera la anomalía de precipitación promedio bajo el escenario RCP 8.5 del periodo 2015-2039 actualizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2015).

3.2.2.3.1.1.2 Coeficiente de escurrimiento estimado (C_{cc})

Para el cálculo del C_{cc} se debe de considerar el cambio de uso de suelo en un periodo mínimo de 30 años. En base a este se calcula el parámetro adimensional K_{cc} (estimado) y con ello se determina el C_{cc} utilizando las ecuaciones 9 o 10 de este capítulo.

3.2.2.3.1.2 Volumen de Escurrimiento Superficial Histórico (VES_H).

El VES_H se determina en base al apartado 3.2.2.1.1.2.1 Disponibilidad anual de agua superficial de este capítulo para un periodo de 30 años como mínimo.

3.2.2.3.2 Índice de Población (*IP*)

El índice de población se calcula en base a la tasa de crecimiento anual municipal tomando como periodo de referencia 2000-2010 o actual (INEGI, 2017b; INEGI, 2017c). Tomando como referencia la tasa de crecimiento se proyecta el aumento o disminución, según sea el caso, de la población al año que se requiera evaluar para calcular el *IP*. Esta variable, por su condición de porcentaje, no se requiere normalizar.

3.2.2.3.3 Índice de Marginación Social (*IM*).

El índice de marginación social por municipio se estima con base en los resultados del Consejo Nacional de Población (CONAPO) el cual considera nueve componentes: Grado de analfabetismo, Educación primaria terminada, Drenaje sanitario, Acceso a energía eléctrica, Servicio de agua potable, Nivel de hacinamiento, Porcentaje de viviendas con piso de tierra, Localidades con población menor a 5 mil habitantes e ingreso económico (CONAPO, 2015). Es necesario normalizar este índice, lo que se realiza conforme a la ecuación 12.

3.2.2.3.4 Grado de Explotación de Acuíferos (*IA*)

De acuerdo con la metodología para este índice son considerados los acuíferos subexplotados y sobreexplotados. Los primeros tendrán un valor de 1 y los segundos de 0. Esta clasificación se efectúa conforme a la información oficial disponible (CONAGUA, 2018).

3.2.2.3.5 Clasificación del *ISHM_k*

La clasificación de acuerdo a la metodología de Rivas et al. (2010) y Rivas-Acota & Montero (2013; 2014) es la siguiente:

VHG	
Grado	Valores
Muy Baja	$0.00 < VHG \leq 0.07$
Baja	$0.07 < VHG \leq 0.14$

Media	$0.14 < VHG \leq 0.21$
Alta	$0.21 < VHG \leq 0.28$
Muy Alta	$0.28 < VHG \leq 0.36$

Tabla 20 Clasificación del índice de VHG. Elaboración propia de acuerdo con Rivas & Montero (2013; 2014).

Esto valores se normalizan conforme a la ecuación 12, y con base en la ecuación 17 se propone la siguiente clasificación:

<i>ISHM_k</i>	
Grado	Valores
Muy Baja	$ISHM_k > 0.81$
Baja	$0.61 < ISHM_k \leq 0.81$
Media	$0.42 < ISHM_k \leq 0.61$
Alta	$0.22 < ISHM_k \leq 0.42$
Muy Alta	$ISHM_k \leq 0.22$

Tabla 21 Clasificación normalizada del *ISHM_{VGH}*. Elaboración propia

3.2.3 RESUMEN DE LA PROPUESTA DEL *ISHM*

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los componentes e indicadores propuestos para la creación del *ISHM*.

PROPUESTA INDICE DE SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO (ISHM)			
COMPONENTES		ECUACIONES	
$ISHM = \left[\prod_{m=1}^M ISHM_{i-k} \right]^{1/M}$	CANTIDAD	$ISHM_i = ISHM_{WSI} * W_a + ISHM_{Idas} * W_b$	$ISHM_{WSI} = \frac{W_i}{WA_i - EWR_i}$ $ISHM_{Idas} = \frac{D_{ma}}{R - D_{nr}}$
	CALIDAD	$ISHM_j = ISHM_{ICA}$	$ISHM_{ICA} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$
	VULNERABILIDAD	$ISHM_k = 1 - ISHM_{VHG}$	$ISHM_{VHG} = 1 - IE_{oc} * W_g + IP * W_p + IM * W_M + IA * W_A$

Tabla 22 Componentes e indicadores para la construcción del *ISHM*

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL *ISHM*: CUENCA DEL RÍO CONCHOS

En este capítulo se presenta la implementación de la metodología establecida en el capítulo anterior del *ISHM* en la cuenca del río Conchos. De inicio se da una descripción detallada de la zona de estudio: ubicación, clima, recurso hídrico y tratados internacionales. En la segunda parte se presenta el cálculo, análisis y discusión de los resultados por subcuenca del Índice de Escasez de Agua ($ISHM_{WSI}$) y el Índice de Disponibilidad de Agua Subterránea ($ISHM_{Idas}$), los cuales conforman el componente de Cantidad ($ISHM_i$). En la tercera parte, se muestran las consideraciones establecidas en esta investigación para el cálculo del Índice de Calidad de Agua ($ISHM_{ICA}$) el cual es igual al componente de Calidad ($ISHM_j$); en esta sección se presenta el análisis y discusión de resultados por subcuenca de este componente. En la cuarta

parte se presenta el cálculo, análisis y discusión de resultados por subcuenca del Índice de Vulnerabilidad Hídrica (*ISHM_k*).

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1.1 CUENCA DEL RÍO CONCHOS

La cuenca del Río Conchos está localizada en el norte de México y es parte de la Región Hidrológica no. 24 (RH-24). Es el afluente más importante de la RH, desemboca en el río Bravo en Ojinaga, el cual sigue su curso en dirección este/noroeste hasta desembocar en el Golfo de México. El río Conchos nace en la parte Este en la Sierra Madre Occidental, la cual se denomina Sierra Tarahumara, a más de 2600 msnm. Los principales afluentes del río Conchos son los ríos Nonoava, Balleza, Florido, Parral, San Pedro, Satevó, Santa Isabel, Chuvíscar y Sacramento. Los acuíferos más importantes por su aspecto económico y social que se interrelacionan con el cauce principal o sus afluentes son el acuífero Jiménez - Camargo, Meoqui-Delicias, Alto Río San Pedro, Chihuahua-Sacramento y Bajo río Conchos. Las presas de mayor capacidad dentro de la cuenca son La Boquilla (Lago Toronto), Fco. I Madero (Las Vírgenes), Luis L. León (El Granero) y Federalismo Mexicano (San Gabriel) (Kelly, 2001; Ingol-Blanco & McKinney, 2011; CONAGUA, 2011; CONAGUA, 2019d).

La cuenca se encuentra ubicada dentro del estado de Chihuahua (93.1%) y un pequeño porcentaje en el estado de Durango (6.9%), representando casi el 30 % de la RH (CONAGUA, 2019c; CONAGUA, 2019d). Cuenta con un área de drenaje de 66,682 km² y se estima que la longitud de cauce principal es de 750 km. La integran las subcuencas: Río Conchos – Presa de la Colina, Río Florido, Río San Pedro, Río Conchos – Presa el Granero, Río Conchos – Ojinaga. De acuerdo con la división oficial de la CONAGUA (2011) estas cuencas se dividen en 11 subcuencas (ver Figura 18), pero para efectos de esta investigación

se agruparon subcuencas principales con subcuencas pequeñas, estableciendo 7 subcuencas distribuidas como se muestra en la Figura 19.

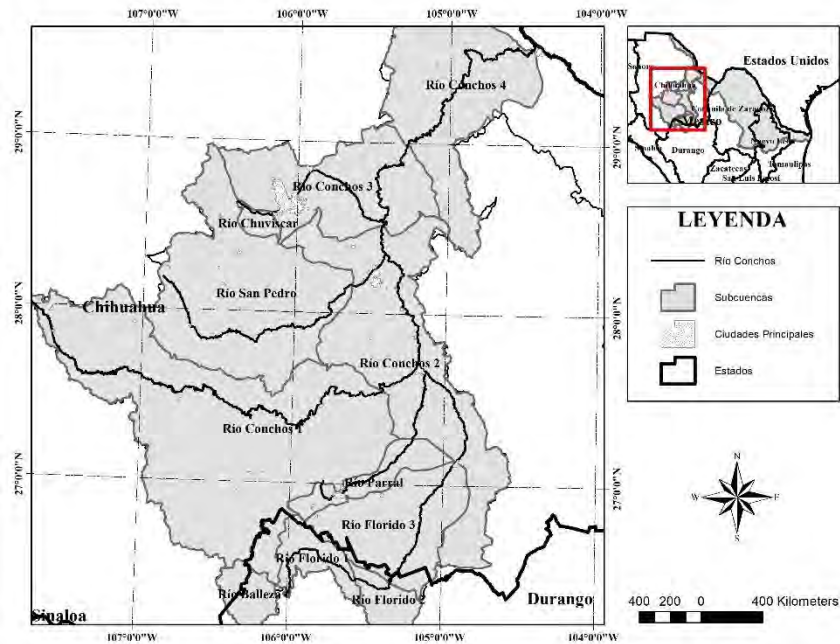


Fig.18 División oficial de las subcuencas de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2011).

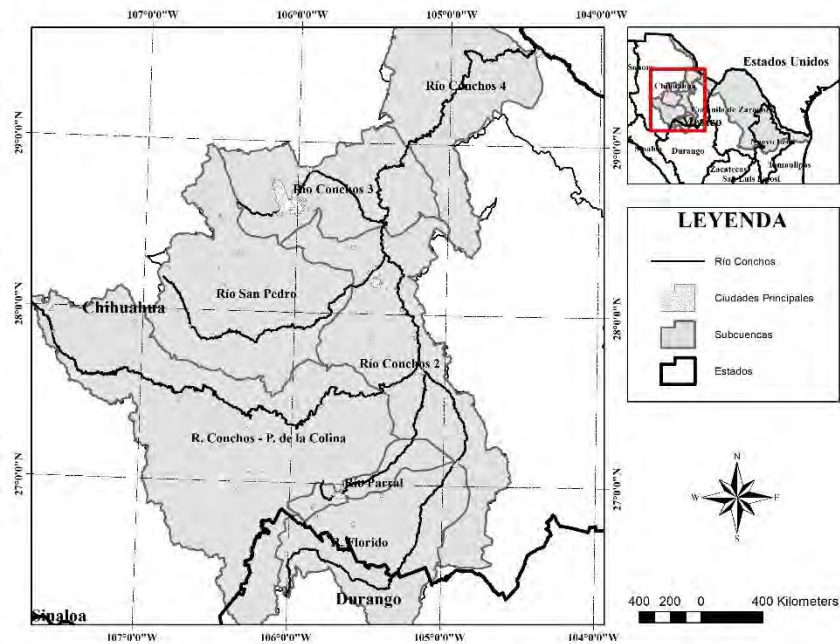


Fig. 19 Subcuencas agrupadas de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2011).

Esta cuenca se caracteriza por su clima desértico y seco, especialmente en la cuenca media y baja. Por su parte, en la zona alta predomina el clima cálido y semihúmedo con lluvias estacionales durante el año. Las temperaturas máximas ocurren en el verano (de junio a agosto) y las mínimas en invierno (de noviembre a febrero). En toda la cuenca la temperatura media anual es de 17.5 °C; existe una variación de la temperatura máxima anual que va desde los 35 °C en la cuenca baja, pasando por 27 °C en la cuenca media, hasta los a 20 °C en la cuenca alta. Con respecto a las temperaturas mínimas existe una variación desde los 15 °C en la parte más baja hasta los 5 °C en las demás regiones (IMTA, 2009). La precipitación es variable en toda la cuenca, desde 700 mm en promedio anual en la cuenca alta, 500 mm en la parte media y hasta 260 mm en la cuenca baja (CONAGUA, 2019b).

4.1.2 RECURSO HÍDRICO

4.1.3.1 Clasificación de los usos de agua

El agua en la cuenca del río Conchos se maneja de acuerdo con la legislación mexicana y los tratados internacionales establecidos, tomando como base los derechos y exigencias de cada usuario con respecto a esta, considerando la disponibilidad del recurso en los embalses principales dentro de ella. Los volúmenes concesionados o concedidos a los usuarios de aguas nacionales en los organismos de cuenca se encuentran en el REPDA. Este registro tiene una clasificación del agua según su uso, sin embargo, CONAGUA ha empleado el término *uso agrupado* para integrar en una sola clasificación varios rubros establecidos en el REPDA, diferenciando si es uso consuntivo o no.

El uso consuntivo quedó clasificado de la siguiente manera: agrícola, abastecimiento público e industria autoabastecida. Para el uso no consuntivo estaba establecido una sola agrupación: generación de energía (Hidroeléctricas), pero, en 2014 se agregó un nuevo rubro no

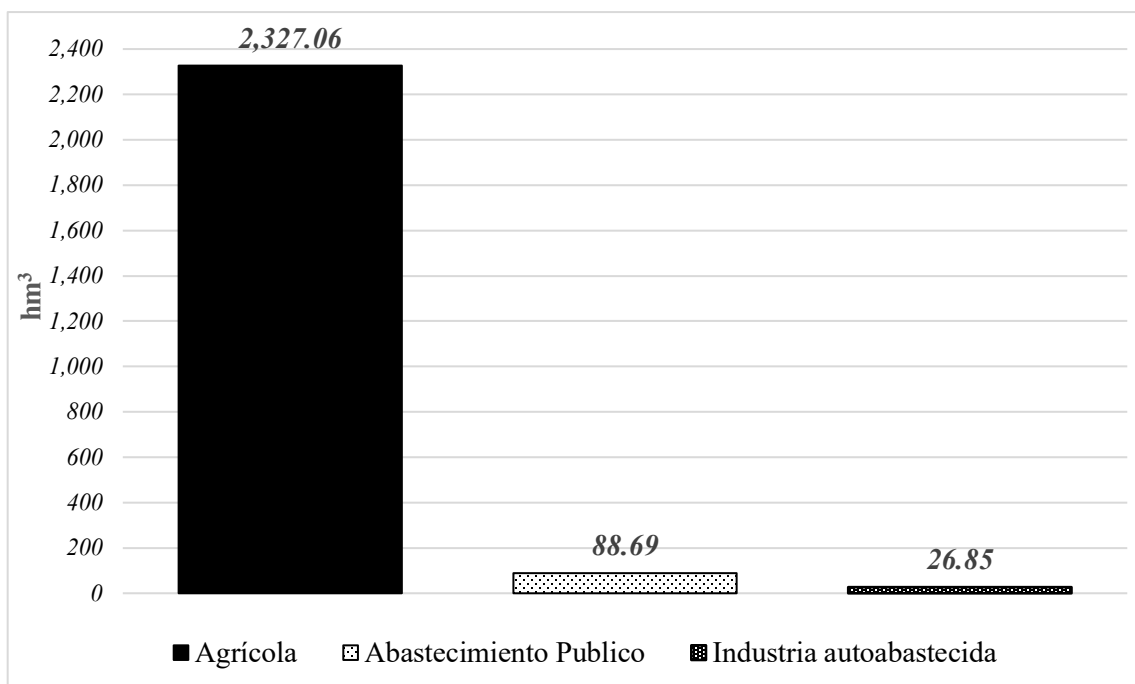
consuntivo llamado: uso de conservación ecológica, con un volumen concesionado de 9.46 hm³/año (CONAGUA, 2015).

4.1.3.2 Aprovechamiento del Recurso Hídrico

De acuerdo con CONAGUA (2011) en la cuenca del río Conchos el volumen concesionado para uso consuntivo destinado para abastecer todas sus necesidades es de 2,442.60 hectómetros cúbicos⁹ al año (hm³/año). De esta cantidad de agua un 95.3% (2,327.06 hm³/año) es para uso agrícola, el cual supera el porcentaje nacional que se estima está cerca de un 68% (CONAGUA, 2017a); el 4.7% (115.54 hm³/año), el volumen restante se destina a abastecimiento público-urbano (3.6%) e industria autoabastecida (1.1%).

Con referencia a fuentes de abastecimiento para uso consuntivo, CONAGUA (2011) reporta que 1,833.72 hm³/año (75.07%) provienen de fuentes superficiales y solo 608.87 hm³/año (24.93%) proviene de fuentes subterráneas que abastecen esta región. En la Gráfica 6 se muestran los volúmenes concesionados por uso agrupado en la cuenca del río Conchos; en la Tabla 23 se muestran las fuentes de abastecimiento por uso consuntivo y los porcentajes que representan para toda esta región.

⁹ **Hm**³ = 1,000,000 m³ (Un millón de metros cúbicos).



Gráfica 6 Volúmenes concesionado para la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2011).

USO CONSUNTIVO DEL AGUA (hm³)				
Uso	Superficial	Subterránea	Total	%
Agrícola	1,798.40	528.66	2,327.06	95.27%
Abastecimiento Publico	32.42	56.27	88.69	3.63%
Industria autoabastecida	2.90	23.95	26.85	1.10%
Totales	1,833.72	608.87	2,442.60	100.00%

Tabla 23 Fuentes de abastecimiento de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información del CONAGUA (2011).

CONAGUA (2011) reporta que el volumen de agua concesionado para generación de energía

El uso no consuntivo es de 1701.13 hm³/año, el cual está dividido es las hidroeléctricas: La Boquilla (713.61 hm hm³/año), Fco. I Madero (245.79 hm³/año) y La Colina (741.73 hm³/año).

Teniendo en consideración lo anterior, se hace evidente la falta de equidad en los volúmenes distribuidos en la cuenca, resaltando así, la importancia de contar con instrumentos para

evaluar y administrar el agua de manera más eficiente para los rubros donde se destina un bajo porcentaje del recurso.

4.1.3.3 Situación del Recurso Hídrico

La presión hídrica en la región donde se encuentra el río Conchos ha aumentado de manera muy rápida en los últimos años, en el 2003 el grado de presión¹⁰ en la RH era del 50% aproximadamente (CONAGUA, 2003); Para el 2018 el grado de presión se incrementó a un poco más de 77% (CONAGUA, 2018). Tomando como base este indicador, los planes actuales de manejo o planes de gestión del agua en esta zona del país no responden a las expectativas de aprovechamiento para los distintos usuarios del recurso, el medio ambiente y sus responsabilidades internacionales.

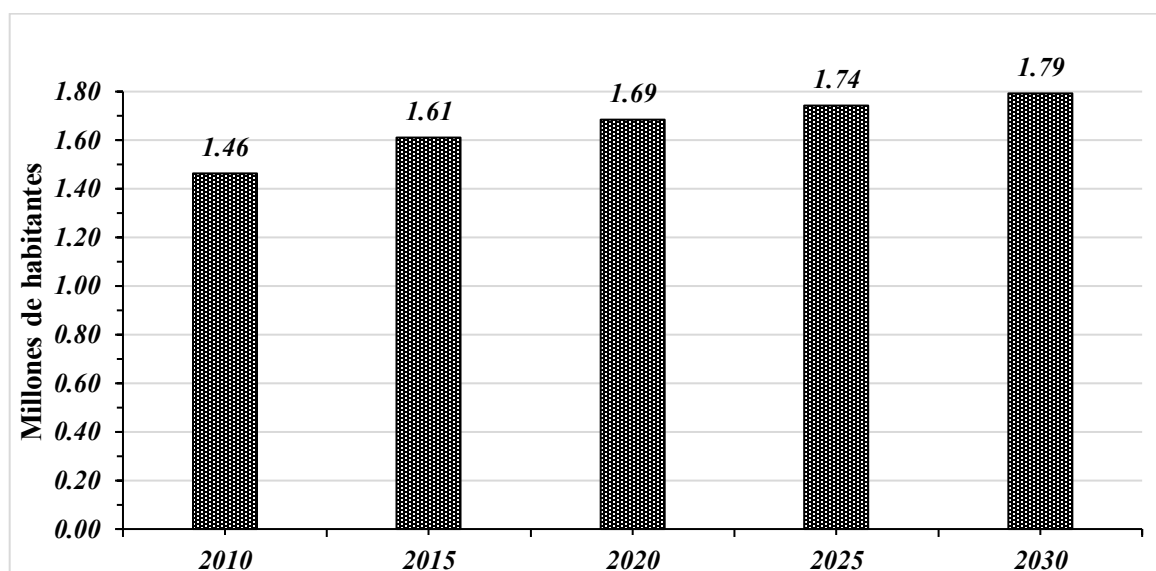
De acuerdo con evaluaciones de la CONAGUA (2016b) cada una de las subcuencas que conforman la región tiene un déficit hídrico ya que no cuentan con disponibilidad de agua. Todo esto como consecuencia del incremento poblacional, el aumento de la demanda de agua para irrigación, una creciente urbanización, la contaminación de cuerpos de agua, cambio climático y la sobreexplotación de acuíferos, que han estado afectando la disponibilidad de agua en esta región del país, así como la asignación de concesiones para todos estos usos. Para una evaluación de la seguridad hídrica es fundamental un análisis de cada uno de estos tópicos, los cuales se describen a continuación.

4.1.3.3.1 Incremento poblacional y aumento en la demanda de alimento.

La cuenca del río Conchos tenía 1.28 millones de habitantes según el XII censo de población y vivienda del año 2000 (INEGI, 2017c). Para el año 2010, la población en la región alcanzó 1.46 millones de habitantes de acuerdo al censo de población y vivienda de ese año, esta

¹⁰**Grado de presión** = Volumen total de agua concesionado/Volumen de agua renovable.

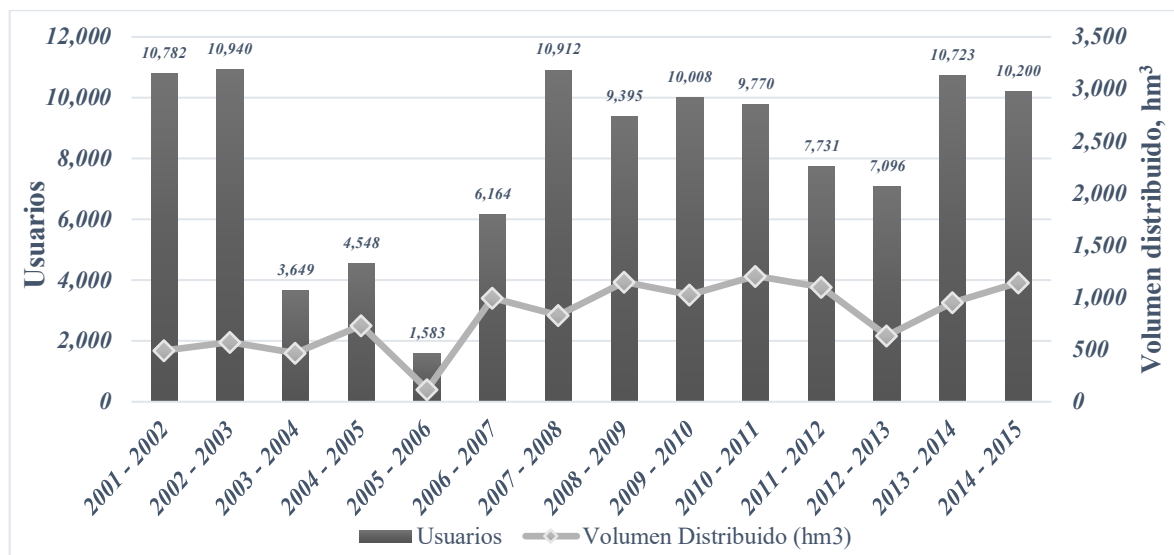
dinámica de crecimiento arrojó una tasa de 14.4 % en todo el periodo (INEGI, 2017b); De acuerdo a la CONAPO, para el año 2030 se proyecta que habrá 1.79 millones de habitantes en la región (CONAPO, 2017a). En la gráfica 7 se muestra la dinámica de población quinquenal de la cuenca de río Conchos en el periodo 2010-2030. Con estas cifras se percibe claramente que en un futuro cercano se va a necesitar más agua tanto para el uso urbano como para el uso agrícola para producir alimentos y así cubrir la demanda de la población.



Gráfica 7 Dinámica de población de la cuenca del río Conchos del periodo 2010-2030. Elaboración propia con datos de CONAPO (2017a).

Un ejemplo claro son los volúmenes de agua distribuidos a los usuarios de los distritos de riego (DR) asentados en la cuenca, ya que pasaron de 733.73 hm³ distribuidos en 2005 a 1,153.58 hm³ en 2015. Actualmente se requiere un poco más del 55% más de agua para irrigación. Este aumento se debe a varios factores, resaltando los siguientes: 1) el aumento de la superficie física regada en un 96%, pasando de 37,952 ha a 74,484 ha y 2) el aumento de los usuarios en la región en un 126%, pasando de 4,548 a 10,200 usuarios en el mismo

periodo (CONAGUA, 2016c). En la gráfica 8 se muestra los usuarios y los volúmenes distribuidos en el periodo arriba mencionado.



Gráfica 8 Usuarios y volúmenes distribuidos a los DR asentados en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con datos del CONAGUA (2016c).

Como se mencionó, el sector agrícola está irrigando un poco más de 70,000 ha que se encuentran distribuidas en los 4 distritos de riego ubicados en la cuenca (CONAGUA, 2016c); cabe mencionar que del año 2005 al año 2015 se regaron más de 55,700 ha en promedio cada año teniendo una productividad física del agua¹¹ de 1.52 kilogramos por metro cúbico de cultivo (kg/m^3) por año, esta cifra está por debajo del promedio nacional de 1.60 kg/m^3 en ese periodo (CONAGUA, 2018a); además se ha observado una alta variabilidad de precipitación que caracteriza a la cuenca y periodos prolongados de sequías (Ortega-Gaucin, 2013).

¹¹Productividad física del agua = Producción agrícola (gr) /Volumen de agua empleado en el riego (m^3) (CONAGUA, 2018a). Salazar et. al. la denominan “eficiencia en el uso del agua” Fuente especificada no válida.

4.1.3.3.2 Creciente Urbanización

La distribución de la población en la cuenca del río Conchos es predominantemente urbana¹², con un 99.33% del total de la población asentada en estas zonas (INEGI, 2017c). La población se centraliza mayormente en cinco municipios: Camargo, Chihuahua, Delicias, Hidalgo del Parral y Meoqui, representando un poco más del 79% de la población total de la región (INEGI, 2017b). Se prevé que la población urbana siga predominando en esta región del país en el futuro, de acuerdo con la proyección de la población urbana y rural de la cuenca. Los retos relacionados con el abastecimiento y saneamiento de estas zonas metropolitanas serán enormes, ya que se requerirá de un uso sumamente eficiente del agua para hacer frente a esta concentración de personas; además será necesario tomar medidas de conservación del medio ambiente, las cuales son necesarias para salvaguardar las fuentes de abastecimiento.

4.1.3.3.3 Contaminación de los cuerpos de agua

De acuerdo con CONAGUA (2016b) las descargas de aguas residuales se clasifican en dos categorías: municipales e industriales. La primera categoría tiene que ver con todas las aguas residuales manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales: urbanos y rurales, mientras que la segunda, son las aguas residuales vertidas por locales que efectúan actividades comerciales e industriales.

Tomando en consideración las aguas municipales en la cuenca del río Conchos, estas generan 116.9 hm³/año de los cuales el 92.9% (108.6 hm³/año) son colectados y canalizados a las plantas de tratamiento. El 7.1 % restante, que equivale a 8.3 hm³/año, son vertidos directamente a los cuerpos de agua de la región. De los 108.6 hm³/año que llegan a las 88 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en operación en toda la región, el 85.6%

¹²De acuerdo con INEGI (2017c) se refiere a localidades donde habitan más de 2,500 personas.

(92.9 hm³/año) es tratado y el 14.4% correspondiente a 15.7 hm³/año es vertido al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento, por la falta de capacidad de las PTARs. (CONAGUA, 2017d).

Este volumen no recolectado ni tratado es un poco más del 22% (24 hm³/año) del total de agua residual, la cual es vertida anualmente sin ningún tipo de tratamiento a ríos, arroyos y lagos de la cuenca, contaminando y generando un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, así como afectando la disponibilidad del recurso teniendo una calidad inadecuada para los diferentes usos consuntivos.

Otros factores que agravan la situación son las descargas clandestinas no contabilizadas, la falta de normatividad y legislación adecuada para las descargas a cuerpos de agua ya que es muy laxa, la inexistente cultura de reutilización de agua tratada, la falta de educación ambiental dentro de la sociedad, las plantas de tratamiento que operan de manera ineficiente o que no están operando y la contaminación difusa, entre otras (CONAGUA, 2012). En conclusión, se debe incluir la calidad del agua como un factor muy importante en la oferta hídrica actual y futura, así como considerar el manejo y control de la contaminación como un componente en la gestión y administración del recurso hídrico (FAO, 2013).

4.1.3.3.4 Impactos del Cambio Climático

La anomalía de temperatura media esperada para la región donde se ubica la cuenca del río Conchos para el año 2030 bajo el escenario SRES-A2 es entre +1.20 y +1.44 °C (Figura 20). Para finales de siglo, bajo el mismo escenario, se espera un aumento de temperatura media de entre 4 y 5 °C (Montero-Martínez, Martínez-Jiménez, Castillo-Pérez, & Espinoza-Tamarindo, 2010).

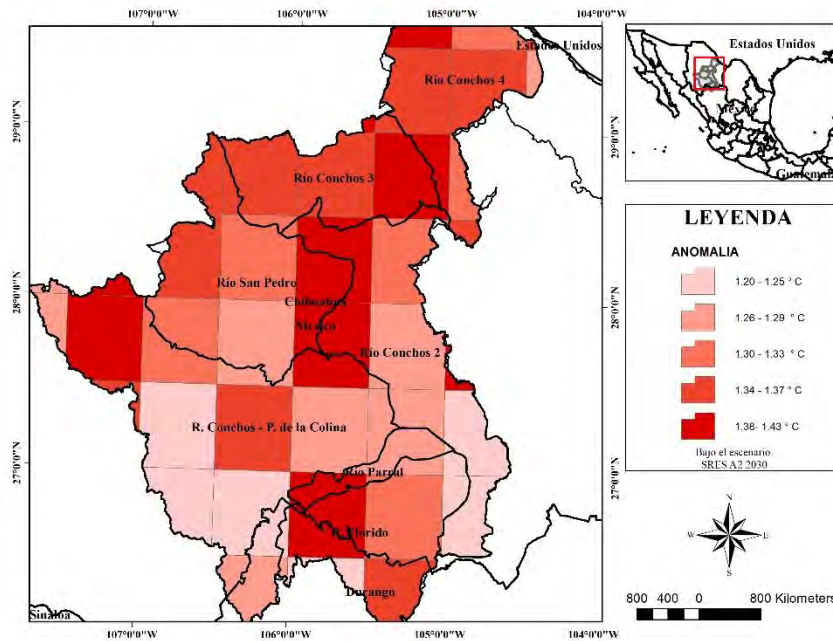


Fig.20 Anomalía de la temperatura para el año 2030 bajo el escenario SRES-A2. Elaboración propia con información de Montero et al. (2010).

El impacto esperado por el Cambio Climático en la precipitación, considerando como base el promedio de la lluvia histórica de 1961-1990 en esta misma región, y bajo el mismo escenario, es de entre -7 y -14% para el año 2030 y de entre -13 y -21% para finales de siglo, lo que cual podría reflejar una disminución del escurrimiento de 15% para el año 2030 y de 24% para el año 2100 (Rivas-Acosta & Montero-Martínez, Downscaling technique to estimate hydrologic vulnerability to climate change: and application to the Conchos Rives basin, Mexico, 2013).

4.1.3.3.5 Sobreexplotación de acuíferos

Dentro de la cuenca del rio Conchos se encuentran 17 acuíferos. De acuerdo con CONAGUA (2018b) 11 de ellos cuentan con disponibilidad de agua y los 6 restantes no la tienen (Figura 21).

Dentro de los acuíferos sin disponibilidad, tres de ellos (830-Chihuahua-Sacramento, 831-Meoqui-Delicias, 832-Jiménez-Camargo) están siendo sobreexplotados¹³ desmedidamente. El volumen de recarga regional media anual de todos los acuíferos dentro de la cuenca es 1,543.20 hm³ y el volumen de extracción concesionado es de 1,000.71 hm³, siendo su índice de explotación¹⁴ de 0.65 (CONAGUA, 2018b).

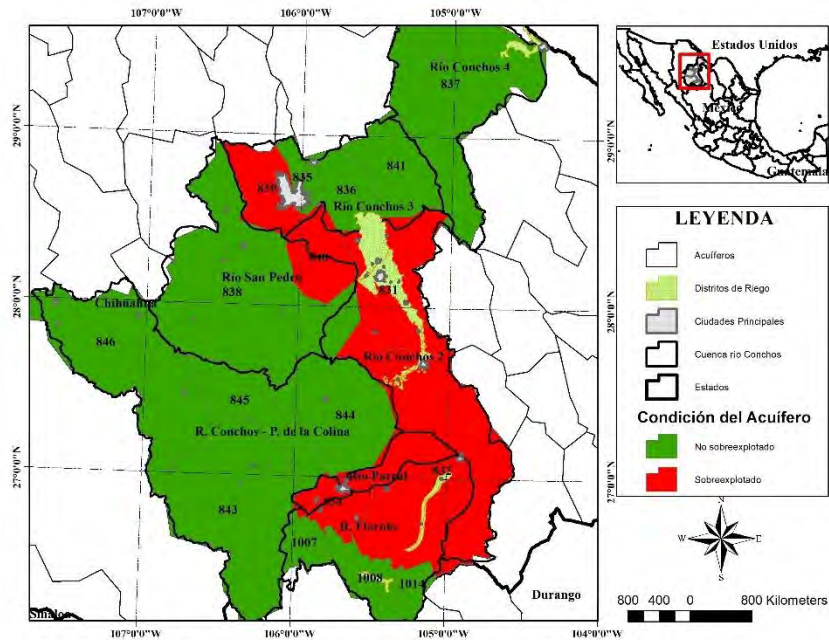


Fig.21 Condición de acuíferos en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018b).

4.1.3.3.6 Disponibilidad en subcuencas

De acuerdo con CONAGUA (2016) el déficit hídrico de agua superficial en esta importante región del país ya es una realidad, ya que cada una de las subcuencas que conforman la región no cuentan con disponibilidad de agua en la actualidad (Figura 22). Este déficit es sin considerar en un futuro cercano cada uno de los tópicos que se describieron anteriormente.

¹³De acuerdo con los resultados de los estudios recientes, se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo, en función de la relación extracción/recarga (CONAGUA, 2016c).

¹⁴**Índice de explotación** = Volumen de extracción concesionado / Volumen de recarga.

Por ello se observa que se necesitan instrumentos eficientes de evaluación del recurso hídrico en la cuenca, para determinar la seguridad hídrica en la cuenca más importante de la RH-24.

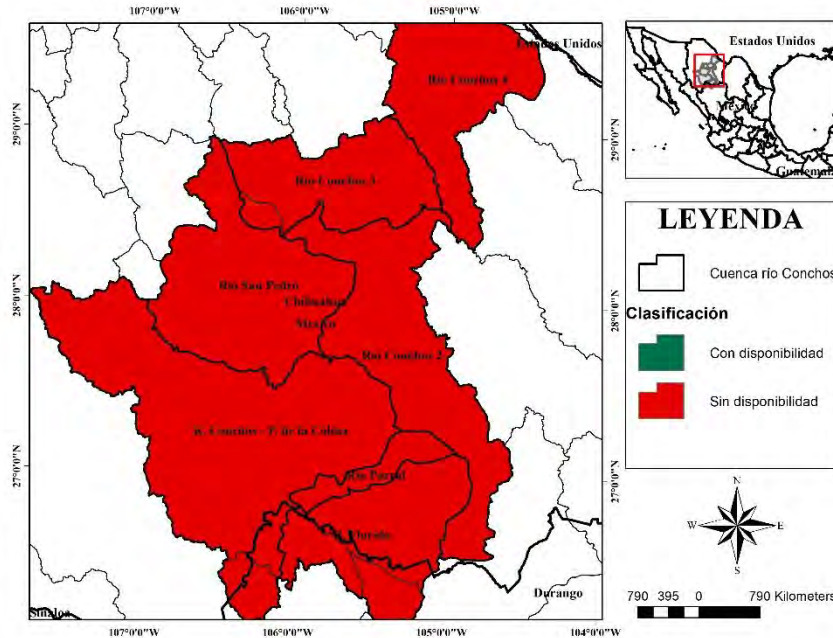


Fig.22 Disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2016).

4.1.3 TRATADOS INTERNACIONALES

Los límites de las cuencas hidrológicas en muy pocas ocasiones concuerdan con las fronteras políticas y los límites de los países, lo que hace que la política exterior intervenga en el manejo del agua entre dos o más naciones. La manera tan diferente de ver la distribución, asignación y uso del agua han sido una fuente de fuertes tensiones y problemas a lo largo de los años entre los países involucrados (Cooley & Geick, 2011). Dentro de las 310 cuencas de ríos internacionales está asentada el 52% de la población mundial, lo cual representa casi la mitad de la superficie terrestre del planeta (McCracken & Wolf, 2019).

Sólo en Norteamérica existen 49 cuencas transfronterizas representando más del 35% del área en el continente (Wolf, 2002; McCracken & Wolf, 2019). México comparte ocho cuencas con sus países vecinos las cuales representan el 21% del área total (CONAGUA, 2018; McCracken & Wolf, 2019). La cuenca del río Bravo, donde se encuentra el río Conchos, es una de estas cuencas transfronterizas que comparte con Estados Unidos. Teniendo como base lo anterior, la parte mexicana de la cuenca tiene comprometidos una parte de sus escurrimientos con el país vecino por un común acuerdo establecido en el Tratado de Aguas de 1944 (CILA, 1944).

Los tratados binacionales referentes al agua entre México y Estados Unidos son dos: La Convención para la equitativa distribución de las aguas del río Grande de 1906 (Tratado del agua para el valle de Juárez) y el Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América de 1944, y conforme al segundo es que está comprometida el agua de la cuenca del río Bravo/Grande. El tratado de 1944 es el que tiene más relevancia, ya que conforme a lo establecido en el acuerdo México recibiría 1,850.23 hm³ al año de agua proveniente de los Estados Unidos asignados a la cuenca del río Colorado y, Estados Unidos recibiría un tercio de agua que llegue al río Bravo (431.7 hm³/año) procedentes de los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo las Vacas.

Esta última cantidad de agua entregada por México establecida en el tratado, no podrá ser menor a 2,158.5 hm³ en ciclos de 5 años consecutivos; así el tratado establece “*en caso de extraordinaria sequía o serio accidente de los sistemas hidráulicos los faltantes que existieran al final del ciclo de cinco años, se repondrán en ciclo siguiente con agua procedente de los mismos tributarios*” (CILA, 1944). El cumplimiento de este convenio internacional se ha visto afectado por las sequías que han azotado a México en años recientes

(CILA, 1995). Este fenómeno provocó una falta de entregas de agua a Estados Unidos en casi un ciclo completo, provocando con ello intensas negociaciones binacionales para lograr una solución cooperativa ante esta crisis (Mártinez-Austria, Derbez, & Giner, 2013).

4.2 CÁLCULO DEL ISHM_i

4.2.1 ÍNDICE DE ESCASEZ DE AGUA (ISHM_{WSI})

4.2.1.1 Demanda de agua anual (W_i)

De la base de datos *Otorgamiento de concesiones, asignaciones y permisos para el uso, explotación y/o aprovechamiento de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes* de la CONAGUA (2018d) se obtuvieron los títulos, volumen de extracción, afluente y ubicaciones geográficas (latitud y longitud) de los aprovechamientos superficiales y subterráneos ubicados en la cuenca del río Conchos. Con la ubicación geográfica y con ayuda del programa *ArcMap 10.4* se proyectaron estas concesiones dentro de un SIG, además de que se creó una capa o archivo .shp. (Figura 23 y 24).

