



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAGOS,  
BASÁNDOSE EN INDICADORES DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA:  
ANÁLISIS EMERGÉTICO Y HUELLA HÍDRICA EN EL LAGO DE ATITLÁN**

**MSc. Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga**  
Asesorado por el Doctor Tomás Antonio Padilla Cámara

Guatemala, agosto de 2018

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACTULTAD DE INGENIERÍA**



**ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAGOS,  
BASÁNDOSE EN INDICADORES DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA:  
ANÁLISIS EMERGÉTICO Y HUELLA HÍDRICA EN EL LAGO DE ATITLÁN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO AL COMITÉ DEL DOCTORADO EN CAMBIO CLIMÁTICO Y  
SOSTENIBILIDAD

POR

**MSC. ING. DENNIS SALVADOR ARGUETA MAYORGA**  
ASESORADO POR EL DOCTOR TOMÁS ANTONIO PADILLA CÁMBARA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**DOCTOR EN CAMBIO CLIMÁTICO Y SOSTENIBILIDAD**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**HONORABLE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
VOCAL I: Ing. Ángel Roberto Sic García  
VOCAL II: Ing. Pablo Christian De León Rodríguez  
VOCAL III: Ing. José Milton De León Bran  
VOCAL IV: Br. Oscar Humberto Galicia Núñez  
VOCAL V: Br. Carlos Enrique Gómez Donis  
SECRETARIA: Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA**

DIRECTOR: Ing. MSc. Edgar Darío Álvarez Cotí  
COORDINADORA: Dra. Mayra Virginia Castillo Montes  
EXAMINADOR: Dr. Alfredo Salvador Gálvez Sinibaldi  
EXAMINADOR: Dr. Marvin Roberto Salguero Barahona  
EXAMINADOR: Dra. Mayra Virginia Castillo Montes

## **HONORABLE JURADO EVALUADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**“METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAGOS,  
BASÁNDOSE EN INDICADORES DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA:  
ANÁLISIS EMERGÉTICO Y HUELLA HÍDRICA EN EL LAGO DE ATITLÁN”**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 15 de julio de 2015.

---

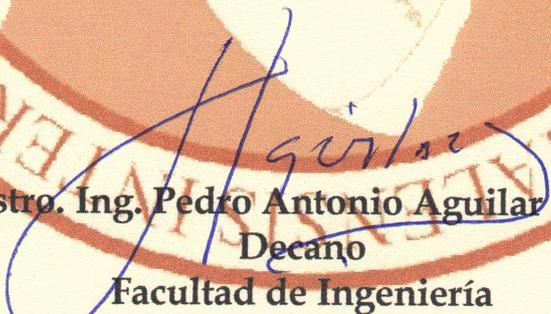
**Ing. MSc. Dennis Salvador Argueta Mayorga**

Ref. APTD-2018-001

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado a la Tesis Doctoral en Cambio Climático y Sostenibilidad titulado: **"METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAGOS, BASÁNDOSE EN INDICADORES DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA: ANÁLISIS ENERGÉTICO Y HUELLA HÍDRICA EN EL LAGO DE ATITLÁN"** presentado por el Maestro en Ingeniería Sanitaria Dennis Salvador Argueta Mayorga, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, agosto de 2018.

Cc: archivo/LZ.L.A.

Ref. APTD-2018-001

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística de la Tesis Doctoral titulado **"METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAGOS, BASÁNDOSE EN INDICADORES DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA: ANÁLISIS ENERGÉTICO Y HUELLA HÍDRICA EN EL LAGO DE ATITLÁN"** presentado por el Maestro en Ingeniería Sanitaria Dennis Salvador Argueta Mayorga, correspondiente al programa de Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, agosto de 2018.

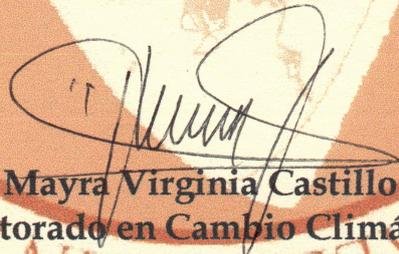
Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref. APTD-2018-001

Como Coordinadora del Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad doy el aval correspondiente para la aprobación de la Tesis Doctoral titulada **"METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAGOS, BASÁNDOSE EN INDICADORES DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA: ANÁLISIS ENERGÉTICO Y HUELLA HÍDRICA EN EL LAGO DE ATITLÁN"** presentado por el Maestro en Ingeniería Sanitaria Dennis Salvador Argueta Mayorga.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*



**Doctora Mayra Virginia Castillo Montes**  
Coordinadora de Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, agosto de 2018.

Cc archivo/LZLA.

Ref. APTD-2018-001

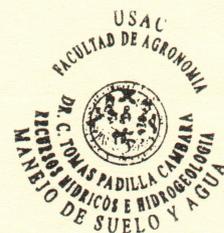
En mi calidad como Asesor del Maestro en Ingeniería Sanitaria **Dennis Salvador Argueta Mayorga** doy el aval correspondiente para la aprobación de la Tesis Doctoral titulada **"METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DE LAGOS, BASÁNDOSE EN INDICADORES DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA: ANÁLISIS ENERGÉTICO Y HUELLA HÍDRICA EN EL LAGO DE ATIFLÁN"** quien se encuentra en el programa de Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Doctor Tomás Antonio Padilla Cámara**  
Asesor(a)

**Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias**



Guatemala, agosto de 2018.

Cc archivo/L.Z.L.A.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Ser supremo, que me ha bendecido y demostrado su infinito amor y su existencia. Por fe confiaré siempre en Él.
- Mi padre** Oscar Argueta Hernández, por los sabios consejos y por su ejemplo de sacrificio, perseverancia, sencillez y humildad. ¡Ojalá algún día llegue a ser como él!
- Mi madre** Aura Mayorga Salguero de Argueta, por su empatía conmigo en todo momento. Por su dedicación y amor incondicional desde siempre. No existe un vocablo que logre describir el amor y admiración que siento por ella. Por siempre mi vieja hermosa.
- Dr. Tomás Padilla** Por su colaboración incondicional como asesor de tesis; por sus consejos y por su disposición en fomentar el desarrollo de este trabajo de graduación.
- Dra. Mayra Castillo** Por el apoyo durante todo el proceso de formación doctoral, con énfasis en las instancias críticas en la realización de la tesis

doctoral. Su apoyo fue fundamental para obtener este logro.

**Dr. Alfredo Gálvez**

Por la dedicación y el tiempo invertido para la elaboración de esta tesis, y que la misma tenga un aceptable nivel interpretativo.

**Personal docente**

Doctores Rosa María Amaya, Casta Zeceña, Eduardo López Bastida, Oscar Brown, Mario Álvarez, Marvin Salguero, Julio César Díaz, Miguel Chacón, David Monterroso, Alexis Sagastume.

**Personal administrativo de la Escuela de Estudios de Postgrado**

Por el apoyo brindado en mi formación.

**A mis compañeros y amigos de la primera promoción del Doctorado**

En especial a Félix Aguilar, Andrea Rodas, Katy López y Laura Gómez, por persuadir a avanzar aun en los momentos difíciles.

**A la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Por la apertura a la educación. Mi alma máter.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Oscar Argueta Hernández  
Aura Mayorga Salguero de Argueta

### **Mis hermanos**

Oscar Fernando Argueta Mayorga  
José Luis Argueta Mayorga

### **Mis abuelitos**

Oscar Argueta Toledo (Q.E.P.D.)  
Herminia Hernández de Argueta  
José Raúl Mayorga (Q.E.P.D.)  
Rosaura Salguero de Mayorga (Q.E.P.D.)

En general a todas las personas que me han mostrado su apoyo y cariño en todo momento de mi vida.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
HIPÓTESIS.....	XXV
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. ¿Por qué se selecciona la cuenca del lago de Atitlán para la presente investigación?.....	13
1.3. Conceptos generales de cuerpos lénticos.....	14
1.3.1. Sistemas lénticos.....	14
1.3.2. Dinámica de sistemas lénticos.....	14
1.3.3. Estratificación térmica de los lagos y reservas.....	16
1.3.4. Eutroficación.....	17
1.4. Economía ecológica.....	20
1.4.1. Conceptos fundamentales.....	24
1.4.2. Usos de la economía ecológica.....	28
1.4.3. Diferencias entre economía ecológica y economía tradicional.....	29
1.4.4. Visión de la economía ecológica.....	32

1.4.5.	Indicadores de la economía ecológica.....	33
1.4.6.	Ventajas y desventajas de la economía ecológica.....	35
1.5.	Huella hídrica.....	36
1.5.1.	Huella hídrica como indicador de sostenibilidad.....	37
1.5.2.	Usos de la huella hídrica .....	38
1.5.3.	Ventajas y desventajas de la huella hídrica.....	39
1.5.4.	Aplicación de la huella hídrica en otras partes del mundo..	40
1.6.	Métodos emergéticos.....	41
1.6.1.	Definiciones y conceptos.....	41
1.6.2.	Análisis emergético como indicador de sostenibilidad.....	43
1.6.3.	Ventajas y desventajas de los métodos emergéticos.....	43
1.6.4.	Aplicaciones de la emergía.....	44
1.6.5.	Relación entre la emergía y los recursos hídricos.....	45
2.	METODOLOGÍA.....	47
2.1.	Descripción de la metodología para determinar la huella hídrica...	47
2.2.	Descripción de la metodología para realizar análisis emergéticos.....	62
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	69
3.1.	Evaluación de la huella hídrica.....	69
3.1.1.	Fase I. Definición del alcance general.....	69
3.1.2.	Fase II. Cuantificación de la huella hídrica.....	83
3.1.3.	Fase III. Evaluación de sostenibilidad.....	98
3.1.4.	Fase IV. Formulación de propuestas.....	99
3.2.	Resultados del análisis emergético.....	104
3.2.1.	Descripción del sistema a analizar y sus límites.....	104
3.2.2.	Alcances para determinación del análisis emergético.....	105

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	113
CONCLUSIONES.....	143
RECOMENDACIONES.....	147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151
ANEXOS.....	161



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Distribución vertical de un lago.....	16
2.	Cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua, causados por el proceso de eutrofización.....	18
3.	El metabolismo social.....	25
4.	Mapa conceptual de aplicaciones de la huella hídrica.....	37
5.	Fases para evaluar la huella hídrica.....	48
6.	Etapas en la realización de análisis emergético.....	63
7.	Idiomas de la región.....	72
8.	Índice de Desarrollo Humano (IDH).....	73
9.	Cuenca del lago de Atitlán.....	75
10.	Ubicación de las estaciones meteorológicas de Sololá.....	78
11.	Usos del suelo del departamento de Sololá.....	79
12.	Taxonomía del suelo del departamento de Sololá.....	81
13.	Registro de información climática para CROPWAT 8.0.....	84
14.	Datos ingresados en CROPWAT 8.0 para obtener los valores de radiación y evapotranspiración de referencia.....	85
15.	Precipitación efectiva (mm) calculada con el <i>software</i> CROPWAT 8.0.....	86
16.	Cultivos dentro del área de estudio, utilizando información de la FAO, a través de CROPWAT 8.0.....	87
17.	Datos generales del suelo del área de estudio, utilizando información de la FAO, a través de CROPWAT 8.0.....	89
18.	Requerimiento de agua para los cultivos dentro del área de estudio,	

	utilizando información de la FAO, a través de CROPWAT 8.0.....	90
19.	Gráfica de requerimiento de agua para los cultivos, abasteciéndose de precipitación efectiva (verde) y de riego (azul), a través de CROPWAT 8.0.....	91
20.	Flujograma de representación de cálculo de la huella hídrica.....	113
21.	Población (expresada como porcentaje del total de la cuenca) en los municipios circunscritos en la cuenca de Atitlán.....	115
22.	Uso de la tierra en la cuenca del lago de Atitlán.....	116
23.	Clasificación del uso de la tierra en la cuenca de Atitlán para el año 2003.....	117
24.	Clasificación del uso de la tierra en la cuenca de Atitlán para el año 2017.....	118
25.	Gráfica de temperaturas máximas y mínimas (promedio) en la cuenca de Atitlán para los 12 meses del año.....	120
26.	Gráfica precipitación (mm) y precipitación efectiva (mm) en la cuenca del lago de Atitlán.....	121
27.	Huella hídrica para el sector agrícola en la cuenca de Atitlán.....	122
28.	Proyección de escenarios de huella hídrica para un rango de 100 años.....	130
29.	Índices emergéticos en la cuenca de Atitlán.....	131

## **TABLAS**

I.	Valores límites de la OCDE para un sistema concreto de clasificación trófica.....	19
II.	Identificación del área de estudio (cuenca Atitlán).....	74
III.	Extensión territorial y población dentro de la cuenca de Atitlán.....	76
IV.	Cobertura forestal de la cuenca Atitlán, año 2,006.....	80
V.	Datos climáticos en la cuenca del lago de Atitlán (1994-2015).....	85

VI.	Datos de precipitación promedio (milímetros) en la cuenca del lago de Atitlán (1994-2015).....	86
VII.	Valores de huella hídrica dentro de la cuenca del lago de Atitlán, por tonelada.....	93
VIII.	Valores de huella hídrica dentro de la cuenca del lago de Atitlán para el sector agrícola (siembras), por año.....	94
IX.	Valores de huella hídrica dentro de la cuenca del lago de Atitlán para el sector agrícola (siembras y bosques), por año.....	95
X.	Cálculos para el análisis emergético.....	108
XI.	Valores obtenidos del análisis emergético.....	111
XII.	Índices emergéticos.....	111
XIII.	Valores de huella hídrica para el sector doméstico en la cuenca de Atitlán.....	124
XIV.	Valores de huella hídrica para el escenario 1 (situación actual año 2018) en la cuenca de Atitlán.....	125
XV.	Valores de huella hídrica para el escenario 2 (año 2018) en la cuenca de Atitlán.....	126
XVI.	Valores de huella hídrica para el escenario 3 (año 2068) en la cuenca de Atitlán.....	127
XVII.	Valores de huella hídrica para el escenario 4 (año 2118) en la cuenca de Atitlán.....	128
XVIII.	Resumen de valores de la huella hídrica para 4 escenarios en la cuenca de Atitlán.....	129
XIX.	Precipitación en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	163
XX.	Días de lluvia en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	164
XXI.	Temperatura media en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	165
XXII.	Temperatura máxima promedio en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	166

XXIII.	Temperatura mínima promedio en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	167
XXIV.	Temperatura máxima absoluta en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	168
XXV.	Temperatura mínima absoluta en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	169
XXVI.	Humedad relativa media en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	170
XXVII.	Humedad máxima promedio en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	171
XXVIII.	Humedad mínima promedio en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	171
XXIX.	Nubosidad (octas) en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	172
XXX.	Evapotranspiración en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	173
XXXI.	Dirección del viento en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	174
XXXII.	Velocidad del viento en la estación meteorológica Santiago Atitlán.....	175
XXXIII.	Temperatura media en °C, en la estación meteorológica El Tablón.....	176
XXXIV.	Temperatura máxima promedio en la estación meteorológica El Tablón.....	177
XXXV.	Temperatura mínima promedio en la estación meteorológica El Tablón.....	178
XXXVI.	Temperatura máxima absoluta en la estación meteorológica El Tablón.....	179
XXXVII.	Temperatura mínima absoluta en la estación meteorológica	

	El Tablón.....	180
XXXVIII.	Humedad relativa media en la estación meteorológica El Tablón.....	181
XXXIX.	Precipitación en la estación meteorológica El Tablón.....	182
XL.	Días de lluvia en la estación meteorológica El Tablón.....	183
XLI.	Insolación en la estación meteorológica El Tablón.....	184
XLII.	Humedad máxima en la estación meteorológica El Tablón.....	185
XLIII.	Humedad mínima en la estación meteorológica El Tablón.....	185
XLIV.	Evapotranspiración en la estación meteorológica El Tablón.....	186
XLV.	Nubosidad en la estación meteorológica El Tablón.....	187
XLVI.	Velocidad del viento en la estación meteorológica El Tablón.....	188
XLVII.	Dirección del viento en la estación meteorológica El Tablón.....	189
XLVIII.	Temperatura media en la estación meteorológica El Capitán.....	190
XLIX.	Temperatura máxima promedio en la estación meteorológica El Capitán.....	191
L.	Temperatura mínima promedio en la estación meteorológica El Capitán.....	192
LI.	Temperatura máxima promedio en la estación meteorológica El Capitán.....	193
LII.	Temperatura mínima absoluta en la estación meteorológica El Capitán.....	194
LIII.	Humedad relativa en la estación meteorológica El Capitán.....	195
LIV.	Humedad máxima en la estación meteorológica El Capitán.....	196
LV.	Humedad mínima en la estación meteorológica El Capitán.....	196
LVI.	Precipitación en la estación meteorológica El Capitán.....	197
LVII.	Días de lluvia en la estación meteorológica El Capitán.....	198
LVIII.	Nubosidad en la estación meteorológica El Capitán.....	199
LIX.	Velocidad del viento en la estación meteorológica El Capitán.....	200
LX.	Dirección del viento en la estación meteorológica El Capitán.....	201



## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>Cal</b>	Caloría
<b>COGUANOR</b>	Comité Guatemalteco de Normas
<b>CSLA</b>	Cuenca sur del lago de Atitlán
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección del Medio Ambiente)
<b>HH</b>	Huella hídrica
<b>INFOM</b>	Instituto de Fomento Municipal
<b>IGN</b>	Instituto Geográfico Nacional
<b>INSIVUMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
<b>IPCC</b>	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (siglas en inglés)
<b>J</b>	Joule
<b>kwh</b>	Kilowatt por hora
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>μhos</b>	Microhmos
<b>μS</b>	Microsiemens
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación Económica y desarrollo
<b>OD</b>	Oxígeno disuelto
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud
<b>PEA</b>	Población Económicamente Activa
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>ppm</b>	Partículas por millar

**sej**

Solar emergy joule

**Ton**

Tonelada métrica

## GLOSARIO

<b>Actividades antropogénicas</b>	Representan las acciones, efectos, técnicas o materiales que se generan como respuesta de las actividades humanas.
<b>Análisis emergético</b>	Representa la metodología para determinar la cantidad de energía usada de manera directa o indirecta para la creación de un servicio o producto, cuantificados en emjoules.
<b>Cuerpos lénticos</b>	Son cuerpos de agua cerrados que permanecen en un mismo lugar sin correr ni fluir, como los lagos, las lagunas, los esteros, o los pantanos.
<b>Ecología</b>	Es la ciencia que estudia a los seres vivos, su ambiente, distribución, abundancia y cómo esas propiedades son afectadas por la interacción entre los organismos y su ambiente.
<b>Ecosistema</b>	Es un sistema natural que está formado por un conjunto de organismos vivos y el medio físico donde se relacionan.
<b>Emergía</b>	Se refiere a la suma de las energías solares requeridas directa e indirectamente en la producción de un producto o servicio.