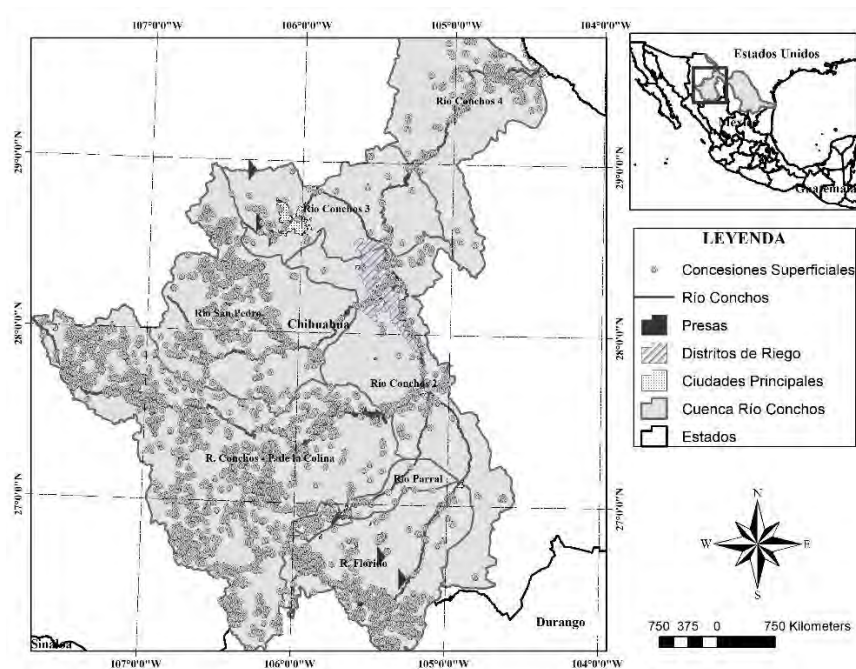


Fig.23 Aprovechamientos superficiales de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018d).

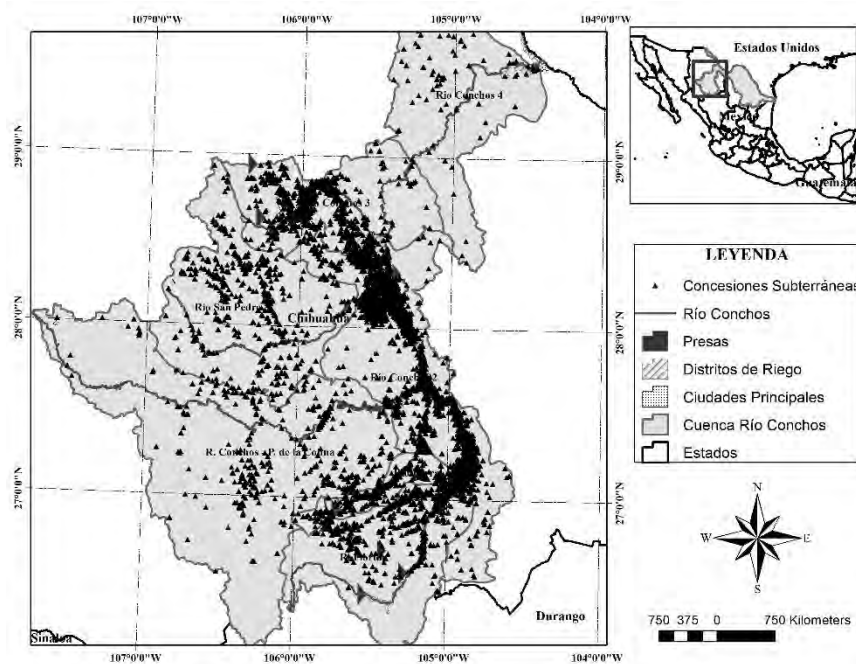


Fig.24 Aprovechamientos subterráneos de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018d).

Tomando como base esta capa, se ubicaron las concesiones dentro de cada una de las subcuencas que conforma la cuenca del río Conchos. En la **Apéndice A.5** se muestran las ubicaciones de las concesiones en cada una de las subcuencas.

Una vez ubicados los aprovechamientos se realizó una base de datos específica para cada subcuenca la cual contiene la siguiente información para los aprovechamientos superficiales: título, nombre de la región hidrológica, nombre de la cuenca, volumen concesionado, afluente, latitud, longitud, entre otros. Los aprovechamientos subterráneos, por su parte contienen la siguiente información: título, volumen concesionado, clave del acuífero, nombre del acuífero, latitud y longitud.

De las bases de datos realizadas, se obtuvo el volumen total de aprovechamiento por cada subcuenca (W_i). En la Tabla 24 se muestra el volumen concesionado por fuente de aprovechamiento.

Sub Cuenca	Fuente, hm ³		W_i , hm ³
	Superficial	Subterráneo	
R. Conchos - P. de la Colina	41.61	13.26	54.87
Río Parral	9.91	30.49	40.40
Río Florido	61.97	80.57	142.53
San Pedro	266.90	20.65	287.55
Conchos 2	183.84	166.58	350.43
Conchos 3	34.95	122.64	157.59
Conchos 4	89.54	16.25	105.78
$\Sigma=$	688.71	450.43	1,139.14

Tabla 24 Volumen concesionado de cada una de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información del CONAGUA (2018d).

4.2.1.2 Disponibilidad anual de agua (WA_i)

4.2.1.2.1 Superficial.

Para determinar el Volumen Medio Anual de Escurrimiento Natural ($VMAEN$) se utiliza la ecuación 7:

$$VMAEN = P_i * A_i * C_e$$

Para las series de tiempo de precipitación se consideró el periodo 1981-2015. En el Apéndice A.6 se muestran las series de tiempo y hietogramas anuales de cada una de las subcuencas. En la Tabla 25 se muestra la precipitación media anual en cada una de las subcuencas en el periodo arriba mencionado.

Sub Cuenca	Precipitación, mm
R. Conchos-P. de la Colina	528.34
Río Parral	410.77
Río Florido	390.00
Río San Pedro	383.31
R. Conchos 2	294.90
R. Conchos 3	322.04
R. Conchos 4	293.63
$\Sigma=$	2,622.99

Tabla 25 Precipitación media anual en el periodo 1981-2015 de las subcuencas del río Conchos. Elaboración propia con información de SERVIRGLOBAL (2018).

Las áreas de las cuencas se calcularon en base a la capa *Shapefile*: cuencas hidrológicas de la CONAGUA (2016). La Figura 25 muestra las áreas de cada una de las subcuencas.

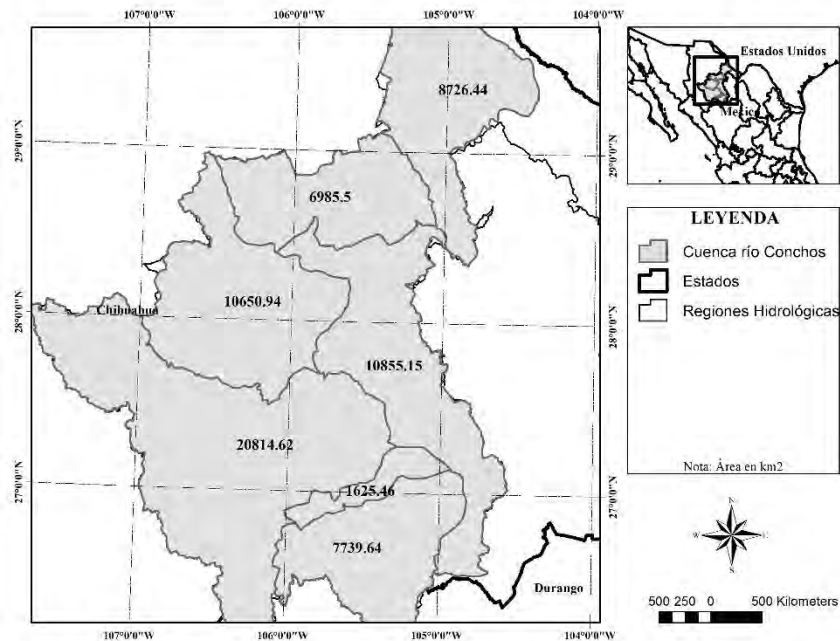


Fig. 25 Áreas de las subcuencas que conforman la cuenca del río Conchos. Elaboración propia tomando como base información de CONAGUA (2016).

En la Figura 26 se muestra el mapa de Uso de Suelo y Vegetación. El mapa de Tipo de Suelo se muestra en la Figura 27. Estos mapas se utilizaron para calcular el parámetro adimensional K y con el ello determinar el C_e para cada una de las subcuencas.

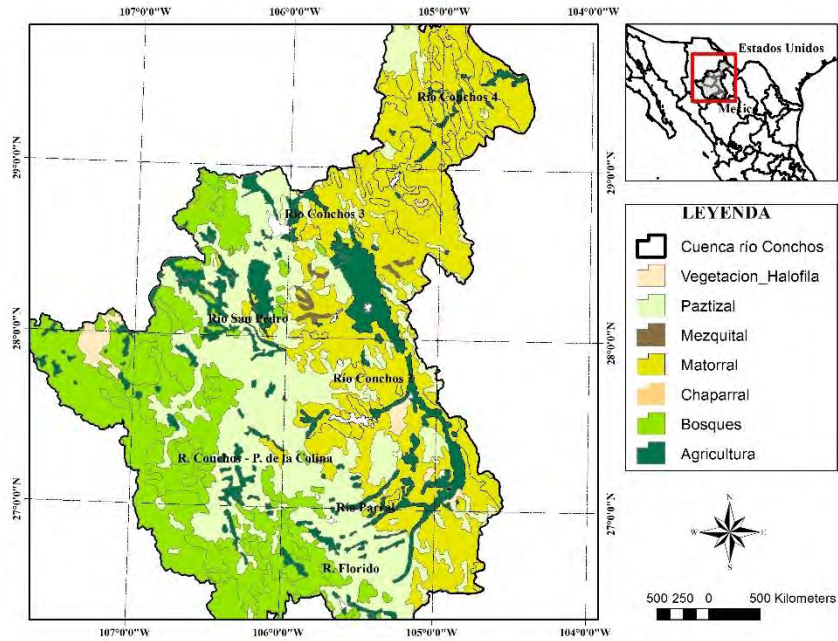


Fig. 26 Usos de suelo en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de INEGI (2014).

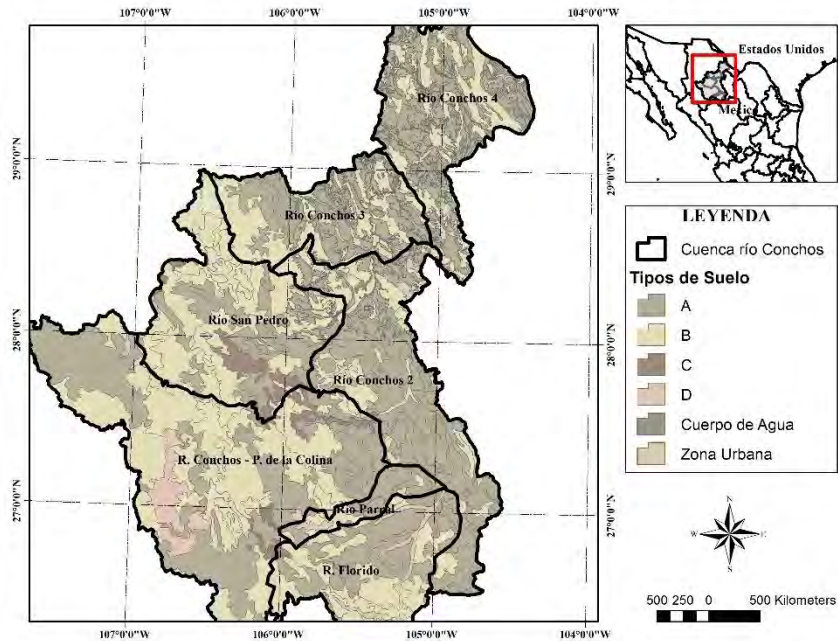


Fig. 27 Tipos de suelo en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de INEGI (2013).

En la Tabla 26 se muestran los C_e calculados para cada una de las subcuencas.

Sub Cuenca	C_e
R. Conchos-P. de la Colina	0.097
Río Parral	0.087
Río Florido	0.085
Río San Pedro	0.075
R. Conchos 2	0.092
R. Conchos 3	0.049
R. Conchos 4	0.059
Promedio=	0.078

Tabla 26 Coeficiente de escurrimiento (C_e) calculados para las subcuencas del río Conchos. *Elaboración propia.*

Una vez determinadas las tres variables que intervienen en *VMAEN*, se calcula el escurrimiento natural por subcuenca conforme a la ecuación (7). En la Tabla 27 se muestran los resultados obtenidos. En la **Apéndice A.7** se muestran los hidrogramas del *VMAEN* del periodo 1981 - 2015 por subcuenca.

Sub Cuenca	VMAEN, Hm³
R. Conchos-P. de la Colina	1,090.37
Río Parral	60.09
Río Florido	265.90
Río San Pedro	314.14
R. Conchos 2	304.12
R. Conchos 3	116.38
R. Conchos 4	157.16
$\Sigma=$	2,308.15

Tabla 27 *VMAEN* calculado para cada una de las subcuencas del río Conchos. *Elaboración propia.*

4.2.1.2.2 Subterránea.

De acuerdo con los estudios recientes los cuales dieron lugar a las *Actualizaciones de la disponibilidad media anual de agua subterránea* publicadas en el DOF por parte de la

CONAGUA (2018b), se analizó la disponibilidad para cada una de las subcuencas de la cuenca del río Conchos. En la Figura 28 se presenta la ubicación de los acuíferos en cada una de las subcuencas. En la Tabla 28 se muestra la disponibilidad de agua subterránea por subcuenca.

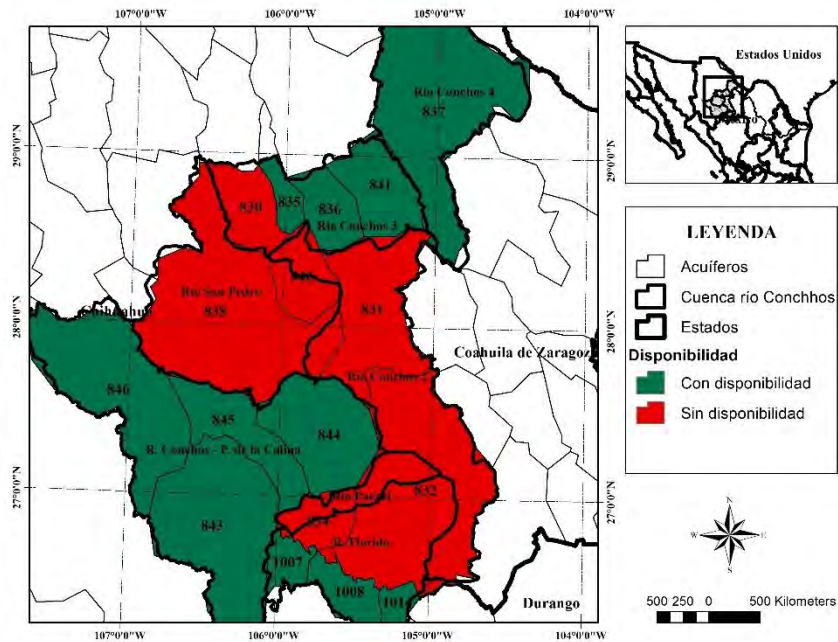


Fig.28 Acuíferos dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018c).

Subcuenca	hm ³	Disponibilidad
R. Conchos - P. de la Colina	146.51	Con Disponibilidad
R. Parral	0.00	Sin Disponibilidad
R. Florido	55.33	Con Disponibilidad
R. San Pedro	0.00	Sin Disponibilidad
R. Conchos 2	0.00	Sin Disponibilidad
R. Conchos 3	36.03	Con Disponibilidad
R. Conchos 4	62.08	Con Disponibilidad
Σ= 299.94		

Tabla 28 Disponibilidad de agua subterránea por subcuenca. Elaboración propia.

La disponibilidad total (WA_i) por subcuenca se determina sumando el $VMAEN$ y la disponibilidad de agua subterránea (Tabla 29).

Sub Cuenca	Superficial	Subterráneo	WA_i, hm^3
R. Conchos - P. de la Colina	1,090.37	146.51	1,236.88
Río Parral	60.09	0.00	60.09
Río Florido	265.90	55.33	321.23
San Pedro	314.14	0.00	314.14
Conchos 2	304.12	0.00	304.12
Conchos 3	116.38	36.03	152.41
Conchos 4	157.16	62.08	219.23
$\Sigma=$	2,308.15	299.95	2,608.10

Tabla 29 Disponibilidad de total de agua (WA_i) por subcuenca. Elaboración propia.

4.2.1.3 Requerimientos Ambientales de Agua (EWR_i)

Como se estableció previamente los “*requerimientos ambientales es el flujo recomendado mínimo para el mantenimiento en buenas condiciones y supervivencia de la mayoría de las formas de vida acuática de los ecosistemas dependientes del agua*” (Tennant, 1976). Para su estimación, en esta investigación se consideró el 30% de la Disponibilidad anual superficial (WA_i) por considerarse un umbral prudente. Así, utilizando la consideración anterior los EWR para la cuenca del río Conchos por subcuenca se presenta en la Tabla 30.

Sub Cuenca	$VMAEN, \text{hm}^3$	EWR_i, Hm^3
	Superficial	
R. Conchos - P. de la Colina	1,090.37	327.11
Río Parral	60.09	18.03
Río Florido	265.90	79.77
San Pedro	314.14	94.24
Conchos 2	304.12	91.24
Conchos 3	116.38	34.91
Conchos 4	157.16	47.15

$\Sigma=$	2,308.15	692.44
-----------	-----------------	---------------

Tabla 30 Requerimientos Ambientales (EWR) de agua por subcuenca. Elaboración propia.

4.2.1.4 Análisis y discusión de resultados del $ISHM_{WSI}$.

Una vez contando con las variables necesarias calculadas (W_i , WA_i y EWR) se puede determinar el $ISHM_{WSI}$ conforme a la ecuación (5). Los resultados se muestran en la Tabla 31.

Sub Cuenca	$ISHM_{WSI}$	Grado
R. Conchos - P. de la Colina	0.060	Sin Estrés
Río Parral	0.961	Muy Alto
Río Florido	0.590	Alto
San Pedro	1.308	Extremadamente Alto
Conchos 2	1.646	Extremadamente Alto
Conchos 3	1.341	Extremadamente Alto
Conchos 4	0.615	Alto

Tabla 31 Resultado del $ISHM_{WSI}$ por subcuenca. Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 31 manifiestan que la mayor parte de la cuenca del Río Conchos está es una condición crítica. La única subcuenca clasificada **Sin Estrés** hídrico es la zona alta (**R. Conchos – P. de la Colina**), donde llueve en promedio 528 mm al año, dando como resultado un escurrimiento de 1,090 hm³ al año y cuenta con 146.51 hm³ de disponibilidad de agua subterránea la cual es aportada por los 4 acuíferos que caen dentro de la subcuenca (843 Bocoyna, 844 Valle de Zaragoza, 845 San Felipe de Jesús y 846 Carichi-Nonoava). Así, esta subcuenca dispone con más del 45% del total del agua renovable de toda la región (1,236.88 hm³). Ahí la población es poca (57,571 habitantes) con respecto a su área total y, por consiguiente, es poca la demanda de agua para todos los usos con apenas un poco más

de 50 hm³ al año. Además, esta zona no cuenta con importantes demandas de agua para riego agrícola.

Las subcuencas con grados *Altos* de escasez son: **R. Florido** y **R. Conchos 4**. En estas se encuentran importantes distritos de riego: 103 río Florido y 090 Bajo Río Conchos, con 4,670 ha y 3,998 ha de superficie física regada, respectivamente (CONAGUA, 2016c). Además de ciudades como Santa Bárbara, Mariano Matamoros, Villa Ocampo, Villas las Nieves, José Esteban Coronado, José Mariano Jiménez, más comunidades rurales asentadas en la subcuenca R. Florido con un total de 72,083 habitantes. Santiago Coyame, Manuel Ojinaga y comunidades rurales están asentadas en la subcuenca del R. Conchos 4 con un total de 25,960 habitantes. La demanda de agua para todos los usos por subcuenca es de 142.53 hm³ para el R. Florido y 105.78 hm³ para el R. Conchos 4.

La precipitación media anual es de 390 mm para la subcuenca del R. Florido y 293.63 mm para la subcuenca del R. Concho 4, con un *VMAEN* de 265.90 hm³ y 157.16 hm³, respectivamente. La disponibilidad anual de agua subterránea es de 55.33 hm³ para la región del R. Florido, solo que esta disponibilidad se ubica en la parte alta (acuíferos 1007 Providencia, 1008 Cabrera-Ocampo y 1014 Torreón de Cañas) y 62.08 hm³ para la Subcuencas R. Conchos 4, aportada por el acuífero 837 Bajo Río Conchos.

La subcuenca con un *Muy Alto* índice escasez de agua es la subcuenca del **R. Parral**. La demanda de agua para todos los usos es de aproximadamente 3.5% (40.40 hm³) del total de toda la cuenca. Tiene una población total de 113,803 habitantes distribuidos entre las localidades de Hidalgo del Parral, San Francisco. Del Oro y comunidades rurales. La precipitación promedio anual supera los 400 mm, que da como resultado un poco más de 60 hm³ al año de escurrimiento natural. No dispone de agua subterránea, ya que los acuíferos 832 Jiménez-Camargo y el 834 Parral-Valle de Verano están sobreexplotados. Los

requerimientos ambientales determinados son de 18.03 hm³, teniendo una situación crítica ya que solo cuenta con 1.66 hm³ disponible para nuevas concesiones.

Las subcuencas con un grado *Extremadamente Alto* de escasez son:

R. Conchos 2, donde está asentado el distrito de riego más grande de la región: 005 Delicias (61,443 ha) y otro distrito de riego importante de la zona: el 113 Alto Río Conchos (4,253 ha) (CONAGUA, 2016c). Esta subcuenca es la que más agua demanda, con un poco más del 30% (350.43 hm³) del volumen total para todos los usos de la cuenca. Tiene una precipitación promedio de 294 mm al año que da como resultado un poco más de 300 hm³ de volumen de escurrimiento natural por año y los acuíferos 831 Meoqui-Delicias, 832 Jiménez-Camargo y 840 Villalba tiene un déficit hídrico crítico. La población total se distribuye entre 15 localidades urbanas, que incluye a Delicias, Santa Rosalía de Camargo, Pedro Meoqui, Saucillo y comunidades rurales, siendo un total de 326,598 habitantes.

R. San Pedro, tiene una demanda de agua de 287.55 hm³ al año (25.24% del total). Aun cuando tiene pocos habitantes (21,961) cuenca con más de 508 concesiones superficiales y 522 subterráneas, contrastando con las 334 localidades (Urbanas más rurales) asentadas en la subcuenca. Este fenómeno se puede deber, por un lado, a que la ciudad de Cuauhtémoc (114 mil habitantes) colinda con la subcuenca, pero está fuera de ella, quien puede ser la responsable del gran número de concesiones para suplir la demanda de agua de esta ciudad. Por otro, la subcuenca cuenta con una concesión de más de 245 hm³ para la generación de energía eléctrica.

La precipitación media anual es de 383 mm y su *VMAEN* es de aproximadamente de 314 hm³ anuales. No tiene disponibilidad subterránea, el acuífero 383 Alto San Pedro y 840 Villalba tiene un déficit hídrico de 0.1343 y 9.5788 hm³, respectivamente.

R. Conchos 3, donde se encuentra la ciudad de Chihuahua, siendo la ciudad con más habitantes de la región (809 mil) y teniendo una población total en toda la subcuenca de 846 mil habitantes, considerando las localidades rurales. La demanda de agua anual es de 157.59 hm³, de los cuales más del 77% es suplida por agua subterránea, superando en porcentaje a todas las demás subcuencas de la región. Tiene una precipitación de un poco más de 322 mm por año y su *VMAEN* equivale a 116.38 hm³ al año. El acuífero 830 Chihuahua-Sacramento está siendo sobreexplotado, pero los otros tres acuíferos dentro de la subcuenca: 835 Tabalaopa-Aldama, 836 Aldama-San Diego y 841 Potrero del Llano cuentan con una disponibilidad de 6.7952 hm³, 14.8143 hm³ y 14.4243 hm³, respectivamente.

Una variable importante considerada son los *EWR* lo cual impacta en cada una de las subcuencas, ya que, si se descuentan estos requerimientos ambientales de agua para el medio ambiente en este análisis, el grado de escasez queda en *Alto* para las subcuencas **R. Parral**, **R. Florido** y **Conchos 4**, *Muy Alto* para **R. San Pedro** y *Extremadamente Alto* las subcuencas **R. Conchos 2 y 3**.

En la Figura 29 se muestra el mapa con los resultados del *ISHM_{WSI}* por subcuenca.

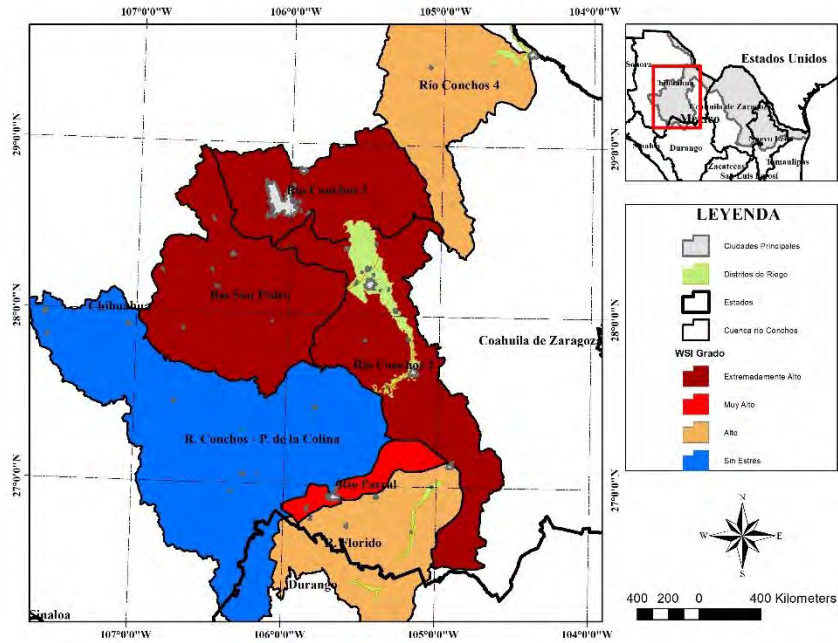


Fig.29 Resultados del ISHM_{WSI} por subcuenca. Elaboración propia.

De acuerdo con la metodología establecida, en la Tabla 32 se muestran los resultados obtenidos.

Subcuenca	W_i , hm ³	WA_i , hm ³	EWR , hm ³	$ISHM_{wsi}$	Indicador
R. Conchos - P. de la Colina	54.87	1,236.88	327.11	0.940	Alto
Río Parral	40.40	60.09	18.03	0.039	Extremadamente Bajo
Río Florido	142.53	321.23	79.77	0.410	Extremadamente Bajo
San Pedro	287.55	314.14	94.24	-0.308	Extremadamente Bajo
Conchos 2	350.43	304.12	91.24	-0.646	Extremadamente Bajo
Conchos 3	157.59	152.41	34.91	-0.341	Extremadamente Bajo
Conchos 4	105.78	219.23	47.15	0.385	Extremadamente Bajo
$\Sigma=$	1,139.14	2,608.10	692.44		

Tabla 32 Resultado del ISHM_{WSI} por subcuenca. Elaboración propia.

En la Figura 30 se muestra el mapa de los resultados obtenidos.

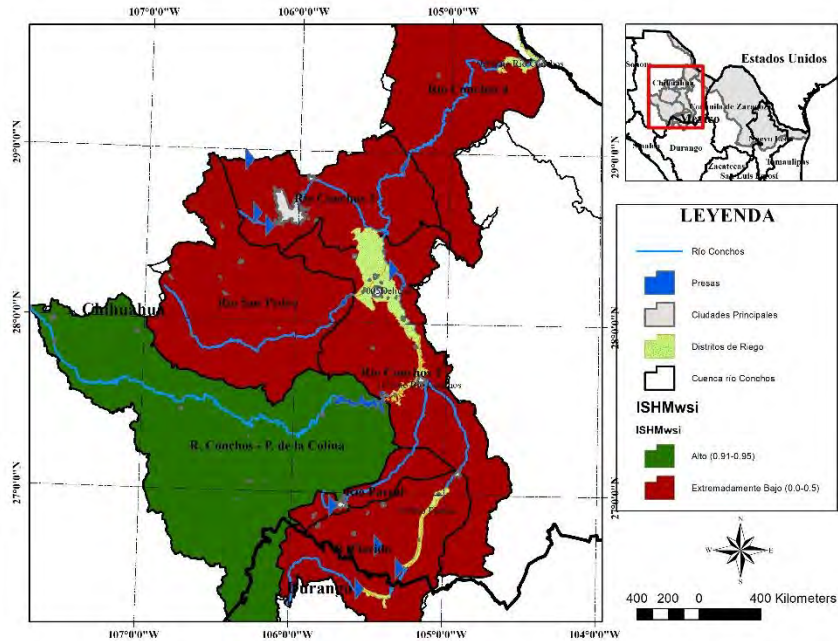


Fig.30 Resultado del $ISHM_{WSI}$ dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

4.2.2 ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA ($ISHM_{Idas}$)

Con base en la información actualizada de la disponibilidad media anual de agua subterránea en México publicadas en el DOF por parte de la CONAGUA (2018b), se obtuvieron las variables de recarga media anual (R), descarga natural comprometida (DNC) y volumen de extracción de aguas subterráneas ($VEAS$) incluyendo el desglose por rubro. Estas variables conforman la disponibilidad media anual de agua del subsuelo y se muestra en la tabla siguiente:

Núm.	Nombre	R, hm^3	DNC, hm^3	VEAS, hm^3					DMA, hm^3	
				VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	Σ	Positiva	Negativa
830	Chihuahua - Sacramento	56.6	0.00	99.88	14.24	0.14	0.00	114.26	0.00	-57.66
831	Meoqui - Delicias	211.20	0.00	381.71	0.13	0.00	0.00	381.84	0.00	-170.64
832	Jiménez - Camargo	173.30	5.50	309.75	19.09	0.46	0.00	329.30	0.00	-161.50
834	Parral - Valle del Verano	26.70	0.00	23.19	15.58	0.00	0.00	38.77	0.00	-12.07
835	Tabalaopa - Aldama	76.50	4.30	60.42	4.32	0.67	0.00	65.40	6.80	0.00
836	Aldama - San Diego	62.50	1.50	43.52	0.00	2.66	0.00	46.19	14.81	0.00

837	Bajo Rio Conchos	116.20	0.80	14.19	13.77	25.36	0.00	53.32	62.08	0.00
838	Alto Rio San Pedro	56.30	29.10	16.75	9.40	1.18	0.00	27.33	0.00	-0.13
840	Villalba	17.50	4.40	4.93	15.23	2.52	0.00	22.68	0.00	-9.58
841	Potrero del Llano	23.70	8.50	0.11	0.66	0.00	0.00	0.78	14.42	0.00
843	Bocoyna	236.70	177.50	3.59	5.97	0.02	0.00	9.59	49.61	0.00
844	Valle de Zaragoza	104.70	75.80	3.90	3.31	0.88	0.00	8.09	20.81	0.00
845	San Felipe de Jesus	69.90	52.40	0.05	0.75	0.00	0.00	0.79	16.71	0.00
846	Carichi - Nonoava	250.00	187.50	2.00	1.12	0.00	0.00	3.12	59.38	0.00
1007	Providencia	16.30	0.00	0.49	0.25	0.00	0.00	0.74	15.56	0.00
1008	Cabrera - Ocampo	29.90	0.00	1.58	2.97	0.00	0.00	4.55	25.35	0.00
1014	Torreón de Cañas	15.20	0.00	0.73	0.05	0.00	0.00	0.79	14.41	0.00

Tabla 33 Disponibilidad media anual de los acuíferos ubicados dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

4.2.1.5 Análisis y discusión de resultados del $ISHM_{Idas}$

Con base en la información anterior se calcula el $ISHM_{Idas}$ para cada uno de los acuíferos con la ecuación (11) y se normaliza con la ecuación (12). Los resultados normalizados por acuífero se presentan en la tabla siguiente:

Núm.	Nombre	$ISHM_{Idas}$	Grado
830	Chihuahua - Sacramento	0.000	Escasez
831	Meoqui - Delicias	0.096	Escasez
832	Jiménez - Camargo	0.019	Escasez
834	Parral - Valle del Verano	0.274	Escasez
835	Tabalaopa - Aldama	0.547	Equilibrio
836	Aldama - San Diego	0.621	Suficiente
837	Bajo Rio Conchos	0.731	Suficiente
838	Alto Rio San Pedro	0.498	Equilibrio
840	Villalba	0.134	Escasez
841	Potrero del Llano	0.974	Abundante
843	Bocoyna	0.919	Abundante
844	Valle de Zaragoza	0.860	Suficiente
845	San Felipe de Jesús	0.620	Suficiente
846	Carichi - Nonoava	0.975	Abundante

1007	Providencia	0.977	Abundante
1008	Cabrera - Ocampo	0.924	Abundante
1014	Torreón de Cañas	0.974	Abundante

Tabla 34 Resultado del $ISHM_{Idas}$ por acuífero. Elaboración propia.

La subcuenca del **R. Conchos – P. de la Colina** está clasificada de acuerdo al *Idas* como **Abundante** en la parte alta (> 0.90) y **Suficiente** en la parte baja ($0.55 - 0.90$), debido a la poca demanda del recurso con apenas 21.59 hm^3 anuales que contrastan con los 661.31 hm^3 por año de Recarga Natural, tomando en cuenta los 4 acuíferos que caen dentro de la subcuenca: 843 Bocoyna, 844 Valla de Zaragoza, 845 San Felipe de Jesús y 846 Cariachi-Nonoava. En otras palabras, se utiliza solo el 3.2% de agua subterránea disponible en la región. También debe de considerarse que aproximadamente un 76% del total de agua demandada proviene de las fuentes superficiales, que es suplida por poco más de los $1,000 \text{ hm}^3/\text{año}$ de escurrimiento natural que hay en la subcuenca.

La subcuenca del **R. Parral** se clasifica con un grado de **Escasez** (< 0.45) de agua subterránea debido a que los acuíferos 832 Jiménez-Camargo y 834 Parral-Valle del Verano que se ubican de manera parcial dentro de la región no cuentan con disponibilidad. Además, tienen un sobre explotación del 93% y 45%, respectivamente. Al contrario de la subcuenca vecina, (R. Conchos – P. de la Colina), en esta subcuenca la demanda de agua subterránea rebasa el 75% del volumen total, lo que equivale a 30.5 hm^3 de los 40.40 hm^3 demandados cada año. Si se consideran los más de 110 mil habitantes que hay en la región y que el escurrimiento superficial es solo el 2.6 % (60.60 hm^3) del volumen de agua total de la cuenca del río Conchos, la demanda de agua subterránea toma mayor relevancia, por la diferencia de las fuentes de demanda, ya que solo 9.91 hm^3 (el 25% restante) proviene de fuentes superficiales.

La subcuenca del **R. Florido** tiene contrastes claramente definidos con respecto al volumen de agua subterránea en la zona. La parte media y baja de la cuenca se ubica sobre acuíferos sobreexplotados (832 Jiménez-Camargo y 834 Parral-Valle del Verano), siendo su *Idas* < 0.45 por lo que su grado de clasificación es de *Escasez*. Esto coincide con la ubicación del DR 103 Río Florido y ciudades importantes. En esta subcuenca la demanda de agua subterránea para uso público-urbano e industria autoabastecida supera el 56% del volumen total alcanzando los 80.57 hm³ anuales, superando los 61.97 hm³ (45 % aprox.) que provienen de aprovechamientos superficiales. Esta demanda es suplida por la sobreexplotación de los acuíferos que se ubican en la parte media-baja de la región y por los acuíferos de la parte alta (1007 Providencia, 1008 Cabrera-Ocampo y 1014 Torreón de Cañas) que cuentan con un *Idas* > 0.90 siendo su grado de clasificación como *Abundante*.

La Subcuenca del **R. San Pedro** se ubica casi totalmente dentro del acuífero 838 Alto Río San Pedro, el cual su grado de clasificación es en *Equilibrio*, por tener un *Idas* = 0.498. El volumen de extracción concesionado es de 27.33 hm³ por año, de los cuales 20.67 hm³ son para suplir la necesidad del uso público-urbano e industria de la región. Además, cuenta con una descarga natural comprometida aguas abajo de 25.10 hm³ como caudal base y 4.00 hm³ anuales para el acuífero 831 Meoqui - Delicias, resultando un volumen total de agua comprometida de 29.10 hm³ anuales (CONAGUA, 2002). Este volumen es el que impacta en el balance de agua subterránea, ya que solo el 7.19% del total de agua demandada para todos los usos proviene de fuentes subterráneas. En la parte baja de la subcuenca se ubica el acuífero 840 Villalba el cual tiene un *Idas* de 0.134 siendo su grado de clasificación de *Escasez*, Además, se encuentra sobreexplotado en un 50%.

Por otra parte, la subcuenca del **R. Conchos 2** se ubica totalmente sobre el acuífero 831 Meoqui-Delicias y parcialmente sobre los acuíferos 832 Jiménez-Camargo y 840 Villalba

con un déficit de agua de 170.6393, 161.5013 y 9.5788 hm³ por año, respectivamente. Estos acuíferos están clasificados con **Escasez** de agua subterránea, de acuerdo con el cálculo del *Idas* (0.0960, 0.0188 y 0.1344). En esta subcuenca están ubicados los Distritos del Riego 005 Delicias y 113 Alto Río Conchos, con una superficie física regada en conjunto de un poco más de 65 mil ha (CONAGUA, 2016c). Esta cantidad de hectáreas es relevante ya que, dentro de esta subcuenca, hay un volumen concesionado de agua subterránea para todos los usos que supera los 166 hm³ por año, de los cuales el 94% está destinada para irrigación. Además, El acuífero 831 Meoqui-Delicias esta sobreexplotado en un 81% y el acuífero 832 Jiménez-Camargo un 95%.

Por su parte, la subcuenca del **R. Conchos 3** se ubica sobre cuatro acuíferos con diferentes clasificaciones con respecto al cálculo del *Idas*. En la parte alta se ubica el acuífero 830 Chihuahua-Sacramento el cual tiene un *Idas* = 0.000, por lo que se clasifica con **Escasez**. El volumen de agua subterránea demandada para todos los usos es de 114 hm³ por año y su recarga natural apenas es de 56.6 hm³. El usuario principal de este acuífero es el sector público-urbano ya que suple las necesidades de agua subterránea a la parte norte del municipio de Chihuahua, donde se encuentra la capital del estado con 809 mil habitantes.

En la parte media-alta se ubica sobre el acuífero 835 Tabalaopa-Aldama el cual está clasificado como en **Equilibrio**, ya que tiene un *Idas* = 0.5471. Cuenta con una recarga natural de agua de 76.50 hm³ al año y tiene una demanda, principalmente del sector público-urbano, de 65.04 hm³ por año. En la parte media-baja de la subcuenca se ubica sobre el acuífero 836 Aldama-San Diego que tiene un *Idas* = 0.6214 el cual está clasificado como **Suficiente**. Tiene una demanda de 46.19 hm³ al año y su recarga natural es de 62.50 hm³ en el año. Además, tiene una descarga natural comprometida de 1.5 hm³ que corresponden a

descargas de manantiales (CONAGUA, 2008). Una parte del sureste del acuífero se encuentra debajo del DR 005 Delicias, siendo su principal usuario el sector agrícola.

La parte baja de la subcuenca se encuentra sobre el acuífero 841 Potrero de Llano el cual está clasificado como *Suficiente*, ya que el cálculo del $Idas = 0.975$. Su recarga natural es de 23.70 hm^3 y tiene concesionados un total de 0.78 hm^3 de agua por año. También, cuenta con una descarga natural comprometida de 8.5 hm^3 por año, de los cuales el 77% corresponden a descargas de manantiales y el volumen restante es para la presa “El Granero” (CONAGUA, 2008) .

Por último, la subcuenca **R. Conchos 4** se ubica totalmente sobre el acuífero 837 Bajo Río Conchos. El volumen de extracción de agua en este acuífero es de $53.32 \text{ hm}^3/\text{año}$ y su recarga natural es de $116.20 \text{ hm}^3/\text{año}$, tiene un volumen de $0.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ comprometido por descarga de manantiales. Su $Idas$ es de 0.731 siendo su calificación como *Suficiente*. A la salida de esta subcuenca está localizado el DR 090 Bajo Río Conchos y la ciudad de Ojinaga, siendo estos sectores los usuarios principales.

En la Figura 31 se muestra el mapa con los resultados normalizados obtenidos y se presentan los acuíferos ubicados en cada una de las subcuencas.

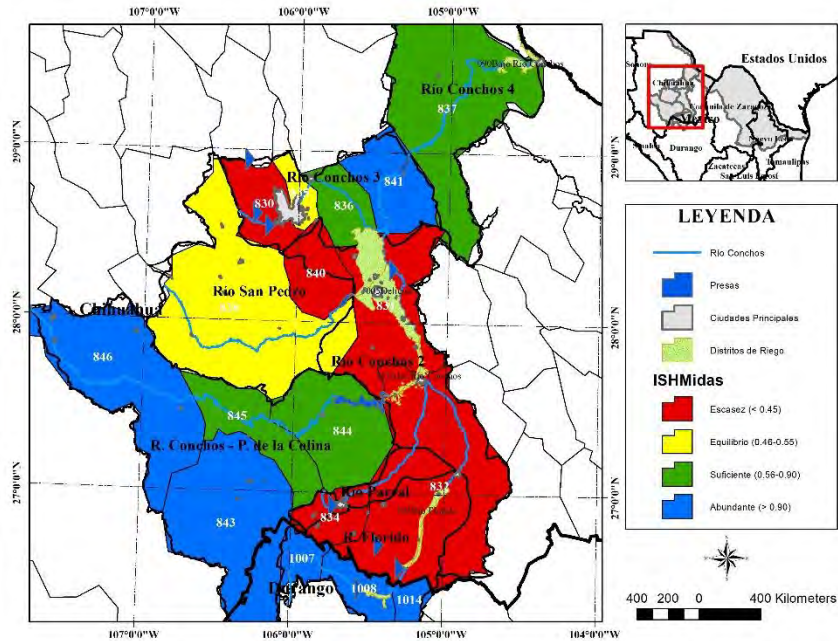


Fig. 31 Resultado del $ISHM_{Idas}$ por acuífero dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados por acuíferos se promedian los valores para calcular un solo valor del $ISHM_{Idas}$ por subcuenca. Este promedio se muestra en la tabla 35.

Subcuenca	$ISHM_{Idas}$	Grado
R. Conchos - P. de la Colina	0.843	Suficiente
R. Parral	0.146	Escasez
R. Florido	0.634	Suficiente
R. San Pedro	0.316	Escasez
R. Conchos 2	0.083	Escasez
R. Conchos 3	0.533	Equilibrio
R. Conchos 4	0.731	Suficiente

Tabla 35 Resultado del $ISHM_{Idas}$ por subcuenca. Elaboración propia.

Para una mejor visualización y análisis de esta variable se construyó la Figura 32 en donde se aprecia la clasificación del $ISHM_{Idas}$, además de los DR y las ciudades principales localizados en la cuenca del Río Conchos.

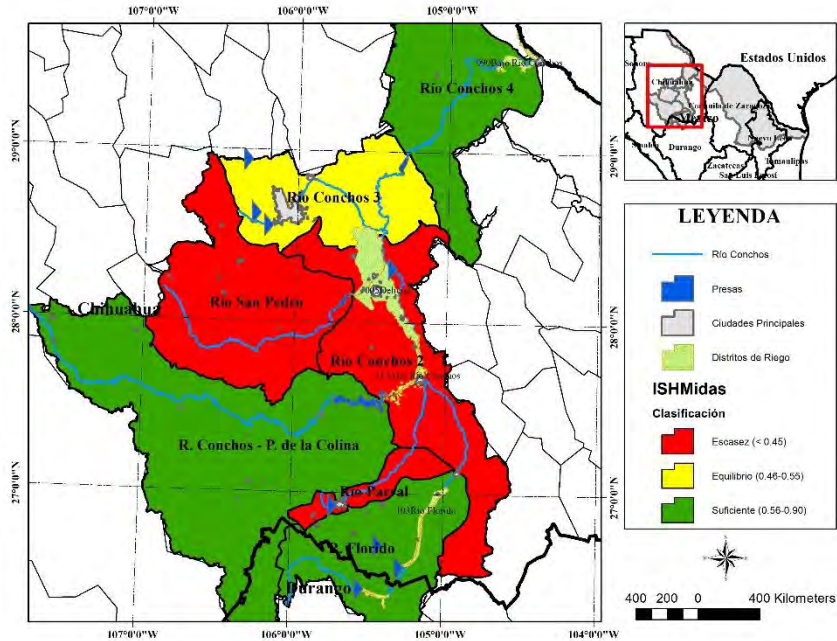


Fig. 32 Resultado del $ISHM_{idas}$ por subcuenca dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

4.2.3 RESULTADOS DEL $ISHM_i$

Una vez calculadas las dos variables de entrada de este componente y estableciendo sus respectivos valores de ponderación se puede determinar el componente $ISHM_i$ conforme a la ecuación (3).

4.2.1.6 Análisis y discusión de resultados por subcuenca

4.2.1.6.1 Río Conchos – P. de la Colina

Los valores resultantes de este componente muestran una disponibilidad **Muy Alta** en la subcuenca del **R. Conchos – P. de la Colina** con $ISHM_i = 0.916$, ya que tiene un $VMAEN$ de $1,090.37 \text{ hm}^3$ al año y los acuíferos que están dentro de la subcuenca tienen disponible un volumen medio anual de agua subterránea de poco más de 146 hm^3 por año. Este volumen

contrasta claramente sobre la demanda anual para todos los usos en esta zona que es de 54.87 hm³.

4.2.1.6.2 Río Parral.

La subcuenca del **R. Parral** tiene una disponibilidad **Baja** con un $ISHM_i = 0.120$. Esta región supe la demanda de agua de los sectores público-urbano, agrícola e industrial utilizando el 67% del volumen total de agua proveniente de fuentes superficiales. Así, de los 60.09 hm³ al año de agua renovable, se demandan en total 58.43 hm³ por año, considerando el volumen de agua requerido por el medio ambiente. El 33% del volumen de agua restante para los tres sectores arriba mencionados, proviene de fuentes subterráneas las cuales están siendo sobreexplotadas de una manera crítica.

4.2.1.6.3 Río Florido.

Con respecto a la subcuenca del **R. Florido** tiene un $ISHM_i = 0.411$, por lo que tiene una disponibilidad **Moderada** de agua. Tiene una demanda total para todos los usos de 222.30 hm³ por año y su agua renovable, considerando la disponibilidad de agua subterránea, es de 321.27 hm³. En otras palabras, se está demandando el 69% del agua renovable, si se considera que esta subcuenca solo tiene disponibilidad de agua subterránea en la parte alta y, que hay sobreexplotación de acuíferos en zonas donde se ubica el DR y ciudades importantes, se vislumbra un panorama complicado en un futuro cercano.

4.2.1.6.4 Río San Pedro.

La subcuenca del **R. San Pedro** tiene una **Muy Baja** disponibilidad con un $ISHM_i = -0.263$. El agua renovable anual en esta subcuenca es de 314.14 hm³ (no hay disponibilidad de agua subterránea) de los cuales el 287.55 hm³ son para suplir las necesidades de los tres usuarios principales, más un total de 94.24 hm³ como requerimiento ambiental, siendo un total al año

de 381.79 hm³, por ello el valor negativo en el balance, ya que se requieren de un volumen de agua de 67.65 hm³ para suplir la demanda consuntiva y ambiental.

4.2.1.6.5 Río Conchos 2.

Por su parte, un $ISHM_i = -0.299$ corresponde a la subcuenca del **R. Conchos 2** con una disponibilidad **Muy Baja**. Este valor representa, de inicio la diferencia que hay entre la disponibilidad natural que existe y el volumen de demanda de agua para todos los usos que hay en esta región, 304.12 contra 441.66 hm³ considerando el volumen de agua para medio ambiente. Así, la subcuenca confronta el grado de presión del recurso hídrico a la cual está expuesto con la extracción excesiva de los acuíferos en la zona, alcanzando hasta el 90% de sobreexplotación en algunos de ellos.

4.2.1.6.6 R. Conchos 3.

En cuanto a la subcuenca **R. Conchos 3** se refiere, esta presenta una disponibilidad **Baja** ya que tiene un $ISHM_i = 0.339$. Esto como consecuencia que el agua renovable tiene un déficit de 40.09 hm³ (192.50 hm³ contra 157.59 hm³) para suplir la demanda para todos los usos de la región. Esta diferencia es completada con la sobreexplotación del acuífero más importante de la subcuenca, el 830 Chihuahua-Sacramento del cual se extraen 57.66 hm³ de agua al año más de lo recargado naturalmente, y por dos acuíferos que cuentan con disponibilidad en la región.

4.2.1.6.7 Río Conchos 4.

Por último, la subcuenca del **R. Conchos 4** tiene un $ISHM_i = 0.438$ que se clasifica con una disponibilidad **Moderada**. Esta clasificación tiene que ver con la disponibilidad con la que cuenta la subcuenca de agua subterránea, ya que alcanza los 62.07 hm³ por año del acuífero 837 Bajo Río Conchos. Con respecto a las fuentes superficiales, naturalmente la subcuenca alcanza a “abastecer” a sus usuarios y el medio ambiente, pero no queda disponibilidad para

más extracciones, ya que la demanda del recurso hídrico es de 152.93 hm³ y el agua renovable es de 157.16 hm³ por año.

La Tabla 36 muestra la tabla resumen de los resultados obtenidos del cálculo de $ISHM_i$. Por su parte la Figura 33 muestra la distribución de las subcuencas dentro de la cuenca del río Conchos con su respectiva clasificación del componente de Cantidad del $ISHM$.

Sub Cuenca	$ISHM_{wsi}$	Grado	$ISHM_{idas}$	Disponibilidad	W_{wsi}	W_{idas}	$ISHM_i$	Disponibilidad
R. Conchos - P. de la Colina	0.940	Alto	0.843	Suficiente	75.84%	24.16%	0.916	Muy Alta
Río Parral	0.039	Extremadamente Bajo	0.146	Escasez	24.53%	75.47%	0.120	Baja
Río Florido	0.410	Extremadamente Bajo	0.413	Escasez	43.48%	56.52%	0.411	Moderada
San Pedro	-0.308	Extremadamente Bajo	0.316	Escasez	92.82%	7.18%	-0.263	Muy Baja
Conchos 2	-0.646	Extremadamente Bajo	0.083	Escasez	52.46%	47.54%	-0.299	Muy Baja
Conchos 3	-0.341	Extremadamente Bajo	0.533	Equilibrio	22.18%	77.82%	0.339	Baja
Conchos 4	0.385	Extremadamente Bajo	0.731	Suficiente	84.64%	15.36%	0.438	Moderada

Tabla 36 Resultado del $ISHM_i$ por subcuenca. Elaboración propia.

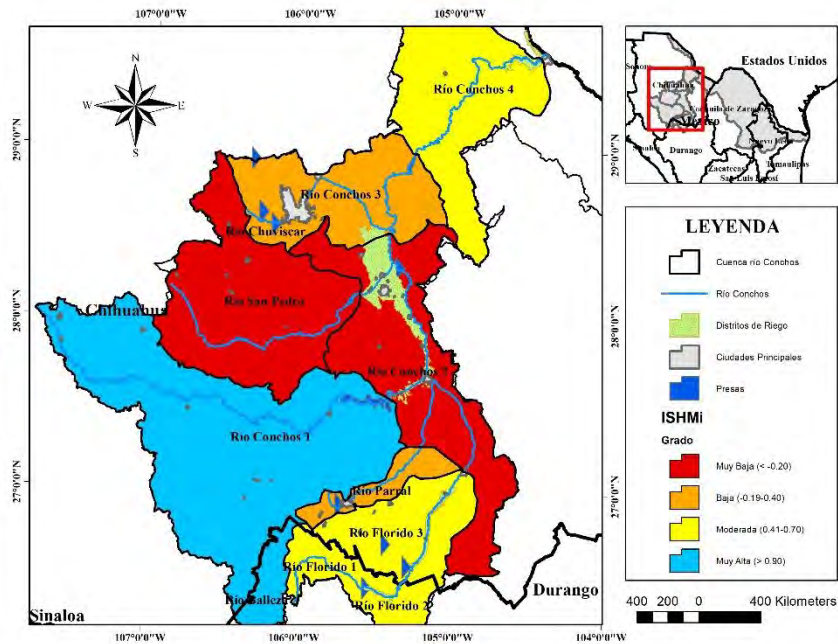


Fig.33 Resultado del $ISHM_i$ por subcuenca en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

4.3 CÁLCULO DEL ISHM_j

4.3.1 ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA

4.3.1.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo

En los últimos 5 años la *Red Nacional de Monitoreo de la Calidad de las Aguas Nacionales* ha contado con más de 5,000 Puntos de Monitoreo de Calidad de Agua (PMCA) ubicados en regiones con una alta influencia antropogénica, siendo los sitios superficiales los que más abundan con más de 2,500 puntos. Esta red se compone de una red primaria, una red secundaria, estudios especiales y emergencias hidro-ecológicas, los cuales monitorean los tres tipos de sistemas acuáticos: epicontinentales, costeros y subterráneos. Los principales parámetros monitoreados son DBO₅, DQO, SST (CONAGUA, 2018; SEMARNAT, 2018; CONAGUA, 2019).

Esta base de datos se encuentra disponible en el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) dentro de los indicadores de la calidad de agua superficial 2012-2017 de la CONAGUA (2019b). De acuerdo con CONAGUA en la cuenca del río Conchos existen 62 PMCA funcionando actualmente, de los cuales fueron inicialmente analizados 16 de ellos ubicados dentro y a la salida de cada subcuenca (Figura 34). Un segundo análisis se realizó evaluando un total de 7 PMCA ubicados a la salida de las subcuencas (Figura 35) Cabe señalar que la mayoría de los PMCA seleccionados se encontraban dentro del cauce del río Conchos o sus afluentes, descartando así la mayor cantidad de puntos monitoreados, pues éstos se encuentran en embalses, en los que se presenta el efecto de dilución.

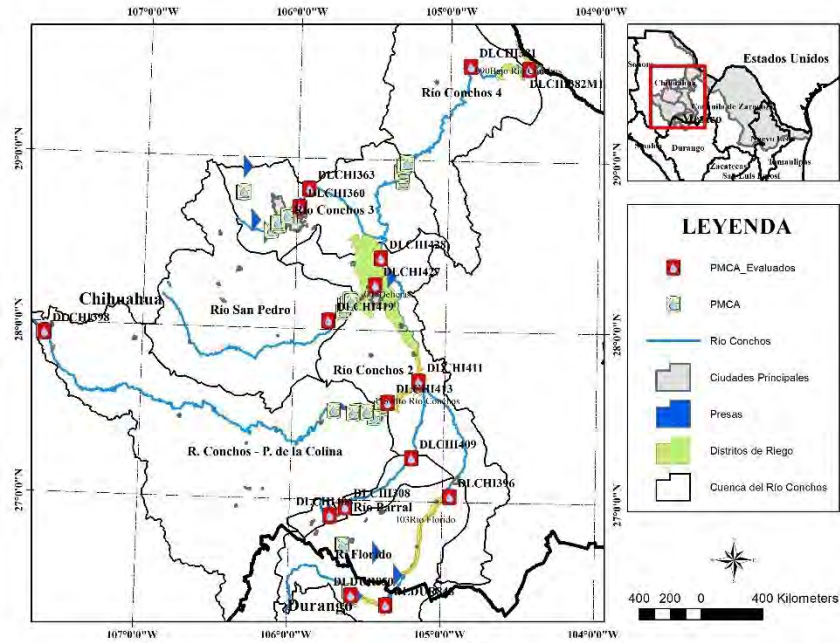


Fig.34 Ubicación de los PMCA dentro y a la salida de cada subcuenca en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2019b).

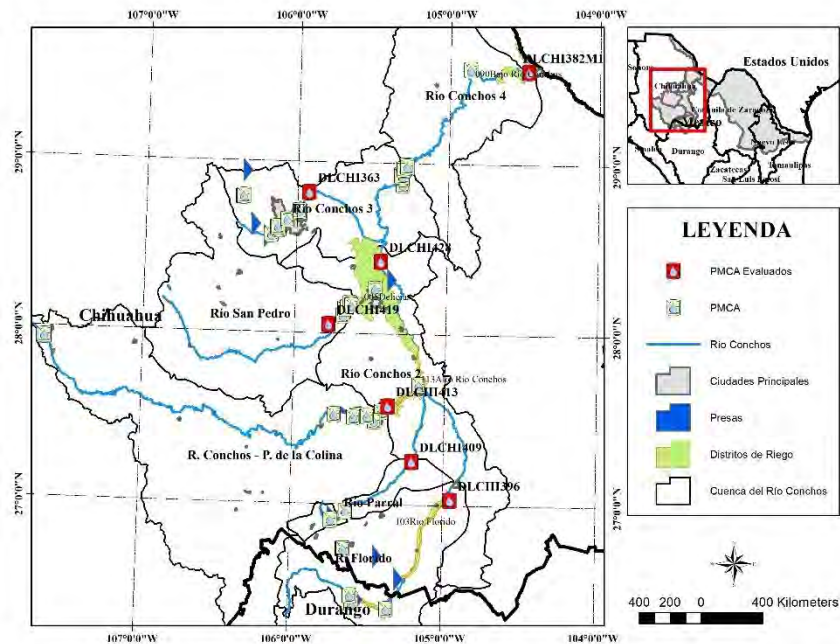


Fig.35 Ubicación de los PMCA a la salida de cada subcuenca en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2019b).

Las 7 estaciones seleccionadas para la evaluación del *ISHM_j* de cada una de las subcuencas se muestran en la Tabla 37.

Subcuenca	Estación de Monitoreo		Año
	Clave	Nombre	
R. Conchos - P de la Colina	DLCHI413	La Boquilla (Colina)	2017
R. Parral	DLCHI409	Río Florido	2017
R. Florido	DLCHI396	Ojo de Dolores	2017
R. San Pedro	DLCHI419	RH24-5 Bravo Conchos	2017
R. Conchos 2	DLCHI428	Puente Julimes	2017
R. Conchos 3	DLCHI363	Río Chuvíscar	2017
R. Conchos 4	DLCHI382MI	Puente Ojinaga	2017

Tabla 37 Estaciones seleccionadas para la evaluación del *ISHM_{ICA}* por subcuenca. Elaboración propia.

4.3.1.2 Recopilación de información.

Una vez analizadas y ubicados los PMCA, de estos se extrajo información de los parámetros que actualmente son monitoreados en la cuenca como es: DBO₅, DQO, O₂, SST, CF, y TA, para cada una de las subcuencas de nuestra área de estudio. La Tabla 38 se presentan los valores de los parámetros monitoreados en un periodo de 5 años (2012-2017):

Subcuenca	Estación de Monitoreo		DBO ₅ mg/l	OD %	SST mg/l	Turbiedad NTU	CF NMP/100 ml	Toxicidad, <i>Daphnia</i> <i>m.</i>	Toxicidad, <i>Vibrio f.</i>
	Clave	Nombre						TA	TA
R. Conchos - P de la Colina	DLCHI413	La Boquilla (Colina)	2.0	97.2%	10.0	10.1	1,081.0	1.0	2.3
R. Parral	DLCHI409	Río Florido	2.2	112.0%	10.0	10.1	1,509.0	1.0	1.9
R. Florido	DLCHI396	Ojo de Dolores	2.0	69.5%	10.0	10.1	1,229.5	1.0	1.0
R. San Pedro	DLCHI419	RH24-5 Bravo Conchos	2.0	99.4%	10.0	10.1	1,530.0	1.0	1.0
R. Conchos 2	DLCHI428	Puente Julimes	2.4	102.4%	14.2	14.3	3,616.0	1.0	1.0

R. Conchos 3	DLCHI363	Río Chuvísar	2.9	71.1%	22.0	22.2	1,015.0	1.0	1.0
R. Conchos 4	DLCHI382MI	Puente Ojinaga	2.0	77.4%	27.8	28.1	886	1.0	1.0

Tabla 38 Valores monitoreados de los PMCA en el periodo 2012-2017. Elaboración propia con información de CONAGUA (2019b).

4.3.1.3 Consideraciones generales

1. En esta investigación, como se mencionó anteriormente se optó por considerar la metodología de CONAGUA para el cálculo del $ISHM_j$ por conceptualizarla como adecuada de acuerdo con la información oficial disponible. Se realizó el cálculo con las otras dos metodologías como un ejercicio de comparación.
2. Asimismo, se calculó el ICA en base a la metodología actual de la CONAGUA y la metodología desarrollada en los años ochenta, ya que es esta última la que aporta un valor cuantitativo el cual es utilizado para el cálculo del $ISHM$. Cabe mencionar, que se realiza una comparación y análisis de resultados de las dos metodologías (SEMARNAT, 2018).
3. Como la metodología de CONAGUA desarrollada anteriormente no consideraba el parámetro de SST sino la contaminación por Turbiedad, se realizó la transformación de los SST a NTU (*Nephelometric Turbidity Units*, por sus siglas en inglés) que son las unidades de medición de la Turbiedad, con la siguiente consideración $NTU = 1.01$ SST (Holliday, Rasmussen, & Miller, 2003).
4. Las *Funciones de Transformación* utilizadas para el cálculo del grado de impacto (I_i) o factores de Calidad Ambiental (CA) fueron las propuestas por la NFS.
5. Los pesos de ponderación se tomaron de los establecidos por la SEMARNAT (2018).
6. La clasificación de $ISHM_{ICA}$ se basó en las consideraciones de la SEMARNAT y la NFS (SEMARNAT, 2002; NFS, 2018).

7. Se realizaron dos evaluaciones de la Calidad del Agua en cada subcuenca. La primera consideró la información a la salida de la subcuenca hidrológica. La segunda se consideró el valor *más* desfavorable de los monitoreados en distintas zonas dentro la subcuenca. Para el valor final del *ISHM_j* se consideraron los valores a la salida de cada subcuenca y estos se incorporaron para el cálculo del *ISHM*, ya que se concibe que a la salida la calidad es representativa con respecto a la subcuenca.
8. En el caso de la Subcuenca del río San Pedro se realizó una evaluación, ya que solamente hay información a la salida de esta.
9. Para la subcuenca R. Conchos 3 se tomó el PMCA de la región media-alta de la subcuenca y no a la salida, ya que la interacción antropogénica está en esta zona y aguas debajo de esta región no existen ciudades con y/o DR con descargas importantes.

4.3.1.4 Transformación de parámetros a Factores de Calidad Ambiental.

Para el cálculo del *ISHM_j* con la metodología de los años ochenta es necesario obtener factores de Calidad Ambiental (*CA*). Utilizando las *Funciones de Transformación* desarrolladas por el *NFS* se transforman los parámetros monitoreados a su equivalente de Calidad Ambiental. Estas *Funciones* consideran 9 parámetros para evaluar dicha calidad, dentro de los cuales 4 son los que monitorea la CONAGUA. Los resultados de la *transformación* para estos 4 parámetros son presentados en la Tabla 39.

Cuenca	Estación de Monitoreo		DBO ₅		OD		TURBIEDAD		CF	
	Clave	Nombre	mg/l	CA	%	CA	NTU	CA	NMP/100 ml	CA
R. Conchos - P de la Colina	DLCHI413	La Boquilla (Colina)	2.0	80	97.2%	99	10.1	76	1,081.0	22
R. Parral	DLCHI409	Río Florido	2.1	77	112.0%	95	10.1	76	1,509.0	20

R. Florido	DLCHI396	Ojo de Dolores	2.0	80	69.5%	74	10.1	76	1,229.5	21
R. San Pedro	DLCHI419	RH24-5 Bravo Conchos	2.0	80	99.4%	99	10.1	76	1,530.0	20
R. Conchos 2	DLCHI428	Puente Julimes	2.4	71	102.4%	99	14.3	68	3,616.0	15
R. Conchos 3	DLCHI363	Río Chuvíscar	2.9	68	71.1%	76	22.2	59	1015.0	22
R. Conchos 4	DLCHI382MI	Puente Ojinaga	2.0	80	77.4%	84	28.1	55	886.0	23

Tabla 39 Transformación de los parámetros a su factor de Calidad de Ambiental. Elaboración propia.

4.3.2 RESULTADOS DEL $ISHM_j$

Una vez obtenidos los factores de CA para cada parámetro es posible calcular el $ISHM_j$ de acuerdo con la ecuación (14). Cabe recordar que en la **metodología actual** de la CONAGUA, el cálculo del ICA final se determina en base al parámetro *más* desfavorable medido dentro del área de estudio, es decir, el parámetro *más* contaminado es el referente para establecer la Calidad del Agua. Con base a las **dos metodologías** se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuenca	Estación de Monitoreo		CONAGUA ¹	CONAGUA ²	
	Clave	Nombre	$ISHM_j$	$ISHM_j$	CALIDAD
R. Conchos - P de la Colina	DLCHI413	La Boquilla (Colina)	Contaminada	0.704	Buena
R. Parral	DLCHI409	Río Florido	Contaminada	0.674	Aceptable
R. Florido	DLCHI396	Ojo de Dolores	Contaminada	0.615	Aceptable
R. San Pedro	DLCHI419	RH24-5 Bravo Conchos	Contaminada	0.699	Aceptable
R. Conchos 2	DLCHI428	Puente Julimes	Contaminada	0.651	Aceptable
R. Conchos 3	DLCHI363	Río Chuvíscar 1	Contaminada	0.578	Aceptable
R. Conchos 4	DLCHI382MI	Puente Ojinaga	Aceptable	0.648	Aceptable

¹ ICA con normativa vigente de CONAGUA

² ICA con normativa anterior de CONAGUA

Tabla 40 Resultados del $ISHM_j$ actual y anterior por subcuenca. Elaboración propia.

4.3.1.5 *Análisis y discusión de resultados por subcuenca.*

4.3.1.5.1 Río Conchos – P de la Colina.

Conforme a la **metodología actual** a la salida de esta subcuenca se presenta una alta contaminación biológica superando los 1,000 NMP/ 100 ml de Coliformes Fecales, por lo que el afluente se considera con una calidad **Contaminada**.

Ahora, si se considera la **metodología anterior** la calidad del afluente aumenta a **Buena**, aun cuando la cantidad de Coliformes Fecales alcanza las 1,081 NMP/100 ml, pero, cuenta con muy poca cantidad de materia orgánica, un alto porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y una turbiedad baja. Por lo cual, al ponderar estas cuatro variables resulta una calidad de agua arriba mencionada con un valor del $ISHM_{ICA} = 0.704$.

La contaminación fecal se puede deber a las pocas Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) localizadas en la subcuenca (11 PTAR) y al poco caudal instalado en estas que es de 58 l/s de los cuales el 73.92% es tratado (CONAGUA, 2015; CONAGUA, 2017d).

4.3.1.5.2 Río Parral

Considerando la **metodología actual**, a la salida de esta subcuenca la calidad del agua se clasifica como **Contaminada** por presentar materia orgánica, contaminación fecal y toxicidad moderada.

Con la **metodología anterior**, por su parte, a la salida de la subcuenca se encontró contaminación por Coliformes Fecales, una baja concentración de DBO_5 , una buena saturación de Oxígeno Disuelto y muy pocas unidades de turbiedad, por lo que la calidad del agua es **Aceptable**, con valor final del $ISHM_{ICA} = 0.674$.

En la subcuenca están distribuidas 6 PTAR que tratan un caudal 210.5 l/s de aguas residuales que representan el 74.04% de la capacidad instalada. Cabe mencionar que en la localidad de Hidalgo del Parral solo existe una PTAR la cual funciona a un 74% de su capacidad, que es de 270 l/s (CONAGUA, 2015; CONAGUA, 2017d), lo cual se refleja en la alta contaminación fecal a través de la subcuenca.

4.3.1.5.3 Río Florido.

La región baja de la subcuenca tiene presencia de Coliformes Fecales por lo que se clasifica con una calidad *Contaminada* conforme a la **metodología actual**. Esta contaminación puede ser derivada de la actividad pecuaria de la región y la falta de capacidad de tratamiento de las PTAR en la subcuenca.

Sin embargo, con la **metodología anterior** la subcuenca se puede clasificar con una calidad *Aceptable* de agua, porque aun cuando hay contaminación fecal, se encontró poca materia orgánica, una buena saturación de Oxígeno Disuelto en el río y una aceptable Turbiedad. Así, con la interacción de estas variables el valor calculado del $ISHM_{ICA} = 0.615$.

Como en las demás subcuencas, la contaminación fecal se puede deber en parte a la capacidad instalada de las PTAR y al caudal tratado, que no alcanzan a combatir la contaminación difusa de la región. Las 28 PTAR en la subcuenca tratan un total de 157.8 l/s que es un 72.53% de la capacidad instalada en conjunto. Si bien son bastantes las plantas en operación en la zona, cabe resaltar que del total, 27 de ellas tiene una capacidad instalada de menos de 7 l/s, sobresaliendo la planta de la localidad de Jiménez la cual trabaja al 70% de su capacidad siendo esta de 100 l/s (CONAGUA, 2015; CONAGUA, 2017d).

4.3.1.5.4 Río San Pedro

Por su parte, esta subcuenca aguas arriba de la presa Fco. I Madero fue detectada contaminación biológica, puesto que las Coliformes Fecales superan las 1,500 NMP/100 ml, de acuerdo con la **metodología actual** está clasificada como **Contaminada**.

Si consideramos la **metodología anterior**, la calidad del río en esa parte de la subcuenca es **Aceptable** por la escasa materia orgánica, la baja turbiedad y la buena saturación de Oxígeno en el río, por lo que se clasifica con una calidad **Aceptable** con un $ISHM_{ICA} = 0.699$.

El caudal tratado de las 18 PTAR localizadas en la subcuenca es poco menos del 60% de su capacidad instalada, la cual supera los 26 l/s, las cuales no alcanzan a contener la contaminación por la actividad pecuaria y las descargas municipales de la zona. Cabe mencionar, que en el cauce principal del río solo están ubicadas 4 PTAR que tratan un caudal de 2.8 l/s que representa el 80% de su capacidad instalada (CONAGUA, 2015; CONAGUA, 2017d).

4.3.1.5.5 Río Conchos 2

Esta subcuenca presenta contaminación fecal con más de 3,500 NMP/100 ml, por lo que la clasificación del afluente es **Contaminada** de acuerdo con la evaluación utilizada actualmente.

Por su parte, esta subcuenca se clasifica con una calidad **Aceptable** por la interacción de la baja concentración de DBO_5 , una buena saturación de Oxígeno Disuelto y una baja concentración de turbiedad, aun cuando tiene una alta concentración de Coliformes Fecales, siendo su $ISHM_{ICA} = 0.651$.

Hay 22 PTAR en operación en la subcuenca que en conjunto tiene una capacidad instalada de 389.9 l/s de los cuales el caudal tratado alcanza los 298.9 l/s (76.66%), de las que destacan

las ubicadas en los municipios Camargo, Pedro Meoqui y Saucillo con un caudal tratado de 100 l/s, 81 l/s y 41 l/s respectivamente (CONAGUA, 2015; CONAGUA, 2017d).

4.3.1.5.6 Río Conchos 3.

Como es un común denominador en las subcuencas de esta región, y considerando que en esta zona se encuentra ubicada la ciudad más importante y grande de toda la cuenca, su afluente en el punto monitoreado está clasificado como **Contaminado** por la contaminación biológica encontrada, que se puede deber a las descargas municipales de esta gran urbe.

Sin consideramos, además de los Coliformes Fecales, la ponderación de las otras variables monitoreadas en el afluente como la Materia Orgánica, El Oxígeno Disuelto y la turbiedad, la calidad del agua es clasificada como **Aceptable** por la poca concentración de DBO₅ y turbiedad, además de la buena saturación de oxígeno que se encontró, con un valor de $ISHM_{ICA} = 0.578$.

Las pocas PTAR en operación de la subcuenca no ayudan en la mitigación de la contaminación. De las 6 plantas dentro de la región, 3 de ellas están ubicadas dentro de la mancha urbana de la ciudad de Chihuahua con un caudal tratado de 2,055 l/s que representa el 55.36% de su capacidad instalada (CONAGUA, 2015; CONAGUA, 2017d).

4.3.1.5.7 Río Conchos 4

Esta subcuenca tiene una calidad de agua **Aceptable** de acuerdo con la **metodología actual** vigente, esto debido a la concentración de materia orgánica en el río y la presencia de Coliformes Fecales.

Al considerar las demás variables que intervienen en la clasificación de la calidad del agua el valor del $ISHM_{ICA} = 0.648$. Este valor está asociado con la poca concentración de DBO₅,

una buena saturación de Oxígeno Disuelto, una aceptable Turbiedad y con aceptable contaminación fecal en el río.

En la parta media-alta de la subcuenca solo se encuentra un PTAR que opera a un 35.71% de su capacidad con un caudal tratado de 0.5 l/s (CONAGUA, 2015; CONAGUA, 2017d).

El resultado del $ISHM_j$ con la **metodología actual** y **anterior** soportado por un SIG representando cada una de las subcuenclas que conforman la cuenca del río Conchos se presenta en la Figura 36 y 37 respectivamente.

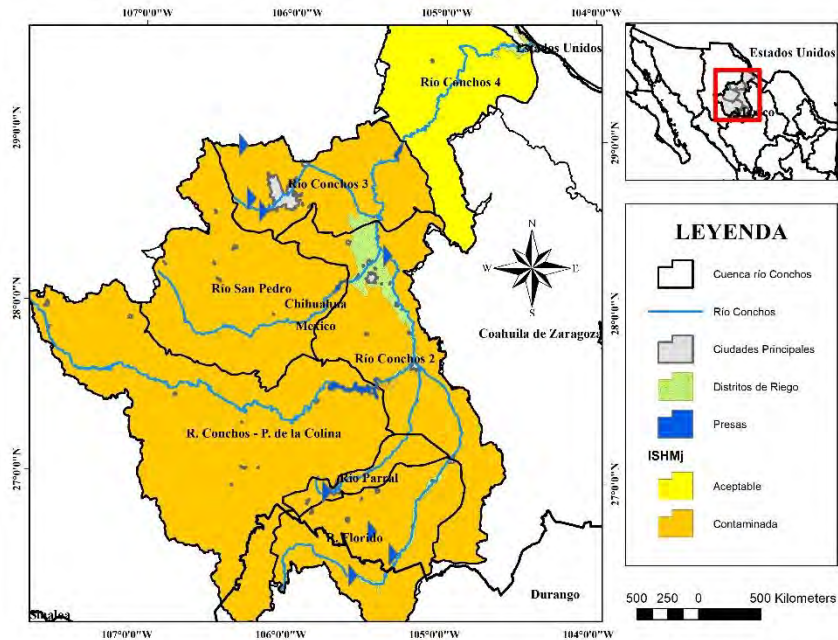


Fig.36 Resultados del $ISHM_j$ con la metodología actual de la CONAGUA dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

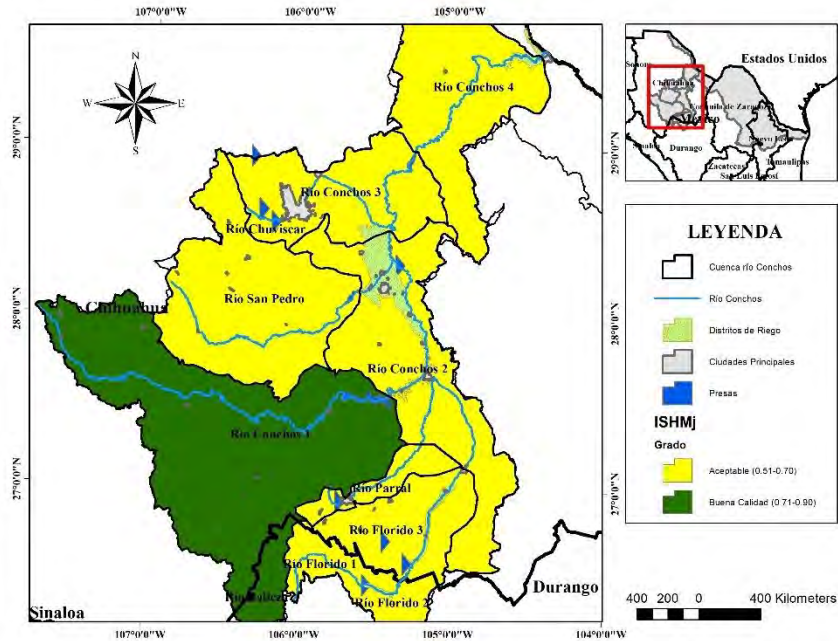


Fig.37 Resultados del ISHM_j con la metodología anterior de la CONAGUA dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

4.3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Como se estableció anteriormente, se realizó un ejercicio de comparación entre los métodos propuestos en esta investigación. Los resultados de este ejercicio se presentan en la siguiente tabla:

Cuenca	Estación de Monitoreo		CONAGUA ¹	CONAGUA ²		WQI		BATELLE-COLUMBUS	
	Clave	Nombre	ISHM _{ICA}	ISHM _j	CALIDAD	ISHM _j	CALIDAD	ISHM _j	CALIDAD
R. Conchos - P de la Colina	DLCHI413	La Boquilla (Colina)	Contaminada	0.704	Buena Calidad	0.678	Media	0.718	Buena Calidad
R. Parral	DLCHI409	Río Florido	Contaminada	0.674	Aceptable	0.652	Media	0.715	Buena Calidad
R. Florido	DLCHI396	Ojo de Dolores	Contaminada	0.615	Aceptable	0.593	Media	0.663	Aceptable
R. San Pedro	DLCHI419	RH24-5 Bravo Conchos	Contaminada	0.699	Aceptable	0.671	Media	0.715	Buena Calidad
R. Conchos 2	DLCHI428	Puente Julimes	Contaminada	0.651	Aceptable	0.625	Media	0.700	Buena Calidad
R. Conchos 3	DLCHI363	Río Chuvíscar 1	Contaminada	0.578	Aceptable	0.551	Media	0.665	Aceptable
R. Conchos 4	DLCHI382MI	Puente Ojinaga	Aceptable	0.648	Aceptable	0.599	Media	0.689	Aceptable

Tabla 41 Comparación de resultados del $ISHM_j$ con los métodos propuestos en esta investigación. Elaboración propia.

4.4 CÁLCULO DEL $ISHM_k$

4.4.1 VULNERABILIDAD HÍDRICA GLOBAL ($ISHM_{VHG}$)

4.4.1.1 Índice de Escurrimiento Superficial (IE_{cc})

Este índice relaciona el Volumen de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático (VES_{cc}) y El Volumen de Escurrimiento Superficial Histórico (VES_H) conforme a la ecuación 18.

4.4.1.1.1 VES_{cc}

Para el cálculo de la primera variable se considera la anomalía de precipitación anual (%) bajo el escenario RCP 8.5 en el periodo 2015-2039 en la zona de estudio (Figura 38).