<b>Especies ícticas</b>	Hace referencia a las especies de peces presentes en un lugar.
<b>Fitoplancton</b>	Se refiere al conjunto de los organismos acuáticos autótrofos del plancton, los cuales poseen capacidad fotosintética y viven esparcidos en el agua.
<b>Huella hídrica</b>	Es un indicador que se utiliza para la cuantificación y cualificación del uso antropogénico del agua, así también se usa para cuantificar el agua que se contamina por los mismos usos.
<b>Irrigación</b>	Se refiere al riego de un terreno.
<b>Isograma</b>	Es una línea que representa, en un mapa o en una cuadrícula determinada, un valor igual o constante de cantidades variables.
<b>Limnólogo</b>	Es un especialista en aspectos bióticos de un cuerpo de agua, así como analista de la relación de los aspectos fisicoquímicos con la distribución de los organismos presentes en un sistema lótico o léntico. Especialista en el área de Limnología.
<b>Material piroclástico</b>	Corresponde a roca pulverizada y fragmentos de lava expulsados desde la chimenea de un volcán. Se clasifican, de menor a mayor tamaño, en cenizas, pumitas, lapillis, bloques y bombas.

**Microcuencas**

Representan unidades geográficas que se sustentan en el concepto hidrológico de división del suelo. Suelen ser de menor tamaño que una cuenca (varias de ellas forman una cuenca).

**Pesticidas**

Son sustancias químicas o mezclas de sustancias, destinadas a matar, repeler, atraer, regular o interrumpir el crecimiento de plagas.

**Polución**

Contaminación intensa y dañina del agua, del aire o del medio ambiente, producida por los residuos de procesos industriales o biológicos.



## RESUMEN

El presente trabajo investigativo detalla el procedimiento requerido para realizar un análisis de sostenibilidad de un cuerpo hídrico, basándose en los indicadores de la economía ecológica: huella hídrica y análisis emergético.

Primeramente, se recabó información bibliográfica sobre la caracterización de cuerpos lénticos, así como monografías en relación con el lago de Atitlán; que incluyen mapas cartográficos, tesis que se relacionan con los tópicos “huella hídrica” y “emergía” en general, así como estudios realizados sobre la cuenca que subtiende al lago de Atitlán; información como accesos viales, forma en la que se abastecen de agua potable y desechan sus residuos sólidos, aspectos demográficos, entre otros. Esta información sirvió para aplicar la metodología respectiva.

Se realizó una visita preliminar en donde se constató cuáles servicios poseían o carecían los habitantes de las comunidades aledañas al lago de Atitlán. Posteriormente, se procedió a sustentar la investigación con un marco teórico basado en la importancia del estudio de sistemas lacustres, limnología y en la determinación de la huella hídrica basándose en aspectos propios de la cuenca, así como información relacionada con análisis emergéticos para sistemas lénticos.

Posteriormente, se llevó a cabo una descripción metodológica para la obtención de la huella hídrica y de la evaluación emergética del lago de Atitlán. Las fases del análisis de huella hídrica conllevaron: i. Definir el alcance analizando el área de estudio, identificar fuentes secundarias de información,

entre otros; ii. Cuantificar la huella hídrica siguiendo los lineamientos metodológicos vertidos por la WFN (Water Footprint Network), aplicándolos al lago de Atitlán; iii. Evaluar la sostenibilidad del lago de Atitlán analizando la huella hídrica para los sectores agrícola y doméstico; iv. Formular propuestas para alcanzar la sostenibilidad espacial y temporal del cuerpo hídrico en estudio.

La cuenca que subtiende el lago de Atitlán posee 19 municipios que pertenecen a 3 departamentos (Sololá, Totonicapán y Quiché). Dicha cuenca es endorreica, y con tendencia a contaminación gradual del suelo y agua. Los poblados que cuentan con mayor tasa de crecimiento son los que más afectan el recurso hídrico por actividades ligadas a la subsistencia. Más del 50% de la población que habita dentro de la cuenca en estudio, reside en los municipios con adyacencia al lago de Atitlán, de tal manera que el impacto de estos al recurso hídrico es mayor.

Los resultados obtenidos en la aplicación de la huella hídrica en el lago de Atitlán indican que se tiene una huella hídrica verde de 497.63 millones de metros cúbicos por año, la cual refleja la cantidad de agua proveniente de la precipitación pluvial que es aprovechada para riego de cultivos y áreas boscosas. Se obtuvo un valor de huella hídrica azul de 80.71 millones de metros cúbicos por año, que corresponde a la cantidad de volumen de agua que se extrae para complementar actividades de riego y para consumo humano, cuando el agua proveniente de la precipitación no es suficiente; en cuanto a la huella hídrica gris se obtuvo un valor de 18.70 millones de metros cúbicos por año, que corresponde a la cantidad de agua que sirve para amortiguar ambientalmente la carga contaminante del sector agrícola. Analizando estos datos, la huella hídrica gris representa un 3.2% del valor de la suma de la huella hídrica verde y azul, lo que refleja un valor relativamente bajo de carga ambiental.

Asimismo se realizó un análisis de 4 escenarios para analizar las variaciones en los valores de huella hídrica verde, azul y gris para diversos años (2018, 2028, 2068 y 2118). De acuerdo con el análisis realizado, se percibió que para una proyección de 100 años el valor de la huella hídrica azul para cultivos se incrementa un 45 por ciento, a diferencia de la huella hídrica azul para el sector doméstico que se incrementa 15.82 veces; es decir que la mayor utilización de agua será para abastecer a la población, casi triplicando el valor del agua requerida para riego, extraída de fuentes superficiales. El valor correspondiente a la huella hídrica verde se mantiene con poca variación, debido a que es el agua que precipita y que es aprovechable tanto por los cultivos como por las zonas boscosas.

El valor correspondiente en proyección, para la huella hídrica gris, se ve en aumento para el escenario de 100 años, sin embargo, de acuerdo con la metodología establecida, este aumento no pone en déficit el volumen del agua del lago de Atitlán. Es decir, se está contaminando el lago, pero en un periodo de 100 años aún no se ve en un grado de vulnerabilidad a desaparecer o a mermar sustancialmente su calidad fisicoquímica, debido al gran volumen de agua que posee el lago de Atitlán.

En el análisis emergético realizado en el lago de Atitlán, para determinar su sostenibilidad, se obtuvieron los siguientes valores: índice de rendimiento emergético de 27.99, el cual representa una armonía termodinámica en el aprovechamiento energético dentro de la cuenca de Atitlán; índice de inversión emergética de 0.04, que se interpreta como herramienta de sostenibilidad cuando el valor obtenido es bajo tendiendo a cero; índice de carga ambiental de 0.38, que representa el impacto ambiental derivado de acciones antrópicas, interpretándose que valores bajos representan menor impacto ambiental; índice de sostenibilidad de 73.66, que indica una relación costo/beneficio de los

procesos productivos dentro de la cuenca, de tal manera que con mayor explotación irracional del suelo dentro de la cuenca, mayor impacto habrá y por ende, menor sostenibilidad; y porcentaje de renovabilidad de 72%, que representa que la mayor parte de los recursos utilizados dentro de la cuenca de Atitlán son renovables.

En cuanto a las conclusiones de este estudio están: i) la metodología para determinar la sostenibilidad de lagos desde la perspectiva de la huella hídrica y de análisis emergético conlleva la definición de alcances, recolección de datos, análisis de datos, y cuantificación de la huella hídrica y análisis emergético. ii) basándose en la interpretación de los datos obtenidos de la huella hídrica en el lago de Atitlán, así como el análisis emergético realizado, se determina que actualmente la cuenca de Atitlán es sustentable. iii) Los valores obtenidos en el análisis emergético reflejan que la interacción termodinámica y el aprovechamiento energético en el lago de Atitlán y la cuenca que lo subtiende, es sostenible. iv) Para mejorar los índices de sostenibilidad del recurso hídrico en un lago, se requiere de las siguientes acciones: disminución de la deforestación, mejorar la calidad de fertilizantes utilizados dentro de la cuenca para evitar que estos contaminen el lago, depender mayormente de recursos renovables para la subsistencia, entre otros.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante los últimos cincuenta años se ha vertido una gran cantidad de contaminantes dentro de las cuencas que subtienden los cuerpos hídricos de regiones tropicales como Guatemala, de forma indiscriminada y en muchas ocasiones conscientes del daño que eso causa a toda la ecología y sociedad. Asimismo, se han deforestado grandes regiones geográficas de Guatemala para cambiar el uso de la tierra, ya sea para agricultura, vivienda, o para infraestructura destinada al comercio y los servicios.

Específicamente en el caso del lago de Atitlán, a pesar de que existen varios estudios sobre este lago y la cuenca del mismo, todos tienen limitaciones, ya que varios de ellos se desarrollan desde el punto de vista de la economía tradicional o ambiental, lo cual los restringe para generar procedimientos analíticos que permitan evaluar la sostenibilidad del recurso natural que representa dicho lago.

Esta investigación pretende estudiar el lago de Atitlán desde esa concepción y para ello se formularon las siguientes preguntas orientadoras de investigación:

### *Pregunta central*

¿Cuál es el procedimiento metodológico para determinar la sostenibilidad de un cuerpo léntico a través de los indicadores de la economía ecológica: huella hídrica y análisis emergético?

### *Preguntas auxiliares*

1. ¿De qué forma la huella hídrica comparada con la capacidad de carga podrían coadyuvar en la determinación de la sostenibilidad de un lago?
2. ¿Cómo se pueden enfocar los indicadores de la economía ecológica para tener una visión clara de un lago desde la economía ecológica?
3. ¿Cómo se alcanza la sostenibilidad de un lago a través de la optimización de los indicadores de huella hídrica y análisis emergético, validando una metodología previamente establecida?
4. ¿De qué manera se interpretan los valores obtenidos de la aplicación metodológica para determinar la sostenibilidad de lagos desde la perspectiva de la economía ecológica (huella hídrica y análisis emergéticos)?

El problema científico, objeto de este trabajo, se puede resumir de la siguiente manera:

El lago de Atitlán carece de estudios integrales vistos desde la idea de concebirlo como un sistema geodinámico y termodinámico (economía ecológica), lo cual limita la interpretación de su sostenibilidad.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Establecer la metodología para estimar indicadores de la economía ecológica en un cuerpo léntico, basándose en las características físicas, biológicas, químicas, sociales, culturales y económicas dentro de la cuenca que lo subtiende.

### **Objetivos específicos**

1. Fundamentar teórica y metodológicamente la aplicación de la huella hídrica en los sistemas lénticos, para estimar la sostenibilidad de dichos sistemas.
2. Ponderar los indicadores de la economía ecológica (huella hídrica y análisis emergético) en un sistema léntico, basándose en una metodología previamente fundamentada.
3. Determinar la sostenibilidad de un sistema léntico a través de los indicadores de la economía ecológica: huella hídrica y análisis emergético.
4. Realizar un análisis general de la optimización de la sostenibilidad de cuerpos lénticos, con base en la interpretación de los valores de los parámetros determinados con la aplicación de la economía ecológica.



## HIPÓTESIS

Este trabajo de investigación apuesta a una nueva metodología aplicable a la determinación de la sostenibilidad de lagos, a través de la economía ecológica. Se ha evidenciado en diversas investigaciones que hay una tendencia en la determinación de la sostenibilidad de los recursos naturales en general, sin embargo, no se ha abordado profundamente en lagos por medio de la huella hídrica y el análisis emergético

La huella hídrica y el análisis emergético se fundamentan en fenómenos sociales, naturales, económicos y físicos, por tanto la interacción entre ellos podría medir la sostenibilidad de un recurso hídrico. A través de la aplicación metodológica de la huella hídrica y el análisis emergético se estima la sostenibilidad de un lago.



## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

En relación con el objetivo principal de la investigación, que se basa en establecer el proceso metodológico para determinar la sostenibilidad de un lago, basándose en indicadores de economía ecológica, se realizó un estudio de tipo explicativo, con diseño de investigación no experimental, determinando indicadores de la economía ecológica en función de variables independientes previamente identificadas.

El estudio de investigación se dividió en dos partes fundamentales: determinación de la huella hídrica de la cuenca que subtiende el lago de Atitlán, y el análisis de sostenibilidad de dicha cuenca a través de métodos emergéticos.

La primera parte de la investigación inicia con la determinación de la huella hídrica, basándose en el siguiente proceso:

1. Definición del alcance de la investigación
  - a) Definición del área de estudio
  - b) Descripción del alcance del proyecto
  - c) Definición de la escala del trabajo
  - d) Identificación de fuentes de información
2. Cuantificación de la huella hídrica
  - a) Metodología estándar de cálculo
  - b) Metodología para determinar la huella hídrica en el sector agrícola
  - c) Metodología para determinar la huella hídrica en el sector doméstico
3. Evaluación de sostenibilidad
4. Formulación de propuestas

La segunda parte corresponde a la descripción metodológica para realizar análisis energéticos en cuerpos hídricos, que conlleva los siguientes pasos:

1. Descripción del sistema y sus límites
2. Adquisición, elaboración y control de información territorial
3. Tabulación de información de la evaluación energética
4. Cálculo de indicadores energéticos
5. Interpretación de los valores obtenidos

Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de la huella hídrica, así como del análisis energético, aplicados a la cuenca del lago de Atitlán. Luego se analizan los resultados y se interpretan para determinar la sostenibilidad o no de la cuenca de Atitlán.

## INTRODUCCIÓN

En época reciente el tópico “cambio climático” ha venido a cambiar en vías muy radicales la forma en que se han tratado los términos “ambiente” y “desarrollo sostenible”. A pesar de que estos temas suelen ser muy debatidos y con pronósticos de gran incertidumbre tanto en causas como consecuencias, cada día se hace más evidente, por la mayoría de los integrantes de la comunidad científica internacional, que el productor del cambio climático es el efecto invernadero, que a su vez es fruto de la actividad antrópica.

Rojas (2013) indicó que anteriormente se pensaba que los recursos naturales eran inagotables e ilimitados, y que la era industrial se basó en la energía fósil; posteriormente, se demostraría que sus emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) serían la principal fuente responsable del calentamiento global por efecto invernadero y, en consecuencia, responsable del cambio climático global del planeta, irreversiblemente en marcha, que se expresa específicamente en el incremento de la temperatura del planeta.

El informe divulgado por Field, Barros y Dokken (2014), indicó que existe una injerencia importante y significativa del hombre en el sistema climático. Asimismo, enuncia que los cambios que se suscitan en el ciclo hidrológico debido al cambio climático pueden conllevar varios impactos y riesgos, y que estos están condicionados por conductores no climáticos de cambio y respuestas del manejo integrado del agua.

Lo que sin duda se considera inexorable, es el estado crítico del planeta debido al efecto invernadero, lo cual se manifiesta en cambios en las intensidades

y valores extremos de precipitación, fusión de la criósfera, aumento del vapor de agua y de la evaporación, variaciones en la escorrentía superficial y subsuperficial, entre otros.

Asimismo, de acuerdo con Bates, Kundzewicz y Palutikof (2008), los sistemas hídricos presentan diversos efectos negativos a consecuencia del cambio climático, y cada vez son más evidentes. Entre estos efectos se pueden mencionar: polución del agua, modificaciones en los regímenes de disponibilidad de agua, cambios en la tasa de recarga de aguas subterráneas, y otros.