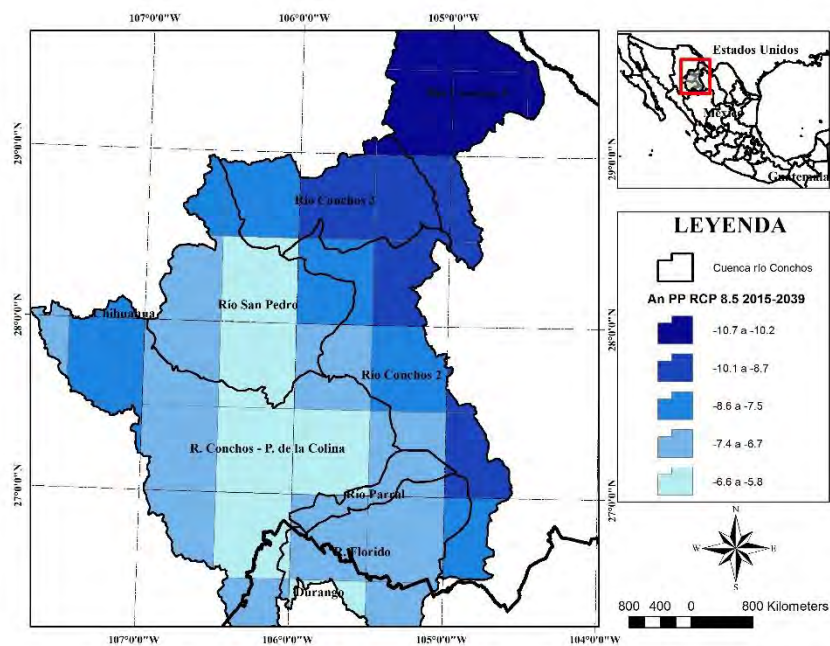


Fig.38 Anomalía de precipitación anual (%) bajo el escenario RCP 8.5 en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información del INECC (2015).

Con base en este escenario se proyectó el cambio de precipitación para el año 2039. El resultado de esta proyección y comparación con la precipitación actual se ven en la Tabla 42.

Sub Cuenca	Precipitación, mm	
	2015	2039
R. Conchos-P. de la Colina	528.34	492.62
Río Parral	410.77	381.53
Río Florido	390.00	362.43
Río San Pedro	383.31	357.71
R. Conchos 2	294.90	271.08
R. Conchos 3	322.04	294.24
R. Conchos 4	293.63	263.71
$\Sigma=$	2,622.99	2,423.33

Tabla 42 Proyección de precipitación al año 2039 bajo el escenario RCP8.5 por subcuenca. Elaboración propia.

El Coeficiente de escurrimiento estimado (C_{cc}) considera el cambio de uso de suelo en la cuenca en un periodo mínimo de 30 años. Dicho cambio se analizó en el periodo 1970 -2011. En base en el cambio de uso de suelo se puede calcular el parámetro adimensional K y utilizando la ecuación (9) y/o (10) se puede estimar el C_{cc} . Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Cuenca	Área	C_e	
		2017	2039
R. Conchos - P de la Colina	20,814.00	0.097	0.092
R. Parral	1,625.00	0.087	0.083
R. Florido	7,740.00	0.085	0.083
R. San Pedro	10,650.00	0.075	0.073
R. Conchos 2	10,855.15	0.092	0.088
R. Conchos 3	6,985.50	0.049	0.046
R. Conchos 4	8,726.44	0.059	0.056

Tabla 43 Estimación del Coeficiente de Escurrimiento para el año 2039. Elaboración propia.

Una vez contando con la estimación de estas dos variables, se puede calcular el VES_{cc} conforme a la ecuación (19).

4.4.1.1.2 VES_H

El VES_H se considera igual al $VMAEN$ calculado con la ecuación (7). Así, la comparación de los volúmenes de escurrimiento se muestra en la tabla 44.

Sub Cuenca	$VES_H \text{ Hm}^3$	$VES_{cc} \text{ Hm}^3$
R. Conchos-P. de la Colina	1,090.37	966.50
Río Parral	60.09	53.30
Río Florido	265.90	240.06
Río San Pedro	314.14	284.94
R. Conchos 2	304.12	265.81
R. Conchos 3	116.38	99.84
R. Conchos 4	157.16	134.49
$\Sigma=$	2,308.15	2,044.94

Tabla 44 Volumen de escurrimiento histórico y estimado por subcuenca. Elaboración propia.

4.4.1.1.3 Resultados

Aplicando la ecuación (18) se obtienen los siguientes resultados para cada una de las subcuencas:

Cuenca	Área	Escurrimiento, hm^3		IES_{cc}
		2017	2039	
R. Conchos - P de la Colina	20,814.00	1,090.37	966.50	0.11
R. Parral	1,625.00	60.09	53.30	0.11
R. Florido	7,740.00	265.90	240.06	0.10
R. San Pedro	10,650.00	314.14	284.94	0.09
R. Conchos 2	10,855.15	304.12	265.81	0.13

R. Conchos 3	6,985.50	116.38	99.84	0.14
R. Conchos 4	8,726.44	157.16	134.49	0.14

Tabla 45 Resultados de IES_{cc} por subcuenca. Elaboración propia.

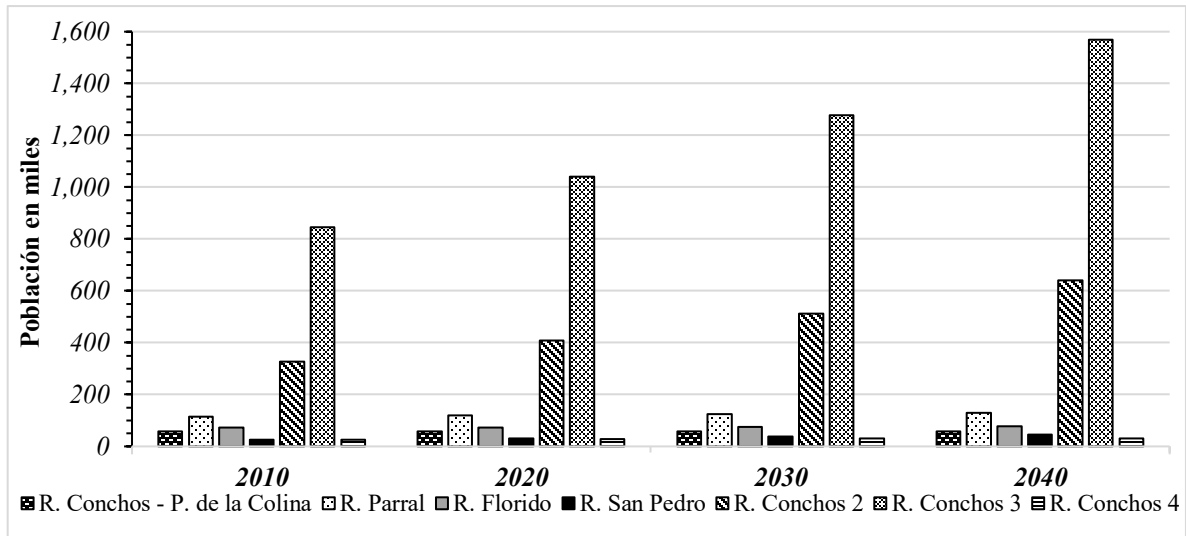
4.4.1.2 Índice de Población (IP)

En base al censo de población y vivienda del año 2000 y 2010 se calculó la tasa de crecimiento poblacional para cada una de las subcuencas que conforman la cuenca del río Conchos. Los resultados muestran una tasa por debajo de 5% en la parte alta de la cuenca, y una tasa de más del 20% en la parte media-baja de la región en la década (Tabla 46).

Cuenca	Población		Tasa de crecimiento, %
	2000	2010	
R. Conchos - P. de la Colina	57,348	57,571	0.39%
R. Parral	108,655	113,803	4.74%
R. Florido	70,339	72,083	2.48%
R. San Pedro	21,961	26,941	22.68%
R. Conchos 2	261,060	326,598	25.10%
R. Conchos 3	688,542	846,027	22.87%
R. Conchos 4	24,254	25,960	7.03%

Tabla 46 Tasa de crecimiento por subcuenca. Elaboración propia con información de INEGI (2017b; 2017c)

Tomando como referencia este periodo la proyección regional de la población para el año 2040 se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 9 Proyección de la población por subcuenca. Elaboración propia con información de INEGI (2017c).

Con la población de referencia y la población proyectada se calcula el porcentaje de aumento al cual se denominó Índice de Población. Esta variable se expresa como la cantidad de habitantes vulnerables en la cuenca, entre mayor sea la población en la cuenca más vulnerable es y, viceversa. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Cuenca	IP
R. Conchos - P. de la Colina	0.012
R. Parral	0.149
R. Florido	0.076
R. San Pedro	0.663
R. Conchos 2	0.958
R. Conchos 3	0.855
R. Conchos 4	0.226

Tabla 47 Índice de Población por subcuenca. Elaboración propia.

4.4.1.3 Índice de Marginación Social (IM)

Los valores para este índice se tomaron del informe *Índice Marginación por entidad federativa y municipios 2015* y de los *Mapas de grado de Marginación por municipio 2015*

(CONAPO, 2015; CONAPO, 2015b). De la capa *shapefile* del grado de marginación se obtuvo el Índice de Marginación (*IM*) para cada uno de los municipios dentro de la cuenca del río Conchos. Se procesó esta información para ubicar los municipios que se ubican dentro de cada subcuenca. Así, se calculó el *IM* por subcuenca promediando los valores de cada municipio para sacar un valor único por subcuenca. Este valor se normalizó utilizando la ecuación (12) y los rangos establecidos por CONAPO (2015). La **Figura 39** y la **Tabla 48** muestran el grado de marginación y el índice de marginación, respectivamente.

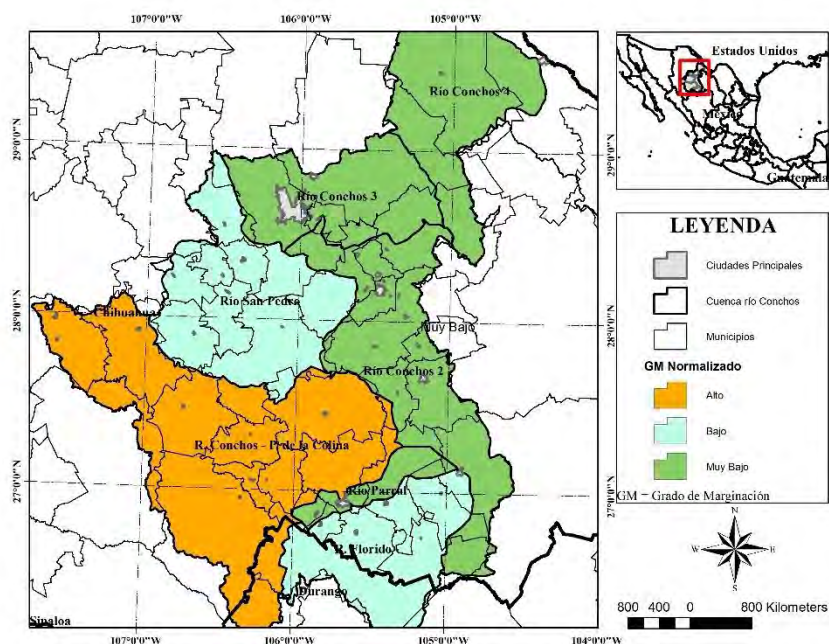


Fig.39 Grado de marginación por subcuenca. Elaboración propia con información de CONAPO (CONAPO, 2015b).

Subcuenca	<i>IM</i>	
	CONAPO	Normalizado
R. Conchos - P. de la Colina	0.318	0.351
R. Parral	-1.290	0.129
R. Florido	-0.900	0.183
R. San Pedro	-0.669	0.215
R. Conchos 2	-1.193	0.143

R. Conchos 3	-1.458	0.106
R. Conchos 4	-1.51	0.099

Tabla 48 Índice de Marginación por subcuenca. Elaboración propia con información de CONAPO (CONAPO, 2015b).

4.4.1.4 Grado de explotación de acuíferos (IA)

Los acuíferos subexplotados y sobreexplotados se obtuvieron de la información actualizada de la CONAGUA (2018b). En la Figura 40 se presentan la condición de los acuíferos dentro de la cuenca del río Conchos. En base en estos se toman los valores 0 y 1, Subexplotados y sobreexplotados, respectivamente.

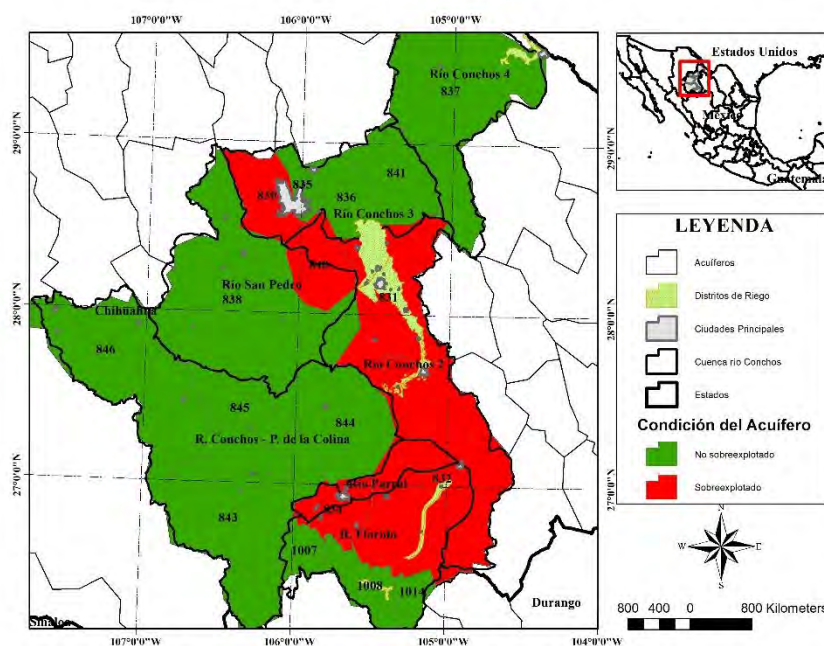


Fig.40 Condición de acuíferos dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia con información de CONAGUA (2018b).

4.4.1.5 Consideraciones Generales.

Cabe mencionar que para la determinación de este índice se tomaron algunas consideraciones:

1. Si los acuíferos sobreexplotados abarcan más del 50% del área de la cuenca, el valor del IA se toma como cero, por considerarse que la cuenca esta fuera en una mayor parte del área de influencia del acuífero.
2. Si un acuífero se encuentra sin disponibilidad de agua (como el caso del acuífero 838 Alto San Pedro), aun cuando esté no esté sobreexplotado, se considera un IA igual a cero.
3. Si la sobreexplotación de los acuíferos supera en un 50% la disponibilidad media anual total de los demás acuíferos dentro de la cuenca (como el caso de la subcuenca río Conchos 3: -57.66 contra 36.03 hm^3) también se considera un IA igual a cero.

Los resultados de IA por subcuenca se presentan en la Tabla 49.

Subcuenca	IA	Observaciones
R. Conchos - P. de la Colina	0.00	Acuíferos subexplotados
R. Parral	1.00	Acuíferos sobreexplotados
R. Florido	1.00	Los acuíferos sobreexplotados abarcan más del 50% del área de la cuenca.
R. San Pedro	1.00	Acuíferos en Equilibrio. No cuenta con Disponibilidad
R. Conchos 2	1.00	Acuíferos sobreexplotados
R. Conchos 3	1.00	La sobreexplotación del acuífero 830 supera la disponibilidad de los acuíferos 835,836 y 841
R. Conchos 4	0.00	Acuíferos subexplotados

Tabla 49 Grado de sobreexplotación de acuíferos. Elaboración propia

4.4.2 RESULTADOS DEL $ISHM_k$

La Tabla 50 presenta el resumen de las variables de entrada y el cálculo del componente $ISHM_{VHG}$ y $ISHM_k$ normalizados, el cual se determina conforme a la ecuación (17).

Subcuenca	IE_{cc}	IP	IM	IA	$ISHM_{VHG}$	Grado	$ISHM_k$	Grado
-----------	-----------	------	------	------	--------------	-------	----------	-------

	0.71	0.13	0.09	0.07				
R. Conchos - P. de la Colina	0.113	0.012	0.351	0.000	0.315	Baja	0.685	Baja
R. Parral	0.112	0.149	0.129	1.000	0.503	Media	0.497	Media
R. Florido	0.096	0.076	0.183	1.000	0.459	Media	0.541	Media
R. San Pedro	0.092	0.663	0.215	1.000	0.671	Alta	0.329	Alta
R. Conchos 2	0.125	0.958	0.143	1.000	0.825	Muy Alta	0.175	Muy Alta
R. Conchos 3	0.141	0.855	0.106	1.000	0.810	Muy Alta	0.190	Muy Alta
R. Conchos 4	0.144	0.226	0.099	0.000	0.391	Baja	0.609	Baja

Tabla 50 Resultados del $ISHM_k$ de cada una de las subcuencas. Elaboración propia.

4.4.1.6 Análisis y discusión de resultados por subcuenca

4.4.1.6.1 Río Conchos – Presa de la Colina.

El $ISHM_k$ en esta subcuenca es **Bajo** con un valor de 0.685. Esto se debe, por un lado, al escurrimiento que se tiene en la cuenca (1,090.37 hm³) aun cuando se proyecta una disminución del 11.3%, esta subcuenca tendrá más de 960 hm³ por año de escurrimiento natural. Otro factor por considerar es la *Baja* tasa de crecimiento de población que se espera en la región, con menos del 2% de crecimiento poblacional y por ello un $IP = 0.012$. Aun cuando tiene un *Alto* grado de marginación ($IM = 0.351$), no cuenta con acuíferos sobreexplotados, y eso disminuye la vulnerabilidad hídrica de la subcuenca.

4.4.1.6.2 Río Parral.

Esta subcuenca tiene un $ISHM_k = 0.497$ con lo cual es clasificada con una vulnerabilidad hídrica **Media**. Esto se debe al impacto proyectado en el escurrimiento natural que disminuirá un 11.3%. Esto sumado con un $IP = 0.149$, manifestado por un incremento del 14.9% de la población para el año 2040 con respecto al periodo de referencia (2000 – 2010). Tiene un índice de marginación *Muy Bajo* (0.129), pero la región está asentada en acuíferos sobreexplotados, que hace a la región vulnerable hídricamente.

4.4.1.6.3 Río Florido.

La vulnerabilidad hídrica del río florido es **Media** con un valor de $ISHM_k = 0.541$, ya que la proyección es que habrá una disminución de 24.76 hm³/año (-9.7%) de escurrimiento natural en la subcuenca. Aun cuando *IP* es el más bajo de la cuenca con 0.076 (5,496 habitantes para el año 2040) y su índice de *IM* es *Bajo* (0.183), esta subcuenca está asentada sobre acuíferos intensamente sobreexplotados (Jiménez – Camargo y Parral – Valle de Verano) que abarcan más de la mitad de la subcuenca, además de que los acuíferos con disponibilidad no alcanzan para suplir la demanda de agua en la región, por lo que lo coloca como vulnerable hídricamente.

4.4.1.6.4 Río San Pedro.

Esta subcuenca es **Altamente** vulnerable hídricamente con un $ISHM_k = 0.329$, esto se debe a la disminución proyectada de escurrimiento natural que alcanza el 9.3%, que equivale a 28.06 hm³ por año. Además, se proyecta que habrá 17,872 habitantes más en la cuenca para el año 2040 con respecto al periodo de referencia, que demandaran más agua, por lo que su *IP* = 0.633. Su índice de marginación es *Bajo* con un *IM* = 0.215, pero los acuíferos en donde está asentada la subcuenca no tienen disponibilidad de agua, ya que la recarga contra la demanda está en *Equilibrio*. Así, un mayor número de habitantes, más la disminución de escurrimiento y la restricción de agua subterránea que se tiene, hace a la subcuenca vulnerable hídricamente

4.4.1.6.5 Río Conchos 2

Con un $ISHM_k = 0.175$ esta subcuenca está clasificada con una vulnerabilidad hídrica **Muy Alta**, ya que cuenta con particularidades bien definidas. Primero, se proyecta una disminución de 12.6% de escurrimiento natural con respecto al actual. Segundo, se proyecta que la población pasará de 326,598 habitantes a 639,489 habitantes para el año 2040,

teniendo el índice de población más alto de la cuenca, con un $IP = 0.958$, por lo que el abastecimiento de agua será un gran reto. Tercero, la subcuenca está asentada sobre acuíferos extremadamente sobreexplotados, como Meoqui - Delicias y Jiménez -Camargo. Si bien, tiene un índice de marginación *Muy Bajo* ($IM = 0.143$), en esta región se encuentra el Distrito de Riego más grande de la cuenca, por lo que es y seguirá siendo Vulnerable Hídricamente.

4.4.1.6.6 Río Conchos 3.

La vulnerabilidad hídrica en esta subcuenca es *Muy Alta* con un $ISHM_k = 0.190$. Por un lado, esto se debe a que se proyecta una disminución del escurrimiento directo de hasta 14.2%, por otro lado, se proyecta un aumento de la población, pasando de 846,027 a 1,569,443 habitantes en la región, por lo que su $IP = 0.855$. Todo esto sumando a que la mayor concentración de habitantes esa asentada sobre el acuífero Chihuahua – Sacramento el cual está extremadamente sobreexplotado. Aun cuando tiene una *Muy Baja* marginación con un $IM = 0.106$ y que la subcuenca cuenta con tres acuíferos con disponibilidad de hasta 36.03 hm^3 por año (en la región noreste de la subcuenca), es una región altamente vulnerable hídricamente por la cantidad de personas en la región, el poco escurrimiento natural y la sobreexplotación de agua subterránea actual.

4.4.1.6.7 Río Conchos 4.

Por último, esta subcuenca tiene un $ISHM_k = 0.609$ por lo que está clasificada como una *Media* vulnerabilidad hídrica. Se proyecta que habrá una disminución del escurrimiento en un 14.42% con respecto al actual, pero todavía se dispondrá de más de 130 hm^3 al año de escurrimiento natural. Si bien, se proyecta que habrá en 5,872 habitantes más en la región, con un $IP = 0.226$, este aumento no proyecta un gran incremento en la demanda de agua. La disponibilidad de agua subterránea, con un poco más de 62 hm^3 por año, y su índice de

marginación clasificado como *Muy Bajo*, hacen a la región muy poco vulnerable hídricamente hablando.

De manera general y a manera de resumen los resultados muestran una *Baja* vulnerabilidad hídrica en las subcuencas R. Conchos – P. de la Colina. La cuenca R. Parral, R. Florido y R. Conchos 4 muestran una vulnerabilidad *Media* y la parte media-baja de la cuenca muestra un vulnerabilidad *Alta* y *Muy Alta*, respectivamente. La Figura 41 muestran el resultado del $ISHM_k$ para cada una de las subcuencas del río Conchos.

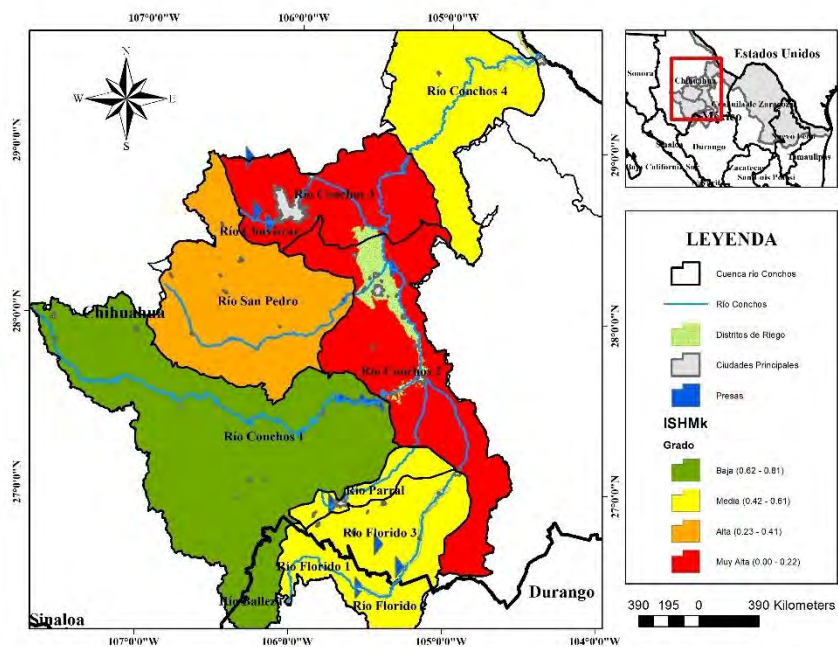


Fig.41 Resultado del $ISHM_k$ por subcuenca. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5: CALCULO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL *ISHM*.

En este capítulo se presentan los cálculos y los resultados del *ISHM* de acuerdo con la metodología establecida del Capítulo 3 e implementada en la cuenca del río Conchos conforme al Capítulo anterior. Primero, se hace un resumen de sus componentes mostrando las ecuaciones que intervienen en cada uno de ellos. Segundo, se muestran el resumen de los resultados con su respectiva clasificación, así como los mapas soportados y elaborados en un SIG de cada componente que conforman el *ISHM*. Tercero, se presenta el cálculo del *ISHM*, su clasificación y los resultados de la interacción de los tres componentes (Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad). Por último, se analizan y discuten los resultados del *ISHM* por subcuenca y se muestran los mapas soportados por SIG elaborados en base a los resultados obtenidos.

5.1 COMPONENTES

El resumen de los componentes del *ISHM* con las ecuaciones de cada componente se presenta en la siguiente tabla:

ÍNDICE DE SEGURIDAD HÍDRICA PARA MÉXICO (<i>ISHM</i>)		
Ecuación:	$ISHM = \left[\prod_{m=1}^3 ISHM_{i-k} \right]^{1/3}$	
Donde:	CANTIDAD	$ISHM_i = (ISHM_{WSI} * W_a) + (ISHM_{Idas} * W_b)$
	CALIDAD	$ISHM_j = ISHM_{ICA}$
	VULNERABILIDAD	$ISHM_k = 1 - ISHM_{VHG}$

Tabla 51 Resumen de componentes y ecuaciones para el cálculo del *ISHM*. Elaboración propia.

5.2 RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL ISHM

El resumen de los resultados, clasificación y mapas de cada componente implementado en la cuenca del río Conchos y expuesto en el Capítulo anterior se presentan a continuación:

<i>ISHM</i>						
SUBCUENCA	CANTIDAD	Disponibilidad	CALIDAD	Calidad	VULNERABILIDAD	Grado
	<i>ISHM_i</i>		<i>ISHM_j</i>		<i>ISHM_k</i>	
R. Conchos - P. de la Colina	0.916	Muy Alta	0.704	Buena Calidad	0.685	Baja
Río Parral	0.120	Baja	0.674	Aceptable	0.497	Media
Río Florido	0.411	Moderada	0.615	Aceptable	0.541	Media
San Pedro	-0.263	Muy Baja	0.699	Aceptable	0.329	Alta
Conchos 2	-0.299	Muy Baja	0.651	Aceptable	0.175	Muy Alta
Conchos 3	0.339	Baja	0.578	Aceptable	0.190	Muy Alta
Conchos 4	0.438	Moderada	0.648	Aceptable	0.609	Baja

Tabla 52 Resumen de resultados de los tres componentes del ISHM. Elaboración propia.

Los resultados de cada uno de los componentes por separado resaltan información relevante con respecto al recurso hídrico en la cuenca (ver capítulo anterior). Por un lado, se puede conocer la disponibilidad o cantidad de agua para aprovechar, así como su calidad. Y por otro, se puede conocer que tan vulnerable hídricamente es la cuenca considerando los aspectos demográficos, cambios en los regímenes de precipitación e impactos en el escurrimiento por el Cambio Climático. Si bien es información relevante e importante que permite hacer un análisis detallado de cada componente, considerando las características propias y los actores involucrados, aun así, por si solos cada componente tiene sus limitantes. Los resultados de cada uno de los componentes soportados por un SIG se presentan a continuación:

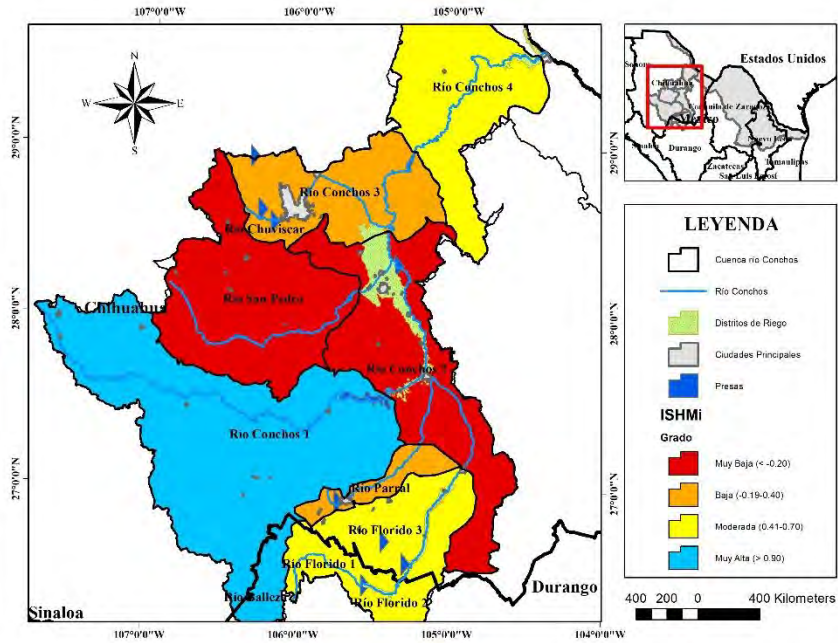


Fig.42 Resultado del componente de Cantidad o ISHM_i. Elaboración Propia.

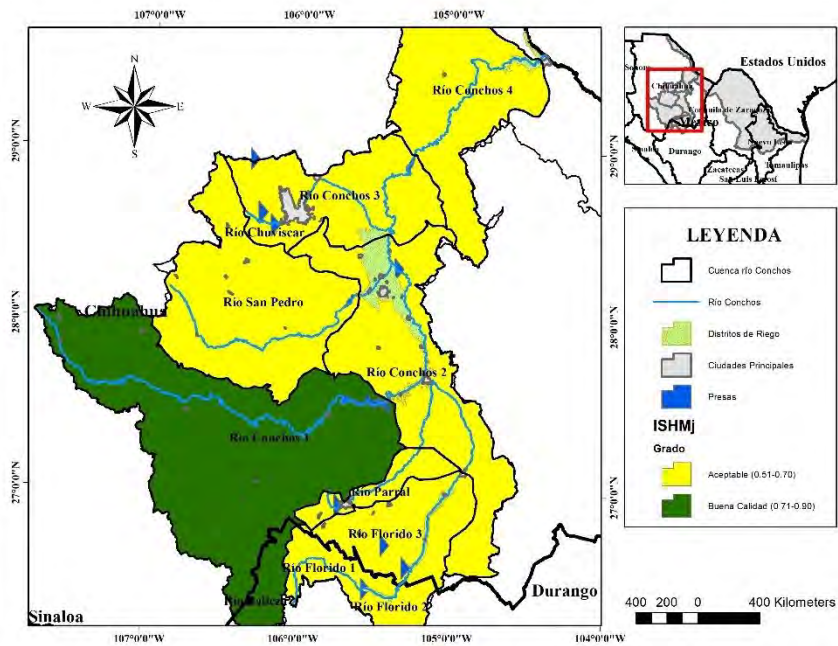


Fig.43 Resultado del componente de Calidad o ISHM_j. Elaboración Propia.

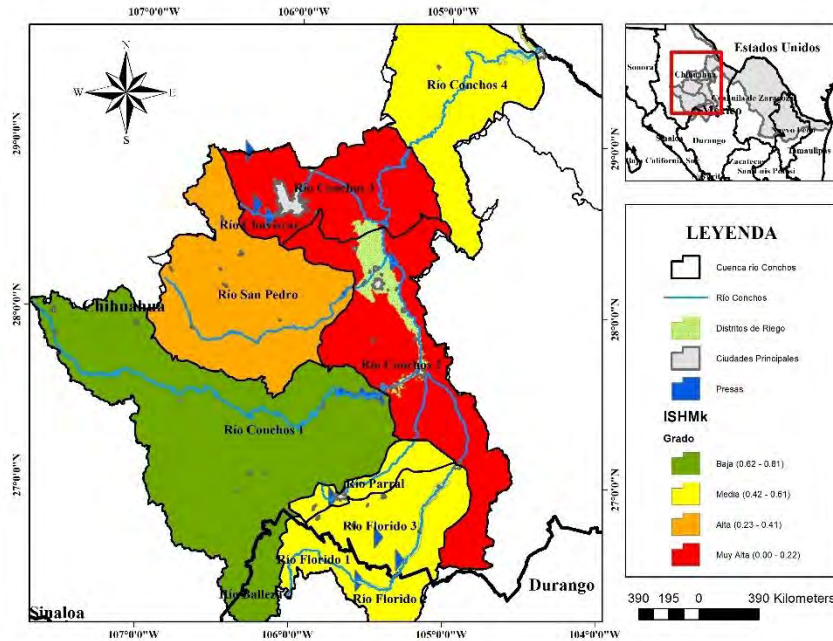


Fig.44 Resultado del componente de Vulnerabilidad o $ISHM_k$. Elaboración Propia.

5.3 CALCULO DEL ISHM

Una vez obtenidos los resultados de cada uno de los componentes es posible calcular el *ISHM* utilizando la ecuación (2) y clasificar los resultados, normalizados o sin normalizar, con base en las Tablas 11 y 12, según sea el caso.

5.3.1 RESULTADOS DEL *ISHM*

El *ISHM* provee información de la interacción entre sus componentes: Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad, focalizando así, el componente más sensible y/o el componente más importante que resulta relevante de acuerdo con la región o zona que ese este analizando. Por ello, es necesario contar con la evaluación detallada de los componentes por separado (ver Capítulo 4) y el análisis minucioso del *ISHM* en el mismo ejercicio. A continuación, se presentan los resultados normalizados y sin normalizar, así como su clasificación, del cálculo del *ISHM* para cada una de las subcuencas del río Conchos:

SUBCUENCA	ISHM*	Grado	ISHM**	Grado
R. Conchos – P. de la Colina	0.762	Alta	0.881	Alta
Río Parral	0.343	Baja	0.671	Baja
Río Florido	0.515	Moderada	0.758	Moderada
San Pedro	-0.392	Muy Baja	0.304	Muy Baja
Conchos 2	-0.325	Muy Baja	0.338	Muy Baja
Conchos 3	0.334	Baja	0.667	Baja
Conchos 4	0.577	Moderada	0.789	Moderada

*Valor sin normalizar

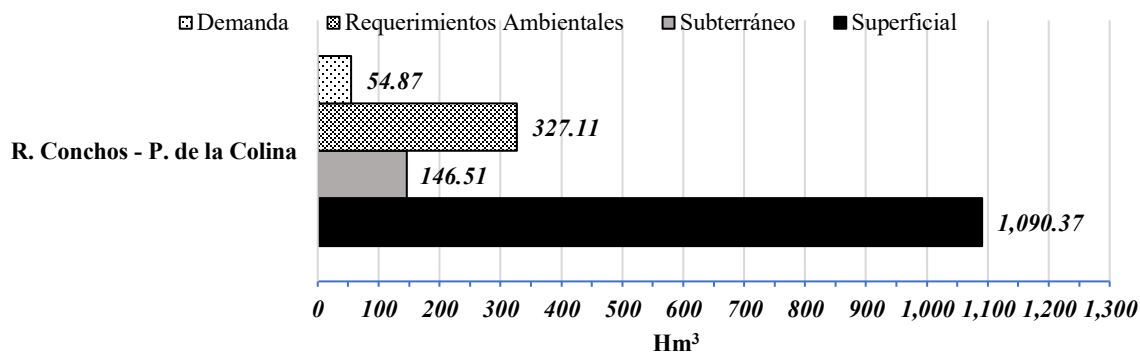
**Valor Normalizado

Tabla 53 Resultados del ISHM. Elaboración propia.

5.3.1.1 Análisis y discusión de resultados por subcuenca.

5.3.1.1.1 Río Conchos – P. de la Colina.

De acuerdo con los resultados obtenidos, esta subcuenca tiene un Índice de Seguridad Hídrica *Alta* con un *ISHM* normalizado = 0.881. El componente de Cantidad de esta región es *Alto* con un $ISHM_i = 0.916$, ya que cuenca con un volumen medio de escurrimiento de 1,090.37 hm³ al año de agua renovable superficial y 146.51 hm³ al año de agua subterránea disponible. Los requerimientos ambientales de esta cuenca son de 327.11 hm³ al año y la demanda de agua para todos los usos es de 54.87 hm³ por año. (Gráfica 10).



Gráfica 10 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos- P. de la Colina. Elaboración propia.

Además, el componente de Calidad clasifica a esta subcuenca con una *Buena Calidad* de agua con un $ISHM_j = 0.704$ (Figura 45), esto debido a la interacción de los parámetros medidos con una *alta* y *baja* calidad ambiental en ella. Con respecto a los parámetros *altos* de calidad ambiental, cuenta con poca cantidad de materia orgánica presente en el afluente ($DBO_5 < 2$ mg/l), un alto porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto (97.15%) y una Turbiedad de 10.10 NTU. Ahora, con respecto a los parámetros *bajos* de calidad ambiental, tiene una carga de materia microbiológica considerable, con una concentración de Coliformes Fecales = 1,081 NMP/100 ml.

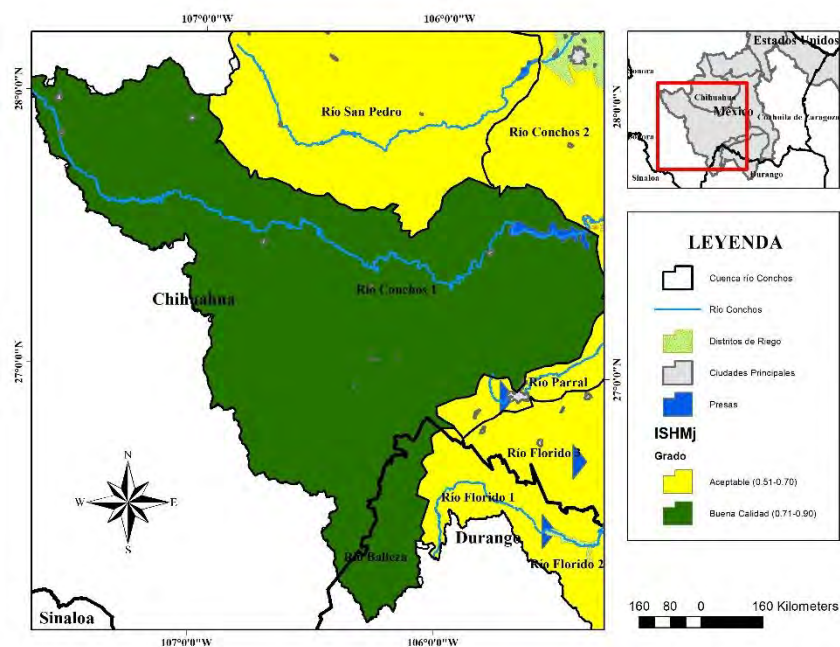
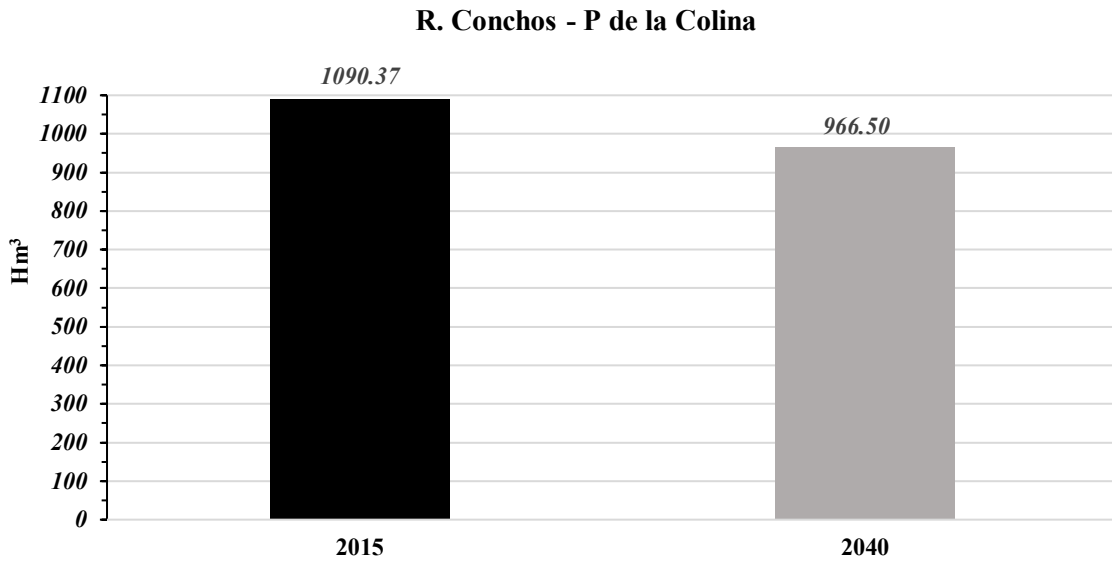


Fig. 45 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos – P. de la Colonia. Elaboración propia.

Por último, en esta subcuenca el componente de Vulnerabilidad clasifica a la subcuenca con una *Baja* vulnerabilidad hídrica con un $ISHM_k = 0.685$. Esto debido, por un lado, al bajo crecimiento poblacional que se ha observado y que se proyecta (1.2%). Por otro lado, aun cuando se proyecta que para el año 2040 habrá una disminución del 11.3% del *VMAEN*, la

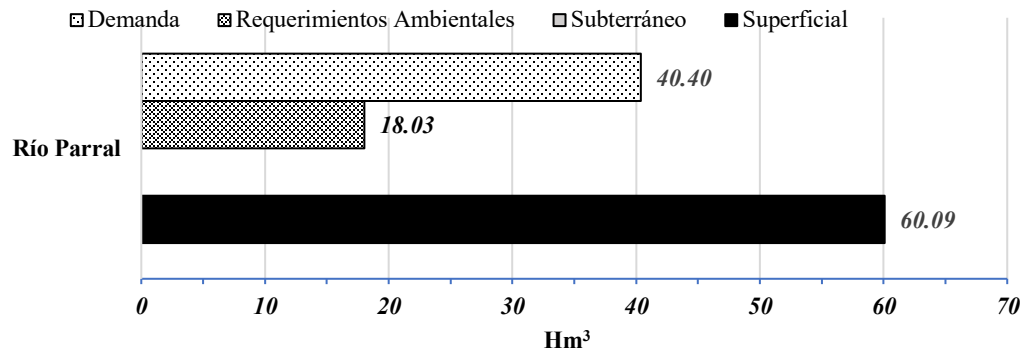
subcuenca dispondrá de más de 960 hm³ al año de volumen de escurrimiento (Gráfica 11), por lo que la hace poco Vulnerable Hídricamente.



Gráfica 11 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos – P. de la Colina. Elaboración Propia.

5.3.1.1.2 Río Parral.

Esta subcuenca tiene un **Bajo** Índice de Seguridad Hídrica con un *ISHM* normalizado = 0.671. Esto debido a que el $ISHM_i = 0.120$ que clasifica al componente de Cantidad como *Bajo*, ya que cuenta con poco más de 60 hm³ de VMAEN y no tiene disponible agua subterránea debido a que los acuíferos donde está asentada están sobreexplotados. La demanda de agua para todos los usos supera los 40 hm³ al año y este río requiere ambientalmente aproximadamente 18 hm³ por año de volumen de agua (ver Gráfica 12).



Gráfica 12 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Parral. Elaboración propia.

La calidad del agua en esta subcuenca está clasificada como *Aceptable* con un $ISHM_j = 0.674$ (Figura 46). Se tiene monitoreada contaminación microbiológica con una concentración de Coliformes Fecales = 1,509 NMP/100 ml, tiene baja concentración de DOB_5 (2.145 mg/l), una buena saturación de Oxígeno Disuelto (112%) y una baja unidad de turbiedad (10.12 NTU). Al ponderar cada uno de estos parámetros con sus respectivos parámetros de importancia y su calidad ambiental, dan la calidad del agua arriba mencionada.

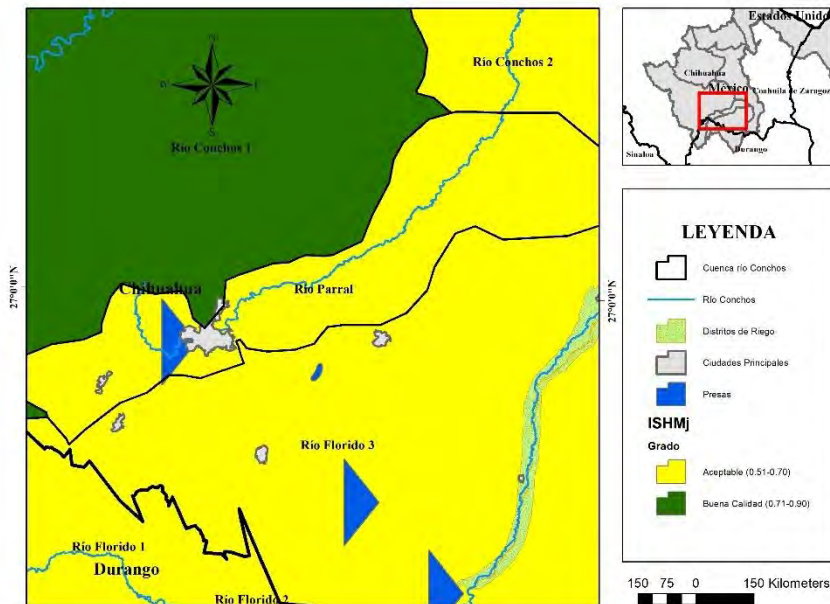


Fig.46 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Parral. Elaboración propia.

Esta cuenca tiene una clasificación *Media* con respecto a la Vulnerabilidad Hídrica con un $ISHM_k = 0.497$. Este valor tiene que ver con la sobreexplotación de acuíferos en donde está asentada la cuenca, ya que de acuerdo con la información oficial disponible el acuífero 832 Jiménez – Camargo (En *Escasez*) y 834 Parral – Valle de Verano (En *Escasez*) tiene un $ISHM_{idas}$ de 0.0188 y 0.2739 (Figura 47), respectivamente, con un déficit de -173.57 hm^3 por año.

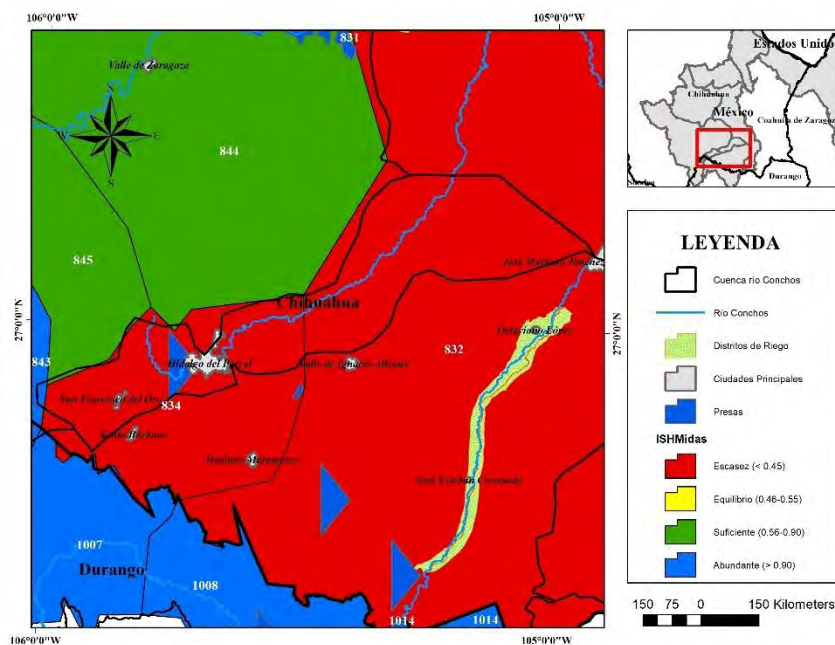
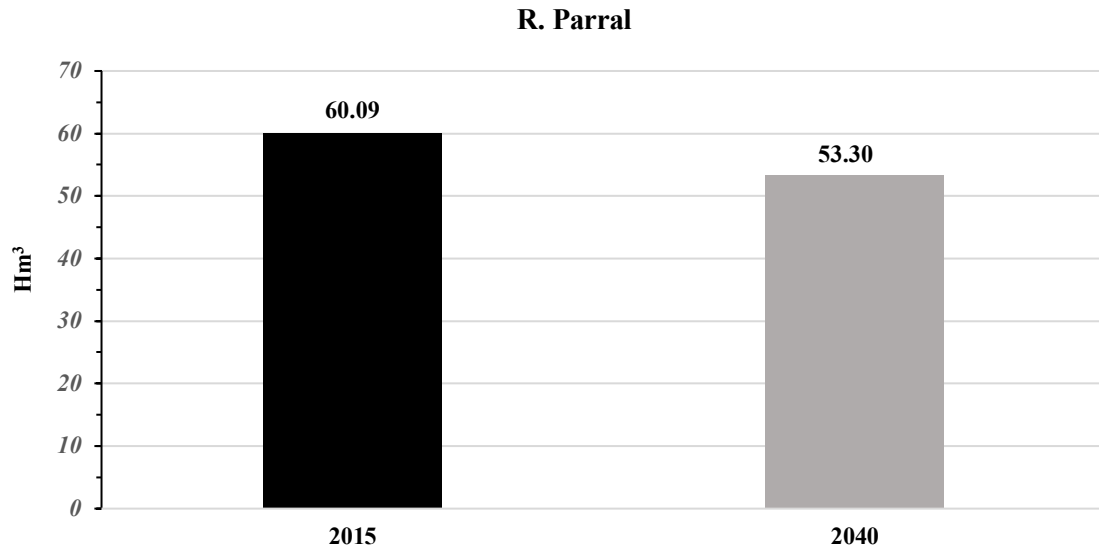


Fig. 47 Índice de Disponibilidad de agua subterránea en la subcuenca del R. Parral. Elaboración propia.

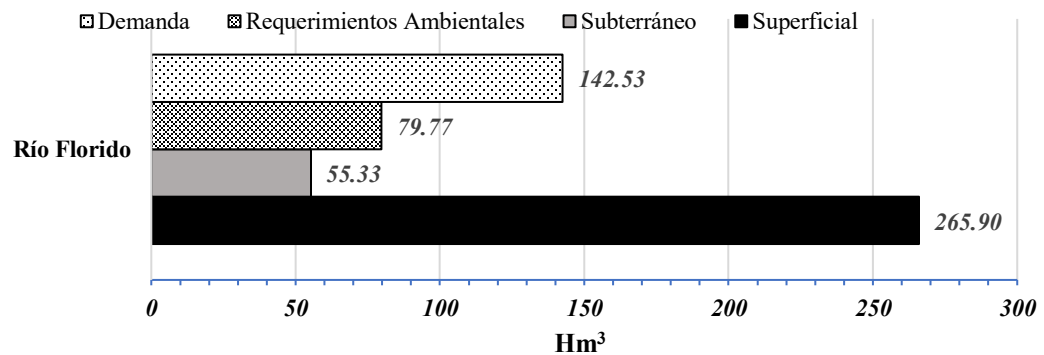
Por otro lado, está clasificada con una *Muy Baja* marginación (0.129, valor normalizado), un aumento de 14.90% de la población para al año 2040, o sea, 130,757 habitantes más en la subcuenca y una disminución proyectada al 2040 de 11.3% de *VMAEN* pasando de 60.09 hm^3 al año a 53.30 hm^3 (Gráfica 13).



Gráfica 13 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Parral. Elaboración Propia.

5.3.1.1.3 Río Florido.

La Seguridad Hídrica en el río Florido es **Moderada** con un valor normalizado del $ISHM = 0.758$. Tiene un componente de Cantidad clasificado como *Moderado* con un $ISHM_i = 0.411$. Esta cuenca cuenta con $VMAEN$ de 265.90 hm^3 por año y cuenta con una disponibilidad de agua subterránea en la región sur de 55.33 hm^3 al año. El afluente de esta subcuenca requiere ambientalmente 79.77 hm^3 por año y la demanda de agua para todos los usos es de 142.53 hm^3 al año (Gráfica 14).



Gráfica 14 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Florido. Elaboración propia.

Esta subcuenca tiene un $ISHM_j = 0.615$ lo que la clasifica con una *Aceptable* calidad del agua (Figura 48). Cuenta con poca concentración de DBO_5 (menos de 2 mg/l), tiene una aceptable saturación de oxígeno Disuelto (69.53%) y una Turbiedad de 10.10 NTU. La contaminación fecal en la subcuenca es considerable con una concentración de 1,229.5 NMP/100 ml de Coliformes Fecales, que es el parámetro que interviene para que baje la calidad de agua en el afluente.

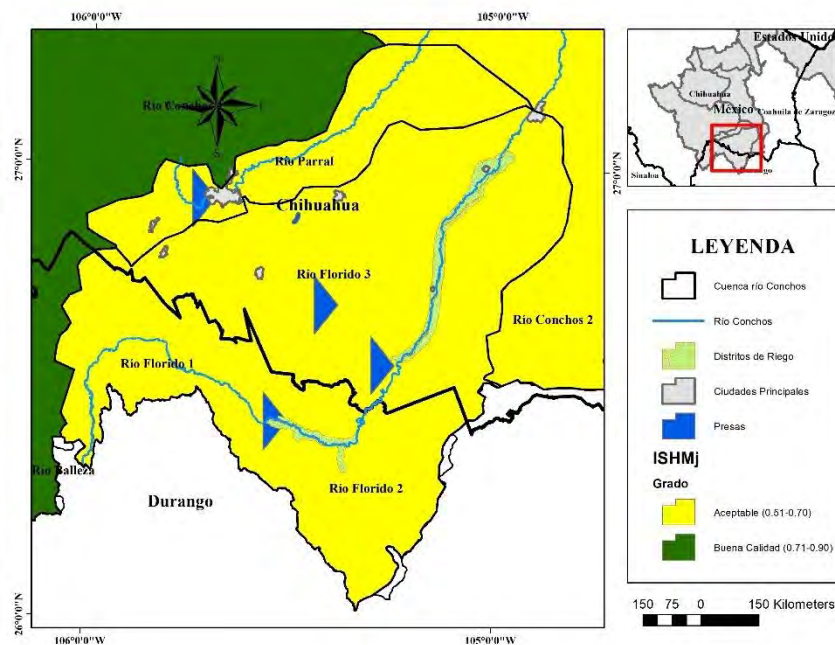
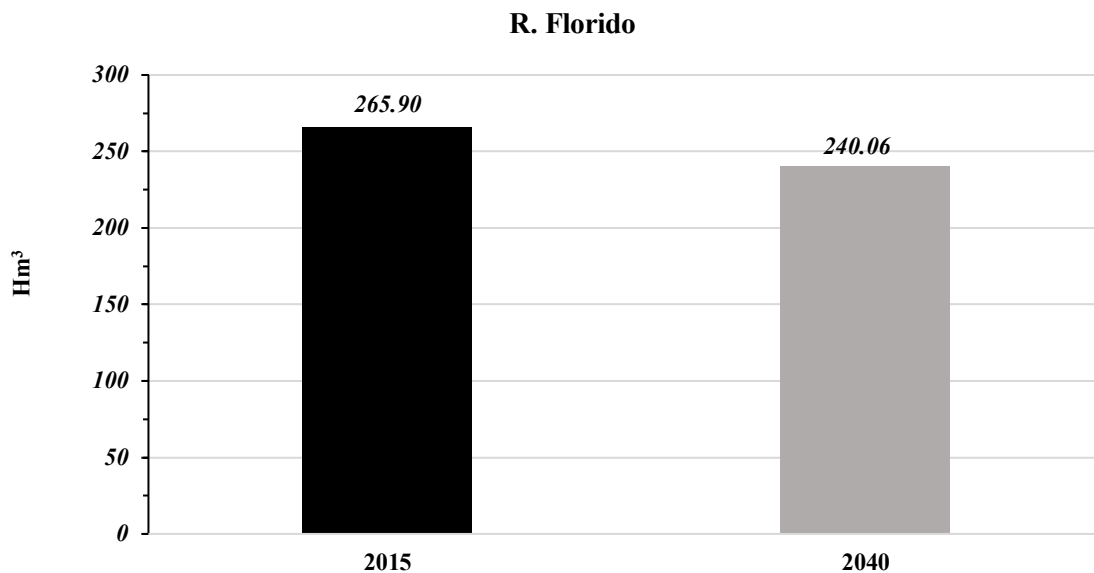


Fig. 48 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Florido. Elaboración propia

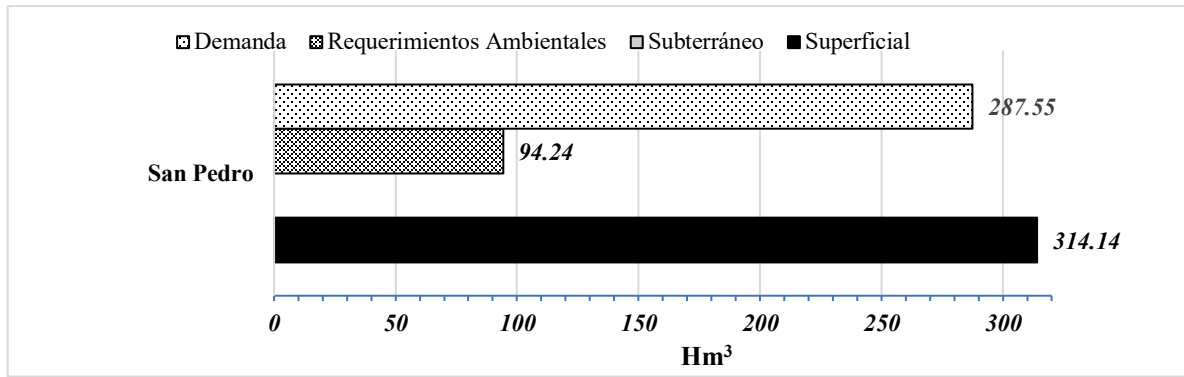
La Vulnerabilidad Hídrica en esta subcuenca es *Media* con un $ISHM_k = 0.541$. Este valor resultado de la sobreexplotación de acuíferos en donde está asentada la cuenca, una *Baja* marginación (valor normalizado de 0.183), una población que aumentará en un 7.4% para el año 2040 (5,496 habitantes de más) y una proyección de la disminución del *VMAEN* del 9.7% (25.84 $hm^3/año$) con respecto al total de 265.90 hm^3 para el año 2040 (Gráfica 15).



Gráfica 15 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Florido. Elaboración Propia.

5.3.1.1.4 Río San Pedro.

Esta subcuenca está clasificada con una **Muy Baja** Seguridad Hídrica con un *ISHM* normalizado = 0.304, esta clasificación es consecuencia, de inicio, de un componente de cantidad clasificado como *Muy Bajo* con un $ISHM_i = - 0.263$. Este déficit se debe principalmente a que el $VMAEN = 314.14 \text{ hm}^3$, no es suficiente para suplir la demanda de agua para todos los usos = 287.55 hm^3 por año y los requerimientos ambientales = 94.24 hm^3 al año para esta subcuenca, además de que los acuíferos que están bajo esta subcuenca no cuentan con disponibilidad de agua subterránea (Gráfica 16).



Gráfica 16 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia.

El valor del componente de calidad de agua en esta subcuenca la clasifican con una *Aceptable* calidad con un $ISHM_j = 0.699$ (Figura 49), muy cerca del umbral de una *Buena* calidad de agua. Se tiene monitoreado menos de 2 mg/l de DBO₅, un 99.40% de saturación Oxígeno Disuelto y una Turbiedad de 10.10 NTU. La calidad de este afluente del río Conchos se ve afectada por la concentración microbiológica de coliformes fecales que supera los 1,500 NMP/100 ml.

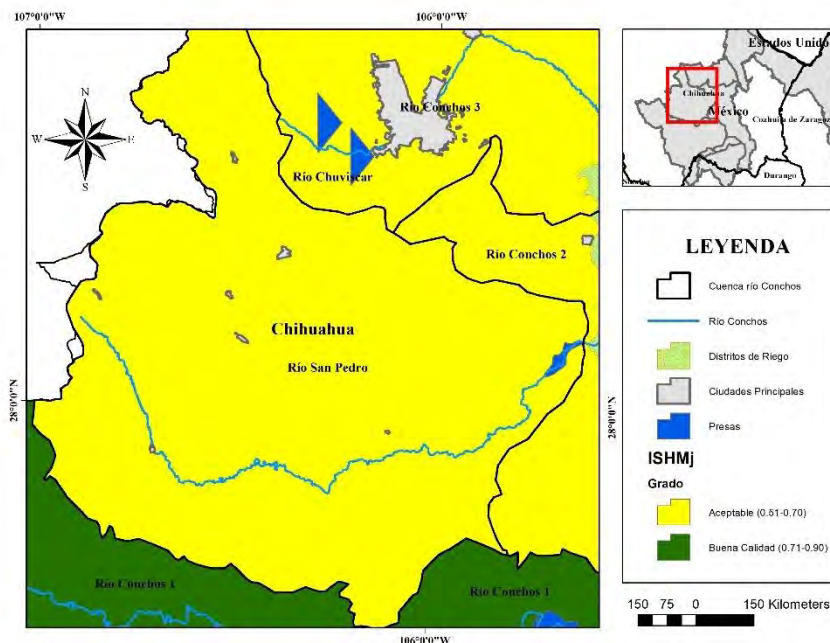


Fig. 49 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. San Pedro. Elaboración propia.

El último componente evidencia la *Alta Vulnerabilidad Hídrica* que hay en la región con $ISHM_k = 0.329$. Esto como consecuencia de la falta de disponibilidad que tiene los acuíferos en la región. El acuífero 838 Alto Río San Pedro (en *Equilibrio*) tiene un déficit de 0.13 hm^3 al año, y aun cuando no se clasifica como sobreexplotado ya no tiene disponibilidad de agua. El acuífero 840 Villalba (en *Escasez*) tiene un déficit de 9.57 hm^3 por año, por lo que su Índice de Disponibilidad es de 0.49 y 0.13, respectivamente. Ver Figura 50.

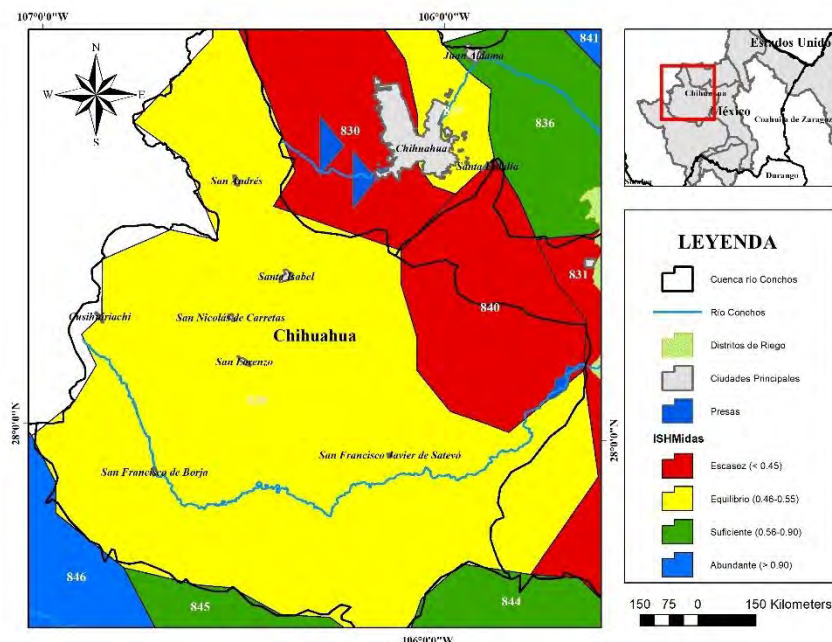
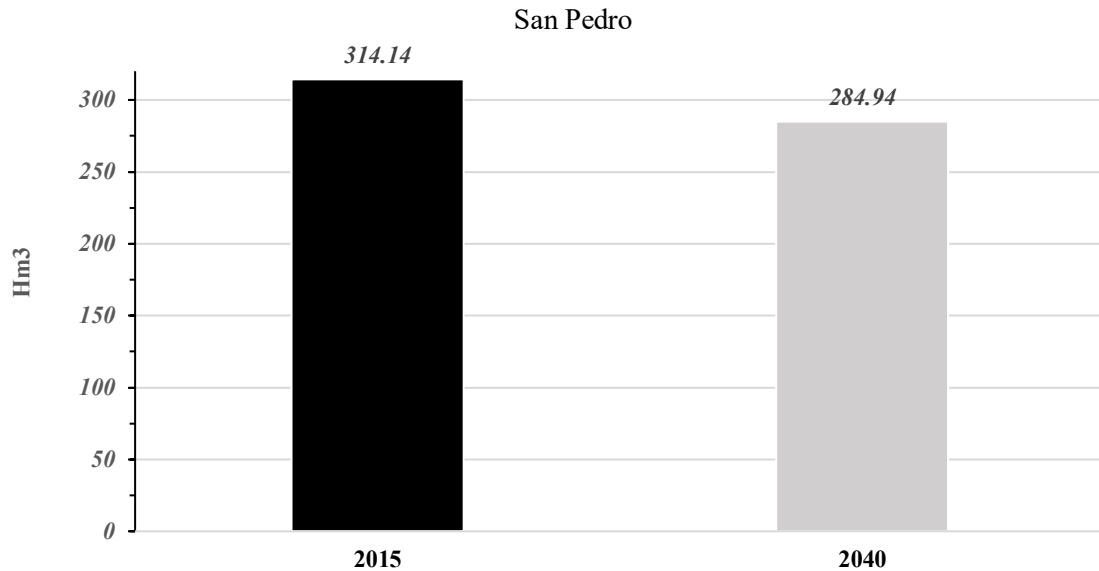


Fig. 50 Índice de Disponibilidad de agua subterránea en la subcuenca del R. San Pedro. Elaboración propia.

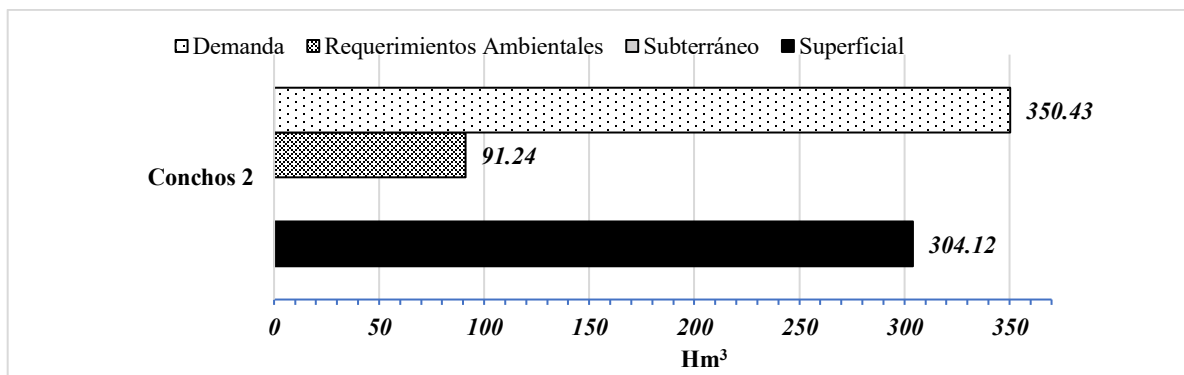
El análisis de la tasa de crecimiento arroja un incremento en la población proyectada al año 2040 de 17,872 habitantes que equivale a 66.3% con respecto a la población actual. Además, se proyecta la disminución de *VMAEN* de 29.20 hm^3 para el año 2040, pasando de 314.14 hm^3 a 284.94 hm^3 anual (Gráfica 17).



Gráfica 17 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración Propia.

5.3.1.1.5 Río Conchos 2

El *ISHM* normalizado = 0.338 en esta subcuenca la clasifica con una Seguridad Hídrica **Muy Baja**. Los resultados obtenidos muestran un $ISHM_i = -0.299$ que clasifica al componente de Cantidad como *Muy Bajo*. Esto se debe principalmente a que la demanda de agua por año para todos los usos es mayor al agua renovable disponible (350.43 hm^3 contra 304.12 hm^3) en un poco más de 46 hm^3 . Si a este volumen se le suma que ambientalmente el afluente necesita un volumen de agua de 91.24 hm^3 por año, se observa que el panorama es totalmente crítico. (Gráfica 18).



Gráfica 18 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia.

El componente de calidad en esta subcuenca la clasifica como *Aceptable* con un $ISHM_j = 0.651$ (Figura 51). Esta cuenca cuenta con contaminación microbiológica de 3,600 NPM/100 ml de Coliformes Fecales. Por el contrario, la concentración de DOB_5 es de 2.44 mg/l, tiene una saturación de Oxígeno Disuelto de 102.35% y una turbiedad 14.31 NTU, que hacen el balance contra la contaminación arriba mencionada.

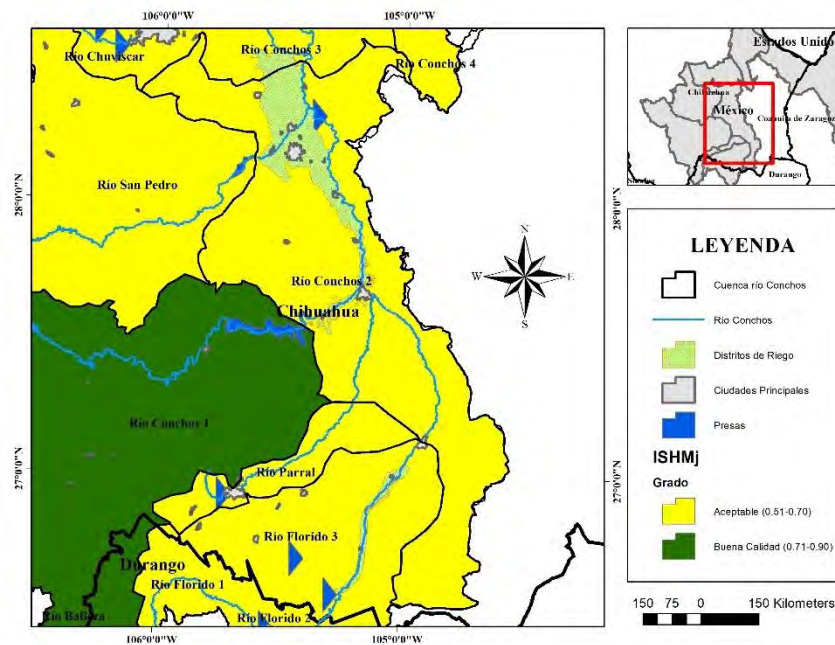


Fig. 51 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos 2. Elaboración propia.

La Vulnerabilidad Hídrica en esta subcuenca está clasificada como *Muy Alta* con un $ISHM_k = 0.175$. Esto se debe a la extrema sobreexplotación de los acuíferos en donde está asentada la región. El acuífero 831 Meoqui – Delicias tiene un Índice de Disponibilidad = 0.096 que lo clasifican en *Escasez* con un déficit de 170.63 hm³ por año (Figura 52).

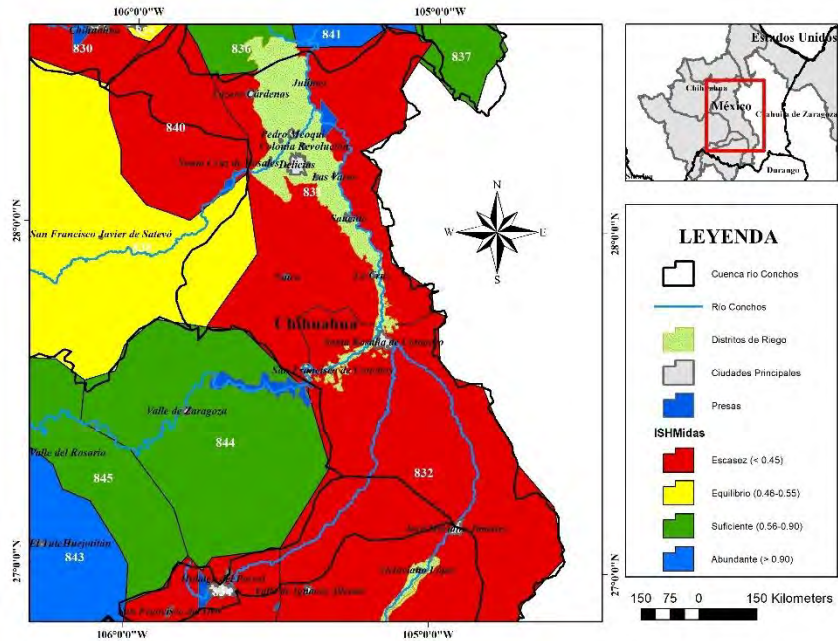
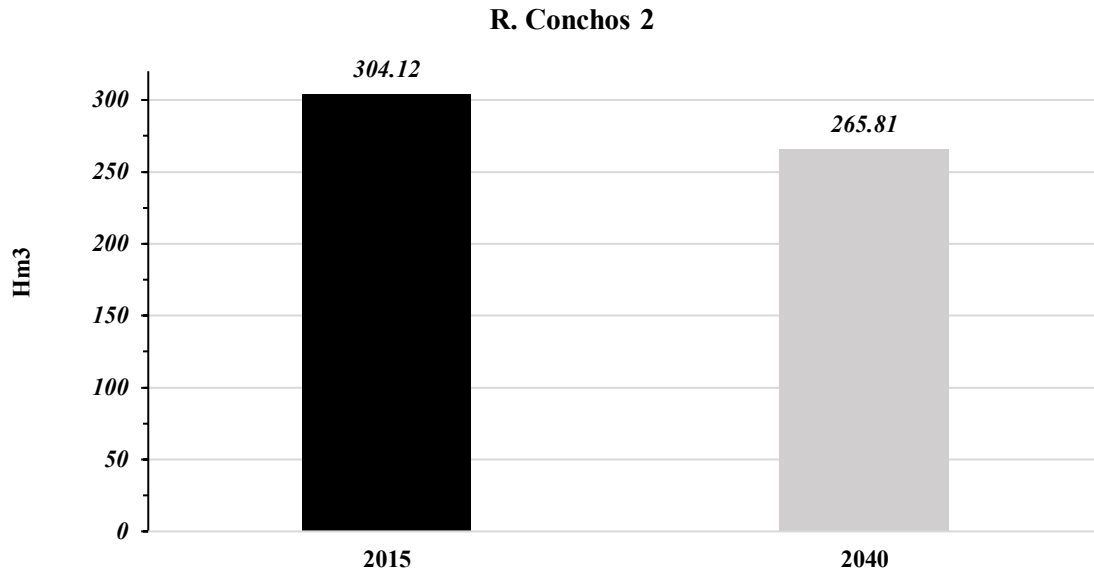


Fig. 52 Índice de Disponibilidad de agua subterránea en la subcuenca del R. Conchos 2. Elaboración propia.

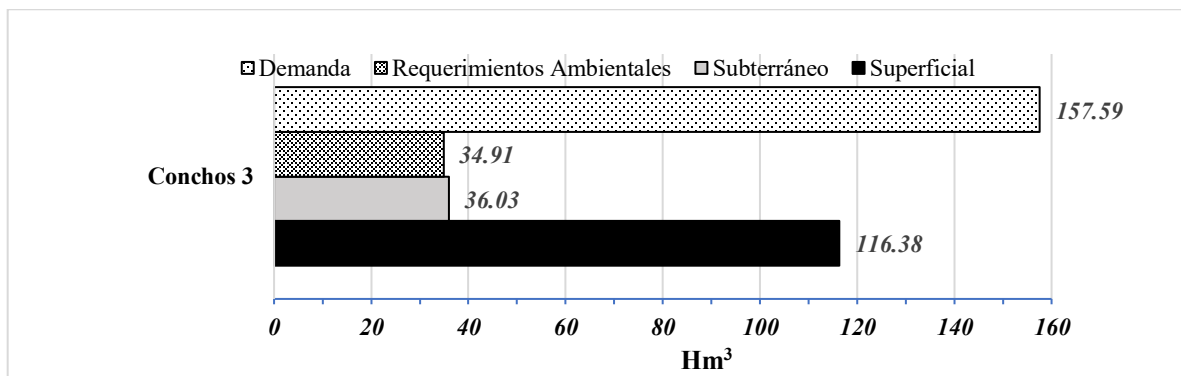
También se debe, a la proyección de la población al año 2040 con un incremento del 95.8% (de 326,598 habitantes a 639,489 habitantes) y al impacto que tendrá la disminución del VMAEN en un 12.6%, lo cual equivale a un volumen de agua de 38.31 hm³ por año (Gráfica 19).



Gráfica 19 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración Propia

5.3.1.1.6 Río Conchos 3

La Seguridad Hídrica en esta subcuenca está clasificada como **Baja** con un *ISHM* normalizado = 0.667. De inicio cuenta con componente de cantidad clasificado como *Bajo* ($ISHM_i = 0.339$). Su *VMAEN* = 116.38 hm³ al año y tiene una disponibilidad de agua subterránea de 36.03 hm³ por año. En contraste, la demanda para todos los usos en la región es de 157.39 hm³ y requiere un volumen de agua de 34.91 hm³ por año para el equilibrio del medioambiente (Gráfica 20).



Gráfica 20 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia.

Por otro lado, esta subcuenca tiene una *Aceptable* calidad del agua con $ISHM_j = 0.578$ (Figura 53). La cantidad de $DBO_5 = 2.9$ mg/l, una aceptable saturación de Oxígeno Disuelto con 71.10% y una turbiedad considerable con 22.22 NTU. Como en todas las demás subcuencas, la carga microbiológica en el afluente es lo que deteriora la calidad del agua, en esta hay 1,015 NMP/100 ml de Coliformes Fecales.