Se han realizado pronósticos y proyecciones en función de la actividad antrópica y efectos del cambio climático, que a partir del 2008 al 2050, el área geográfica que padecerá estrés hídrico marcado e incrementado, será el doble del área de la región que sufre un estrés hídrico menor. También se tiene noción que “las áreas en que las proyecciones indican una menor escorrentía experimentarían una clara reducción de los servicios obtenidos de los recursos hídricos. Una mayor escorrentía anual en algunas áreas generaría un mayor abastecimiento total de agua” (Bates, et. al., 2008, p. 3).

Guatemala es un país con altas posibilidades de peligros, vulnerabilidades y exposiciones, considerándosele por la comunidad científica, como uno de los países más afectados por el cambio climático. Harmeling (2010) indicó que Pakistán, Guatemala y Colombia fueron reconocidos, en el año 2009, como los países más afectados por el cambio climático.

De acuerdo con SEGEPLAN (2006), en su diagnóstico titulado “Estrategia para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de Guatemala”, indica que la situación hídrica de Guatemala pareciera estar inmune al riesgo hídrico, ya que se tiene una oferta estimada de noventa y siete mil ciento veinte millones de

metros cúbicos (97,120,000,000 m<sup>3</sup>) de agua; no obstante, hay regiones en las cuales se ha presentado estrés hídrico. A estas regiones se les conoce como “corredor seco” y que incluyen zonas de Zacapa, Chiquimula Jutiapa, e incluso, áreas del altiplano guatemalteco.

Esta tesis doctoral corresponde a una nueva disciplina de la economía denominada “economía ecológica”, la cual tiene una visión termodinámica y geodinámica de los distintos ecosistemas. La economía ecológica tiene varios indicadores para realizar diversos estudios ecosistémicos, entre los que se destacan: análisis del ciclo de vida (ACV), el análisis energético, la huella ecológica, huella hídrica, la valoración del capital natural, el análisis exergético, matrices energéticas sustentables, metabolismo social y análisis emergético. En esta investigación se tratan dos de los indicadores más utilizados en el campo de la economía ecológica para valorar ecosistemas que son: huella hídrica y los análisis emergéticos.

La huella hídrica admite la consideración del agua y su uso, de forma oculta, a través de la producción de bienes o prestación de servicios de consumo, de tal forma que se proporciona información sobre los efectos en el agua que son ligados a acciones antrópicas ya sea de forma individual o por medio de empresas.

El método emergético se define como una forma de contabilidad energética que se utiliza para evaluar todos los flujos y almacenamientos de energía necesaria para alcanzar un determinado producto o servicio y para medir el estrés bajo el cual se encuentra el medio ambiente debido a las actividades humanas. (Bastianoni y Marchettini, 1996, p. 497).

La combinación de ambos métodos representa una novedad, ya que los mismos proporcionan una visión de la sostenibilidad de los lagos basada en valoraciones que permitan evaluar los ecosistemas desde la perspectiva económica y natural, así como verificar las interacciones entre la capacidad de carga de un ecosistema específico y la huella hídrica.

En este estudio, el análisis emergético fue utilizado para facilitar el proceso para la determinación de futuras alternativas de alcanzar la sostenibilidad del lago de Atitlán. Debido a que ha habido cambios sustanciales en la calidad de este sistema léntico, se utilizará el análisis emergético para evaluar dichos cambios que se suscitaron en el pasado hasta la época actual, y anticiparse a posibles cambios en el futuro próximo.

Con pleno conocimiento de la relación entre las problemáticas de polución paulatina del lago de Atitlán y la carencia de estudios completos relacionados con dicho lago, así como la búsqueda de soluciones para conducir políticas sostenibles para el lago, esta tesis doctoral se centra en el desarrollo de los siguientes capítulos:

## Capítulo I. Marco teórico de la investigación

En este capítulo se realiza una síntesis crítica del estado del conocimiento sobre las aplicaciones de la emergía, y cómo estas son determinadas de acuerdo con las variables que conforman un producto, servicio o un elemento ecológico. En esta síntesis se analizan los elementos más relevantes de las metodologías en lo referente a los aspectos conceptuales y su aplicación, fundamentalmente. Se exponen las características y cálculo de la emergía para un servicio o producto y sus aplicaciones de forma general.

Asimismo, se realiza un análisis exhaustivo de la metodología concerniente a la determinación de la huella hídrica para lagos en general, indicando sus ventajas y potencialidades de evaluar un cuerpo léntico con este método.

## Capítulo II. Caracterización del objeto de estudio y metodología utilizada

Se desarrolla una caracterización del lago de Atitlán, incluyendo una monografía de su cuenca, así como la descripción de las características generales que determinan su estado trófico, como también las principales variables climáticas, sociales, demográficas, entre otras. Se exponen además los criterios de la metodología para el cálculo de los índices emergéticos que conforman el análisis que se ha realizado en el lago de Atitlán, para alcanzar la sostenibilidad en el futuro inmediato. También se indica detalladamente la forma en que se calcula la huella hídrica del sistema léntico (lago de Atitlán).

## Capítulos III y IV. Presentación de resultados y discusión de resultados, respectivamente

En estos capítulos se desarrollan las metodologías descritas para describir, analizar y evaluar las mejoras propuestas, a través de gráficos y tablas, la metodología emergética empleada, así como el análisis de la huella hídrica que conlleve a la sostenibilidad del cuerpo léntico en estudio. En estos capítulos se determinó el estado actual del lago de Atitlán, y se generaron las propuestas generales para alcanzar la sostenibilidad de dicho recurso hídrico.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Antecedentes

En cuanto a la utilización de métodos basados en el geodinamismo y termodinamismo, se han realizado diversos estudios para analizar ecosistemas; sin embargo, a finales del siglo XX se introdujo un nuevo término dentro de la comunidad científica denominado “Emergía”.

De acuerdo con Odum (1996), la aplicación del modelo que representa la emergía, se ha estudiado con diferentes aplicaciones entre las que resaltan: evaluación emergética de una plantación de pino en Nueva Zelanda en 1984, análisis emergético de planta de energía solar en Austin, Texas, en 1991, la evaluación emergética del Río Mississippi en 1993, entre otras. Todas estas evaluaciones son la base fundamental sobre la que descansa la aplicación de la emergía en los ecosistemas. Sin embargo, partiendo de estas líneas basales de información, se establece que el término “emergía” es de reciente creación, por lo que todo conocimiento científico que pueda generarse, va adecuando las definiciones que atañen a los métodos emergéticos, incluyendo lo descrito en este trabajo de investigación.

Sotomayor (2013), realizó en Chile una investigación titulada “Análisis emergético y territorial de agroecosistemas campesinos. Estudio de caso Hijueta N°5 Pilolcura, Valdivia.” En dicha investigación se valoró, en función de la emergía, el desempeño ambiental de un territorio específico de la provincia de Valdivia, por medio de análisis emergéticos. Aplicando la metodología emergética

se estableció el comportamiento de diversas parcelas y se indicó cuál era la más sostenible en función de la economía y el ambiente.

Buenfil (2001), realizó un estudio doctoral en la Universidad de Florida, el cual llevó como título “Evaluación emergética del agua” (Emergy evaluation of water), en donde se efectuó un análisis emergético del agua comparando cuatro escalas: global, regional, local y pequeña escala (hogares). Este estudio consideró los parámetros de irrigación en la agricultura, aguas residuales asimiladas por los ríos, agua potable y agua tratada. (Buenfil, 2001).

En la Universidad de Florida, en los Estados Unidos de América, Brown, et al. (1991) realizaron una investigación titulada “Análisis de emergía y perspectivas políticas para el mar de Cortez, México” (*Emergy Analysis and Policy Perspectives for the Sea of Cortez, Mexico*). En esta investigación se logró como resultado la generación de políticas relacionadas con el Río Colorado de acuerdo con el análisis emergético que se realizó, de tal manera que aplicando dichas políticas se alcanzará la sostenibilidad del Golfo de Cortez.

En cuanto a la aplicación metodológica, se ha dispuesto que se valide con la aplicación de la misma al lago de Atitlán, el cual es considerado por algunos científicos: Dix, M. (2009), Much, Z. (2010), Azurdia, I. (2014) como un sistema léntico que se localiza dentro de los límites del estado mesotrófico (calidad fisicoquímica promedio). Debido a la flora y fauna que prevalecen dentro de la cuenca de Atitlán, aunado al paisaje característico del lago, es considerado aún como uno de los lugares más hermosos del planeta.

De acuerdo con estudios recientes de calidad del agua dentro del lago de Atitlán realizados por Dix (2009) y Dix et al. (2012), en la última década se ha tenido un incremento en la contaminación del lago de Atitlán debido a la carencia

de un manejo integral de la cuenca que lo subtiende. El crecimiento de las áreas urbanas, acompañado del cambio de uso de suelo hacen que se deteriore la ecología propia del lugar. Además, el ecosistema que representa el lago de Atitlán no es sustentable, de tal manera que desaparecen especies de flora y fauna, así como pone en riesgo la salud humana.

Desde hace más de cincuenta años se han venido realizando múltiples estudios desde varios enfoques en torno al lago de Atitlán, con diferentes organismos guatemaltecos e internacionales. A continuación, se describen los principales estudios encontrados en la revisión bibliográfica.

En Guatemala, en 1970, se realizó un estudio titulado “Investigaciones de calidad del agua en Guatemala, lago de Atitlán 1968-1970 (*Water Quality Investigations Guatemala, Atitlán Lake 1968-1970*)”. De acuerdo con Weiss (1970), el objetivo esencial que se propuso inicialmente en este estudio fue determinar la calidad física, química y biológica del lago de Atitlán. A pesar de que es el estudio más completo que se ha hecho en ese lugar (para la época en la que se realizó, comprendía una innovación en cuanto a cantidad y calidad de información relacionada con un cuerpo hídrico) y que ha servido como línea basal para otros estudios; esta investigación es más de aplicación que de generación de nuevas tecnologías, ya que únicamente se presentaron datos obtenidos en la recolección de información y análisis de laboratorio.

En cuanto a las principales conclusiones, se tiene que la calidad de agua de los afluentes del lago de Atitlán, coinciden en los primeros ochenta metros de profundidad de dicho lago. Además, comparando la cantidad de nitrógeno en el lago durante los 1950's y 1970's se mostró un incremento "suave" del valor correspondiente a este parámetro. La conclusión relevante de este estudio se relaciona con que el valor de la transparencia del lago de Atitlán, a través del

disco Secchi, oscilaba entre 8.00 y 20.00 metros, dependiendo de la época o estación del año en que se realizaron las mediciones (estiaje o invierno).

Posteriormente, Newhall, et. al., (1987) elaboraron el estudio titulado “Historia geológica reciente del lago de Atitlán, un lago tipo caldera ubicado en el occidente de Guatemala.” El objetivo primordial de este estudio fue evidenciar en el área que circunscribe el lago de Atitlán, la actividad volcánica y tectónica reciente, así como determinar tasas de sedimentación dentro del lago. En cuanto a sus alcances y limitaciones, se realizó un análisis para determinar qué movimientos tectónicos-volcánicos provocaron el surgimiento de la caldera que parcialmente ocupa hoy en día el lago de Atitlán.

En este estudio se determinó con base en procedimientos analíticos, la tasa de sedimentación de sólidos dentro del lago de Atitlán. El estudio realizado examinó datos de 1987 (hace más de 30 años), los cuales, *a posteriori*, se determinó que no son congruentes con la situación actual, en lo que concierne a la sedimentación de sólidos; además, no se realizó una propuesta para alcanzar la sostenibilidad de la cuenca que subtiende el lago de Atitlán, sino solamente se presentan datos que fueron obtenidos de cálculos y análisis de laboratorio.

Las principales conclusiones de la investigación desarrollada por Newhall et.al. (1987) indican que el volumen de la caldera de Atitlán III se estima en 260 kilómetros cúbicos; el cálculo estimado de magma eruptado para formar la caldera es cerca de 270 kilómetros cúbicos de roca densa equivalente (DRS por sus siglas en inglés); las tasas de sedimentación en el cuerpo léntico que representa el lago de Atitlán han ido incrementándose levemente, desde el periodo premaya hasta el periodo colonial.

Herdocia (1999) realizó un estudio cuyo título es “Detección y cuantificación de sustancias químicas para establecer índices de contaminación en aguas superficiales del lago de Atitlán”. Este estudio tuvo como objetivos principales la determinación de parámetros químicos en dos puntos de muestreo dentro del lago de Atitlán, para posteriormente realizar la comparación de los valores obtenidos de sustancias químicas con las guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de Salud (OMS) y la norma COGUANOR NGO 29001. Entre sus alcances y limitaciones resalta que las mediciones de los parámetros químicos se realizaron únicamente en época de estiaje, por lo que los valores no son representativos; además se realizó una comparación de los valores obtenidos en este estudio, con los valores del estudio de Weiss (1970), identificando diferencias sustanciales entre ambos, de tal manera que no se podrían tomar como referencia los datos de investigación.

Por otro lado, se analizaron los datos numéricamente y no de una forma analítica para describir las diferencias encontradas en un punto medido y otro. En cuanto a sus principales conclusiones se tiene que los únicos datos que cumplen con la norma COGUANOR NGO 29001 y las guías para la calidad del agua potable de la OMS son plomo y dureza. Los valores de fósforo, manganeso, alcalinidad, nitratos y nitritos están sobre el límite máximo permisible de las normas y guías mencionadas. Cabe hacer mención que las normas COGUANOR NGO 29001 tratan directamente de las características físicas, químicas y biológicas que debe tener el agua para consumo humano, de tal manera que la aplicación de esta norma para recursos hídricos como los lagos y lagunas es válida solamente si se trata de abastecimiento de agua potable y no para el análisis del sistema léntico como tal.

Lanuza (2001) publicó el estudio “Valores de servicios ambientales en la cuenca sur del lago de Atitlán Guatemala”. Los objetivos principales que se

abordaron en dicho trabajo investigativo fueron: “formular una estrategia para el soporte institucional, por medio de ejes programáticos que deberían ser llevados a cabo por servicios ambientales, en la cuenca sur del lago de Atitlán (CSLA)” y “Optimizar las capacidades de las instituciones u organizaciones para lograr el desarrollo de programas ambientales.” (p. 5). Entre sus alcances y limitaciones se tiene que:

- a. Se logró elaborar un marco conceptual, de referencia, y un mapa institucional, los cuales permitieron establecer los lineamientos económicos e institucionales para generar un plan de valoración de servicios ambientales en la CSLA.
- b. Se logró obtener un acercamiento con los actores clave en cuestiones administrativas y ambientales en la CSLA, de tal manera que se realizaron capacitaciones participativas; con ello se logró conocer expectativas, identificar las potencialidades, y sociabilizar las implicaciones de gestionar, planificar y llevar a cabo programas de servicios ambientales en la CSLA en un futuro cercano.
- c. No se presentaron datos cuantitativos de la investigación realizada.
- d. La investigación se basó principalmente en el factor social, más que en economía ambiental o ecológica.

En relación con sus principales conclusiones, se evidenció que: los servicios relacionados con el ambiente no deben figurar como un paradigma sustituto del progreso social y económico, sino como técnicas para adicionar valor al desarrollo integral, aunado al desarrollo y fortalecimiento del conocimiento científico; se plasmó que la valorización de los servicios ambientales debe considerarse como una herramienta para ponderar los elementos que no han sido tomados en cuenta, de tal manera que no se realiza valoración económica, social y/o ambiental.

El estudio realizado por Villalobos y López (2002), cuyo título es “Análisis de la situación de ocurrencia de incendios forestales en la reserva de uso múltiple de la cuenca del lago de Atitlán durante el período 1999-2001”, buscaba como objetivo primordial, la identificación del tipo más ordinario y común de incendios forestales que tuvieron lugar en la cuenca que subtiende el lago de Atitlán. También se tuvo como objetivo, la determinación de la causa y posteriormente el control que se debe tener para mitigar y prevenir problemas relacionados con los incendios forestales.

Por otro lado, entre sus alcances y limitaciones se tiene que: a) se basó en información poco detallada, ya que hubo carencia de información en torno a datos específicos de incendios forestales para la zona de la cuenca del lago de Atitlán en años previos a la realización de este estudio investigativo; b) no contempla estrategias a largo plazo para actividades de mitigación en incendios en áreas agrícolas; c) no se abordó el estudio desde la perspectiva ecológica y social; d) no se presentaron datos para analizar cuantitativa y monetariamente los daños causados por los incendios forestales en la zona de estudio.

En cuanto a sus principales conclusiones se tiene que i) la mayoría de los incendios forestales en la reserva de uso múltiple de la cuenca del lago de Atitlán (RUMCLA) son del tipo rastrero; ii) la mayor causa de incendios forestales en la región han sido las quemas agrícolas fuera de control, ya sea intencional o accidentalmente; iii) no existe un control adecuado por parte de las autoridades municipales, en cuanto a la realización correcta de quemas agrícolas; iv) los delitos ambientales generalmente quedan impunes debido a falta de seguimiento de estos procesos y a la debilidad jurídica imperante en el país.