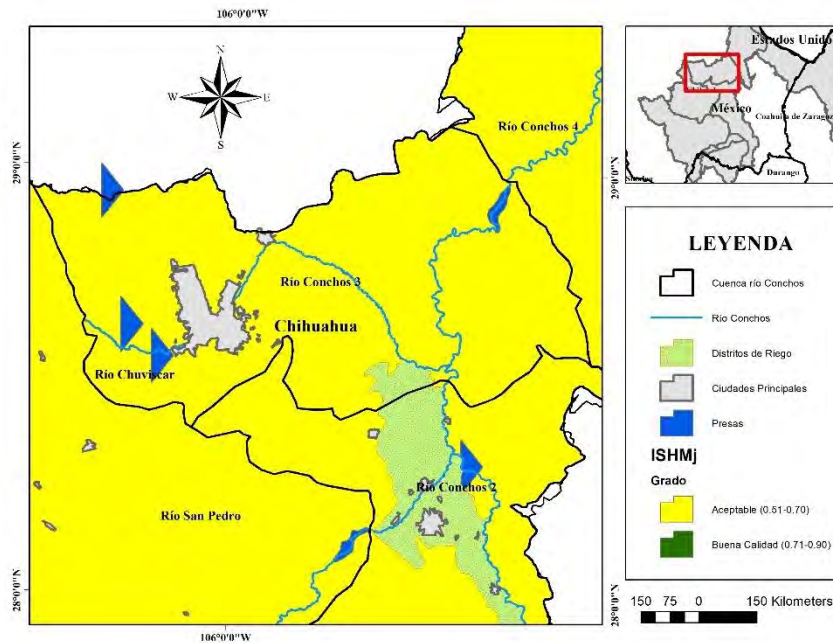
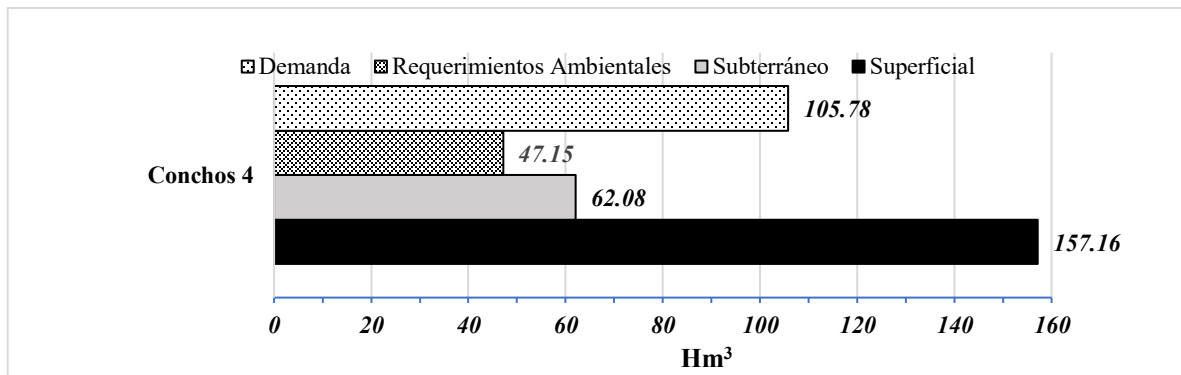


Fig. 53 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos 3. Elaboración propia. Esta subcuenca, por su parte, tiene una *Muy Alta* Vulnerabilidad Hídrica, con un valor del $ISHM_k = 0.190$. Tiene un índice de marginación normalizado *Muy Bajo* (0.106), pero los datos reportados indican una sobreexplotación de más de 57 hm^3 (en *Escasez*) por año en el acuífero 830 Chihuahua – Sacramento y una disponibilidad de 6.79 hm^3 (En *Equilibrio*) por año del acuífero 835 Tabalaopa – Aldama, los cuales se ubican en la Zona Metropolitana de Chihuahua (Figura 54). Por su parte, el crecimiento poblacional esperado en el año 2040 es de más de 723 mil personas (85.5% más), por lo que hacen muy vulnerable a la región.

Gráfica 21 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración Propia

5.3.1.1.7 Río Conchos 4.

La Seguridad Hídrica en la parte baja de la cuenca del río Conchos es **Moderada** con un *ISHM* normalizado = 0.779. El componente de Cantidad está clasificado como *Moderado* con un $ISHM_i = 0.438$. El volumen de agua renovable por año es de 219.24 hm³ (157.16 hm³ superficial y 62.08 hm³ subterráneo). La demanda de agua para todos los usos en la región es de 105.78 hm³ por año y los requerimientos ambientales son 47.15 hm³ al año (Gráfica 22).



Gráfica 22 Disponibilidad de agua superficial y subterránea, demanda y requerimientos ambientales de la subcuenca R. Conchos 4. Elaboración propia.

La calidad del agua en esta cuenca es clasificada como *Aceptable* con un $ISHM_j = 0.648$ (Figura 55). Al igual que todas las subcuencas aguas arriba, esta subcuenca tiene contaminación microbiológica con una concentración de 886 NPM/100 ml de coliformes fecales. Pero contrasta con el monitoreo de DBO₅, Oxígeno Disuelto y Turbiedad, los cuales reportaron concentraciones de 2 mg/l, 77.35% de saturación y 28.06 NTU, respectivamente, por lo que la interacción de estos parámetros da como resultado la calidad del agua arriba mencionada.

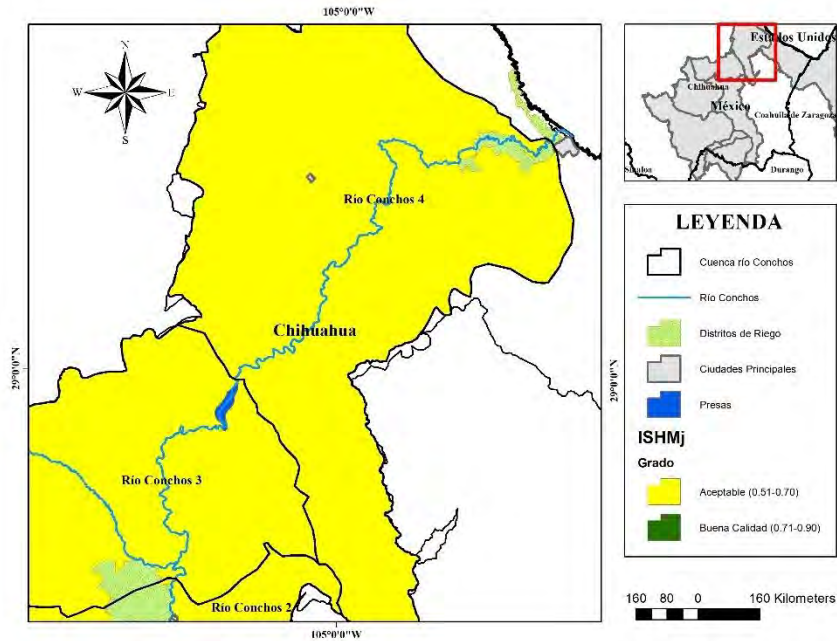
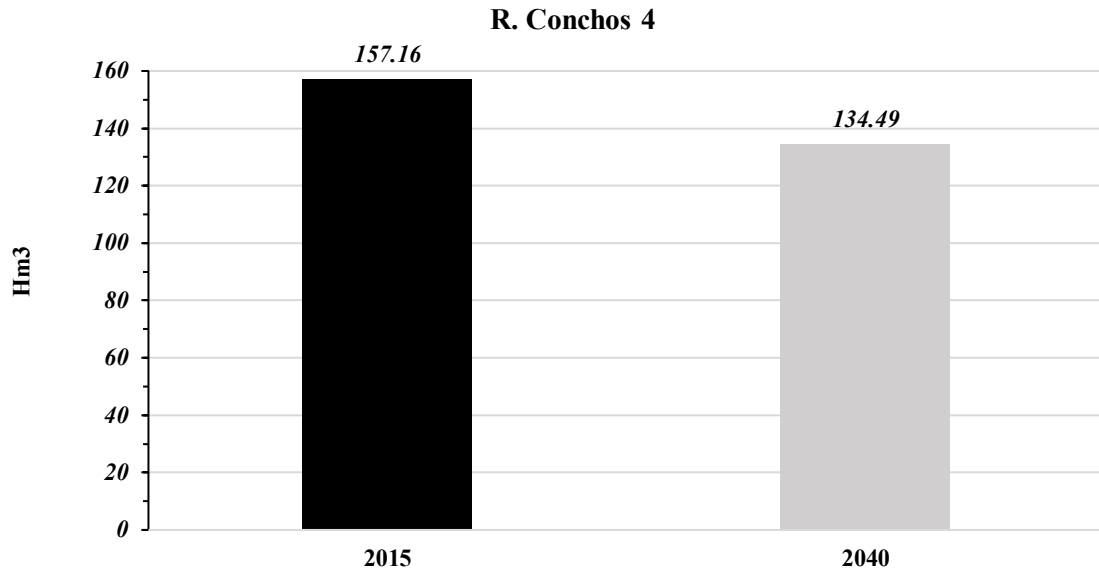


Fig. 55 Clasificación de la calidad de agua en la subcuenca del R. Conchos 4. Elaboración propia.

Por último, esta subcuenca se clasifica con una Vulnerabilidad Hídrica *Media* con una $ISHM_k = 0.609$. Por un lado, el acuífero 837 Bajo Río Conchos tiene una disponibilidad anual de 62.07 hm^3 , que lo clasifican como con *Suficiente* agua de acuerdo con el Índice de Disponibilidad de agua subterránea. Tiene un índice de Marginación *Muy Bajo* (0.099, valor normalizado). Se proyecta para el año 2040 habrá 31,832 habitantes en la subcuenca, en otras palabras, habrá 5,872 habitantes de más con respecto al año 2015. Asimismo, se proyecta una disminución del *VMAEN* de 14.42% que equivale a 22.66 hm^3 menos de escurrimiento de agua al año con respecto al año 2015 (Gráfica 23).



Gráfica 23 VMAEN para el año 2015 y 2040 de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración Propia

5.3.2 RESUMEN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos de la interacción de los tres componentes propuestos para el cálculo del *ISHM* se establece que hay una Seguridad Hídrica **Alta** en la subcuenca R. Conchos – P. de la Colina (0.881), una Seguridad Hídrica **Moderada** en las subcuencas R. Florido (0.671) y R. Conchos 4 (0.779), una Seguridad Hídrica **Baja** En las subcuencas R. Parral (0.671) y R. Conchos 3 (0.667) y una **Muy Baja** Seguridad Hídrica en las Subcuencas R. San Pedro (0.304) y R. Conchos 2 (0.338). La Figura 56 muestra los resultados obtenidos del *ISHM* soportados por un SIG, el cual es de utilidad para el análisis de información local y/o regional.

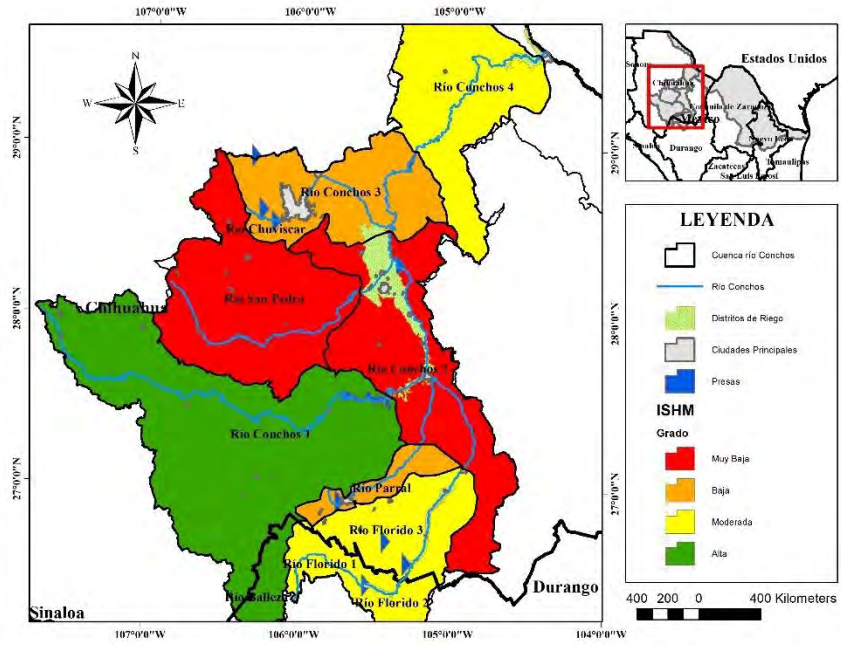


Fig.56 Resultado del ISHM por subcuenca. Elaboración Propia.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS FUTUROS

5.4 CONCLUSIONES

La ONU (2013) define a la Seguridad Hídrica como “*la capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para mantener los medios de subsistencia, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con el agua, y para preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política*”. Con base en esta definición es de interés fundamental de la gestión integrada del agua en una cuenca hidrológica conocer la Seguridad Hídrica en ella.

Para ello es preciso contar con metodologías que nos permitan cuantificar este concepto. Para alcanzar y preservar la Seguridad Hídrica al nivel de cuenca es necesaria una evaluación integral del recurso hídrico tomando en consideración los múltiples factores involucrados.

Partiendo de lo anterior, en esta investigación se plantearon las siguientes preguntas: ¿Es posible cuantificar y medir la Seguridad Hídrica de una región o cuenca? ¿Qué se mediría? ¿Cuáles son los objetivos adecuados y sus limitaciones? ¿Cómo y cuándo se utilizarían? ¿Podrá ser replicable en otras cuencas? Las respuestas a estas preguntas son importantes para los administradores del agua en el mundo, ya que son los responsables de la toma de decisiones con respecto a la gestión o inversión en un región o cuenca hidrológica. Dichas respuestas son estratégicas y esenciales para asegurar la Seguridad Hídrica.

El responder a cada una de estas preguntas y evaluar el cumplimiento de los objetivos establecidos en este trabajo, son una manera de establecer los resultados y las conclusiones de esta investigación.

Primero, partiendo de las preguntas:

1.- ¿Es posible cuantificar y medir la Seguridad Hídrica en una región o cuenca?

La metodología propuesta en esta investigación evaluó y utilizó información oficial disponible para proponer e implementar el primer Índice de Seguridad Hídrica en México por cuenca hidrológica.

2.- ¿Qué se mediría?

En esta investigación se propuso abordar el concepto de Seguridad Hídrica de tal manera que pudiera medir o cuantificar el recurso hídrico bajo un enfoque hidrológico, con el objetivo de evaluar la disponibilidad o cantidad de agua, su calidad y la vulnerabilidad hídrica por cuenca hidrológica y con ello establecer una condición o grado de Seguridad Hídrica.

3.- ¿Cuáles son los objetivos adecuados y sus limitaciones?

El *ISHM* es la primera aproximación de la cuantificación de la Seguridad Hídrica por cuenca hidrológica en México con el objetivo de determinar el estado actual del recurso hídrico únicamente en Cantidad, Calidad y Vulnerabilidad Hídrica. Se reconoce que un enfoque cuantitativo tiene sus limitaciones, ya que por sí solo no es suficiente para medir de manera integral la Seguridad Hídrica de una región o cuenca. Por definición, el concepto de Seguridad Hídrica comprende otros factores que estresan el agua, los cuales necesitan una discusión más detallada no abordados en esta investigación.

4.- ¿Cómo y cuándo se utilizaría?

El capítulo 3 y 4 de esta tesis muestra a detalle la metodología propuesta para el cálculo y la implementación del *ISHM* por cuenca hidrológica y podrá ser utilizada mientras se cuente con la información oficial disponible.

5.- ¿Podrá ser replicable en otras cuencas?

La metodología propuesta puede ser replicable en cualquiera de las 653 cuencas hidrológicas de México, ya que se evalúa y utiliza, como ya se indicó anteriormente, información oficial disponible. Este enfoque limitado pretende establecer que con información accesible se pueda evaluar la Seguridad Hídrica de cualquier cuenca sin necesidad de desarrollar proyectos o monitoreos extras para su aplicación. Sin embargo, cabe aclarar que mientras más parámetros se tengan para su evaluación mejor será el análisis e implementación del *ISHM*.

Segundo, evaluando el cumplimiento de los objetivos de esta investigación:

1.- ¿Se cumplieron los objetivos (general y específicos) propuestos en esta investigación?

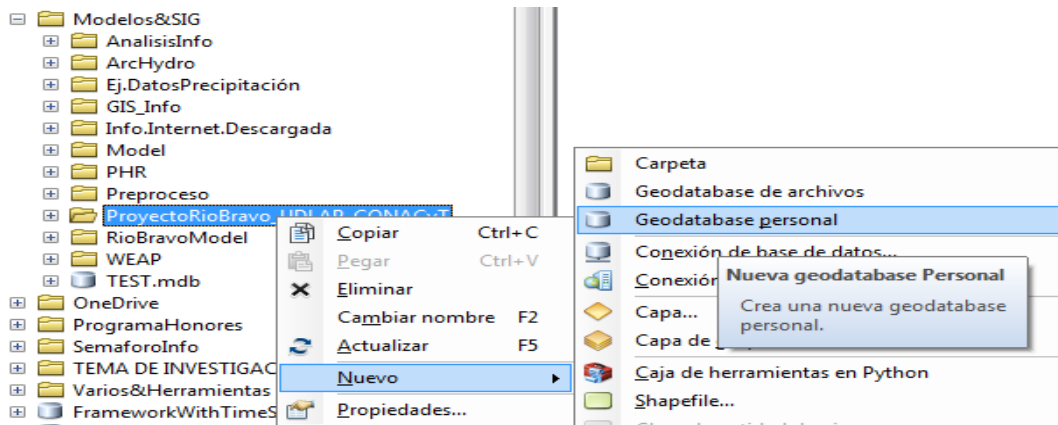
- ♦ Se diseñó, se propuso y se implementó un *ISHM* en una cuenca al norte de México.
- ♦ Se desarrolló un MDR con información necesaria para la implementación del índice para todo México.
- ♦ Se propuso una metodología para el cálculo del *ISHM* y sus componentes, la cual está descrita a detalle en el capítulo 3 de esta tesis.
- ♦ Se evaluó a cada componente que conforma el índice de manera detallada (capítulo 3) y se estableció su clasificación normalizada para su análisis y discusión.
- ♦ Se implementó la metodología del cálculo del *ISHM* en una cuenca del norte de México, la cual se detallada, analiza y discute en el capítulo 4 de esta tesis.
- ♦ Los resultados obtenidos del *ISHM* y sus componentes implementados fueron soportados en un SIG de manera individual y relacional en la *Geodatabase* denominada *Fronteras ISHM*. Dicho MDR tiene el objetivo de servir de herramienta para los tomadores de decisiones y los administradores agua para determinar el componente más sensible y con ello establecer recomendaciones, medidas preventivas y/ correctivas con respecto a la gestión del agua por cuenca hidrológica.

APÉNDICES

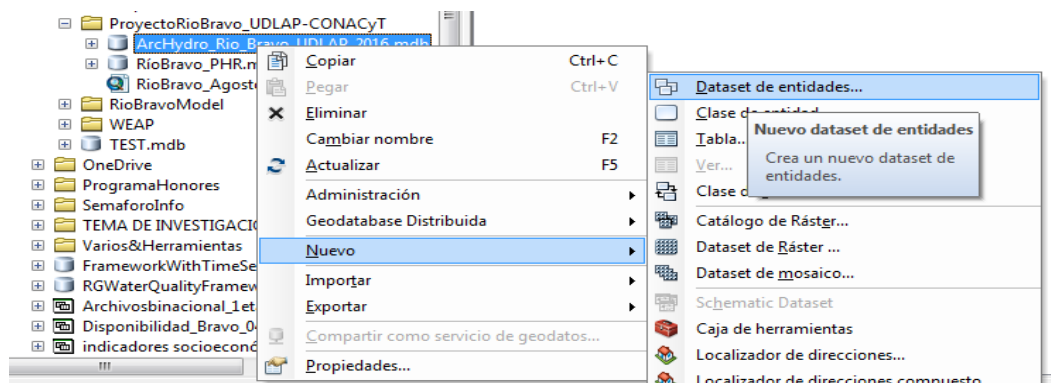
APÉNDICE A.1: Construcción de la *Geodatabase*

En este apartado se describe la estandarización de información disponible dentro de la *Geodatabase* con el apoyo del *ArcGIS* en su versión 10.4 la cual se le denominó: **ArcHydro_UDLAP_2018**. Para la creación de esta *Geodatabase* personal en el conjunto de programas de *ArcGIS* se siguieron los pasos como siguen:

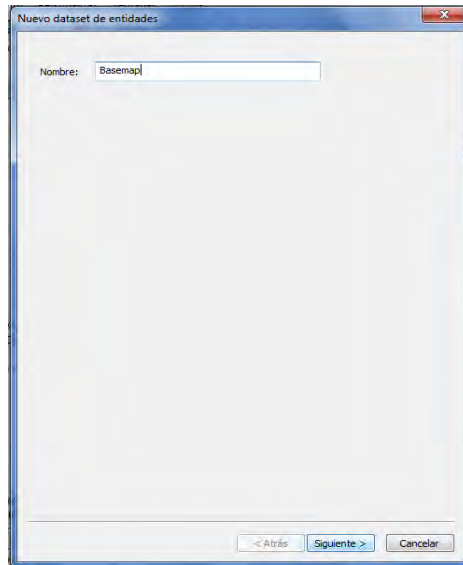
1. Se abre el programa *ArcCatalog* y se ubica la carpeta de datos sobre la cual se va a trabajar y donde se crea la Base de datos Georreferenciada o *Geodatabase*. Se presiona el botón derecho del *mouse* en el menú desplegado de selecciona **Nuevo/Geodatabase personal**.



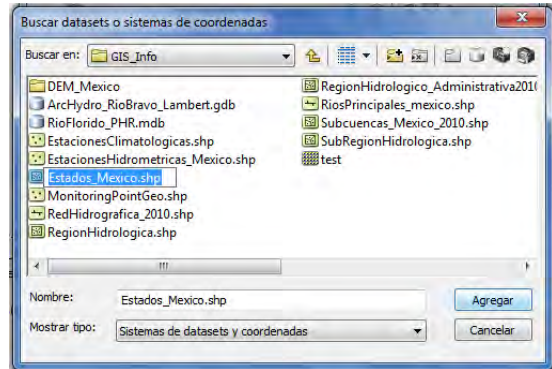
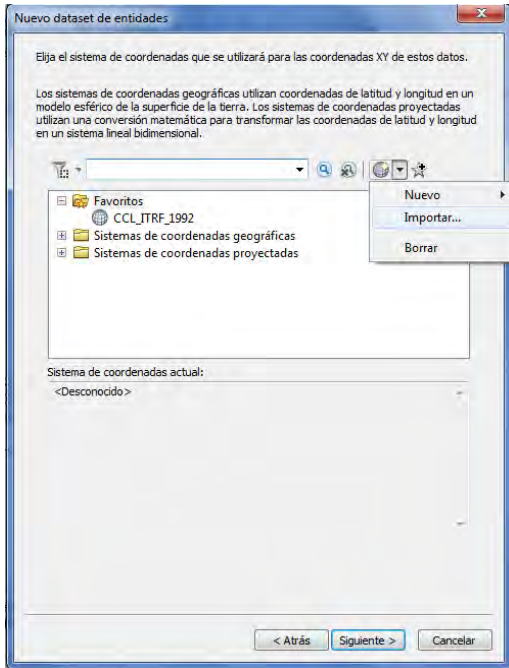
2. Se presiona el botón derecho del *mouse* sobre la *Geodatabase* creada, y se selecciona **Nuevo/ Dataset de entidades**



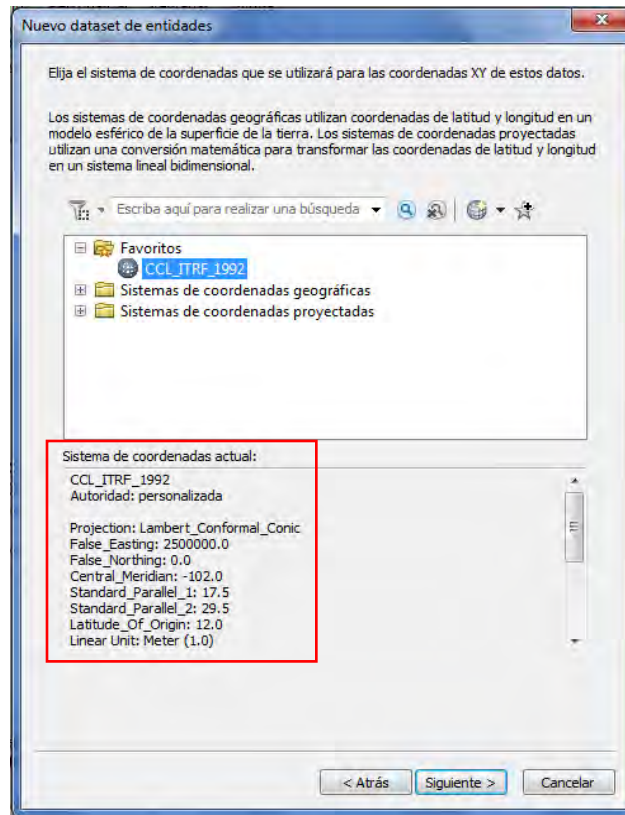
3. Se nombró al *Dataset* de entidades **Basemap** y se presionó **siguiente**.



4. Se pide elegir el sistema de coordenadas que se utilizará en la información. Este sistema de coordenadas se importa desde un archivo *shapefile* con coordenadas Lambert Conformal Conic con el datum ITRF_1992. Para importar las coordenadas mencionadas seleccionamos **Agregar sistemas de coordenadas/importar**. Se **selecciona** el archivo *.shp* y se da clic en **aceptar**



5. Se comprueba que el **sistema de coordenadas actual** ha sido especificado. Una vez realizado eso se da clic en Siguiente dos veces y por último Finalizar.



6. Una vez definido los parámetros de proyección se procede a crear diferentes *dataset* de entidades según sea el criterio de estructuración del proyecto. Estos *dataset* deben de tener los mismos parámetros de proyección que el primer *dataset* creado.

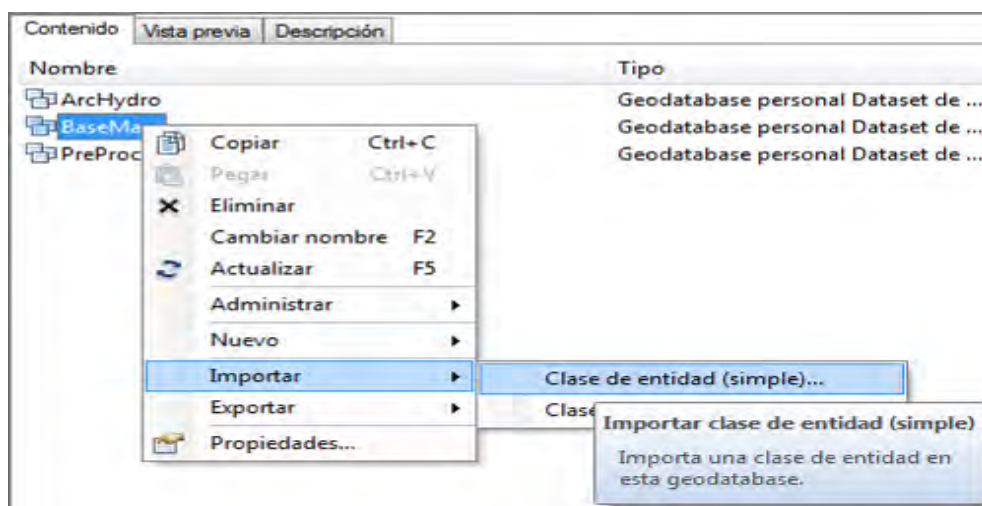
Importación de archivos Shapefile a la Geodatabase

En este apartado se explica la creación del MDR para la cuenca piloto binacional río Bravo/Grande importando archivos *shapefile* al *dataset* de entidades.

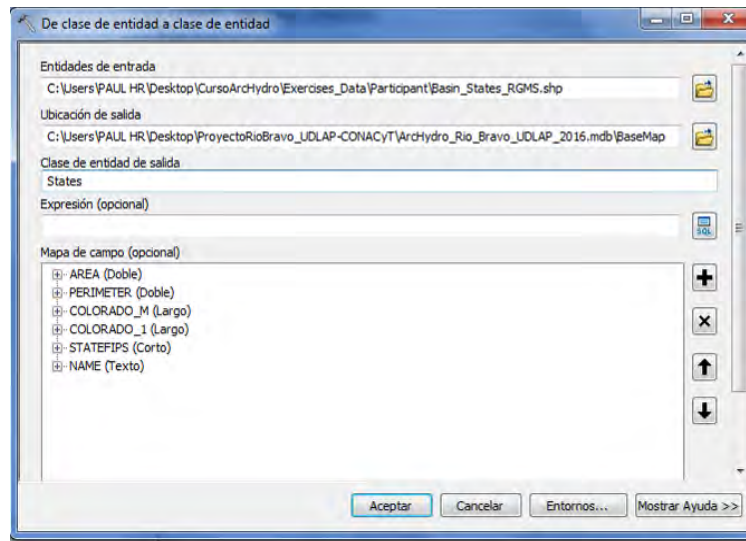
Después de crear la *Geodatabase*, se podrá importar toda la información geográfica disponible.

NOTA: Un aspecto importante a considerar es que al ingresar información al *dataset* de entidades, tenemos que importar de inicio el archivo *shapefile* con la mayor extensión geográfica y espacial, ya que el *dataset* de entidades tomara como límites de referencia espacial el primer archivo *shapefile* que importemos.

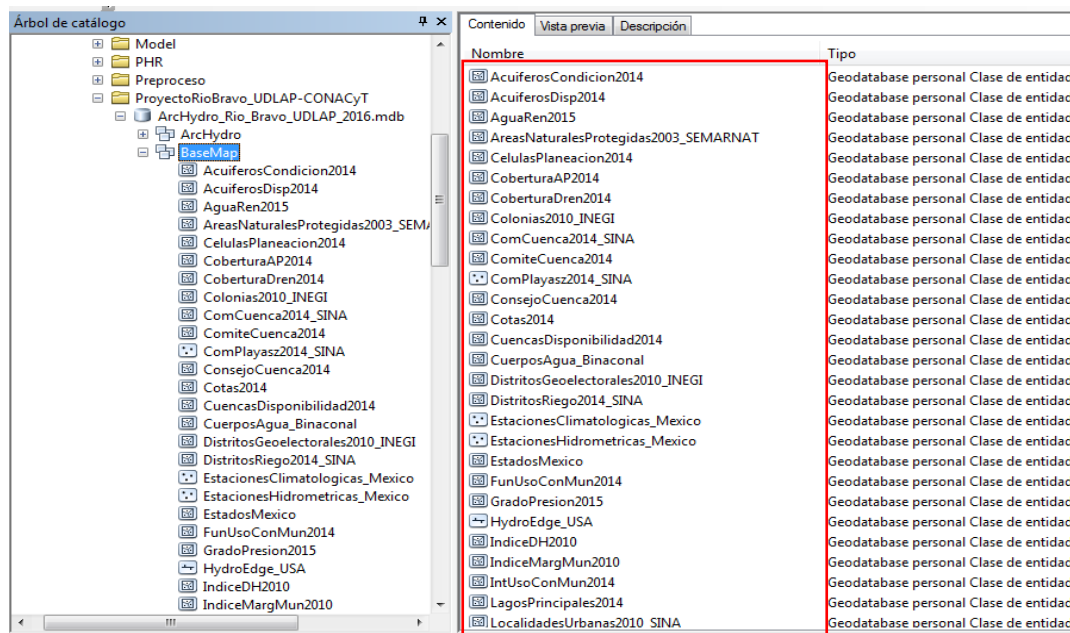
1. Para importar los archivos *shapefile* se da un clic en el botón derecho del *mouse* sobre el *dataset* de entidades y se selecciona **Importar/Clase de entidades (Simple)**



2. Se Selecciona el archivo *shapefile* que desea importar como **Entidades de entrada**. Si desea **renombrar** el archivo introduzca el nuevo nombre en **Clase de entidad de entrada**, y se da clic en **Aceptar** para completar el proceso.



3. Se repiten los pasos anteriores para importar todos los archivos *shapefile* en el *dataset* de entidades. Al final del proceso se tendrá una **lista de clases de entidades (simples) importadas**:

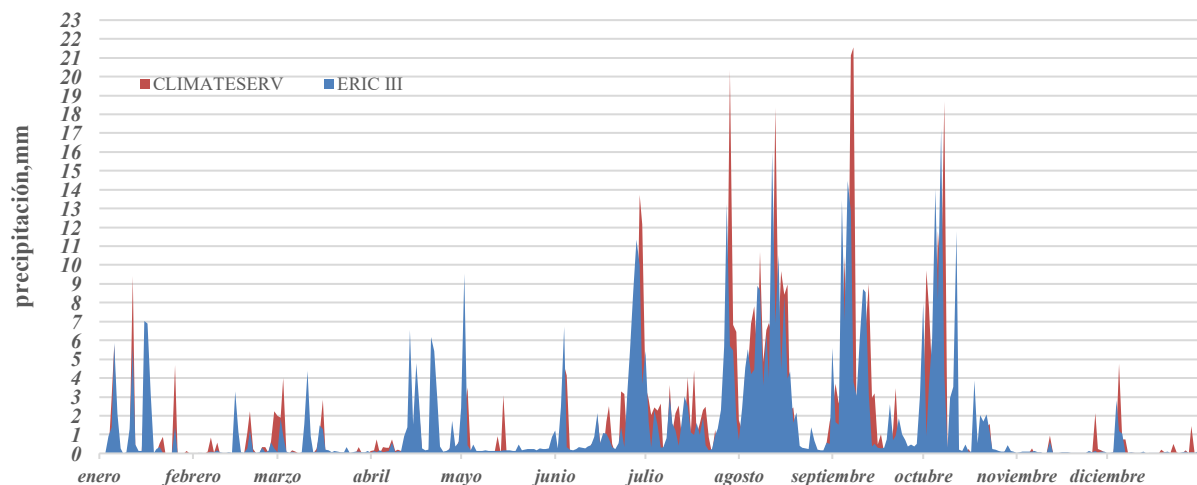


APÉNDICE A.2: Análisis de series de tiempo construidas con información del ERIC III y CLIMATESERV.

El objetivo de este apéndice es presentar el análisis comparativo de precipitación del año 1981 de dos series de tiempo: ERIC II y CLIMATESERV, de acuerdo con la distribución espacial y temporal, la diferencia entre la precipitación acumulada y un Análisis de Varianza (ANOVA).

Distribución espacial de las series de tiempo.

En la Gráfica 24 se muestra comparación de la distribución espacial y temporal de los hietogramas de precipitación media diaria del año 1981 a partir de las dos bases de datos mencionadas. De acuerdo con Legates & McCabe (1999) la comparación entre gráficas es fundamental ya que permite comparar la distribución y variación de los datos.



Gráfica 24 Comparación de distribución espacial y temporal de las Series de tiempo de precipitación a partir del ERIC III y la base de datos CLIMATESERV. Elaboración propia.

Diferencia entre las precipitaciones acumuladas.

La Tabla 54 muestra la diferencia en milímetros de precipitación acumulada de las series de tiempo de las dos bases de datos fue de 16.40 mm para el 1981, que equivale a 2.85% de diferencia.

Datos	PP acumulada 1981, mm	Diferencia, mm	Diferencia, %
ERIC III	576.16	-16.40	-2.85%
CLIMATESERV	559.76		

Tabla 54 Diferencia de precipitación en mm. Elaboración propia.

Coefficiente de correlación:

$$r = \frac{\Sigma(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{(n - 1)S_x S_y}$$

$$r = 0.6215$$

Coefficiente de determinación $r^2 = 0.3862$

Determinación si el r es diferente de cero

$H_0 = \rho = 0.00$ (La correlación entre la población es cero)

$H_1 = \rho \neq 0.00$ (La correlación entre la población es diferente de cero)

Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.01$, tenemos que la tabla *t de student* es:

$t_{0.025,363} = 2.576$ (Tabla B.2 distribución *t de Student* (Douglas, Marchal, & Whaten, 2012))

Calculando t con la fórmula:

$$t_{calculada} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

$$t_{calculada} = 15.114$$

por lo tanto, $t_{calculada} > t_{0.025,363}$

Conclusión:

Rechazamos la hipótesis nula (H_0), ya que la correlación de $r = 0.6215$ es diferentes de cero. Por lo tanto, se concluye que existe una correlación entre el ERIC III y CLIMATESERV.

Resultados del análisis de varianza (ANOVA)

Después de realizar el modelo de regresión lineal y calcula cada uno de sus componentes, se obtiene lo siguiente:

ANOVA					
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Raíz de Media cuadrática	F
Tratamiento	1162.23 SCM	1.00	1162.23	34.09	153.06
Error	2756.34 SCT	363.00	7.59	2.76	
Total	3918.57	364.00	10.77		

Tabla 55 Análisis de Varianza. Elaboración propia.

Entonces, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.01$, tenemos:

$F_{0.5,365-2} = 6.63$ (Tabla B.4 Valores críticos de la distribución F en un nivel de significancia de 1% (Douglas, Marchal, & Whaten, 2012))

Por lo tanto:

$$F_{\text{calculada}} > F_{0.5,365-2}$$

$$153.06 > 6.63$$

Conclusión del ANOVA:

Si $F_{\text{calculado}}$ es mayor que el F_{tabla} significa que el modelos o ajuste es adecuado. El modelo ajustado es válido con un nivel de significancia al 99%.

Tabla sumaria

TABLA SUMARIA			
Variable	Coefficiente	Error estándar	Valor t
Constante	0.72	0.16	4.52
Área	0.56	0.03	20.54

Tabla 56 *Tabla Sumaria. Elaboración propia.*

Entonces:

El Error Estándar de la constante/ a, $t_a = 4.523$

Prueba de la pendiente = pendiente de la recta de regresión (b) / Erros estándar de estimación de pendiente, $t_b = 20.537$

Por lo tanto, $t_{0,025,363} = 2.576$ (Tabla B.2 distribución *t de Student* (Douglas, Marchal, & Whaten, 2012)).

Entonces,

$$t_{calculado} > t_{tabla}$$

$$20.537 > 2.576$$

Conclusión Tabla Sumaria:

El coeficiente de la variable independiente es diferente de cero al 99% de confianza, con que se acepta la existencia de una relación lineal.

APÉNDICE A.3: Factores de ponderación de ICA según su orden de importancia relativa

PARÁMETROS DEL ICA: IMPORTANCIA RELATIVA			
Parámetro	Peso (W_i)	Parámetro	Peso (W_i)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	5.0	Nitrógeno en Nitratos (NO ₃ ⁻¹)	2.0
Oxígeno Disuelto (O ₂)	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliforme Fecales	4.0	Color	1.0
Coliforme Totales	3.0	Dureza Total	1.0
Sustancia Activas al Azul de Metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad Eléctrica	2.0	Sólidos Suspendidos	1.0
Fosfatos Totales (PO ₃ ⁻⁴)	2.0	Cloruros (Cl ⁻¹)	0.5
Grasas y Aceites	2.0	Sólidos Disueltos	0.5
Nitrógeno Amoniacal (NH ₃)	2.0	Turbiedad	0.5

Fuente: Compendio de Estadísticas Ambientales 2002 (SEMARNAT, 2019b)

Tabla 57 Parámetros y factores de ponderación. Elaboración propia.

APÉNDICE A.4: Ubicación geográfica de concesiones superficiales y subterráneas por subcuenca

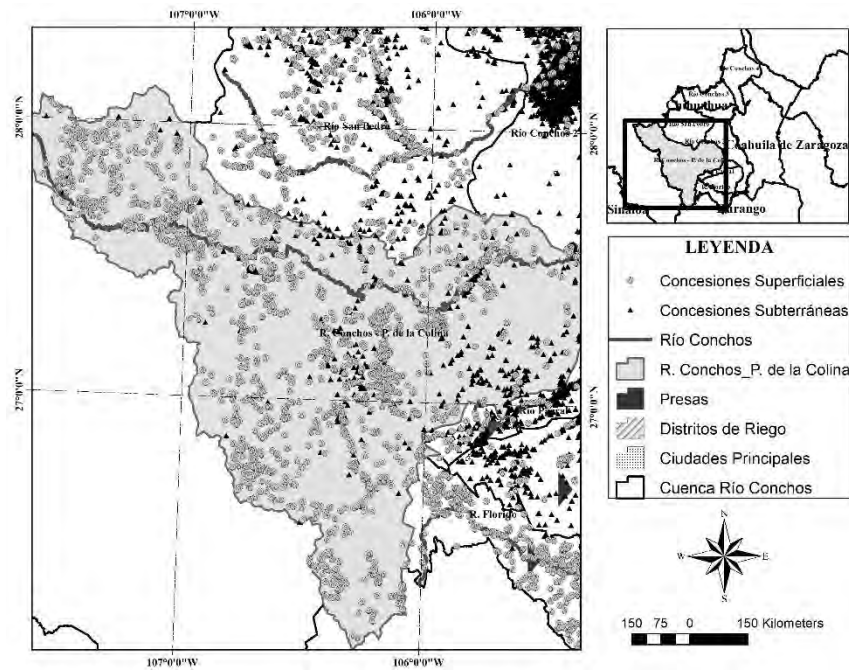


Fig.57 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos – P. de la Colina. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).

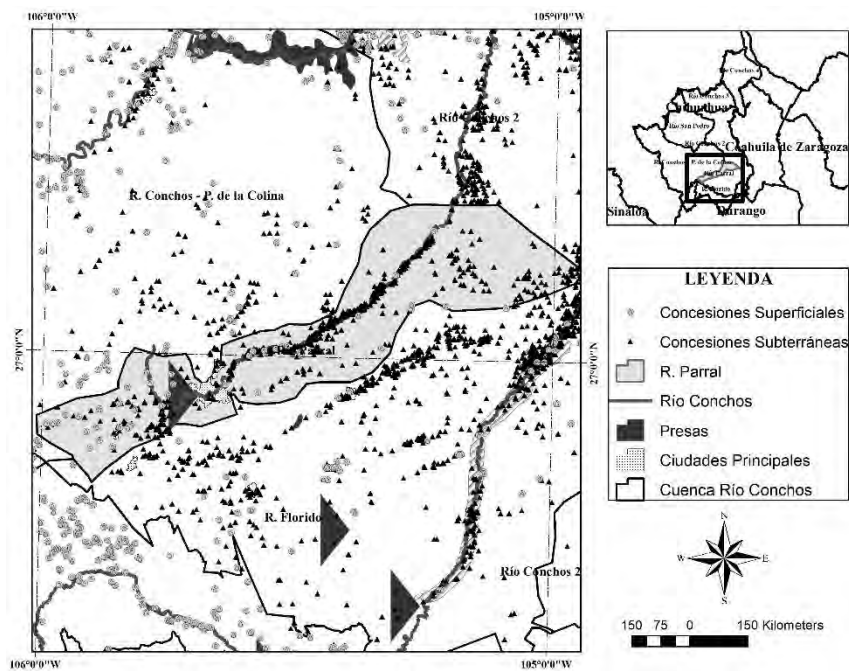


Fig.58 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Parral. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).

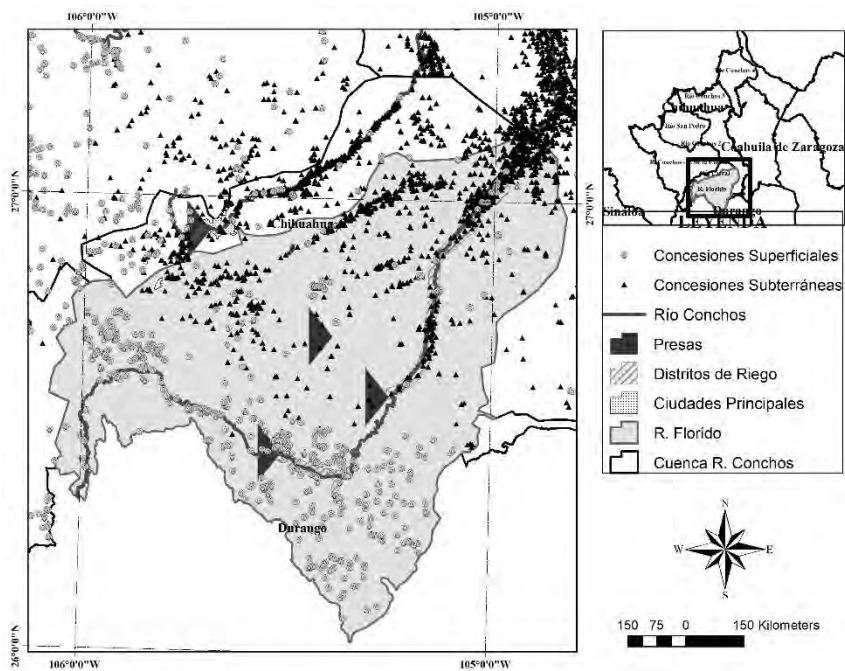


Fig.59 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Florido. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).

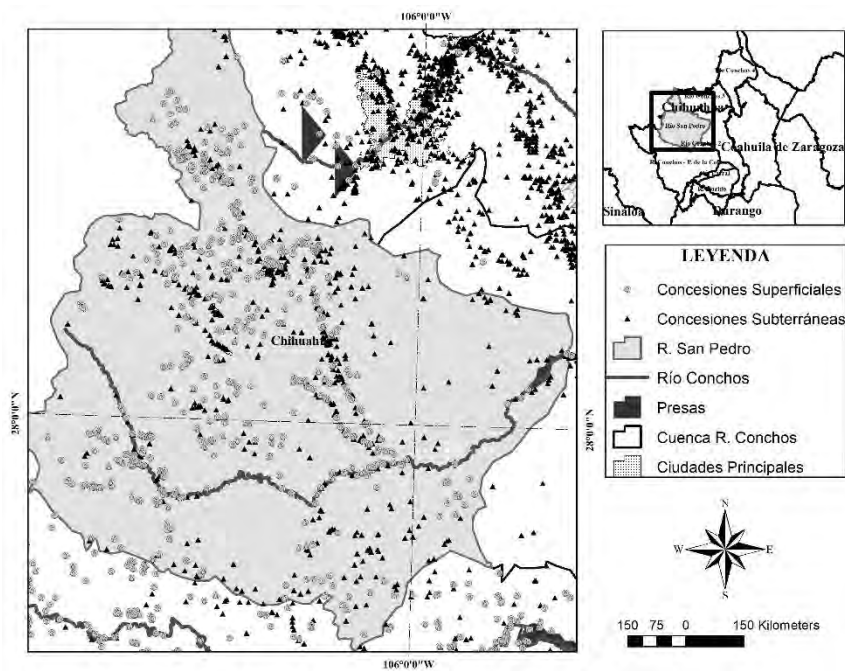


Fig.60 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).

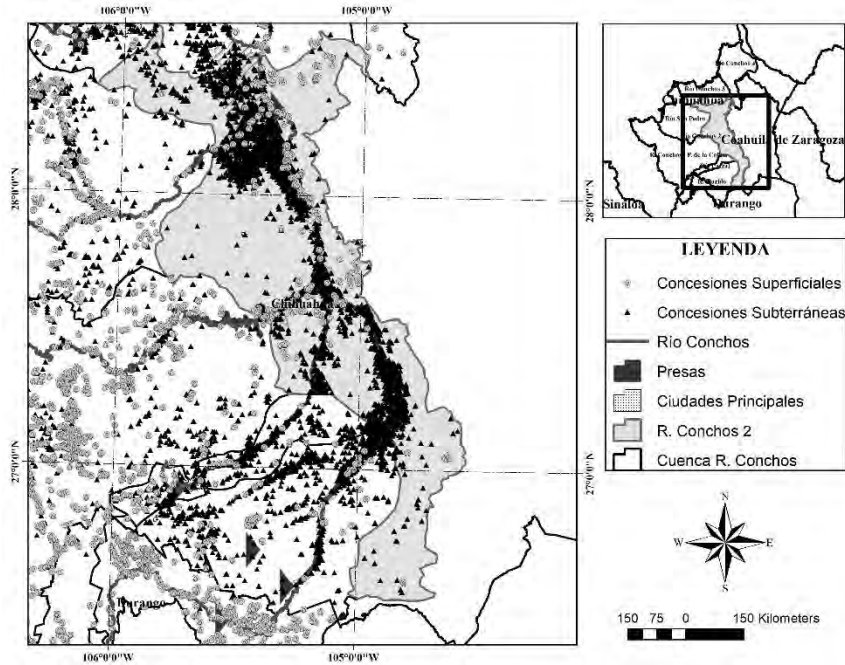


Fig.61 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).

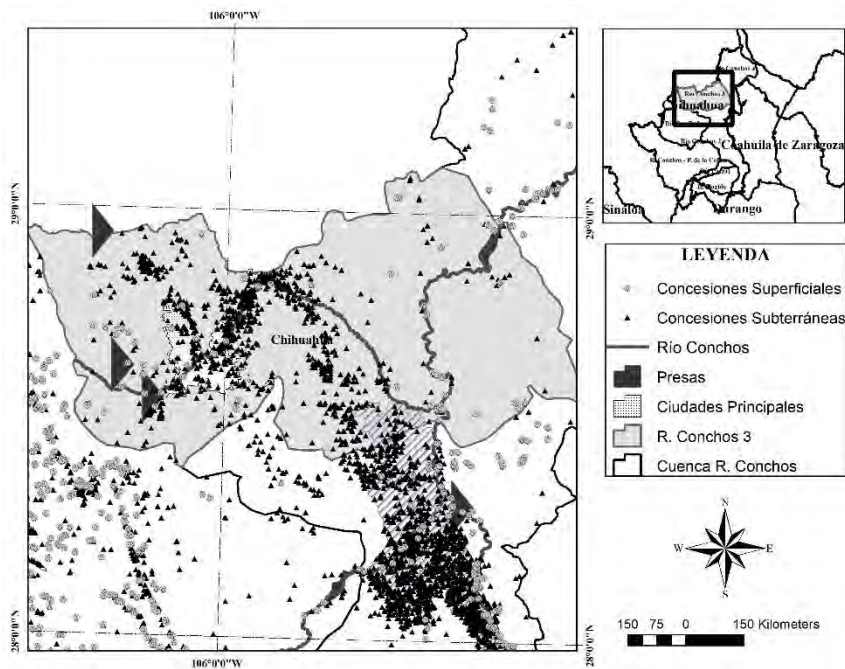


Fig.62 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).

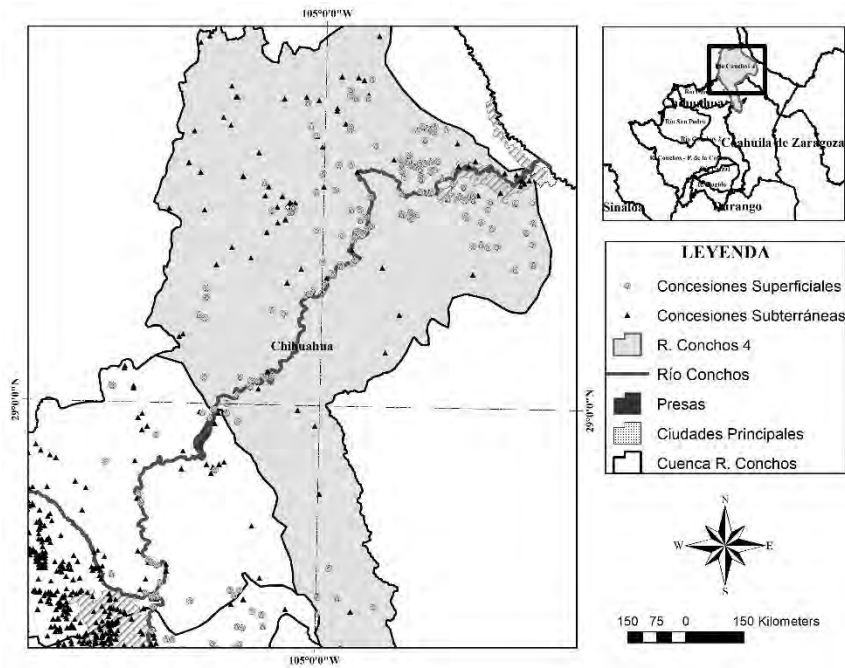


Fig.63 Ubicación geográfica de las concesiones superficiales y subterráneas en la subcuenca R. Conchos 4. Elaboración propia con Información de CONAGUA (2018d).

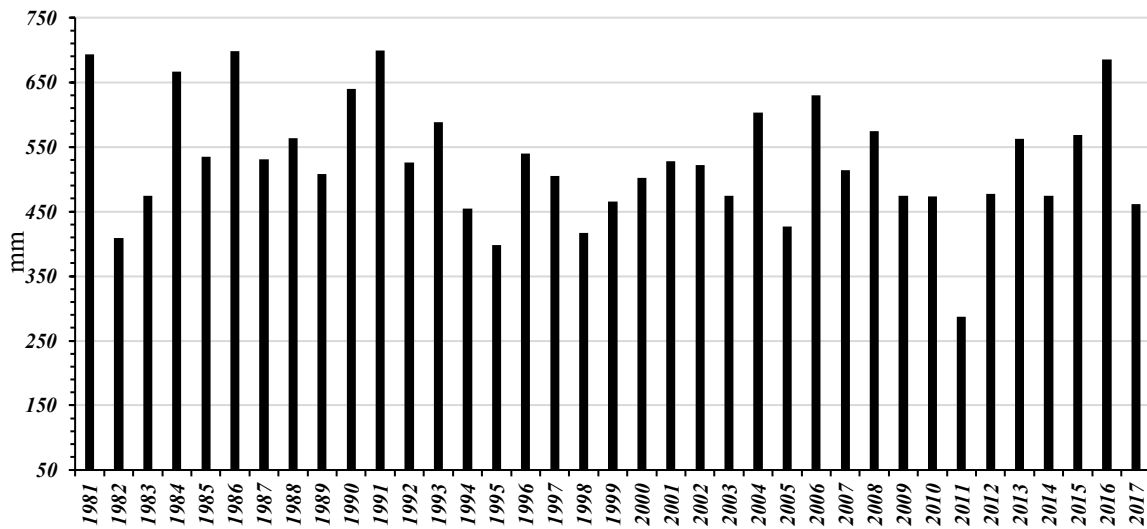
APÉNDICE A.5: Series de tiempo y hietogramas de precipitación por subcuenca.

R. Conchos – P. de la Colina

Año	PP anual, mm
1981	693.55
1982	408.55
1983	474.47
1984	666.30
1985	534.64
1986	697.72
1987	530.87
1988	563.73
1989	508.05
1990	639.51
1991	699.22
1992	525.71
1993	588.41
1994	454.46
1995	398.39
1996	539.85
1997	504.66
1998	416.87
1999	464.98
2000	502.49
2001	527.73
2002	522.13
2003	474.39
2004	603.44
2005	427.04
2006	629.40
2007	513.51
2008	574.53
2009	474.33
2010	473.54
2011	287.17

2012	477.51
2013	562.58
2014	474.02
2015	568.68
2016	685.11
2017	461.05
Promedio =	528.34

Tabla 58 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos-P. de la Colina. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).



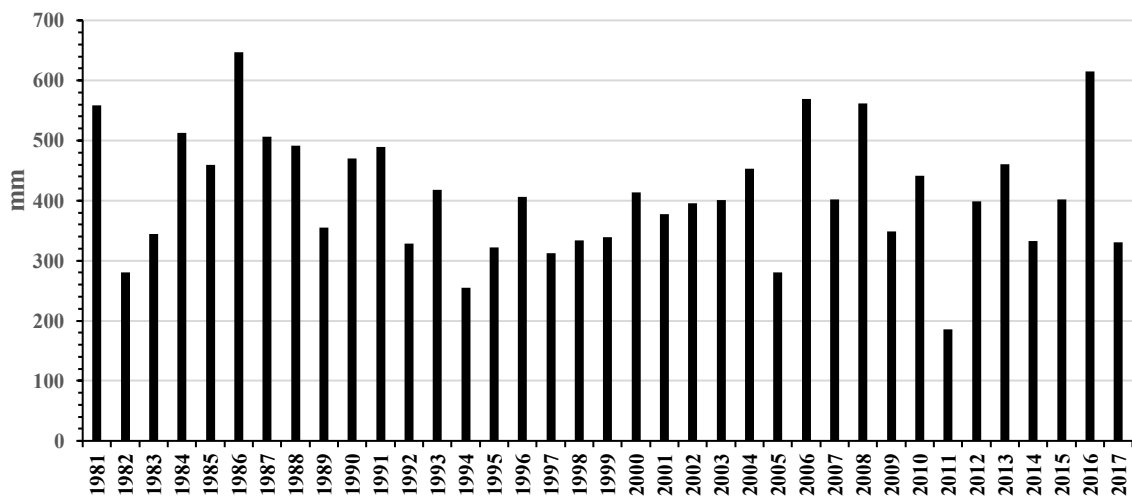
Gráfica 25 Hietograma anual de la subcuenca R. Conchos-P. de la Colina. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).

R. Parral

Año	PP anual, mm
1981	558.93
1982	280.29
1983	344.13
1984	512.69
1985	459.41
1986	646.97
1987	506.55
1988	491.89
1989	354.74
1990	469.83
1991	489.31

1992	327.95
1993	418.40
1994	255.04
1995	322.18
1996	405.87
1997	312.84
1998	334.27
1999	339.14
2000	414.06
2001	377.39
2002	395.74
2003	400.67
2004	453.12
2005	280.05
2006	569.05
2007	402.46
2008	561.54
2009	349.08
2010	440.88
2011	185.18
2012	398.78
2013	460.28
2014	332.20
2015	401.64
2016	615.23
2017	330.73
Promedio =	410.77

Tabla 59 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Parral. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).



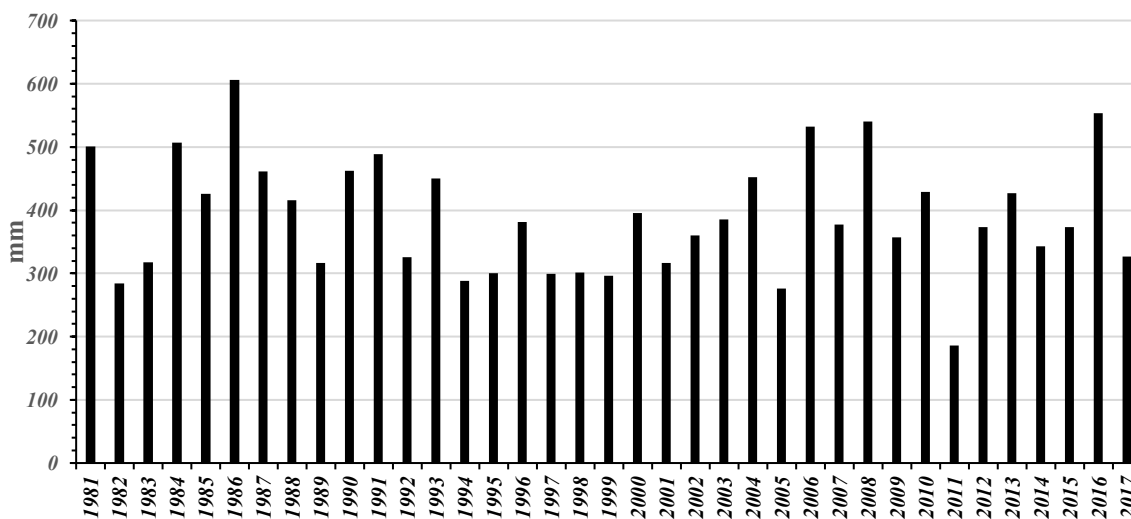
Gráfica 26 Hietograma anual de la subcuenca R. Parral. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).

R. Florido

Año	PP anual, mm
1981	500.95
1982	284.13
1983	317.06
1984	507.10
1985	426.33
1986	606.19
1987	460.90
1988	415.98
1989	316.61
1990	461.91
1991	488.59
1992	325.57
1993	450.00
1994	288.56
1995	299.94
1996	381.70
1997	299.67
1998	301.57
1999	295.92
2000	395.34
2001	316.75

2002	360.25
2003	384.89
2004	451.80
2005	275.73
2006	532.10
2007	377.05
2008	540.73
2009	356.53
2010	428.66
2011	185.75
2012	373.22
2013	426.42
2014	343.03
2015	373.06
2016	553.47
2017	326.62
Promedio =	390.00

Tabla 60 Series de tiempo anual de la subcuena del R. Florido. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).



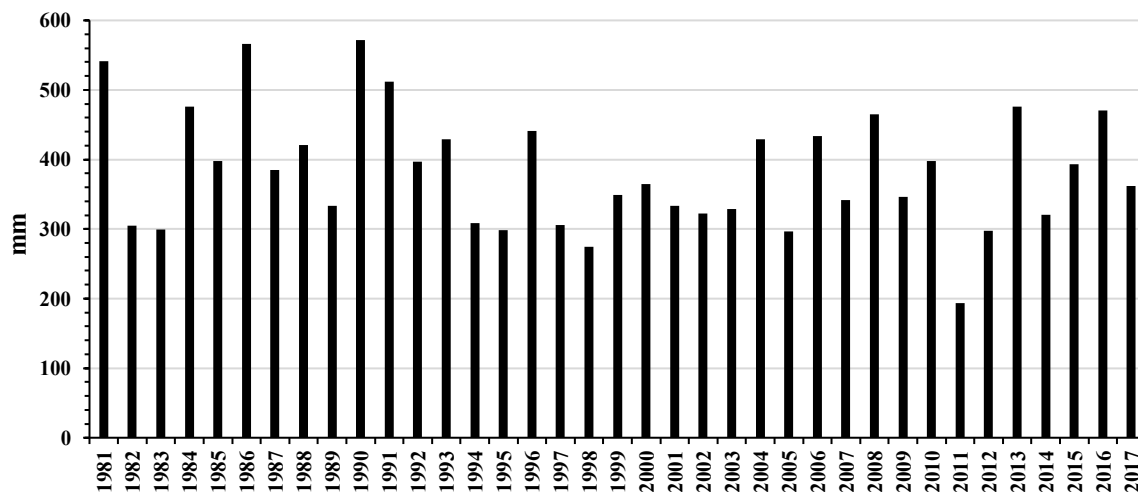
Gráfica 27 Hietograma anual de la subcuena R. Florido. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).

R. San Pedro

Año	PP anual, mm
-----	--------------

1981	541.32
1982	304.56
1983	298.91
1984	475.78
1985	397.58
1986	565.98
1987	384.93
1988	420.38
1989	333.14
1990	571.69
1991	511.75
1992	396.76
1993	429.40
1994	308.62
1995	298.78
1996	440.86
1997	305.77
1998	274.82
1999	348.60
2000	365.07
2001	333.78
2002	322.27
2003	329.21
2004	428.83
2005	296.90
2006	433.60
2007	341.28
2008	464.92
2009	345.85
2010	398.02
2011	193.72
2012	297.33
2013	475.62
2014	320.96
2015	392.85
2016	470.92
2017	361.63
Promedio =	383.31

Tabla 61 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. San Pedro. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).



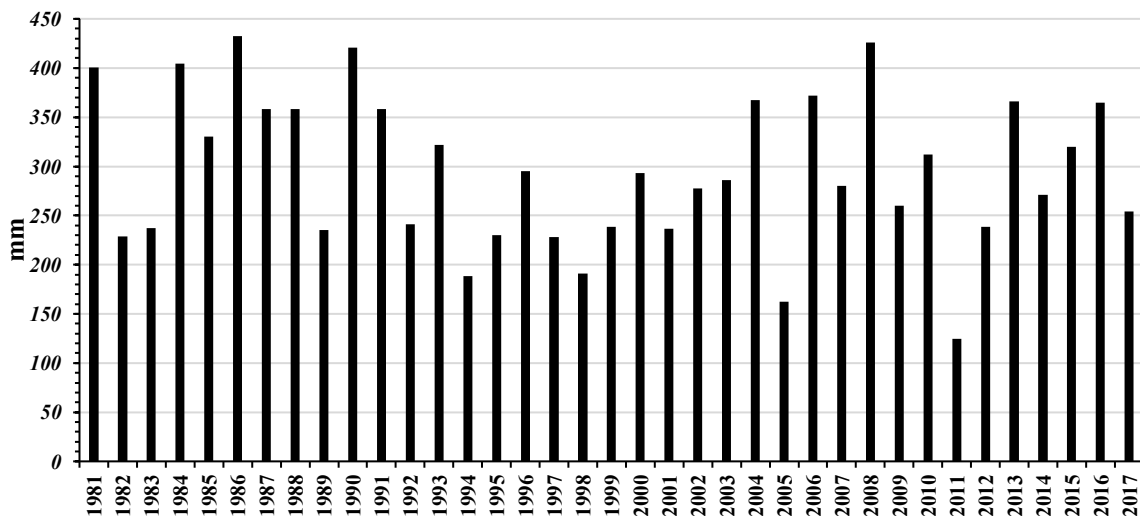
Gráfica 28 Hietograma anual de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).

R. Conchos 2

Año	PP anual, mm
1981	400.29
1982	228.95
1983	237.18
1984	404.28
1985	330.23
1986	432.30
1987	358.38
1988	357.98
1989	235.13
1990	421.00
1991	358.57
1992	241.21
1993	322.12
1994	188.37
1995	230.05
1996	295.11
1997	228.33
1998	190.94
1999	238.32
2000	293.39

2001	236.38
2002	277.77
2003	286.33
2004	367.23
2005	162.13
2006	371.70
2007	280.44
2008	426.20
2009	259.99
2010	312.16
2011	124.45
2012	238.47
2013	366.00
2014	270.96
2015	319.63
2016	364.96
2017	254.42
Promedio =	294.90

Tabla 62 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos 2. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).



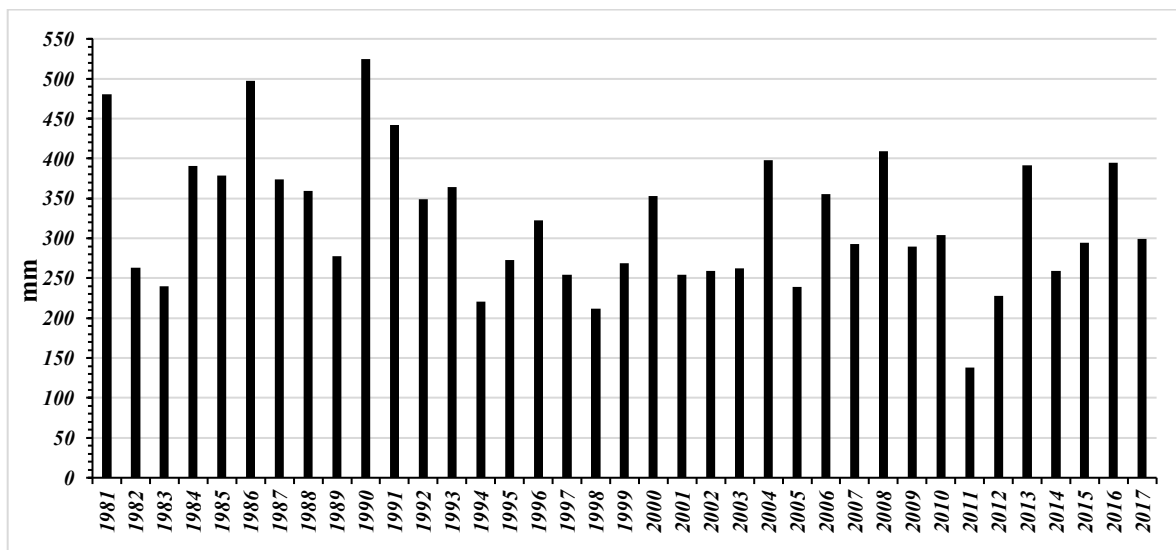
Gráfica 29 Hietograma anual de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).

R. Conchos 3

Año	PP anual, mm
1981	480.89
1982	263.08
1983	240.03
1984	391.09
1985	378.60
1986	497.77
1987	373.87
1988	359.35
1989	277.94
1990	524.34
1991	442.06
1992	349.17
1993	364.09
1994	220.30
1995	273.14
1996	322.35
1997	254.31
1998	212.05
1999	268.50
2000	352.98
2001	254.38
2002	259.48
2003	262.56
2004	397.89
2005	239.48
2006	355.54
2007	292.95
2008	408.91
2009	289.82
2010	303.79
2011	137.78
2012	227.51
2013	391.46
2014	259.40
2015	294.85

2016	394.61
2017	299.22
Promedio =	322.04

Tabla 63 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos 3. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).



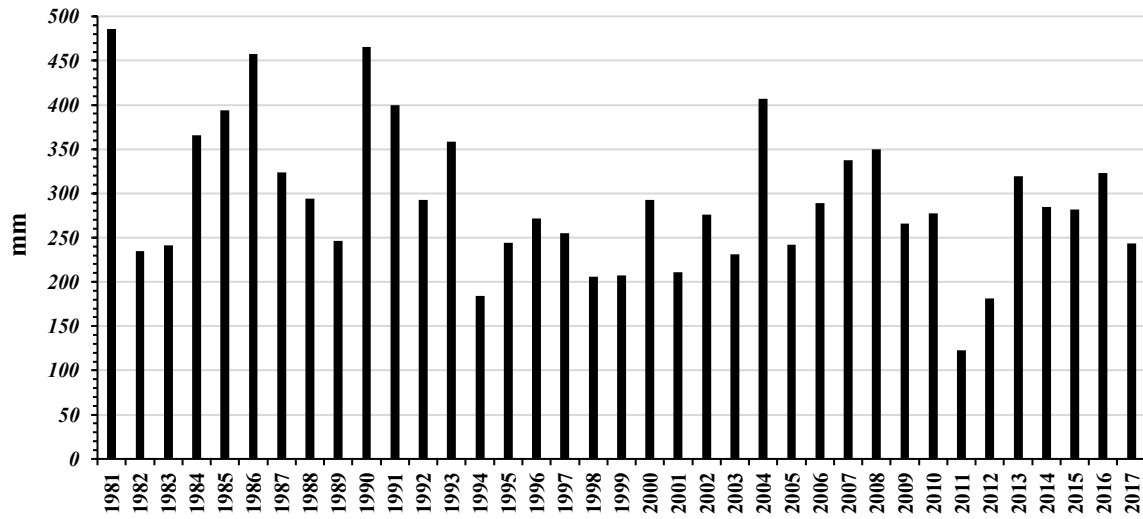
Gráfica 30 Hietograma anual de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).

R. Conchos 4

Año	PP anual, mm
1981	486.04
1982	234.52
1983	240.98
1984	366.00
1985	393.75
1986	457.77
1987	323.96
1988	294.32
1989	246.50
1990	465.50
1991	399.61
1992	292.41
1993	358.77

1994	184.32
1995	244.32
1996	271.97
1997	255.00
1998	205.63
1999	207.32
2000	292.85
2001	210.74
2002	276.25
2003	231.05
2004	407.18
2005	242.18
2006	289.27
2007	337.46
2008	349.63
2009	265.69
2010	277.44
2011	122.46
2012	181.34
2013	319.27
2014	284.90
2015	281.96
2016	322.72
2017	243.11
Promedio =	293.63

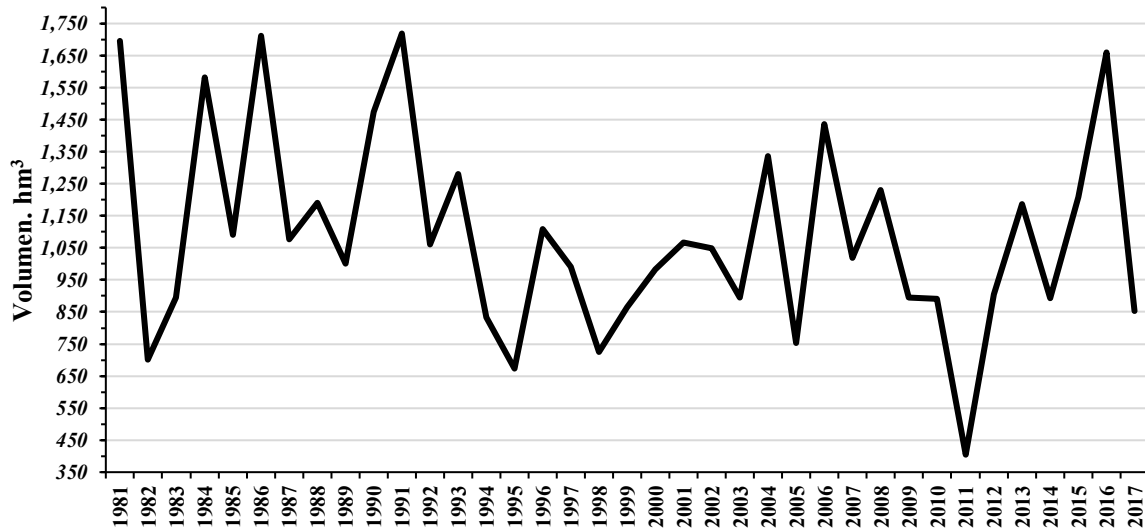
Tabla 64 Series de tiempo anual de la subcuenca del R. Conchos 4. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).



Gráfica 31 Hietograma anual de la subcuena R. Conchos 4. Elaboración propia con información de SERVIGLOBAL (2018).

APÉNDICE A.6: Hidrogramas del *VMAEN* por subcuenca

R. Conchos-P. de la Colina



Promedio = 1,097.37 hm³

Gráfica 32 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos-P. de la Colina. Elaboración propia.

R. Parral



Promedio = 60.09 hm³

Gráfica 33 Hidrograma anual de la subcuenca R. Parral. Elaboración propia.

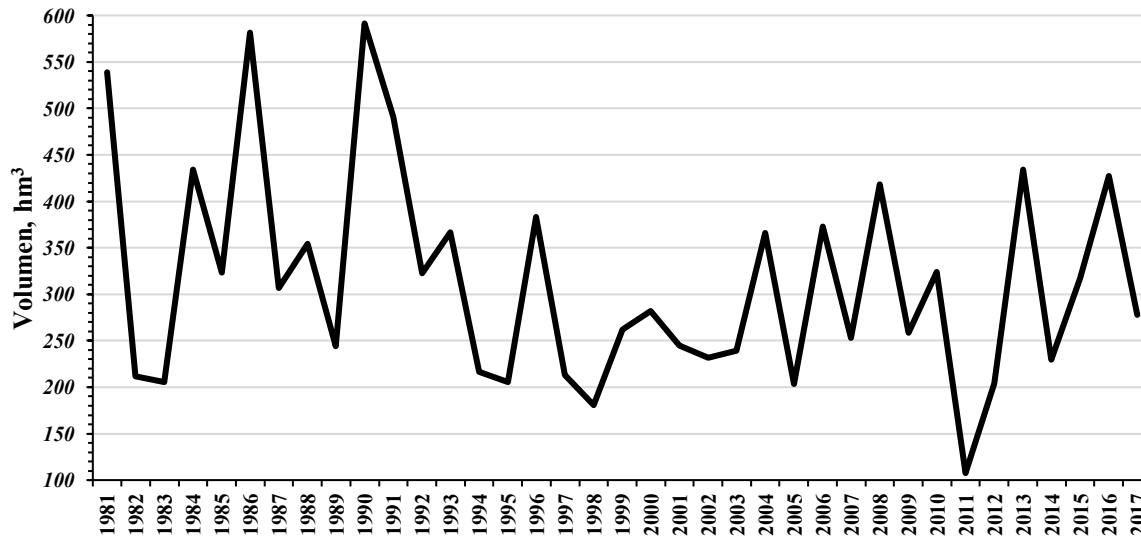
R. Florido



Promedio = 265.90 hm³

Gráfica 34 Hidrograma anual de la subcuenca R. Florido. Elaboración propia.

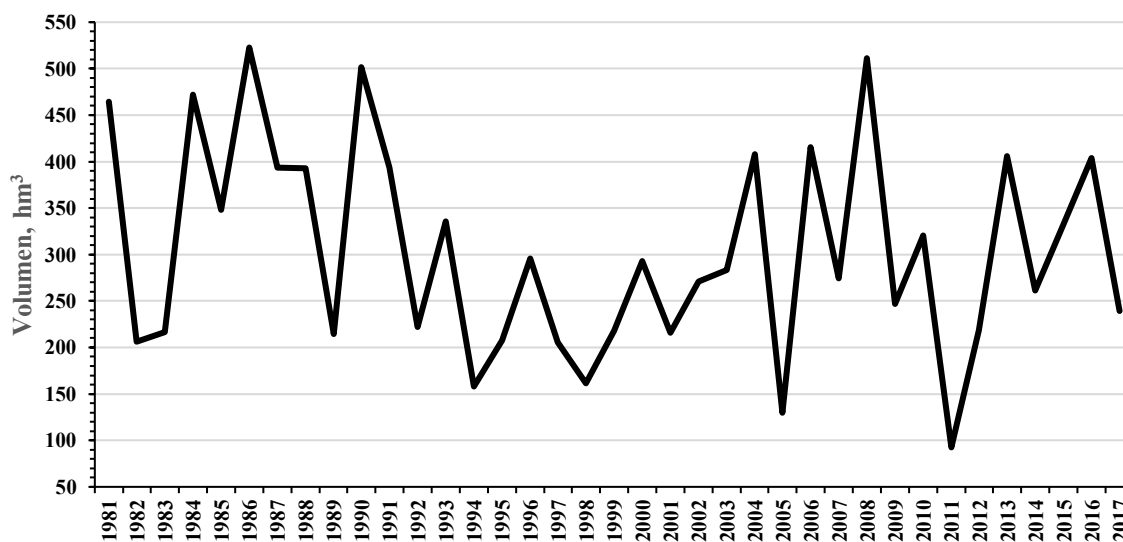
R. San Pedro



Promedio = 314.14 hm³

Gráfica 35 Hidrograma anual de la subcuenca R. San Pedro. Elaboración propia.

R. Conchos 2



Promedio = 304.12 hm³

Gráfica 36 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos 2. Elaboración propia.

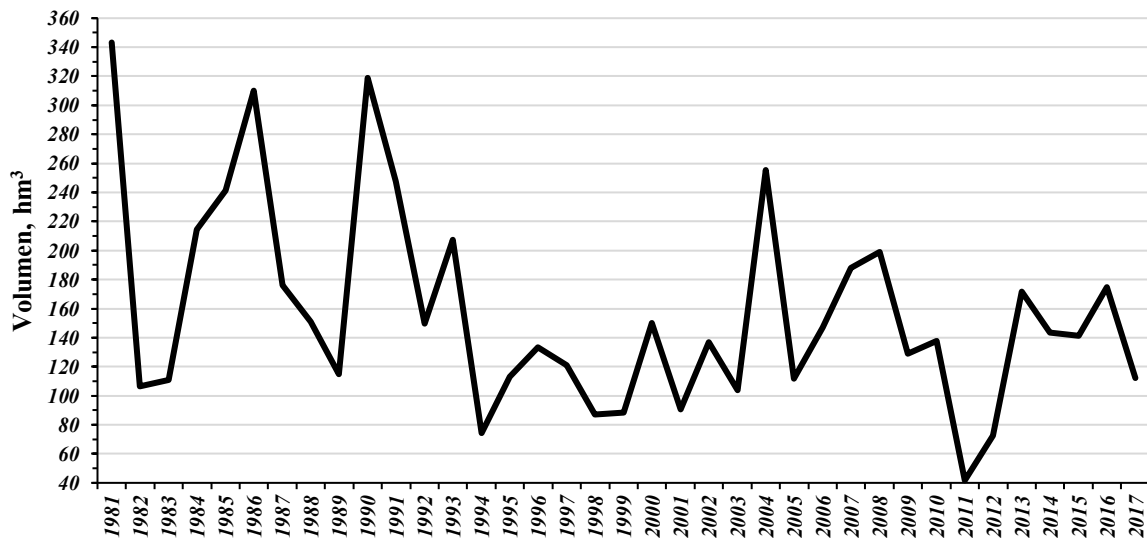
R. Conchos 3



Promedio = 116.38 hm³

Gráfica 37 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos 3. Elaboración propia.