Posteriormente, Dix, Medinilla y Castellanos (2003) realizaron un estudio titulado “Diagnóstico ecológico-social en la cuenca de Atitlán.” El objetivo

principal de esta investigación fue elaborar un diagnóstico social, económico y ecológico de los volcanes de Atitlán, su cuenca y perímetro. Entre sus alcances y limitaciones se tiene que: a) se analizó la información biológica y social existente de forma general, detallando la fauna, flora y aspectos sociales del entorno de la cuenca del lago de Atitlán; b) no se abordaron temas relacionados con la economía o algún tipo de estadística que relacione aspectos biológicos y sociales. En cuanto a sus principales conclusiones se tiene que:

- a. El daño más severo al medio ambiente se ha dado por la tala de árboles, así como por el crecimiento o ampliación de la frontera agrícola.
- b. El lago de Atitlán es, sin lugar a duda, el punto focal para los poblados de la región y un atractivo turístico nacional e internacional.
- c. Es de suma importancia mantener la salud de este ecosistema, tanto para el bienestar de las comunidades como para que siga siendo un destino turístico.

Otro documento de valor para esta investigación fue elaborado por la Asociación Patronato Vivamos Mejor, municipalidad de San Pedro la Laguna, *The Nature Conservancy -TNC-* (2003), cuyo título es “Plan de manejo 2003-2007, Parque regional municipal Chuwanimajuyu', San Pedro La Laguna, Guatemala.” Este trabajo tuvo como objetivo principal “Formular estratégicamente las actividades de conservación y manejo sostenible de recursos naturales, como el cultivo del café, ecoturismo y otras actividades productivas.” (p. 2).

Entre sus alcances y limitaciones se tiene que a) se describió el uso de los recursos naturales dentro del municipio, así como la importancia cultural y ecológica; b) este estudio o propuesta se basa en aspectos teóricos e idealistas para el manejo sustentable del parque municipal; sin embargo, no se presentan

resultados cuantificables de poner en marcha dicho plan. La principal conclusión detectada para esta investigación es que: cumpliendo con lo descrito en el plan formulado, se dio un paso importante en la conservación del área que ocupa el parque regional municipal Chuwanimajuyu'.

El estudio realizado por Soto (2004) denominado “Determinación de los niveles actuales de fósforo en el lago de Atitlán”, tuvo como objetivo general la evaluación los niveles de eutroficación en el lago de Atitlán, a través de la caracterización de nutrientes y otros parámetros de calidad del agua (oxígeno disuelto, temperatura y transparencia a través del disco Secchi). Sus alcances y limitaciones fueron: a) se realizaron mediciones físicas y químicas para determinar el límite del estado trófico del lago de Atitlán; b) la cantidad de muestras utilizadas no fue representativa, aunque dan un panorama de cuán contaminado está el lago de Atitlán; c) no se tomaron en cuenta variables sociales y económicas. Sus principales conclusiones fueron: i) El lago de Atitlán está dentro de los límites del estado oligotrófico, basándose en resultados de evaluaciones de pH, oxígeno disuelto, transparencia y ortofosfatos; ii) el nivel oligotrófico del lago lo hace ser poco productor, por lo que la pesca es limitada.

Por otro lado, se revisó entre la literatura un estudio realizado por Girón (2004), titulado “Calidad del agua del lago de Atitlán, año 2004”. El objetivo general de este estudio fue la elaboración de mediciones fisicoquímicas y microbiológicas de la calidad del agua del lago de Atitlán. Entre sus alcances y limitaciones se tiene que: a) el número de muestreos y periodicidad de las muestras fueron muy pocas; b) se tiene una percepción de cuán contaminado está el lago de Atitlán en función de sus características físicas, químicas y biológicas; c) no se analizó el origen de la contaminación del lago. Las dos principales conclusiones de la investigación fueron: i) las mediciones físico-químicas indicaron que la calidad del agua en el lago era buena desde la

perspectiva limnológica; ii) se contaba con niveles apropiados de oxígeno, alcalinidad y transparencia, para el año 2004.

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala (2005) realizó una investigación que llevó por nombre “Informe de las visitas de campo y monitoreo de calidad de agua, en el lago de Atitlán, Sololá”. El objetivo principal fue evaluar el impacto que provocó la tormenta tropical Stan al sistema hídrico del lago de Atitlán. Entre sus alcances y limitaciones se tienen las siguientes: a) se realizó en un mismo día la medición de cada parámetro a diferente profundidad; sin embargo, se debería haber tomado una mayor cantidad de muestras para determinar conclusiones y acciones a seguir; b) se le dio seguimiento al monitoreo de calidad física y química del lago de Atitlán, de tal manera que se inició la generación de una base de datos; c) no se dio ponderación a las actividades antropogénicas.

La conclusión primordial de esta investigación fue que existe contaminación fecal (presencia de *E. coli*) en la playa, desde Tzanjuyu hasta la desembocadura del río San Francisco. Dicha contaminación se debe a que los desagües del pueblo van directos al lago sin un tratamiento previo. También, las playas de San Antonio Palopó y Santa Catarina Palopó presentan contaminación fecal. Además, en todo el margen del lago se está depositando la basura que arrastraron los afluentes del lago.

Dobias y Leshem (2008) realizaron un trabajo investigativo titulado “*Wastewater treatment systems and the implementation of a wetland in Atitlán lake Basin, Guatemala.*” (Sistemas de tratamiento de aguas residuales y la implementación de un humedal en la cuenca del lago de Atitlán, Guatemala). El objetivo principal fue determinar el entorno completo del lago de Atitlán en función

de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, cuyos efluentes llegan al lago.

Entre sus alcances y limitaciones se tiene: a) se analizaron desde una perspectiva general los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se localizan dentro de la cuenca del lago de Atitlán; b) se analizó la opción de construir humedales para minimizar el impacto de verter aguas residuales crudas en el lago de Atitlán; c) se indicó, en el desarrollo del estudio, que se asumieron varios datos para realizar cuantificaciones de los humedales; sin embargo esto demuestra datos arbitrarios no apegados a la realidad. En cuanto a sus principales conclusiones se tiene que i) los sistemas de tratamiento en la cuenca del lago de Atitlán son pobremente aplicados debido a problemas políticos y a aspectos económicos; ii) los humedales son opciones factibles para mitigar el problema de tratamiento de aguas residuales.

Dix (2009), presentó un estudio titulado “Estudios ecológicos: el lago de Atitlán, antes y ahora”. El objetivo principal de este trabajo investigativo fue analizar el estado de la calidad del agua del lago de Atitlán comparando datos del año 1969 y 2009. Entre sus alcances y limitaciones están: a) se compararon varias características del lago para periodos diferentes, sin embargo, no se hizo anotación si la forma de obtención de resultados para ambas épocas fue la misma o si se hizo alguna calibración de instrumentación y equipo; b) se logró discernir la forma en la que ha mermado la calidad de agua en un periodo de tiempo relativamente largo.

El trabajo concluye que se han observado cambios ecológicos en el lago de Atitlán entre 1968 y 2009, que incluyen una disminución en la claridad del agua; un aumento de temperatura de aproximadamente 2 grados Celsius,

observado especialmente en noviembre, al final del periodo de estratificación del lago.

Flores (2013), realizó una investigación titulada “*Hyperspectral remote sensing of water quality in lake Atitlán, Guatemala*. (Teledetección hiperespectral de la calidad del agua del lago de Atitlán, Guatemala.” Esta investigación tuvo como objetivo principal el análisis de la factibilidad de utilizar un satélite para determinar la calidad del agua del lago de Atitlán.

Entre sus alcances y limitaciones se tiene que: a) de acuerdo con la información vertida en el estudio, se logró utilizar imágenes satelitales a través de algoritmos para determinar la calidad de agua del lago de Atitlán en función de la clorofila; b) el tipo de tecnología utilizada en este estudio se limita básicamente a países desarrollados, por lo que la utilización para más estudios en Guatemala se torna difícil; c) se logró determinar, en un alto porcentaje, la calidad del agua del lago de Atitlán, sin embargo no se analizan situaciones que generan dicha contaminación y su comportamiento futuro. La conclusión primordial de este trabajo fue que las imágenes del satélite Hyperion pueden utilizarse satisfactoriamente para modelar las concentraciones de clorofila en el lago de Atitlán. Es importante recalcar, que de acuerdo con la OCDE (1982), cuanto mayor sea el contenido de clorofila en un cuerpo hídrico, mayor es el nivel de contaminación.

El estudio más reciente con una tendencia de investigación similar al que se pretende en este trabajo de investigación doctoral, fue realizado por Unidos por el Lago (2013), el cual lleva por nombre “Estado del lago de Atitlán, Informe 2,013”. El objetivo principal de este estudio fue lograr el desarrollo de un sistema de monitoreo a largo plazo para ser utilizado en la medición de parámetros físicos (temperatura, claridad), químicos (nutrientes y oxígeno), y biológicos

(composición de algas y zooplancton) para determinar el estado del lago y predecir cambios en el futuro. Los alcances y las limitaciones detectadas en este trabajo fueron:

- a. Se realizaron mediciones de propiedades físicas, químicas y biológicas del lago de Atitlán en diferentes puntos de muestreo.
- b. Se tiene una amplia base de datos e información en este estudio.
- c. No se explica la forma en que interactúa el ambiente con la calidad del agua del lago de Atitlán, así como la forma en que se debe interpretar o utilizar la información vertida para alcanzar la sostenibilidad.

La principal conclusión extraída de este informe es que en años recientes no se ha podido observar ninguna mejora aparente en el manejo de las aguas residuales alrededor del lago, a pesar del florecimiento de cianobacteria en el año 2009. En sentido general, todos estos estudios tienen las limitantes que no toman en cuenta la economía ecológica; como tampoco la acción antropogénica; muchos de ellos se limitan a presentar datos sin análisis o interpretación y no ostentan una modelación para analizar estrategias que logren llevar a la cuenca de un lago específico (en este caso, el lago de Atitlán) hacia la sostenibilidad.

## **1.2. ¿Por qué se selecciona la cuenca del lago de Atitlán para la presente investigación?**

El lago de Atitlán, que se localiza en la región occidental de Guatemala, es un importante reservorio de agua dulce, y su importancia radica en que es uno de los sitios turísticos más visitados, además de proveer desarrollo social y económico a las comunidades que se localizan en la circunscripción del lago. Desde el 2009, se ha suscitado una serie de variaciones en los parámetros físicos, químicos y biológicos, debajo del espejo de agua del lago de Atitlán; por

ejemplo, brotes frecuentes de cianobacteria, eutrofización debido al exceso de nutrientes, incrementos y decrementos súbitos del nivel de agua, extinción de especies endémicas, entre otros. Todo esto ha provocado pérdida de especies originarias de la zona, eutrofización paulatina de toda la columna de agua del lago, florecimientos periódicos de cianobacteria, entre otras afectaciones. En el lago de Atitlán se presenta una serie de problemas que la economía tradicional no puede resolver, pero sí la economía ecológica mediante los planteamientos anteriores, los cuales indican que todo sistema lótico debe ser valorado desde una visión sostenible, situación que no se ha realizado hasta ahora en países subdesarrollados como Guatemala.

### **1.3. Conceptos generales de cuerpos lénticos**

Derivado de la imperante necesidad de conocer términos técnicos y científicos para comprender la forma en que se manifiesta el dinamismo dentro de un cuerpo léntico, se presenta a continuación una serie de conceptos que coadyuvan al entendimiento de esta investigación.

#### **1.3.1. Sistemas lénticos**

Existe una categorización de cuerpos hídricos basada en el comportamiento hidráulico: cuerpos o sistemas lóticos y sistemas lénticos. Para el desarrollo de esta investigación se define que “los sistemas lénticos están representados por lagos, lagunas, ciénagas, planos inundables, estuarios y embalses. Su característica fundamental que los diferencia de los sistemas lóticos es el almacenamiento de un volumen importante de agua que carece de un flujo unidireccional permanente.” (Ramírez y Viña, 1998, p. 153).

### **1.3.2. Dinámica de sistemas lénticos**

De acuerdo con lo indicado por Ramírez y Viña (1998, p. 15), “las condiciones ambientales de los sistemas lénticos experimentan una estrecha dependencia con la pluviosidad, la cual varía a lo largo del régimen anual”; en este sentido se entiende que no hay un estado estable abiótico, y por ende, “las épocas climáticas prevalecientes de sequía, lluvias y transiciones, crean ritmos de crecimiento vegetal en función de los aportes de nutrientes, las poblaciones existentes y la cantidad de luz disponible.” (Ramírez y Viña, 1998, p. 15).

Durante la época lluviosa, los afluentes de los sistemas lénticos llevan consigo una gran carga de sólidos que al ingresar en el cuerpo hídrico cambian su ecosistema (variables físicas, químicas y biológicas sufren cambios). Por ejemplo, se disminuye la capa fótica, se incrementan sedimentos en la zona béntica, cambios termodinámicos, alteraciones en la ictiofauna, y otras afectaciones ecosistémicas.

La acción antrópica resulta ser muy interesante en cuanto al análisis de incidencia en el ecosistema debido a acciones directas e indirectas, por ejemplo, en invierno se produce escurrimiento superficial y subsuperficial que lleva un alto contenido de nutrientes debidos a desechos sólidos, líquidos y a la aplicación de químicos agropecuarios o industriales. Sin embargo, al aumentar el volumen de agua proveniente de precipitaciones pluviales, las concentraciones de las características del agua se diluyen.

Es necesario recalcar que cuando hay época de estiaje o verano, se presenta incremento de la capa fótica y, por consiguiente, hay crecimiento de microorganismos. Algunos parámetros fisicoquímicos parecieran determinar un estado saludable de los cuerpos lénticos, sin embargo, al momento de analizar

la calidad de un sistema hídrico se debe realizar de una forma integrada y no cada parámetro por separado. La temperatura de lagos tropicales presenta variaciones en la columna de agua, es decir, se marcan las estratificaciones térmicas de los sistemas lénticos: epilimnio, termoclina e hipolimnio.

### 1.3.3. Estratificación térmica de los lagos y reservas

En cualquier cuerpo hídrico se presentan variaciones en estratos, no solamente en su calidad, sino también en parámetros específicos como la temperatura. En este sentido cabe hacer mención que:

Los ríos están completamente mezclados, mientras que, en las latitudes templadas, los lagos se someten a estratificación térmica, dividiendo el sistema en capas y restringiendo el transporte de las masas. Esta estratificación se produce debido a interacciones entre la temperatura del agua y la densidad respectiva.” (Mihelcic y Zimmerman, 2012, p. 319).

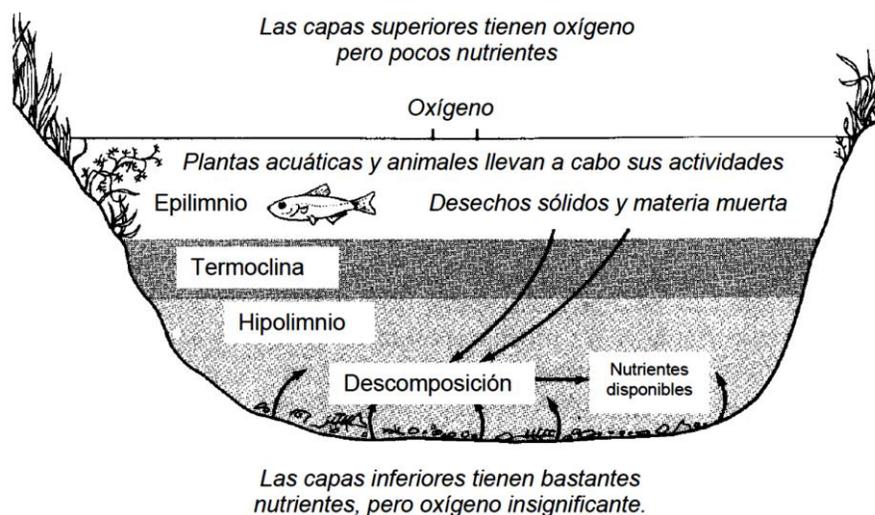


Figura 1. Distribución vertical en un lago. Adaptado de Espinoza, et al. (2005, p.1).

Debe hacerse hincapié en que, durante la estratificación generada en época de verano, una capa superior de agua tibia (la cual es menos densa), flota sobre una capa de agua fría más densa.

En cuanto al proceso de mezcla por convección, se entiende que, ayudado por la energía del viento, se hace circular la columna de agua, llevándola a condiciones isotérmicas. “A medida que las aguas del lago comienzan a calentarse por arriba de los 4°C, el lago se estratifica térmicamente.” (Mihelcic y Zimmerman, 2012, p. 320).

Debido a lo descrito en el párrafo anterior, durante la estratificación de verano, el agua superficial es más caliente y por consiguiente menos densa que las aguas que están debajo de la superficie.

“A medida que las aguas superficiales se enfrían, se hacen más densas, se hunden y promueven la circulación a través de la convección, ayudadas por el viento. Este fenómeno, llamado cambio de otoño, otra vez lleva a condiciones isotérmicas.” (Mihelcic y Zimmerman, 2012, p. 321).

Cuando se vuelve a enfriar el lago superficialmente, se tendrá agua con temperaturas bajas, pero habrá diferencia de densidades, siendo las aguas frías con menor densidad las que se tornan hacia la superficie, lo que provoca la estratificación de invierno.

#### **1.3.4. Eutroficación**

En los lagos, lagunas y lagunetas (en general todos los sistemas lénticos), las condiciones de calidad del agua son vulnerables debido a la magnitud y dirección de los flujos químicos y energéticos que se presentan. “Las

perturbaciones culturales de dos de dichos ciclos, el fósforo y el nitrógeno, causan un problema de calidad del agua de amplio interés, denominándose eutrofización.” (Mihelcic y Zimmerman, 2012, p. 319). Científicamente se ha demostrado que el nitrógeno y el fósforo son elementos que *per se* o generando sustancias, se les considera nutrientes debido a su composición química. En este sentido, “la eutrofización o eutrofización se define como el enriquecimiento del medio acuático con nutrientes” (Ramírez y Viña, 1998, p. 12).

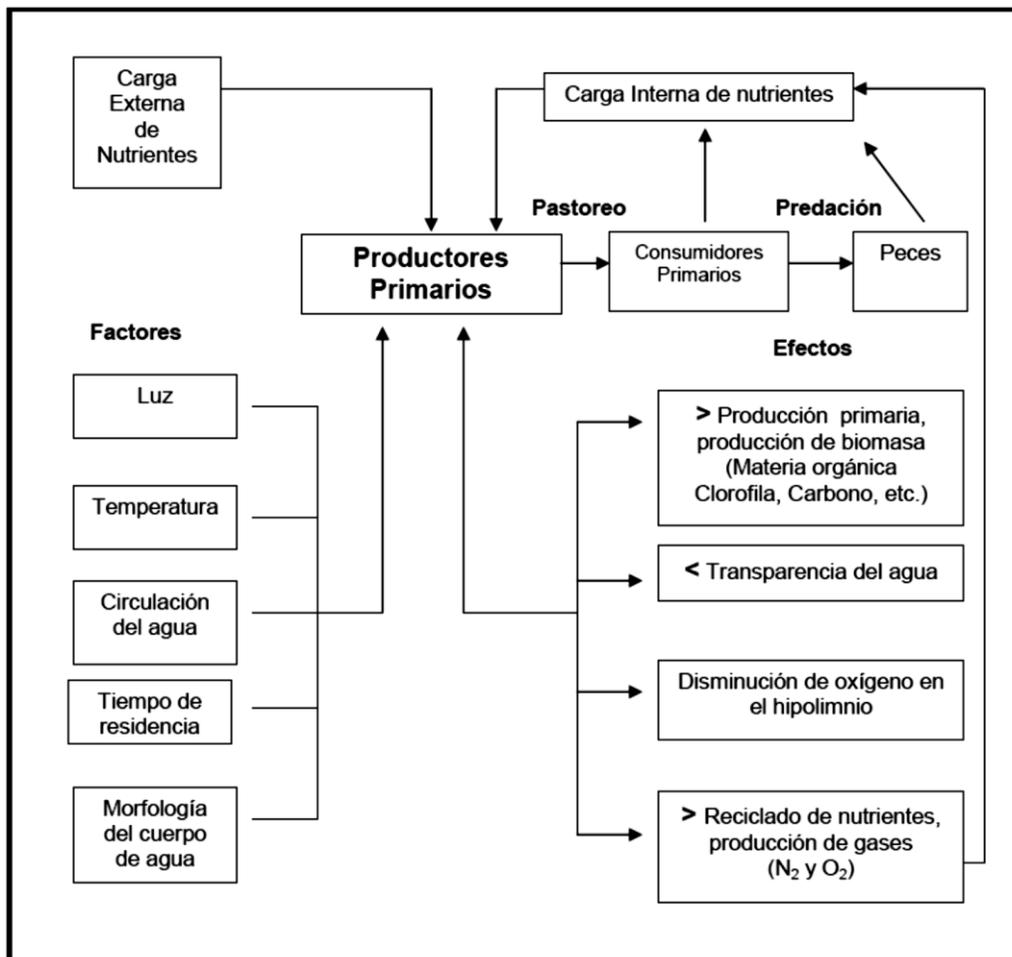


Figura 2. Cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua, causados por el proceso de eutrofización. Adaptado de Cátedra de Protección y Conservación de la Naturaleza (2010).

Como se puede observar en la figura 2, la eutrofización, de forma natural (sin influencia del ser humano), suele presentarse en un espacio de tiempo específico; sin embargo, la recurrencia de actividades antrópicas fomenta y acelera el proceso de eutrofización, acortando de forma significativa la “vida” de un cuerpo hídrico. Los cambios físicos, químicos y biológicos que se analizan para determinar la calidad del agua se presentan de dos maneras: por acciones antropogénicas o por la naturaleza misma.

Tabla I. **Valores límites de la OCDE para un sistema concreto de clasificación trófica**

<b>Grado de eutrofia</b>	<b>Clorofila (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Profundidad Secchi (m)</b>	<b>P (mg/m<sup>3</sup>)</b>
Ultraoligotrófico	< 1	> 12	< 4
Oligotrófico	1-2.5	12-6	4-10
Mesotrófico	2.5-7.9	6-3	10-35
Eutrófico	8.0-25	3-1.5	35-100
Hipereutrófico	>25	< 1.5	> 100

Fuente: elaboración propia, con base en OCDE, 1982.

En cuanto a la clasificación de la calidad del agua para sistemas lénticos, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), propone los valores indicados en la tabla I, entendiéndose que un sistema hídrico altamente contaminado (exceso de nutrientes) se le circunscribe dentro de los límites del estado hipereutrófico, a diferencia de un sistema “saludable” que debido a su baja cantidad de producción biótica se le conoce como un cuerpo hídrico en grado ultraoligotrófico.

#### **1.4. Economía ecológica**

En ocasiones la definición de economía ecológica se suele confundir con la descripción de la economía ambiental; por consiguiente, se debe diferenciar la economía ambiental y ecológica. Por ello se define a la economía ecológica como el “estudio de las relaciones entre el gobierno de la casa de los seres humanos y el gobierno de la casa de la naturaleza. Dicho de otro modo, es el estudio de las distintas interacciones entre sistemas económicos y sistemas ecológicos.” (Common y Stagl, 2008, p. 1).

El avance en el estudio de fenómenos naturales, y la recolección de experiencias que provienen de la interacción humana, han dado lugar a expresiones de comunicación tales como: “el dinero, el valor económico y precios; el ahorro y la inversión; las preferencias y utilidades; el crecimiento económico estacionario o expansivo; capital en sus variantes fabricado, humano, social y natural; recurrentes ciclos de penuria y abundancia económica, entre otros.” (Cadenas, s.f., p. 1). Estas expresiones se enfocan más desde una perspectiva capitalista en la cual el valor económico de los objetos lo determina el mercado y no va en función del costo ambiental y ecológico que implica obtener un producto o servicio.

De acuerdo con los modelos económicos que enmarcan el diario vivir de la población mundial, se establecen reglamentos a nivel internacional, como por ejemplo el uso de una moneda para cada nación, tasas de inflación con base en términos que define la economía tradicional; sin embargo, debe resaltarse que “la economía ecológica es una disciplina que acepta como punto de partida que el sistema económico es un sistema abierto que se interrelaciona con los ecosistemas y con los sistemas sociales, influyéndose mutuamente.” (García, 2003, p. 69).

La economía ecológica comparte otros conceptos con otras ramas del conocimiento científico, sobre todo con los tópicos que se relacionan con la satisfacción de necesidades económicas y sociales, Cadenas (s.f., p.3) explica que “la economía ecológica pretende construir y está a la búsqueda de un nuevo paradigma científico; el de formular la estrategia y gestión del Desarrollo Sostenible más apropiada para el conjunto de la Humanidad”.

Cotidianamente las personas con una posición económica y social relativamente estables, piensan que los recursos que les sirven para su “subsistencia” son infinitos, que siempre tendrán agua potable, siempre contarán con combustible o cualquier otra forma de energía para tener luz en el hogar, hacer funcionar sus vehículos, entre otros. Lo que no se preguntan este tipo de personas es si existe sostenibilidad con el uso de los productos o servicios que les sirven diariamente, porque puede darse una alta probabilidad de que, si sigue el consumismo como hasta ahora, las próximas generaciones tendrán problemas para obtener recursos aptos para su manutención o sostenimiento.

Como indica García (2003, p. 70), “la historia del pensamiento económico pone de manifiesto cómo la ciencia económica se consolidó dejando de lado la realidad física y social en la que transcurre la vida de los hombres.” Esta separación se representa básicamente en dos aspectos: “la limitación del universo del sistema económico a los valores pecuniarios o de cambio y la reducción del concepto de riqueza, objeto de estudio de la economía, a una única categoría de la misma: el capital.” (García, 2003, p.70).

Es hasta cierto punto irracional (basándose en el desarrollo de nuevas tecnologías) que aún se utilicen combustibles fósiles (energía no renovable) en cantidades elevadas, cuando pueden utilizarse energías “limpias” que se renueven con cierta periodicidad y se logre alcanzar el desarrollo sostenible que

garantice la calidad ecosistémica del planeta a largo plazo. “La economía humana está abierta a la entrada de energía. En los sistemas económicos preindustriales, la fuente más importante de energía es la energía solar directa convertida por la fotosíntesis en productos para la alimentación, vestimenta y la vivienda.” (Martínez, 1998, p. 9).

El tema de la energía toma bastante relevancia para seminarios, capacitaciones y congresos a nivel mundial, pero todas las propuestas o conclusiones que se toman en dichas actividades se quedan simplemente en palabras y no se ajustan a planes reales. En dichas reuniones salen a la palestra temas como incrementar la utilización de la energía solar, que como explica Martínez (1998), cuando la energía solar cae sobre la superficie terrestre, se produce fotosíntesis, formando carbohidratos en las plantaciones y de forma directa o indirecta son fuente de alimentación para los seres humanos, pero debido a la alta tecnología que se requiere para la utilización de ese recurso prefieren continuar con el uso de energía no renovable.

“Antes de la industrialización, las fuentes de energía eran energía solar directa aprovechada por la fotosíntesis, o energía solar transformada en viento (que mueve molinos), o caídas de agua (usada en molinos) previamente evaporada por la energía solar.” (Martínez, 1998, p.11). Años después, con la industrialización, surgió la necesidad del carbón (como “nueva” fuente de energía) y posteriormente el petróleo y el gas (en ese orden). Estas energías, en épocas geológicamente antiguas, provinieron de acciones relacionadas con la energía solar. Es decir que la energía obtenida a través de la quema de combustibles fósiles puede utilizarse de forma no frecuente, ya que la propia naturaleza generaría nuevamente las sustancias que producen estas energías, pero el ritmo de producción es bastante lento en comparación con su extracción.

La economía se estableció (como campo particular de estudio) en el año 1776 cuando Adam Smith publicó *The Wealth of Nations* (La riqueza de las naciones.) “Esa amplia investigación sobre la naturaleza y las causas del progreso económico es ahora famosa, fundamentalmente, por la doctrina de Smith de *la mano invisible*.” (Common y Stagl, 2008, p. 3).

La doctrina de *la mano invisible* hace referencia a que la mejor vía para obtener el bienestar social, es permitir a cada individuo perseguir intereses individuales (intereses egoístas). “Smith formó parte de un grupo que ahora se conoce como *los economistas clásicos*, cuyas ideas dominaron la esfera económica hasta el último cuarto del siglo XIX.” (Common y Stagl, 2008, p. 3).

De acuerdo con lo expresado por Common y Stagl (2008, p.4), “aproximadamente a principios de la década de 1970, la economía neoclásica comenzó a demostrar un interés renovado en el medio ambiente natural y ahora incluye dos especializaciones o subdisciplinas importantes: la economía ambiental y la economía de los recursos naturales.”

Prácticamente, la economía ambiental es la que se encarga de analizar, cuantificar y cualificar todo lo que la economía introduce en el ambiente y situaciones problemáticas relacionadas con contaminación o polución; y la economía de los recursos naturales se encarga de tratar lo relativo a lo que la economía extrae del medio ambiente.

La economía ecológica se fundamenta en la base que el análisis de la forma en que subsisten los seres humanos debe tomar en cuenta su interacción con el medio ambiente orgánico e inorgánico. (Common y Stagl, 2008, p.4).

### **1.4.1. Conceptos fundamentales**

Para comprender de una forma adecuada las definiciones relacionadas con la economía ecológica, se analiza la siguiente base conceptual adoptada.

#### **a) Metabolismo social**

El metabolismo social se fundamenta en el estudio de las interacciones que se producen entre el dinamismo social y la naturaleza. El concepto de metabolismo social “se reduce a los simples cálculos de entradas (apropiación), salidas (excreción), importaciones y exportaciones, dejando fuera de sus análisis tanto las complejas configuraciones del resto del proceso metabólico, como las dimensiones no materiales o intangibles del metabolismo.” (Toledo, 2013, p. 46).

Toda actividad antrópica en la actualidad requiere la extracción de materia obtenida en la naturaleza. Dependiendo de si se consume de forma directa o indirecta, pueden existir flujos de importación o exportación. Asimismo, sin importar si es de forma directa o indirecta que se extraiga algo de la naturaleza, seguramente habrá excreción hacia el mismo ambiente una vez haya sido utilizada la materia extraída. En ocasiones la materia prima extraída o las excreciones devueltas a la naturaleza parecieran no tener relevancia, es por ello que Toledo (2013, p. 46), refrenda que “el metabolismo entre la naturaleza y la sociedad contiene dos dimensiones o esferas: un material, visible o tangible y otra inmaterial, invisible o intangible.”

Asimismo, se conoce que, entre la apropiación de materiales y energías y la excreción hacia la naturaleza, se generan procesos internos en las sociedades en los cuales ocurren transformaciones, circulación de bienes, servicios, y

consumo de esos bienes y servicios. A esto, diversas fuentes de información lo denominan “caja negra”.

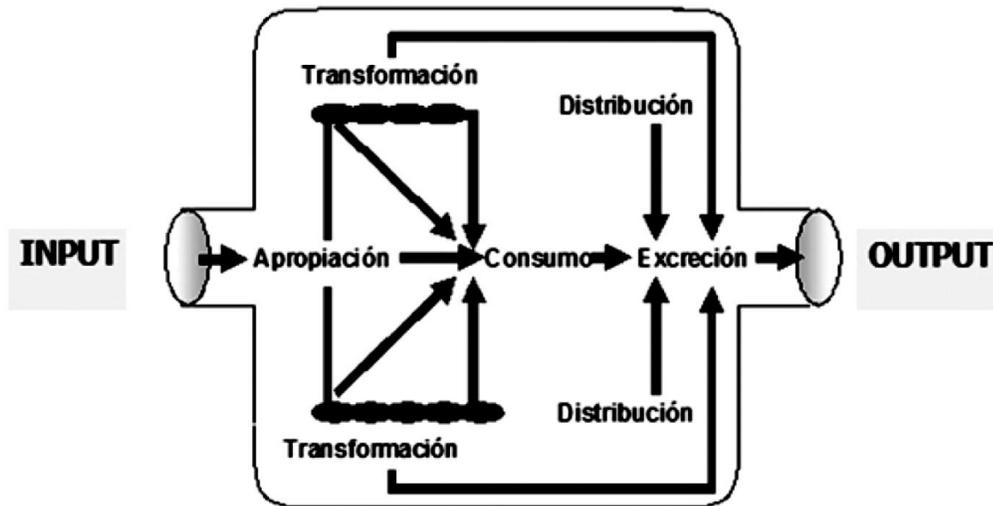


Figura 3. El metabolismo social. Adaptado de González y Toledo (2011, p.5).

Como se indica en la figura 3, “el metabolismo social comienza cuando los seres humanos socialmente agrupados se apropian de materiales y energías de la naturaleza (*input*) y finaliza cuando depositan desechos, emanaciones o residuos en los espacios naturales (*output*).” (Toledo, 2013, p. 47).

A través de la apropiación, la sociedad se abastece de todos los recursos naturales para subsistir y procrearse. El proceso de transformación se refiere a convertir o transformar los recursos apropiados y transformarlos en materiales o servicios que no conservan la forma original con las cuales fueron obtenidos.

“El proceso metabólico se ve entonces representado por cinco fenómenos que son teórica y prácticamente distinguibles: la apropiación (A), la transformación (T), la circulación (C), el consumo (Co) y la excreción (E).” (Toledo, 2013, p. 47).

El proceso de circulación dentro del metabolismo social se presenta cuando la materia extraída de la naturaleza, o los productos y servicios transformados, son necesarios en otro espacio físico distante del lugar donde se dio la apropiación. Luego de la circulación, los bienes que fueron o no transformados, son consumidos por los individuos que componen una sociedad específica. Posterior al consumo (cuarta etapa del proceso de metabolismo social), se encuentra la excreción, que es la actividad a través de la cual los individuos que componen una sociedad, desechan materiales, recursos y energía hacia la naturaleza.