R. Conchos 4



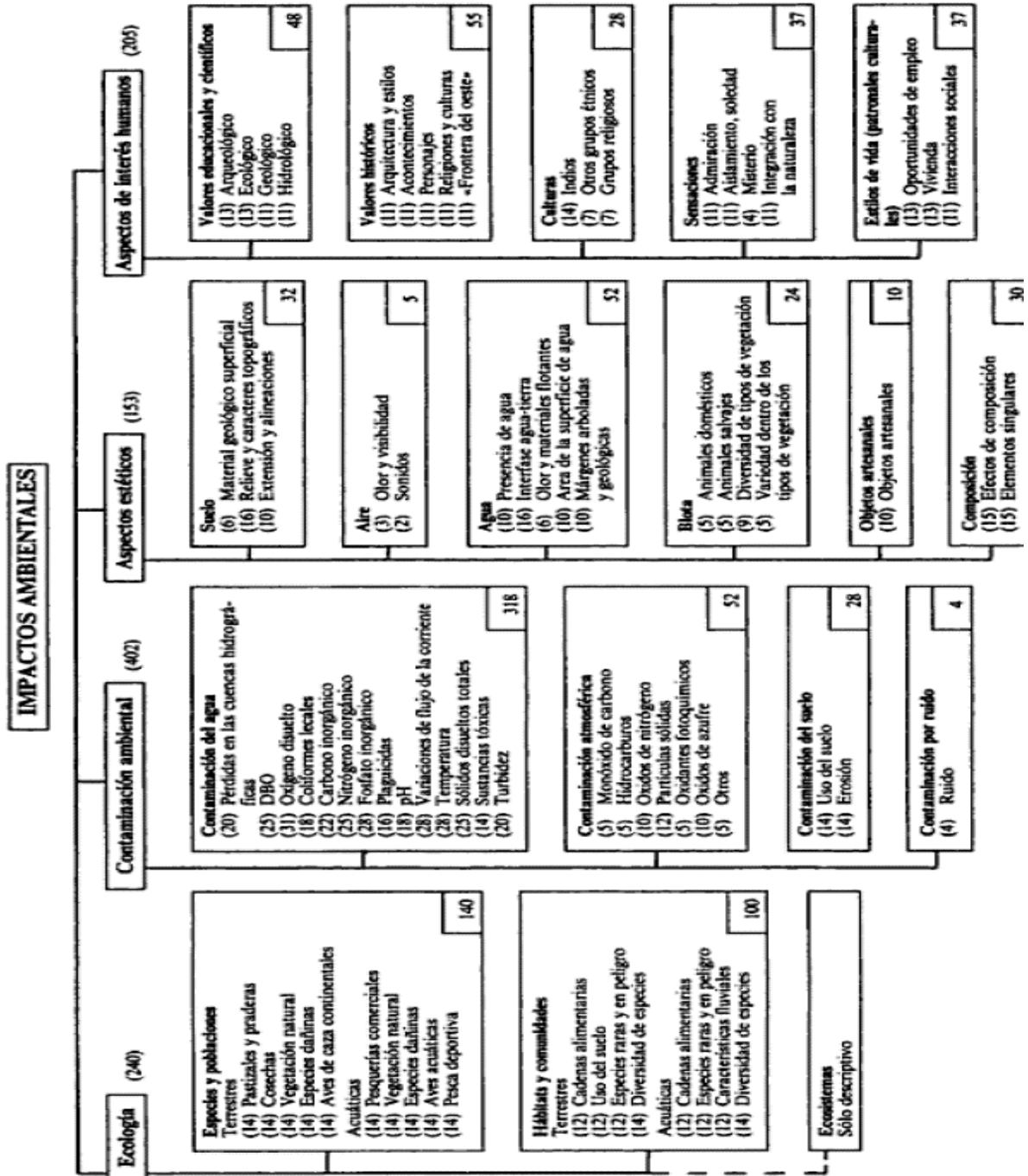
Promedio = 157.16 hm³

Gráfica 38 Hidrograma anual de la subcuenca R. Conchos 4. Elaboración propia.

ANEXOS

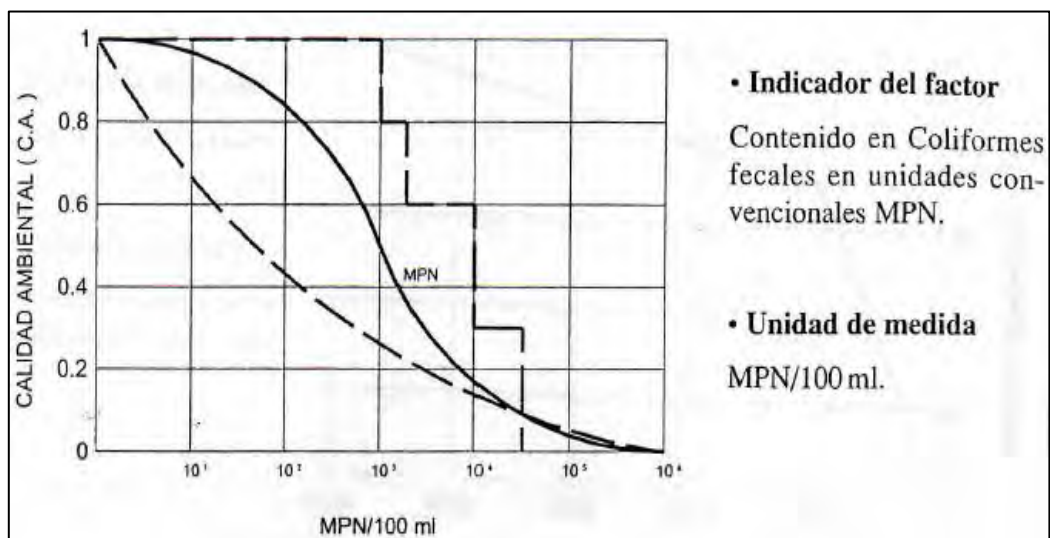
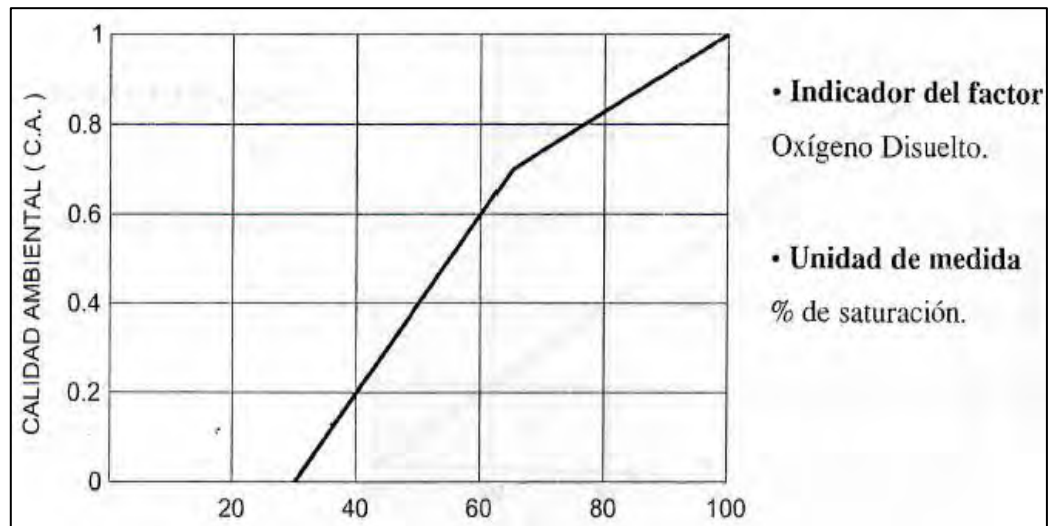
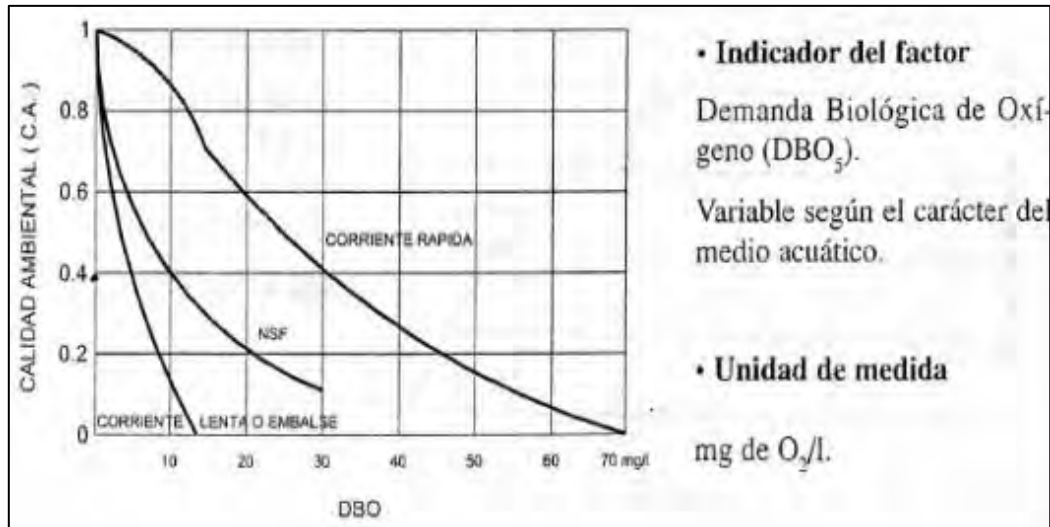
ANEXO 1: Parámetros ambientales del método Battelle-Columbus y Funciones de Transformación

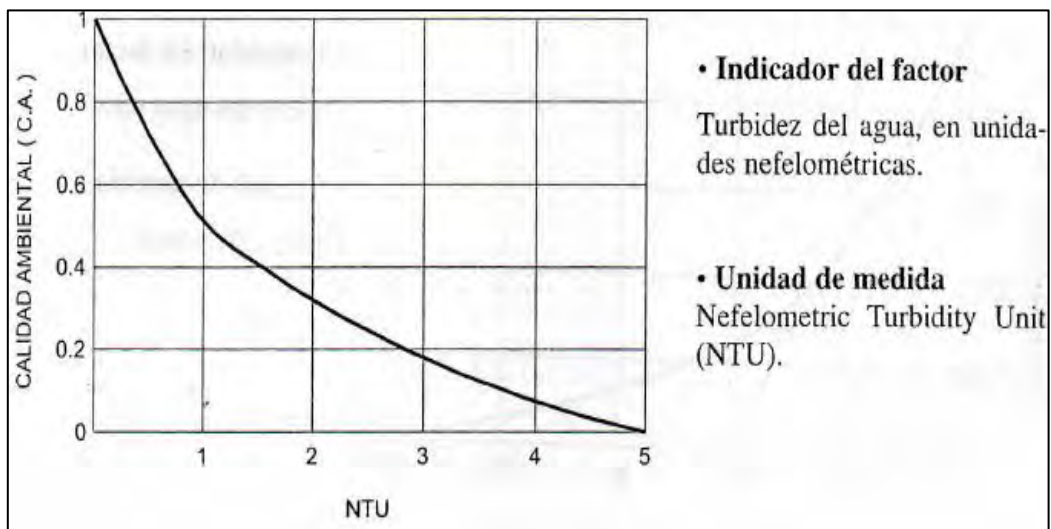
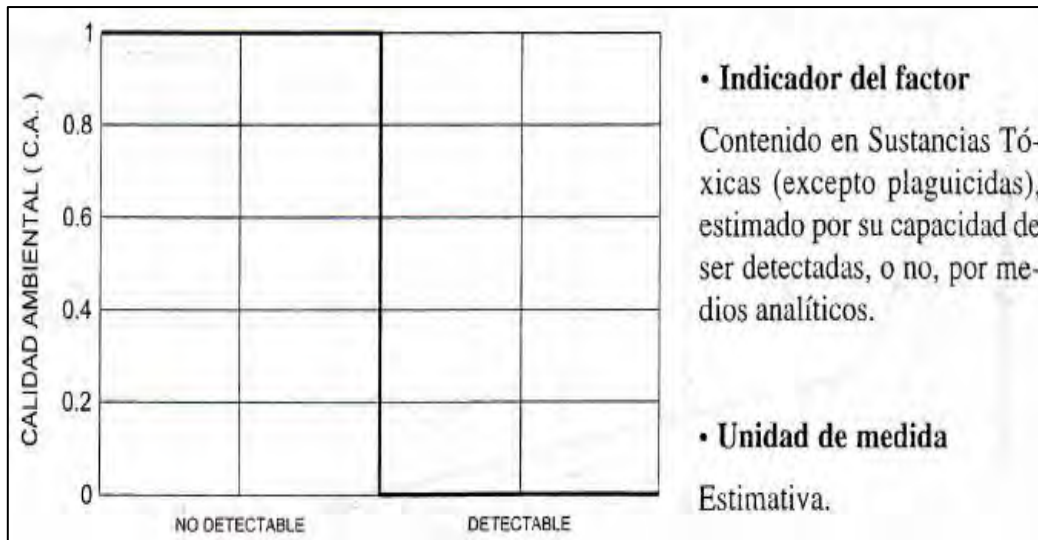
Distribución y ponderación de los PIU



Fuente: (Gúa Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental, 2010)

Funciones de transformación





ANEXO 2: Publicaciones

Artículos

- Hernández-Romero, P., & Patiño-Gómez, C. (2018). Perspectiva Actual y Futura de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Bravo. *ENTORNO-UDLAP*, 42-51.
- Hernández-Romero, P., Patiño-Gómez, C., Corona-Vasquez, B., & Martínez-Austria, P. F. (2019). Rainfall/Runoff Hydrological Modeling Using Satellite Precipitation Information. *Air, Soil and Water Research*, 1-21.
- Wilder, M., Martínez-Austria, P. F., Hernández-Romero, P., & Cruz-Ayala, M. B. (En revisión). The Human Right to Water. *Water Alternatives*, 28-48.

Capítulos de Libros

- Hernández-Romero, P., & Patiño-Gómez, C. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Conchos. En *La cuenca del río Bravo y el cambio climático* (págs. 231-250). San Andrés Cholula, Puebla: Fundación Universidad de las Américas, Puebla
- Patiño-Gómez, C., & Hernández-Romero, P. (2018). Sistema de Información Geográfico Binacional de la Cuenca del río Bravo. En *La Cuenca del río Bravo y el Cambio Climático*. (págs. 190-203). Cholula, Puebla: Fundación de las Américas Puebla.
- Patiño-Gómez, C., & Hernández-Romero, P. (En revisión). Data Models for River Basin Management en Mexico. En *Chapter 5: Water Resources of Mexico* (págs. 1-21). New York, USA: Springer.

Memorias de Congresos

- Patiño-Gómez, C., Martínez-Austria, P. F., Hernández-Romero, P., Mondragón-Monroy, R., & Guevara-Polo, D. E. (2017). Geographic information System: A useful tool for water management unde climate change condition. En *Facing the Threat: Climate Change* (págs. 189-202). Cholula, Puebla: Fundación Universidad de las Américas Puebla
- Hernández-Romero, P., Patiño-Gómez, C., Corona-Vasquez, B., & Martínez-Austria, P. F. (2019). Hydrological Modeling in the Rio Conchos Basin Using Satellite Information. *Technology, Science, and Culture: A Global Vision* (págs. 69-76). Cholula, Puebla: IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.83691

Notas Técnicas.

- Hernández-Romero, P., & Patiño-Gómez, C. (2018). *Perspectiva actual y futura de los recursos hídricos en la cuenca del río Conchos*. Cholula, Puebla: Cátedra UNESCO-UDLAP en Riesgos Hidrometeorológicos.
- Hernández-Romero, P., & Patiño-Gómez, C. (2018). *Current and Future Perspective for Water Resources in the Rio Bravo Basin*. Cholula, Puebla: Cátedra UNESCO-UDLAP en Riesgos Hidrometeorológicos.

REFERENCIAS

- ADB. (2013). *Asian Water Development Outlook: measuring water security in Asia and the Pacific*. Mandaluyong, Philippines: Asian Development Bank.
- ADB. (2016). *Asian Water Development Outlook: strengthening water security in Asia and the Pacific*. Mandaluyong, Philippines: Asian Development Bank.
- Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F., & Siebert, S. (1997). *Global Change and Global Scenarios of Water Use and Availability: An application of Water GAP 1.0*. Kassel, Germany: Center for Environmental System Research, University of Kassel.
- Alcamo, J., Henrichs, T., & Rösch, T. (2000). *World Water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st. Century*. Kassel, Germany: Center for Environmental System Research, University of Kassel.
- Aleksanyan, A., Khudaverdyan, S. K., & Vaseashta, A. (2014). Modeling River Ecosystem Vulnerability Assessments Due to Climate Change: Case Study of Armenia. *Pol. J. Environ. Stud. Vol 24, No. 2*, 871-877.
- Anher, B. (2016). *Assessing Groundwater Stress: An approach of measuring groundwater stress bases on sub-national statistical data*. Delft, Netherlands: International Groundwater Resources Assessment Centre.
- Aparicio-Mijares, F. J., Guitron-De los Reyes, A., & Preciado-Jimenez, M. E. (2011). *Indicadores de sustentabilidad hídrica*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Assefa, Y. T., Babel, M. S., Susnik, J., & Shinde, V. R. (2018). Development of a Generic Domestic Water Security Index, and Its Application in Addis Ababa, Ethiopia. *Water*, 1-23. doi:<https://doi.org/10.3390/w11010037>
- Averyt, K., Meldrum, J., Caldwell, P., Sun, G., McNulty, S., Huber-Lee, A., & Madden, N. (2013). Sectoral Contributions to surface water stress in the conterminous United States. *Environmental Research Letters*, 8(3), 1-9.
- Babel, M., & Shinde, V. R. (2018). A Framework for Water Security Assessment at Basin Scale. *APN Science Bulletin*, 8(1), 27-32. doi:<https://doi.org/10.30852/sb.2018.342>
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (Eds.). (2008). *El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: IPCC.
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Klemmayer, I., Lathuilliere, M., . . . Pfister, S. (2017). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(8), 368-378.
- Brauman, K. A., Richter, B. D., Postel, S., Malsy, M., & Flörke, M. (2016). Water depletion: an improved metric for incorporating seasonal and dry-year water scarcity into water risk assessments. *ELEMENTA. Science of the Anthropocene*, 1-12.

- Brown, A. (2011). *A review of water scarcity indices and methodologies*. Arkansas, USA: The Sustainability Consortium.
- Butler, H., Daly, M., Doyle, A., Gillies, S., Hagen, S., & Shaub, T. (2016). *The GeoJSON Format*. Fremont, California, USA: Internet Engineering Task Force (IETF).
- Canter, L. W. (1998). *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental*. Bogotá: MacGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U.
- Cervera-Gómez, L. E. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios Fronterizos*, 8(16), 9-41.
- Chaves, H. M., & Alipaz, S. (2007). An integrate indicator based on basin hydrology, enviromentak, life and policy: the watershed sustainability index. *Water Resources Management*, 21(5), 883-895.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: MaGRAW-HILL INTERNACIONAL, S.A.
- CICESE. (2016, Junio 12). *Base de datos climátologica nacional*. Retrieved from Sistema CLICOM: <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CILA. (1944). *Tratado de utilización del agua de los ríos Tijuana, Colorado y Grande entre Estados Unidos de America y México*. Washington, DC: Comisión Internacional de Límites y Agua.
- CILA. (1995). *Medidas emergentes de cooperación para abastecer las necesidades municipales de las poblaciones Mexicanas ubicadas a lo largo del río Bravo aguas abajo de la presa de La Amistad*. México, D.F.: Comisión Internacional de Límites y Aguas.
- CONAGUA. (2002). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Alto Río San Pedro, Estado de Chihuahua*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2003). *Estadística del agua en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2008). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 0836 Aldama-San Diego, Estado de Chihuahua*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2008). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 0841 Potrero del Llano, Estado de Chihuahua*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2011, Junio 2). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo-Conchos*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico Administrativa VI Río Bravo*. Mexico: Comisión Nacional del Agua.

- CONAGUA. (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). *Estadística del Agua en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2016, Junio 12). *Sistema de Información Nacional del Agua*. Retrieved from Cuencas (Nacional): http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=cuencas
- CONAGUA. (2016a, Junio 12). *Sistema de Información Nacional del Agua*. Retrieved from Cuencas (Nacional): http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=cuencas
- CONAGUA. (2016b). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2016b). *Situación del Subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016c, Septiembre 10). *Estadísticas Hidrométricas*. Retrieved from Estadísticas agrícolas de los distritos de riego: <http://www.edistritos.com/DR/estadisticaHidrometrica/organismo.php>
- CONAGUA. (2017a, 03 29). *Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)*. Retrieved from Información Estadística Nacional: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196286/NACIONAL.pdf>
- CONAGUA. (2017c, 01 27). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Retrieved Enero 27, 2017, from Base de datos hidrométricas: <http://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- CONAGUA. (30 de Agosto de 2017d). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Plantas de tratamiento de agua residual (Estat): http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=plantasTratamiento
- CONAGUA. (2018). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican*. Cd. México: Comisión Nacional del Agua.

- CONAGUA. (2018). *Estadística de Agua en México*. Cd. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Estadística del agua en México*. Cd. de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Ley Federal de Derechos: Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales*. Cd. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2018a). *Estadística de Agua en México*. Cd. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018b, Junio 19). *Aguas Subterráneas*. Retrieved from Disponibilidad por Acuíferos:
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- CONAGUA. (2018b, Diciembre 22). *Aguas Subterráneas*. Retrieved from Disponibilidad de Acuíferos:
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- CONAGUA. (2018b). *Atlas del agua en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018b, Marzo 31). *Registro Público de Derechos de Agua*. Retrieved from Información Estadística Nacional:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314661/NACIONAL_31032018.pdf
- CONAGUA. (2018c, Agosto 1). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Retrieved from Disponibilidad de los Acuíferos:
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=mapa&o=0&n=nacional>
- CONAGUA. (2018d, Diciembre 18). *Datos Abiertos*. Retrieved from Otorgamiento de concesiones, asignaciones y permisos para el uso, explotación y/o aprovechamiento de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes:
<https://datos.gob.mx/busca/dataset/concesiones-asignaciones-permisos-otorgados-y-registros-de-obras-situadas-en-zonas-de-libre-alu/resource/39b4278f-6796-47c3-ada2-31778b00f7c7>
- CONAGUA. (2019, Enero 8). *CONAGUA*. Retrieved from Monitoreo de Calidad del Agua:
<http://files.conagua.gob.mx/conagua/GobiernoAbierto/Calidaddelagua.pdf>
- CONAGUA. (2019, Enero 14). *Sistema de Información Nacional del Agua*. Retrieved from Cuencas (Nacional):Disponibilidad de cuencas hidrológicas 2017:
http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=cuencas
- CONAGUA. (2019b, Enero 09). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Retrieved from Indicadores de la calidad de agua superficial 2012-2017:
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/calidadAguaSup.php>

- CONAGUA. (2019b, Abril 22). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Retrieved from Precipitación: Mapas Estaciones Climáticas: http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=precipitacion
- CONAGUA. (2019c, Enero 14). *Sistema de Información Nacional del Agua*. Retrieved from Cuencas (Nacional):Disponibilidad de cuencas hidrológicas 2017: http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=cuencas
- CONAGUA. (2019d, Enero 14). *Sistema de Información Nacional del Agua*. Retrieved from Regiones Hidrológicas (nacional): <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas>
- CONAPO. (2015). *Índice de marginación por entidad federativa y municipios*. México, D.F.: Consejo Nacional de Población.
- CONAPO. (2015b, Febrero 10). *Mapa del grado de Marginación por municipio*. México, D.F.: Consejo Nacional De Población. Retrieved from Mapa del grado de Marginación por municipio: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Datos_Abiertos_del_Indice_de_Marginacion
- CONAPO. (2017, Noviembre 14). *Consejo Nacional de Población*. Retrieved from Datos de Proyecciones: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos
- CONAPO. (2017a, abril 2). *Consejo Nacional de Población*. Retrieved from Proyecciones de la población por municipios y localidades: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos
- Conesa-Fernández, V. (2010). *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Cook, C., & Bakker, K. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 94-102.
- Cooley, H., & Geick, P. H. (2011). Climate-proofing transboundary water agreements. *Hydrological Sciences*, 711-718.
- Dee, N., Baker, J. K., Drobny, N. I., Duke, K. M., & Fahringer, D. C. (1972). *Environmental Evaluation System for Water Resources Planning*. Columbus, Ohio: Battelle Memorial Institute, Columbus Laboratories, and United States Bureau of Reclamation.
- Desai, M. (1991). Human Development: Concepts and measurement. *European Economic Review*, 35(2-3), 350-357.
- Dickson, S. E., Schuster-Wallace, C. J., & Newton, J. J. (2016). Water security assessment indicators:the rural context. *Water resources management*, 1567-1604.
- Douglas, A. L., Marchal, W. G., & Whaten, S. A. (2012). *Estadística aplicada a negocios y la economía*. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Falkenmark, M. (1989). The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa: Why Isn't It Being Addressed? *AMBIO*, 18(2), 112-118.

- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management.*, 129-132.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y seguridad alimentaria*. Roma, Italia: Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Funk, C., Paterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., . . . Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infreared precipitation with stations - a new enviromental recordfor monitoring extreme. *SCIENTIFIC DATA* 2, 1-21. doi:10.1038/sdata.2015.66
- Gain, A. K., Giupponi, C., & Wada, Y. (2016). Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environental Research Letters*, 11(12), 1-13.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M., & Beek, L. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 197-200. doi:10.1038/nature11295
- Grey, D., & Sadoff, C. (2007). Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 545-571.
- Guerrero, V. (2004). Aportes de la gestión integral de agua. In C. Tortajada, V. Guerrero, & R. Sandoval (Eds.), *Hacia una gestión integral del agua en México: retos y alternativas* (pp. 31-46). México,D.F.: H. Cámara de Diputados, LLX Lesgislatura.
- GWP. (2013). *Aumentar la seguridad hídrica: Un imperativo para el desarrollo*. Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mesfin, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual*. London & Washigton, DC: Earthscan.
- Holliday, C. P., Rasmussen, T. C., & Miller, W. P. (2003). Establish The Relationship Between Turbidity and Total Suspended Sediment Concentration. *Georgia Water Resources Conference* (pp. 1-3). Athens, Georgia: Institute of Ecology, TRhe University og Georgia.
- IGRAC. (2011). *Groundwater Development Stress*. Delft,Netherlands: International Groundwater Resoruces Assessment Centre.
- IMTA. (2009). *Extractor Rápido de Información Climátologica*. Jiutepec, Morelos,México: Instituto Mexicano del Tecnología del Agua.
- INECC. (2015). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional*. Mexico D.F.: Instituto Nacional de Ecología y el Cambio Climático.
- INEGI. (2013). *Conjunto de datos vectorial edafológico, Escala 1:250,000 Serie II (Conjunto Nacional)*. Retrieved from Greografía/Recursos Naturales/Edafología: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- INEGI. (2013, Septiembre 4). *Conjunto de datos vectorial edafológico, Escala 1:250,000 Serie II (Conjunto Nacional)*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística y

- Geografía. Retrieved from Geografía/Recursos Naturales/Edafología: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- INEGI. (2014). *Usode suelo y vegetación, escala 1:250,000, serie V (Capa Unión)*. Retrieved from <http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/meta/suelos/suelos.html>
- INEGI. (2014). *Usode suelo y vegetación, escala 1:250,000, serie V (Capa Unión)*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2017a, noviembre 14). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved from Séptimo Censo General de Población 1950: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/1950/default.html>
- INEGI. (2017b, Abril 2). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved from Censos y conteos de población y vivienda: Censo de población y vivienda 2010: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>
- INEGI. (2017b, Noviembre 14). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved from Censo de Población y Vivienda 2010: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/default.html>
- INEGI. (2017c, Julio 21). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved from Censos y conteos de población y vivienda.: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/>
- INEGI. (2017c, Abril 02). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved from Censos y conteos de población y vivienda: XII Censo general de población y vivienda 2000: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2000/default.html>
- Ingol-Blanco, E. M., & McKinney, D. C. (2011). *Modeling Climate Change Impacts on Hydrology and Water Resources: Case Study*. Austin, Texas: Center for Research in Water Resources.
- IPCC. (2007). Appendix I: Glossary. In IPCC, M. L. Parry, O. F. Canziani, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Van der Linden, & C. E. Hanson (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and Vulnerability of working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change* (pp. 869-938). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jensen, O., & Wu, H. (2018). Urban Water Security Indicators: Development and Pilot. *Environmental Sciences and Policy*, 33-45.
- Kelly, M. E. (2001). *El Río Conchoa: Un Informe Preliminar*. Austin, Texas: Texas Center for Policy Studies.

- Kulshreshtha, S. N. (1993). *World Water Resources and Regional Vulnerability: Impact of The Future Change*. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied System Analysis.
- Kummu, M., & Varis, O. (2011, febrero 27). The world by latitudes: a global analysis of human population, development level and environment across the north-south axis over the past half century. *Applied Geography*, 31(2), 495-507.
- Lautze, J., & Manthritlake, H. (2012). Water security: old concepts, new package, what value? *Natural Resources Forum*, 76-89.
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241.
- Loucks, D. P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Science-Journal*, 513-530.
- Martínez-Austria, P. F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(5), 165-180.
- Martínez-Austria, P. F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Volumen IV, No. 5, 165-180.
- Martínez-Austria, P. F. (2014). Gobernanza hídrica y la agricultura. In *El Agro y las áreas rurales en el México del siglo XXI* (pp. 135-150). México, D.F: Universidad Autónoma de México.
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. (P. F. Martínez-Austria, & C. Patiño-Gómez, Eds.) Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez-Austria, P. F., Derbez, L. E., & Giner, M. E. (2013). The US-Mexico institutional arrangement for transboundary water governance. In *Free Flow. Reaching water security through cooperation*. (pp. 182-197). Paris: Tudor Rouse and UNESCO.
- Martínez-Austria, P. F., Patiño-Gómez, C., & Tamayo-Escobar, J. E. (2014). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 135-149.
- Martínez-Austria, P., & Patiño-Gómez, C. (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. (P. F. Martínez-Austria, & C. Patiño-Gómez, Eds.) Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez-Austria, P., Díaz-Delgado, C., & Moeller-Chávez, G. (2017). *Seguridad hídrica en México*. Ciudad de México: Academia de Ingeniería de México.
- Mason, N., & Calow, R. (2012). *Water Security: from abstract concept to meaningful metrics. An overview of options*. London, UK.: Overseas Development Institute.
- McCracken, M., & Wolf, A. T. (2019). Updating the Register of International River Basins of the World. *International Journal of Water Resources Development*, 1-51. doi:10.1080/07900627.2019.1572497

- Montero-Martínez, M. J., Martínez-Jiménez, J., Castillo-Pérez, N. I., & Espinoza-Tamarindo, B. E. (2010). Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperaturas máxima y mínima. In *Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático*. (pp. 39-63). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Moore, B. C., Coleman, A. M., Wigmosta, M. S., Skaggs, R. L., & Venteris, E. R. (2015). A high spatiotemporal assessment of consumptive water use and water scarcity in the conterminous United States. *Water Resources Management*, 25(14), 5185-5200.
- NFS. (2018, Abril 12). *Water Research Center*. Retrieved from Monitoring the quality of surface waters: <https://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>
- OCDE. (2013). *Hacer posible la reforma de la gestión del agua en México*. París : OECD Publishing (OECD Studies on water).
- OECD. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and user guide*. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Ohlsson, L. (2000). Water conflicts and social resource scarcity. *Phys. Chem. Earth*, 25(3), 213-220.
- Ortega-Gaucin, D. (2013). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 167-180.
- Patiño-Gómez, C. (2007). *Análisis y modelación hidrológica, de calidad del agua y gestión en la región fronteriza Méjico-Estados Unidos: Implementación del modelo de datos ArchHydro de aguas superficiales para la cuenca binacional del río Bravo/Grande*. Jiutepec, Moreles, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Patiño-Gómez, C. (2007). *Análisis y modelación hidrológica, de calidad del agua y gestión en la región fronteriza Méjico-Estados Unidos: Implementación del modelo de datos ArchHydro de aguas superficiales para la cuenca binacional del río Bravo/Grande*. Jiutepec, Moreles, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098-4104.
- PRI. (2007). *Canadian water sustainability index (CWSI)*. Ottawa, Canada: Policy Reseach Initiative, Government of Canada.
- PRI. (2007). *Canadian Water Sustainability Index (CWSI)*. Ottawa, Canada: Policy Reseach Initiative, Government of Canada.
- R. J. Brandes Company. (2003). *Naturalized Streamflow Data*. Austin, Texas: Texas Commission on Environmental Quality.
- Richey, A., Thomas, B. F., Lo, M.-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., . . . Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 5217-5238. doi:10.1002/2015WR017349

- Ringler, C., Bryan, E., Biswas, A., & Cline, S. A. (2010). Water and Food Security Under Global Change. In *Global Change: Impacts on Water and Food Security* (pp. 3-16). New York: Springer Science + Business Media.
- Rivas-Acosta, I., & Montero-Martínez, M. J. (2014). Assessment of Surface Runoff Vulnerability to CLimate Change in the Lerma-Chapala Basin, Mexico. *Journal of Water Resources PLanning and Management*, 1-13.
- Rivas-Acosta, I., & Montero-Martínez, M. J. (2013). Downscaling technique to estimate hydrologic vulnerability to climate change: and application to the Conchos Rives basin, Mexico. *Journal of Water and Climate Change*, 4(4), 440-457.
- Rivas-Acosta, I., Güitron de los Reyes, A., & Ballinas-González, H. A. (2010). Vulnerabilidad hídrica global: Aguas superficiales. In *Atlas de vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático* (pp. 81-114). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rodríguez, V. J., Tzatchkov, V., Cortez Mejía, P., Sainos Candelario, A., Llaguno Guilberto, Ó., Sandoval Yoal, L., . . . Navarro Barraza, S. (2017). *Índices de seguridad hídrica (ISH)*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Roy, S. B., Chen, L., Girvetz, E. H., Maurer, E. P., Mills, W. B., & Grieb, T. M. (2012). Projecting Water Withdrawal and Supply for Future Decades in the U.S. under Climate Change Scenarios. *Environmental Science & Technology*, 46(5), 2545-2556.
- Ruess, P. (2015). *Mapping of water stress indicators*. Austin, TX: University of Texas at Austin.
- Sagar, A. D., & Najam, A. (1998). The human development index: a critical review. *Ecological Economics*, 249-264.
- Salcedo, E., González, J. A., Espinoza, M. J., & Escalante, M. (n/d). *Evaluación de la sustentabilidad del agua en la cuenca del lago Pátcuaro*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Sandoval Solis, S., & McKinney, D. C. (2011). *Water Planning and Management for Large Scale River Basins: Case of study of the rio Grande/rio Bravo transboundary basin*. Austin, Texas: Center For Research in Water Resources.
- SEMARNAT. (2002, Enero 29). *Compendio de Estadísticas Ambientales*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from Compendio de Estadísticas Ambientales 2002: http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/estadisticas_ambientales_2000/03_Dimensio_n_Ambiental/03_02_Agua/III.2.2/RecuadroIII.2.2.2.pdf
- SEMARNAT. (2015). *NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2018, Enero 12). *Compendio de Estadísticas Ambientales*. Cd. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from Indicadores de

Calidad de Agua: file:///C:/Users/PHR/Desktop/ISHM/2.-ISHMj/Calidad%20de%20Agua/Compendio_2018/Compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html

- SEMARNAT. (2019, Febrero 20). *SEMARNAT*. Retrieved from Compendio de Estadísticas Ambientales 2018: file:///C:/Users/PHR/Desktop/ISHM/Calidad%20de%20Agua/Compendio_2018/Compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html
- SEMARNAT. (2019b, Enero 29). *SEMARNAT*. Retrieved from Compendio de Estadísticas Ambientales 2002: http://www.paot.org.mx/centro/in-semarnat/informe02/estadisticas_2000/estadisticas_ambientales_2000/03_Dimension_Ambiental/03_02_Agua/III.2.2/RecuadroIII.2.2.2.pdf
- SERVIR GLOBAL. (2018, Septiembre 12). *SERVIR GLOBAL*. Retrieved from CLIMATESERV: <https://climateserv.servirglobal.net/>
- Shah, T., Molden, D., Sakthivadivel, R., & Seckler, D. (2000). *The Global Groundwater Situation: Overview of Opportunities and Challenge*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Shrestha, S., Aihara, Y., Bhattarai, A., Bista, N., Kondo, N., Futaba, K., . . . Shindo, J. (2018). Development of an objective water security index and assessment of its association with quality of life in urban areas of developing countries. *SSM- Population Health*, 6, 276-285.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Doell, P., & Portman, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology & Earth System Science*, 1863-1880.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). *Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments*. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity. *International Water Resources Association*, 307-317.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2005). *Taking environmental water requirements in global-scale water resources assessment. Comprehensive assessment research report 2*. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat.
- Srinivasan, V., Konar, M., & Sivapalan, M. (2017). A Dynamic Framework For Water Security. *Water Security*, 12-20.
- Sullicvan, C. (2002). Calculating a water poverty index. *World Development*, 30(7), 1195-1210.
- Sun, G., McNulty, S. G., Moore-Myers, J. A., & Cohen, E. C. (2008). Impacts of climate change, population growth, land use change, and groundwater availability on water supply and demand across the conterminous U.S. *Water Supply*, 6(2), 1-30.

- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 6-10. doi:10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2
- The World Bank. (2016, Septiembre 16). *Data from database: Health Nutrition and Population Statistics*. Retrieved from Population estimates and projections: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=Health%20Nutrition%20and%20Population%20Statistics:%20Population%20estimates%20and%20projections>
- Tidwell, V. C., Kobos, P. H., Malczynski, L. A., Klise, G., & Castillo, C. R. (2012). Exploring the water-thermoelectric power nexus. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 491-501.
- UN. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, titulado "Nuestro futuro común"*. Nairobi, Kenia: Naciones Unidas.
- UN. (1997). *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*. New York: United Nations: Economic and Social Council.
- UN. (2007). *Groundwater resources sustainability indicators*. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- UN. (2009). *Atlas of Transboundary Aquifers: Global maps, regional cooperation and local inventories*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- UN. (2014). *Situación demográfica en el mundo, 2014: Informe conciso*. Nueva York: División de población del departamento de asuntos económicos y sociales de la secretaría de las Naciones Unidas.
- UN. (2015). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. New York: United Nations.
- UNDP. (2019, abril 10). *Human Development Reports*. Retrieved from ¿Por qué se utiliza la media geométrica en el cálculo del IDH, en lugar de la media aritmética?: <http://hdr.undp.org/en/node/2507>
- UNESCO. (2009). *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a changing World*. Paris and London: UNESCO.
- UN-WATER. (2013). *Water Security and the Global Water Agenda*. Ontario, Canada: United Nations University.
- Vörösmarty, C. J., Douglas, E. M., Green, P. A., & Revenga, C. (2005). Geospatial Indicators of Emerging water stress: An Application to Africa. *AMBIO*, 34(3), 230-236.
- Vörösmarty, C. J., Lévêque, C., & Revenga, C. (2005). Fresh Water. In *Ecosystem and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1* (pp. 167-207). Washington, D.C.: Island Press.
- Wada, Y. (2013). *Human and climate impacts on global water resources*. Utrecht, Netherlands: Utrecht University.
- Wada, Y., & Heinrich, L. (2013). Assessment of transboundary aquifers of the world-vulnerability arising from human water use. *Environmental Research Letters*, 1-13.

- WEF. (2015). *Informe Global Risk: Resumen Ejecutivo*. Ginebra, Suiza: The World Economic Forum.
- WEF. (2019). *The Global Risk Report 2019, 14th Edition*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum.
- Wolf, A. T. (2002). *The Atlas of International freshwater agreements*. Nairobi, Kenya: UNEP.
- WWAP. (2016). *The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs*. Paris: UNESCO. Retrieved from <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002439/243938e.pdf>
- Xu, H., & Wu, M. (2017). *Water Availability Indices-A Literature Review*. Oak Ridge, TN: U.S. Department of Energy.
- Zektser, I. S., & Everett, L. G. (2004). *Groundwater Resuources of the World and their use*. Paris,France: United Nation Educational Scientific and Cultural Organization.