#### **b) Sostenibilidad o desarrollo sostenible**

La comunidad científica, en su mayoría, toma sin diferenciación el uso de los términos sostenibilidad o desarrollo sostenible, que prácticamente ambos se refieren al consumo de bienes extraíbles de la naturaleza, sin mermar la oportunidad a generaciones futuras de consumir los mismos bienes para su subsistencia. De acuerdo con Common y Stagl (2008, p.8), el término sostenibilidad se refiere a “mantener la capacidad del sistema economía-medio ambiente para satisfacer las necesidades y deseos de los seres humanos a largo plazo.”

La problemática que prevalece en muchas sociedades dentro del globo terráqueo es la pobreza. La solución de esta condición es, de acuerdo con muchos especialistas en temáticas económicas, el crecimiento económico a través del incremento de la escala de la actividad económica. Eso genera una gran controversia que, de acuerdo con Common y Stagl (2008) yace en que: “Por un lado, la escala actual de la actividad económica global amenaza la sostenibilidad, es decir, que amenaza con reducir la capacidad futura de

satisfacer las necesidades; y por el otro lado, es necesario aumentar la actividad económica” para aliviar la pobreza. (p. 8, 9).

El análisis que debe formarse en los tópicos desarrollo sostenible y crecimiento económico, a nivel mundial, debe establecerse en diferenciar que el desarrollo sostenible se basa en función del medio ambiente, tomando en cuenta aspectos económicos que no se enajenan del capitalismo. Caso contrario, el crecimiento económico representa estadísticas basadas en valores de mercado para indicar que una sociedad en su conjunto tiene ingresos económicos que van creciendo año con año, sin importar las consecuencias en el medio ambiente causadas por el “mercado”.

En este sentido, Common y Stagl (2008, p. 9) indica que desarrollo sostenible es “una forma de crecimiento económico que satisfaga las necesidades y deseos del presente sin comprometer la capacidad del sistema de economía y medio ambiente de seguir cumpliendo con ese objetivo en el futuro.”

El vocablo “sostenibilidad” se asocia de forma indistinta con el término “desarrollo sostenible”. Las definiciones de este término se basan en la mejora del bienestar material de la gente mediante la utilización de los recursos de la tierra a un ritmo que pueda ser mantenido indefinidamente. (Conroy y Litvinof, 1988). En el informe de la Comisión de Brundtland, denominado “Nuestro futuro común”, publicado en 1987, se definió el término desarrollo sostenible como “el que garantiza las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades,” y esta sigue siendo la definición fundamental desde entonces.

De acuerdo con Ortíz y Arévalo (s.f.), existen dos conceptos que diversas personas emplean de forma indistinta, “Sostenibilidad” y “Sustentabilidad”

habitualmente mal utilizados y que en realidad tienen trasfondos diferentes. Para muchos los términos Desarrollo Sostenible, Sostenibilidad, Desarrollo Sustentable o Sustentabilidad, no manejan diferencias de fondo y explican que simplemente estos términos se deben a una confusión producto de la traducción de palabras como “*sustainability*” del inglés al español.

En el desarrollo de este trabajo de investigación se maneja, de acuerdo con el enfoque que se le da, el término sostenibilidad y desarrollo sostenible como sinónimos, definiéndolos como vocablos que representan un equilibrio en el manejo del planeta desde tres aspectos: económico, ambiental y social.

#### **1.4.2. Usos de la economía ecológica**

La economía ecológica analiza las interacciones del sistema socioeconómico con el sistema ambiental que lo sostiene. Con base en esta aseveración, los usos más relevantes de la economía ecológica son:

- a. Relacionar la economía y el medio ambiente.
- b. Clasificar los recursos naturales en función de su utilidad y capacidad de renovación.
- c. Elaborar flujos de insumos, residuos y contaminación.
- d. Categorizar los recursos naturales basándose en la generación de desechos.
- e. Analizar las amenazas que presenta la interdependencia entre el medio ambiente y la economía para alcanzar la sostenibilidad.
- f. Analizar la producción o la prestación de cualquier servicio, en función de la apropiación de recursos extraídos de la naturaleza de forma directa o indirecta.

- g. Diferenciar entre crecimiento económico y desarrollo económico, basados en la satisfacción de necesidades y la capacidad de carga ambiental.
- h. Analizar las posibilidades de sustituir ciertos procesos productivos, adaptándose a cambios tecnológicos que promuevan desarrollo económico, tomando en consideración las limitaciones actuales de los recursos naturales.
- i. Analizar la sostenibilidad de recursos hídricos, y propuesta de planes interdisciplinarios para alcanzar desarrollo sin impactar significativamente el medio ambiente.

#### **1.4.3. Diferencias entre economía ecológica y economía tradicional**

En reiteradas ocasiones nacen dudas fundamentadas en las diferencias que estriban entre economía ecológica y la economía tradicional, o si hay puntos de unión o divergencia entre las definiciones que marcan ambos conceptos. En este sentido, se presentan a continuación las definiciones y fundamentos que describen esos dos conceptos.

El ser humano generalmente realiza las mismas actividades día tras día, enfrascándose en una sociedad de consumismo cada vez más arraigada, y que representa una de las fallas de la economía tradicional. Como indica García (2003, p. 71), “uno de los principales motivos de insatisfacción de la ciencia económica tiene que ver con la ficción de «*Homo oeconomicus*», que despoja la conducta humana de toda propensión cultural en su vida económica, suponiendo una conducta económica de carácter mecánico.” Asimismo, se identifica como aspecto negativo que el ser humano ha sido incapaz de utilizar los recursos naturales con raciocinio.

La economía ecológica, como ciencia, se interrelaciona con otras ciencias y no puede constituirse ni estudiarse como una disciplina separada de otras áreas, tal como indica Cadenas (s.f. p. 4), que:

La economía ecológica no puede ni pretende constituir una disciplina unitaria sino que se sitúa, en ocasiones, como un conocimiento interdisciplinario y, en otras, como transdisciplinario (todo en uno), además aborrece debido a ello el reduccionismo científico ya que intencionadamente se posiciona a la búsqueda de planteamientos sistémicos y holísticos.

Esta ciencia debe tratarse desde una perspectiva holística, donde todas las demás áreas de influencia (hidrología, orografía, economía, ambiente, energía, entre otras) forman parte inherente del estudio de la economía ecológica. “La Economía Ecológica se sitúa en contraposición a la Economía Convencional u Ortodoxa, dominante en el ámbito académico, profesional y político, además de a nivel popular” (Castilla, 1994, p. 11). En términos prácticos y resumidos, la economía convencional supone que existe una repartición de recursos distribuida entre agentes productores y consumidores.

Las interacciones que representa la economía convencional a través de la expresión de “*libre mercado*” no sugiere la ponderación de consecuencias ambientales, sino simplemente funciona en la oferta y la demanda para obtener mayores beneficios económicos, vendiendo un supuesto bienestar a las sociedades sin pensar el daño a la naturaleza. Para discernir algunas otras diferencias entre la economía ecológica y la convencional, se citan las características de mayor relevancia de ambas:

### **a. Características de la economía tradicional**

1. La dotación de recursos requeridos por la sociedad la marca el mercado, y se debe satisfacer esa pseudonecesidad sin analizar el origen de la misma.
2. Los precios se modifican en la economía tradicional de acuerdo con aspectos de la teoría del mercado capitalista, sin tomar en consideración algún valor implícito relacionado con extracción de productos del medio ambiente.
3. “La visión de Sistema Cerrado supone una abstracción total del entorno físico. De esta manera, los recursos naturales son de carácter libre o ilimitados, es decir, no se reconoce la finitud de los recursos naturales ni, por tanto, la posibilidad y consecuencias de su agotamiento” (Castilla, 1994, p. 14).
4. Toda la problemática generada en torno al medio ambiente puede solucionarse con el avance técnico y tecnológico vigente, por lo que no se analizan los impactos al ambiente con anticipación.

### **b. Características de la economía ecológica**

En contraste con lo que indica la economía tradicional, se tienen las siguientes características fundamentales de la economía ecológica:

1. La economía ecológica analiza los ecosistemas y su relación con el sistema económico en un sentido profundo. Como indica Costanza (1989), las relaciones entre los sistemas económicos y la ecología son el centro

de muchos de los problemas vigentes más graves (capacidad de sostenimiento, lluvia ácida, calentamiento atmosférico, extinción de especies, distribución de la riqueza) pero de ellos no se ocupa ninguna disciplina existente.

2. La economía ecológica incorpora dentro de sí misma a la economía del medio ambiente (donde se incluyen evaluaciones de impacto ambiental); también permite nuevas tendencias educativas relacionadas con aspectos económicos y ecológicos.

#### **1.4.4. Visión de la economía ecológica**

De acuerdo con López y Pino (2013), las visiones de la economía ecológica se basan en que el mundo, como un sistema termodinámico y geodinámico, permite la utilización de los recursos por parte del hombre de forma integral (no aislada), lo que implica que la determinación de su explotación, escasez, utilidad y costo de oportunidad se basan en análisis integrales y no separativos o basados simplemente en estudios antrópicos.

Es una característica fundamental de la economía ecológica, de acuerdo con López y Pino (2013), poseer “una visión de futuro del mundo, como un planeta sustentable, donde los seres humanos como centro del desarrollo, considerando las limitaciones impuestas por la naturaleza”. (p. 9). También se debe analizar la economía ecológica desde una perspectiva política integral, ya que debe considerar las diversidades étnicas y culturales a todo nivel (mundial, nacional, regional, local), garantizando una extracción racional de recursos, de acuerdo con las necesidades de cada sociedad. En términos generales, cuando se trata el tópico de economía ecológica, se debe tener una visión compleja fundamentada en leyes y principios que rigen la unidad naturaleza-sociedad.

#### 1.4.5. Indicadores de la economía ecológica

A continuación, se presentan ciertos indicadores de la economía ecológica y una breve definición de cada uno de ellos:

**Metabolismo social:** “se reduce a los simples cálculos de entradas (apropiación), salidas (excreción), importaciones y exportaciones del resto del proceso metabólico, como las dimensiones no materiales o intangibles del metabolismo.” (Toledo, 2013, p. 46). El metabolismo social inicia cuando los seres humanos se apoderan de materiales (incluyendo energías) tomados de la naturaleza y termina cuando se evacúan desechos o residuos en la misma naturaleza.

**Análisis de ciclo de vida (ACV):** se basa metodológicamente en la identificación, cuantificación y caracterización de los diversos riesgos al medio ambiente que están atados a cada etapa o proceso del ciclo de vida de un producto, servicio, región, entre otros. “Básicamente, se enfoca al rediseño de productos bajo el criterio de que los recursos energéticos y materias primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido de como se reemplazan o surgen nuevas alternativas.” (Romero, 2003, p. 91).

**Indicador de desempeño ambiental:** se basa en una serie de indicadores para definir el desempeño de una actividad, ecosistema, país, entre otros, basándose en cuestiones ambientales de alto impacto, como el uso directo de la energía, consumo de energía, uso del agua, depredación de las fuentes, impacto en los hábitats naturales, entre otros.

**Análisis emergético:** de acuerdo con Mosconi y Vázquez (s.f. p.5), el análisis emergético se basa en el concepto de emergía solar y transformidad

solar, introducido por Odum en los años 80, utilizado para analizar el grado de organización y la complejidad de los sistemas abiertos (sistemas que pueden intercambiar energía y materia con el exterior).

**Huella ecológica:** es una herramienta muy utilizada en la actualidad para determinar y analizar la demanda de recursos naturales por parte del ser humano, basándose en la estimación del tamaño biológico utilizado para una actividad específica, cuantificando la medida generalmente por hectáreas. De acuerdo con Wackernagel y Rees (1996, p. 51-52) se define huella ecológica como: “la superficie de tierra productiva o ecosistema acuático necesario para mantener el consumo de recursos y energía, así como para absorber los residuos producidos por una determinada población humana o economía, considerando la tecnología existente.”

**Bienestar o calidad de vida:** según Gómez-Vela y Sabej (2000), es la satisfacción de la persona que le proporciona una actividad específica en un momento determinado en la vida. Es un indicador bastante subjetivo, ya que se limita al concepto de felicidad para el que hay diversas definiciones de acuerdo con la variabilidad de caracteres de los seres humanos. Se basa en aspectos sociales, culturales, económicos, religiosos, entre otros.

**Huella hídrica:** considera el uso del “agua oculta a lo largo de la cadena de producción de bienes o de servicios de consumo, dando información de los efectos sobre el agua asociados a los hábitos de vida de las personas o de la producción de empresas.” (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, 2013).

**Huella de carbono:** es un elemento de información que ayuda a gestionar los riesgos y oportunidades de algún proceso en relación con los gases efecto invernadero, de una manera global e integrada, puesto que abarca las emisiones

asociadas a la cadena de valor completa de cualquier proceso, servicio o negocio, permitiendo incorporar el “componente carbono” a la toma de decisiones. (Endesa, 2016). No se tomó en consideración este indicador ya que el acceso a información relacionada con la utilización de combustibles fósiles para un área determinada, se torna difícil en países como Guatemala, los cuales no le dan el valor educativo y científico a las bases de datos en general. Sin embargo, en un futuro cercano podría abordarse la sostenibilidad de lagos desde la perspectiva de la huella de carbono.

#### **1.4.6. Ventajas y desventajas de la economía ecológica**

Se presenta a continuación una lista de las ventajas y desventajas de mayor relevancia en cuanto a la economía ecológica se refiere:

##### **Ventajas**

- a. Su prioridad es la sostenibilidad.
- b. Utiliza indicadores físicos y biológicos.
- c. Utiliza la evaluación multidimensional.
- d. Hace integración de modelos con relaciones causa-efecto.
- e. Es una nueva orientación sobre las interrelaciones dinámicas que se dan entre los sistemas económicos y los sistemas físico, biológico y social.
- f. Se basa en la siguiente noción física básica: es imposible la generación de más desechos o residuos de los que puede soportar la capacidad de amortiguamiento de los ecosistemas.
- g. La economía ecológica, indica Schettini (2004), que es un elemento central para la comprensión de la sostenibilidad, basándose en discusiones de equidad, distribución de recursos y riqueza, ética, entre otros.

## **Desventajas**

- a. No utiliza indicadores monetarios de forma directa.
- b. Generalmente se asume que la productividad de varias actividades es constante.
- c. Los cálculos son generalmente simples, por lo que puede haber imprecisión en la información o resultados obtenidos.
- d. No permiten comparar situaciones fácilmente.
- e. No son de aplicación universal.
- f. La información para sus cálculos no está ampliamente difundida.

### **1.5. Huella hídrica**

Con base en la información publicada por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (2013), el concepto de la huella hídrica (HH) fue desarrollado por Hoekstra y Chapagain a inicios del siglo XXI y este se fundamenta en dos criterios de suma importancia: “agua virtual” (propuesto por Allan en el año 1993), y “agua verde” (propuesto por Falkenmark en 1995). AgroDer (2012) menciona que la huella hídrica es un indicador que se utiliza para la cuantificación y cualificación del uso antropogénico del agua (producción de comida, industria, generación de energía), así también se usa para cuantificar el agua que se contamina por los mismos usos. En términos generales, la huella hídrica sirve para determinar la cantidad de agua (volumen) que es aprovechable desde la perspectiva antrópica sin importar si se analiza como un individuo, grupo de individuos, alguna zona o región específica, entre otros.

La huella hídrica permite mostrar los consumos de agua de acuerdo con múltiples variables, tales como su proveniencia, consumos en un área determinada, cantidades de agua que se requieren para poder asimilar la

polución generada, entre otros; lo cual es observable en la figura 4, donde se describe el esquema de proceso de cálculo de la huella hídrica a partir de las diferentes escalas de cualquier proceso, tanto si el enfoque es a partir de algún producto o de un área geográfica delimitada. En esta investigación se realiza un estudio de huella hídrica para la cuenca del lago de Atitlán (área geográfica delimitada); de tal manera que se pretende el análisis de la huella hídrica de todos los procesos que se llevan a cabo dentro de la circunscripción de la cuenca, para identificar los efectos sobre el espacio físico, y no sobre personas o productos.

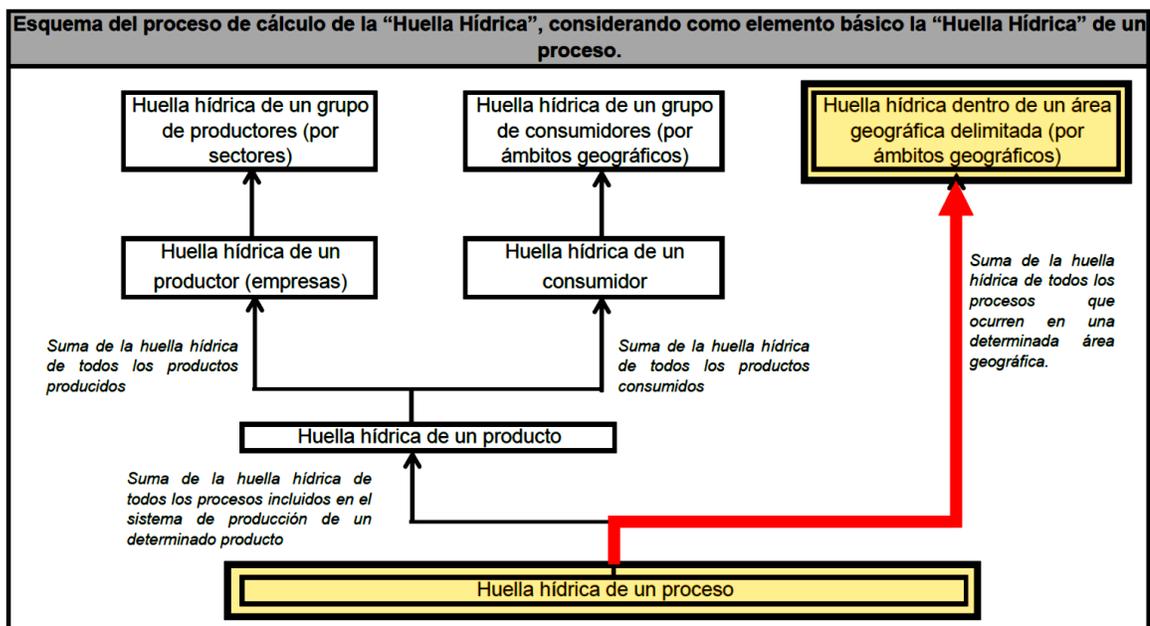


Figura 4. Mapa conceptual de aplicaciones de la huella hídrica. Adaptado de "Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia", 2013, p. 14.

### 1.5.1. Huella hídrica como indicador de sostenibilidad

De acuerdo con Arévalo, Lozano y Sabogal (2011, p. 103), "la huella hídrica, se presenta como un indicador de sostenibilidad que permite identificar relaciones causa-efecto a nivel socio-ambiental, siendo las actividades socioeconómicas el principal factor de presión sobre los recursos naturales."

Asimismo, este indicador de sostenibilidad proporciona una visión diferente del agua, que “permite identificar impactos sobre el recurso hídrico a causa de los hábitos de consumo de grupos de población en ubicaciones geográficas específicas.” (Arévalo, et al. 2011, p. 104). Es de suma relevancia tener conocimiento de un concepto importante para la comprensión de la metodología de la huella hídrica, el cual se denomina “agua virtual”, y este se refiere al recurso hídrico utilizado para la elaboración de un producto específico.

### **1.5.2. Usos de la huella hídrica**

La consideración de la huella hídrica coadyuva al conocimiento de los flujos reales del agua por medio de los datos de producción y consumo (oferta y demanda), logrando determinar la manera en cómo se satisfacen necesidades y generan riquezas. La huella hídrica *per se* es aplicable en casi todas las actividades de origen antropogénico de forma directa o indirecta, ya que dichas actividades generan un impacto en los recursos naturales, especialmente en los hídricos. A continuación, se listan usos comunes de la huella hídrica:

- a. Análisis de sostenibilidad de territorios.
- b. Estudios de desarrollo sostenible.
- c. Obtención de modelos de predicción de sostenibilidad o autosuficiencia en las actividades específicas de algún territorio.
- d. Determinación, con base en datos numéricos, de impactos inducidos a ciertos ecosistemas, debido a actividades antrópicas.

El análisis de la huella hídrica “no debe ser interpretado como un elemento aislado: es una herramienta orientada a brindar información base que, siendo analizada en el contexto regional y junto con otros indicadores de relevancia, puede ser de utilidad para tomadores de decisiones.” (AgroDer, 2012, p. 36). Para

determinar la huella hídrica se deben considerar aspectos climáticos, geográficos e hidrológicos, además de modelos predictivos demográficos.

La huella hídrica de producción se determina primordialmente en función de las actividades agrícolas (técnicas, rendimientos, aspectos de irrigación, variables climatológicas, entre otras). Por otro lado, la huella hídrica de consumo se fundamenta en la manera en que viven los seres humanos: hábitos alimentarios, la ropa que se viste, la tecnología que se utiliza, entre otros. “Todos ellos están directamente relacionados con el poder adquisitivo de los habitantes de cada nación.” (Agroder, 2012, p. 36).

### **1.5.3. Ventajas y desventajas de la huella hídrica**

Como indican Cuevas y Fallot (2014), se presentan ciertas ventajas cuando se aplica la huella hídrica:

- a. Simplicidad y sencillez en su aplicación.
- b. Útil para estimar interrelaciones e impactos.
- c. Para evaluar escenarios, considera el impacto con base en varias variables.
- d. Se puede estimar con valores que se hayan obtenido previamente por otras fuentes.

Asimismo, se identifican ciertas desventajas de la aplicabilidad de la huella hídrica:

- a. No existen valores del uso del agua para todos los productos.
- b. Se necesita información sobre variables climáticas que muchas veces es escasa en ciertas zonas.

- c. Se asume que en la práctica la productividad del suelo agrícola, ganadero y forestal no disminuye con el tiempo.
- d. Requiere datos que en ocasiones no están disponibles, y que, en algunos casos, hay que estimarlos.
- e. Las estimaciones pueden ser imprecisas por aplicar hipótesis que simplifican los cálculos.

#### **1.5.4. Aplicación de la huella hídrica en otras partes del mundo**

Existen varias aplicaciones de la huella hídrica a nivel mundial. La red de huella hídrica (Water Footprint Network) se ha dedicado a su estudio en todo el planeta Tierra.

En este sentido, se han realizado análisis de la huella hídrica para todos los países del mundo por parte de Water Footprint Network, aplicando este resultado para el manejo de políticas económicas, sociales, culturales, entre otras, para garantizar el uso sostenible de los recursos naturales, sobre todo del recurso hídrico.

Cabe mencionar que los análisis realizados por esta institución se basan en información que presentan de forma oficial los países. En el caso de Guatemala, la información técnica con que se cuenta es muy limitada debido a carencia de equipos y personal para la toma de dicha información.

La aplicación de la huella hídrica para áreas muy específicas como cuencas o microcuencas se ha desarrollado por parte de instituciones o investigadores, sin embargo, cubren solamente las áreas de interés de esas instituciones promotoras.

## **1.6. Métodos emergéticos**

A continuación se describen de forma general los términos que ayudan al entendimiento de la aplicación de los métodos emergéticos:

### **1.6.1. Definiciones y conceptos**

Los conceptos relacionados con la “nueva” ciencia denominada Emergía, se fundamentan en las leyes de la Termodinámica, ya que se aplican análisis de energía relacionados con procesos específicos para la obtención de un producto, la prestación de un servicio o cualquier otra actividad de origen natural o antrópico. De acuerdo con Odum (1996, p.7), la Emergía se define como “la cantidad de energía ya usada de manera directa o indirecta para crear un servicio o producto y, por lo general, cuantificados en equivalente a la energía solar expresados en emjoules.”

El problema de analizar la energía para obtención de un determinado producto, es que muchas veces las energías no son producidas de la misma forma, por lo que una comparación sin un análisis previo no fundamenta datos equivalentes. Es por ello que surge la Emergía que analiza a través de transformidades las diversas energías que se involucran en un proceso específico, por ejemplo, la cantidad de calorías que utiliza un pescador para pescar se podría comparar con la cantidad de energía que recibe un cuerpo hídrico por recepción de la luz solar.

En general, el dinero muchas veces se utiliza para valorizar cualquier producto obtenido de la interacción entre la sociedad humana y la naturaleza, basándose en un concepto de mercado, refiriéndose a lo que la gente desea pagar por el producto (“valor receptor”). “El concepto utilizado en el análisis

energético es el de “valor donante”, en el cual algo tiene valor en función de lo que fue invertido para realizarlo dentro de la cadena ambiental y socioeconómica de procesos metabólicos.” (Rótolo, 2011, p. 638).

El análisis energético permite determinar un valor ambiental y económico de un producto o servicio, asignándole las cantidades de energía utilizadas para la creación de ese producto, basándose en la cantidad de energía utilizada para su confección, así como la energía que representa ambientalmente el haber originado ese producto. “El principio de máxima energía indica que los sistemas que se desarrollan y prevalecen son aquellos que incrementan y toman ventaja de la energía que está disponible.” (Brown, et al. 1991, p. 11).

Los productos o servicios que producen menos carga contaminante y que utilizan menos recursos del ambiente, son los que optimizan la energía en sus procesos. Por ejemplo, una empresa que se dedica a la transformación de materia prima para elaboración de fertilizantes agroquímicos, toma de la naturaleza los componentes que requiere, y estos representan una cantidad de energía de acuerdo con el concepto de análisis energético; sin embargo, cuando se usan estos fertilizantes generalmente por escorrentía superficial o subsuperficial llegan a los cuerpos hídricos con una carga alta de nutrientes, que a su vez representan cierto valor de energía. Por ello, optimizar el uso de la energía tomando de la naturaleza lo que permita el desarrollo sostenible es lo que garantiza la calidad de vida de las próximas generaciones.

“Energía (deletreada con “M”) en un recurso, producto o servicio es la suma de las energías solares que son requeridas directa e indirectamente en su producción.” (Brown, et al. 1991, p. 11). Para diferenciar las unidades entre la energía y la energía, se utiliza para esta última, los emjoules (Emergy Joules).

En términos coloquiales, la emergía representa una forma de comparar diversas clases de energía en una misma dimensional “emjoules”, ya que en ocasiones los tipos de energía que se presentan en la evaluación de un ecosistema, producto o servicio no son equivalentes y provocarían confusión al hacer comparación entre los mismos. “Para lograr comparar datos de diferentes tipos de emergía que interactúan en un sistema, se calculan transformidades, las que se definen como la energía de un tipo necesaria para generar una unidad de energía de otro tipo.” (Brown et al., 1991, p. 11).

### **1.6.2. Análisis emergético como indicador de sostenibilidad**

Posiblemente, algo específico en el universo está conectado directa o indirectamente a alguna otra cosa dentro del mismo. Cuando se gestiona y lleva a cabo un análisis emergético, se está haciendo referencia implícitamente, a cuantificar la carga ambiental que recibe un ecosistema específico, así como a calcular el porcentaje de renovabilidad de los recursos que intervienen en el crecimiento y desarrollo socioeconómico de la zona de influencia que se desea analizar. También se puede determinar un índice de sostenibilidad, el cual indica implícitamente que un recurso podrá ser utilizado por generaciones siguientes, hasta ciertos límites.

### **1.6.3. Ventajas y desventajas de los métodos emergéticos**

Se tienen argumentadas las siguientes ventajas de la utilización de métodos emergéticos:

- a. Poseen la habilidad para cuantificar ingresos y egresos ambientales y económicos en un sistema, en una base común (en las mismas unidades de medida).

- b. Basándose en las leyes de la termodinámica, pueden aplicarse los métodos emergéticos a cualquier análisis de productos, servicios o ecosistemas.
- c. Pueden utilizarse para analizar cambios en el tiempo para un mismo ecosistema. (Genera una línea basal, si se requiere).

Asimismo, se detectan las siguientes desventajas en la aplicación de métodos emergéticos:

- a. No ha sido extensamente desarrollado y difundido, especialmente a países en vías de desarrollo.
- b. Se asumen muchos datos, o en ocasiones los datos para calcular transformidades son muy amplios, y faltaría limitarlos.
- c. Debido a que no es muy conocida la emergía y sus aplicaciones, generalmente no se toman en cuenta para planificaciones estatales relacionadas con la mejora del ambiente.

#### **1.6.4. Aplicaciones de la emergía**

La emergía como tal, es una ciencia que se ha desarrollado desde hace aproximadamente 60 años, por lo cual, el conocimiento científico en torno a ella es relativamente escaso. Sin embargo, hay dos pilares fundamentales de la aplicación de la emergía para ecosistemas, que se identifican claramente.

**a. Evaluación de alternativas para el desarrollo:** “por muchos años, la sociedad humana se ha expandido usando una red emergética de recursos no renovables. El crecimiento urbano es centrado donde la emergía fluye dando soporte al espacio económico.” (Odum, 1996, p. 164). El crecimiento poblacional a nivel mundial está íntimamente ligado con el requerimiento de obtención de

recursos naturales y la transformación de estos para la subsistencia. Sin embargo, la utilización insostenible de los recursos naturales conlleva a una disminución de calidad y cantidad de ecosistemas que ponen en peligro el sustento para las generaciones venideras.

**b. Determinación de sostenibilidad de recursos naturales:** cuando se trata de dar un dictamen de cuán renovable y sostenible es la utilización de un recurso específico para la subsistencia de comunidades específicas, se puede utilizar la emergía, que es una cuantificación general.

#### **1.6.5. Relación entre la emergía y los recursos hídricos**

El agua es un recurso natural que está presente en prácticamente todas las actividades antrópicas, y su uso irracional provoca afectaciones en su cantidad, calidad y disponibilidad. El análisis emergético permite obtener información relacionada con la calidad del recurso y cuánto se aprovecha de él, así como cuánto es pagado por acceder a este recurso. En este sentido se torna necesario conocer las relaciones existentes entre la emergía y los cuerpos hídricos.

“En la organización de la geobiósfera, el ciclo hidrológico tiene un papel importante como una de las formas más importantes en que la energía solar es acoplada en los sistemas energéticos en la tierra.” (Odum, 1996, p. 111).

Cuando hay precipitación pluvial en la superficie de la Tierra, esta precipitación se deriva en dos posibles flujos: “una parte es transpirada por las plantas y el flujo remanente fluye por escorrentía hacia almacenamientos en la subsuperficie. Para evaluar la emergía, la transformidad apropiada es multiplicada por la energía disponible usada en cada uno de los flujos divididos.”

(Odum, 1996, p. 112). En cuanto al recurso hídrico se refiere, Odum (1996) indica que el agua aporta más emergía que la que es pagada para ella.

Hay diferentes aspectos del agua que han sido evaluados en estudios previos con enfoque en la emergía (Odum et al., 1987a; Odum et al., 1987b; Green, 1992; Brown and McClanahan, 1992; Doherty et al., 1993; Odum and Arding, 1991; Odum, 1996; Romitelli, 1997; Brandt-Williams, 1999; Howington, 1999). “Estos aspectos son: a. energía química potencial, b. energía geopotencial, c. nutrientes, sólidos suspendidos y disueltos presentes en el agua, y d. la capacidad del agua de asimilar residuos.” (Buenfil, 2001, p. 2).

Como se puede apreciar en las definiciones dadas en este capítulo, es muy importante tener noción de los tópicos esenciales que proporcionan un enfoque analítico para determinar la sostenibilidad de los sistemas lénticos desde la perspectiva de la economía ecológica. Se abordaron ventajas y desventajas de utilizar la emergía y la huella hídrica, cuyas aplicaciones son relativamente recientes, por consiguiente, conforman un área de estudio con alto potencial de investigación científica.

## **2. METODOLOGÍA**

El estudio de investigación se divide en dos partes fundamentales: determinación de la huella hídrica para cuerpos lénticos y el análisis de sistemas hídricos a través de métodos emergéticos. Ambas metodologías se aplicaron a la cuenca del lago de Atitlán como caso de estudio. La metodología propuesta para realizar el análisis de sistemas lénticos desde la perspectiva de la economía ecológica, se describe a continuación.

### **2.1. Descripción de la metodología para determinar la huella hídrica**

En relación con el objetivo principal de la investigación, el cual se basa en el estudio del comportamiento del lago de Atitlán, a partir de indicadores de economía ecológica, se realiza un estudio de alcance explicativo, con diseño de investigación no experimental, para determinar indicadores de la economía ecológica en función de variables independientes identificadas.

La primera parte de la investigación inicia con la determinación de la huella hídrica, basándose en el proceso que se describe en los siguientes subcapítulos.

#### **2.1.1. Fases de la evaluación de huella hídrica en un sistema léntico**

La metodología desarrollada en esta investigación se basa en la propuesta metodológica descrita en la publicación *The Water Footprint Assesment* (Hoekstra y Mekonnen, 2011), en la cual se describen cuatro fases para obtener, cuantificar y analizar la huella hídrica para cualquier proceso:

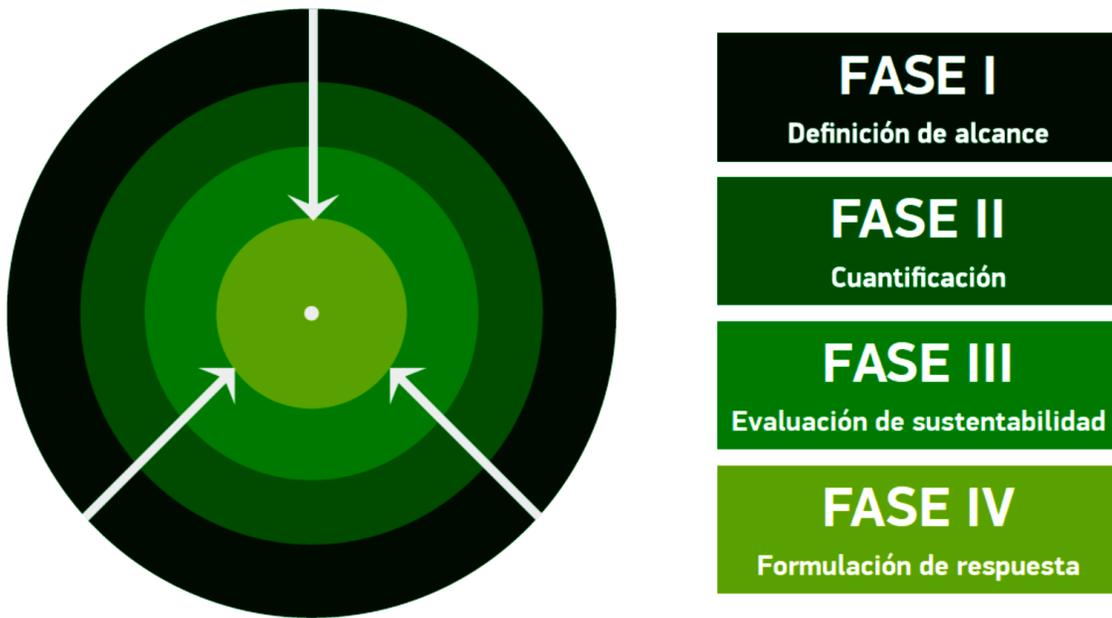


Figura 5. Fases para evaluar la huella hídrica. Adaptado de Uribe y Campuzano (2013, p. 23).

#### **2.1.1.1. Fase I. Definición de alcance**

A partir de lo que se indica en la figura 5, para el desarrollo de este trabajo, se siguió el proceso mostrado, tomando como primera acción la definición de objetivos y alcances del estudio, entre los cuales están:

1. Delimitación geográfica
2. Tipos de procesos analizados (sector agrícola, pecuario, urbano, entre otros).
3. Productos o procesos que se incluyen para la cuantificación de huella hídrica.
4. Definición de límites del estudio (carencia de información en ciertos ámbitos, base de datos climáticas desactualizadas, entre otros).

Las actividades siguientes son fundamentales en la fase I, la cual incluye la definición del alcance y obtención de información para la cuantificación de la huella hídrica.

- a) **Definición del área de estudio:** en este punto es requerida la identificación y delimitación del área a estudiar, que en este caso es la cuenca de Atitlán. Debido a que es una cuenca hidrográfica de mucho interés, se requiere tener una zonificación hidrológica para identificar el área de estudio, lo cual se puede realizar a través de sistemas de información geográfica.
  
- b) **Descripción del alcance del proyecto:** el paso siguiente, luego de identificar y delimitar el área de estudio, es determinar el alcance en cuanto a actividades y sectores que se tomarán en consideración para aplicar la huella hídrica. En un área determinada se pueden presentar diversas actividades económicas y de subsistencia tales como agricultura, piscicultura, usos recreacionales, actividades urbanas, actividades pecuarias, entre otras. Dichas actividades generan impactos de forma directa o indirecta en el recurso hídrico, de tal manera que se hace importante delimitar cuáles áreas o actividades serán incluidas en la determinación de la huella hídrica, tomando en consideración el acceso a la información que permita llevar a cabo todos los procesos de forma adecuada.
  
- c) **Definición de la escala de trabajo:** esto se refiere a determinar espacial y temporalmente lo que se trabajará. Por ejemplo, para la cuenca que subtiende el lago de Atitlán, ya que es relativamente grande, se tiene que ciertos datos no son homogéneos debido a posibles variaciones en aspectos climatológicos e hidrológicos; por consiguiente, se recomienda

la disminución de escalas de trabajo con el fin de mermar la posible heterogeneidad en el manejo de información.

- d) Identificación de fuentes secundarias de información:** se debe identificar y delimitar qué actores intervienen de forma directa en el área de influencia de la cuenca y de los cuales se derive información de importancia significativa. Los actores podrían ser autoridades gubernamentales, regionales, locales, del sector privado o público que sean de interés para la zona de estudio definida.
  
- e) Recolección de información primaria:** en algunas investigaciones las fuentes de información secundaria suelen ser débiles o poco confiables en cuanto a la información que se recolecta; por consiguiente, hay que identificar la información que puede ser recolectada con bastante confiabilidad, analizándola estadísticamente cuando se pueda. Entre esta información se incluye: caracterizaciones, encuestas, observaciones específicas, talleres, entre otros.
  
- f) Análisis de confiabilidad de la información:** “toda la información recopilada debe ser analizada con el fin de verificar su confiabilidad y así garantizar que los resultados obtenidos en el indicador de huella hídrica sean lo más acertado posible” (Uribe y Campuzano, 2013, p. 21). El análisis de confiabilidad cuando se trata de información obtenida en estudios de otros autores, se debe sustentar técnicamente por qué utilizar dicha información y por qué es importante para la obtención de la huella hídrica.

Posteriormente, se continúa con la fase II (indicada en la figura 5) que consiste en la cuantificación explícita de los componentes incluidos en el estudio. En este caso se puede obtener el análisis de huella hídrica para diversos

sectores, sin embargo, se delimitó exclusivamente para el sector agropecuario y urbano.

Asimismo, para la cuantificación de la huella hídrica se requiere tomar en consideración los siguientes aspectos previo a realizar los cálculos respectivos.

- i. **Información de línea base:** se requiere delimitar la línea basal en cuanto a los parámetros que servirán para el cálculo de la huella hídrica de acuerdo con el área de estudio. En ciertas ocasiones la información que se encuentra relacionada con variables específicas es difícil de obtener; sin embargo, la información que se obtenga debe servir para iniciar una línea base.
- ii. **Información hidro-climática:** se debe obtener información relacionada con variables climáticas que sirvan para la determinación de la huella hídrica. Se requiere que la información provenga de alguna institución que esté acreditada para ello, como el caso de INSIVUMEH en Guatemala. También se pueden tomar en cuenta instituciones que poseen registros hidroclimáticos en diversas zonas como el Instituto Nacional de Electrificación –INDE-.
- iii. **Información social y económica:** para calcular la huella hídrica se requiere obtener información socioeconómica de relevancia, la cual debe incluir todo el contenido necesario relacionado con los usos de suelo y usos del agua dentro de la cuenca o área de estudio delimitada.
- iv. **Información sectorial:** se refiere a la información relacionada con los sectores y actividades que se incluirán en el análisis. Se debe obtener y analizar la temática relacionada de las actividades que se desarrollan dentro de la cuenca y los impactos que ocasionan en el recurso hídrico.

### **2.1.1.2. Fase II. Cuantificación de la huella hídrica**

Para la cuantificación de la huella hídrica es necesario realizar el siguiente proceso metodológico.

#### **b. Metodología estándar de cálculo**

Cuando se utiliza el término de huella hídrica, la referencia que se hace es al impacto que causa cierta actividad antrópica, en función de la apropiación que se realiza de los recursos hídricos de una región geográfica específica. “Esta apropiación humana implica necesariamente una pérdida de disponibilidad, por ausencia de volumen de agua o por carencia de calidad mínima aceptable para ser utilizada” (Uribe y Campuzano, 2013, p. 23). En general, la huella hídrica está calculada en función de tres componentes: huella hídrica verde, azul y gris.

La huella hídrica verde se refiere al agua almacenada en el suelo que proviene de la precipitación, la cual no se convierte en escorrentía. En términos generales la huella hídrica verde cubre una demanda sin requerir intervención de origen antrópico.

La huella hídrica azul se refiere al agua extraída de una fuente superficial y/o subterránea que cubre una demanda para un proceso específico. Esta huella representa de forma directa la intervención antropogénica.

La huella hídrica azul se refiere al volumen de agua dulce (ríos, estuarios, lagos, lagunas, o cualquier otro cuerpo hídrico no salobre ni salado) que se necesita para asimilar los contaminantes que se vierten en los cuerpos receptores. La asimilación de la carga contaminante se determina en función de

las normas de calidad ambiental. Para el caso de Guatemala se referencia a lo estipulado en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 y su reforma a través del Acuerdo Gubernativo 110-2016 que se refieren al “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”.

La metodología estándar propuesta por Uribe y Campuzano (2013) implica el conocimiento de las cualidades que “tienen los fenómenos físicos asociados a un proceso humano para que se consideren como causa de pérdida de disponibilidad, de forma que, para cualquier actividad humana, pueda ser estimada una huella hídrica mayor o menor, según la naturaleza del fenómeno a estudiar” (p. 23).

Cuando se estima la contaminación de un cuerpo hídrico, se debe analizar la fuente de la misma, la cual puede presentarse de forma difusa o puntual.

A continuación, se describe la metodología que se aplica para la determinación de la huella hídrica en esta investigación:

### **c. Metodología para el sector agrícola**

Para la determinación de la huella hídrica azul y verde del sector agrícola (cultivos), se calcula como el uso del agua para los cultivos ( $m^3/ha$ ), dividido entre el rendimiento del cultivo respectivo ( $ton/ha$ ), de tal manera que se obtiene la huella en ( $m^3/ton$ ).

Esta metodología es aplicable a los cultivos extensivos, transitorios y anuales. Las plantaciones forestales se consideran como cultivos perennes o extensivos.

“El uso del agua del cultivo depende tanto de las necesidades de agua como de la cantidad real de agua disponible en el suelo” (Castelli, et al.,2012, p. 16).

Para la determinación de la huella hídrica verde se requiere obtener el uso del agua en el cultivo (*crop water use* –CWU-) y este valor se divide entre el rendimiento del cultivo (*crop yield* –Y-):

$$HH_{\text{cultivo.verde}} = \frac{CWU_{\text{verde}}}{Y} \quad (1)$$

Para determinar el valor correspondiente a la huella hídrica azul se requiere obtener el uso del agua en el cultivo exclusivamente proveniente del riego, y se calcula el valor de forma similar que la huella hídrica verde:

$$HH_{\text{cultivo.azul}} = \frac{CWU_{\text{azul}}}{Y} \quad (2)$$

El valor correspondiente al uso del agua verde ( $CWU_{\text{verde}}$ ) se refiere al volumen de agua de lluvia que se evapora en un campo de cultivo durante el período de crecimiento.

Por otro lado, el valor del uso de agua azul ( $CWU_{\text{azul}}$ ) se refiere al volumen de agua requerida para riego, que se extrae de la superficie o en el subsuelo, y posteriormente se evapora durante el período de crecimiento.

En este sentido, la forma de determinar los valores correspondientes al uso del agua verde y de agua azul es como se indica a continuación.

$$CWU_{\text{verde}} = \sum_{d=1}^{l_{gp}} 10 \times ET_{\text{verde}} \quad (3)$$

$$CWU_{\text{azul}} = \sum_{d=1}^{\text{lgp}} 10 \times ET_{\text{azul}} \quad (4)$$

Donde:

CWU = uso del agua del cultivo (*Crop Water Use*)

lgp = duración del periodo de crecimiento del cultivo (Length of the growing period)

ET = evapotranspiración

El valor correspondiente a la evapotranspiración de agua verde se refiere al requerimiento hídrico del cultivo que es cubierto por medio de la precipitación efectiva. En términos de aprovechamiento del agua de lluvia, se sabe que no toda la lluvia que precipita es utilizada al 100% en un proceso de cosecha, sino solamente un porcentaje; este aprovechamiento parcial del agua que precipita se le conoce como “precipitación efectiva”.

El dato que corresponde a la evapotranspiración de agua azul se refiere al requerimiento de riego a través de una irrigación efectiva. De la misma forma que la precipitación no es absorbida al 100% por la vegetación, sucede lo mismo con la irrigación que se realiza, ya que, dependiendo de las condiciones del suelo, así como de la clase de cultivo que se trate, así será el porcentaje de absorción del agua.

El cálculo del requerimiento hídrico del cultivo se debe estimar a partir de “las variables que determinan el comportamiento del entorno: clima, precipitación, suelo” (Uribe y Campuzano, 2013, p. 26).

En la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos que se analizan en una cuenca específica, se emplea el modelo CROPWAT de la

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura –FAO– por sus siglas en inglés (*Food and Agriculture Organization*).

Para iniciar con el cálculo del requerimiento hídrico del cultivo –CWR– (*Crop Water Requirement*), se debe calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo ( $ET_o$ ) en milímetros por día (mm/día) a través del método FAO Penman-Monteith. Posteriormente, se calcula la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) utilizando la ecuación siguiente:

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (6)$$

Donde

$ET_c$  = evapotranspiración del cultivo

$ET_o$  = evapotranspiración de referencia

$K_c$  = coeficiente del cultivo

De acuerdo con Allen et al. (2006, p. 15), el método de FAO Penman-Monteith actualmente “se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia. El método de FAO Penman-Monteith requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento.”

La ecuación de FAO Penman-Monteith se describe de la siguiente manera:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

Donde:

$ET_o$  = evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$R_n$  = radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$G$  = flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$T$  = temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$u_2$  = velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )

$e_s$  = presión de vapor de saturación (kPa)

$e_a$  = presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$  = déficit de presión de vapor (kPa)

$\Delta$  = pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$  = constante psicométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

La determinación de la evapotranspiración de referencia utilizando la ecuación FAO Penman-Monteith se hace fácil, ya que el propio *software* de la FAO "CROPWAT" lo calcula ingresando la información básica requerida.

Con la información establecida para cada cultivo, se determina el valor correspondiente al requerimiento hídrico del cultivo (CWR) de la forma siguiente:

$$\text{CWR} = \sum ET_c \quad (8)$$

La sumatoria de todos los requerimientos hídricos de los cultivos del área de estudio conllevan a la determinación del requerimiento hídrico total.

Para determinar el requerimiento de riego, el cual se utiliza para la determinación de la huella hídrica azul, se realiza el cálculo restando la lluvia efectiva al requerimiento hídrico del cultivo (CWR).

La huella hídrica gris (huella por contaminación) del sector agrícola se establece como la cantidad de agua que se requiere para asimilar en el cuerpo hídrico el contaminante que se requiera. “Se calcula como la división entre la carga másica y la diferencia entre el límite máximo permitido y la concentración natural de ese compuesto en el cuerpo de agua” (Castelli, et al., 2012, p. 16).

Los contaminantes que se presentan comúnmente en los cultivos son los fertilizantes y pesticidas. En Guatemala, la información relacionada con uso de pesticidas no está vastamente documentada, por ello en la presente investigación se calcula la huella hídrica por contaminación agrícola en función del nitrógeno.

Como indica Castelli et al. (2012), para hacer más fácil el cálculo, la carga másica se iguala a la multiplicación de la tasa de aplicación del compuesto que se trate –AR- (*Application rate* por sus siglas en inglés) y un factor adimensional denominado alfa ( $\alpha$ ), que para el caso de nitrógeno se utiliza un valor del 10%.

La ecuación que permite estimar el valor correspondiente a la huella hídrica gris es la siguiente:

$$WF_{gris} = \frac{(\alpha * AR)(C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (9)$$

Donde:

$\alpha$  = factor adimensional que está en función de un producto en específico

AR = tasa de aplicación del producto que se trate

$C_{max}$  = concentración máxima del producto o contaminante de acuerdo con normas o legislación vigente en el país.

- $C_{nat}$  = concentración natural del producto o contaminante de acuerdo con estudios previos realizados en el cuerpo hídrico receptor del efluente del proceso en estudio.
- $Y$  = rendimiento del cultivo.

El valor correspondiente a la tasa de aplicación del producto se puede obtener de los datos de la FAO indicados en el boletín número 56 que lleva por nombre “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.” La determinación de la huella hídrica gris puede obtenerse de una segunda manera, como se indica a continuación:

$$HH_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad (10)$$

Donde:

$L$  = cantidad de fertilizante aplicado (kg/ha)

$HH_{gris}$  = huella hídrica gris de un producto agrícola específico ( $m^3/ha$ )

$C_{max}$  = concentración máxima permisible de nitrógeno en el agua ( $kg/m^3$ )

$C_{nat}$  = concentración natural del nitrógeno en el agua ( $kg/m^3$ )

Como lo expresa Uribe et al. (2013, p.27): el valor obtenido en el cálculo anterior corresponde a la huella hídrica gris de un producto agrícola en una hectárea cultivada; sin embargo, es necesario dividir este valor por el rendimiento del cultivo ( $t/ha$ ) para hacer comparable la huella hídrica gris con la huella hídrica azul y la verde.

#### **d. Metodología para el sector doméstico (urbano)**

Para este estudio se utiliza el volumen de agua diaria en función del número de habitantes dentro de la cuenca. Se asume un valor de dotación en litros por habitante por día. Se asume que el agua que se distribuye en los poblados situados dentro de la cuenca, es extraída de la superficie o proviene de agua subterránea.

“El cálculo de la huella hídrica azul está dado por la sumatoria de la huella hídrica azul de la etapa de potabilización, distribución y consumo por los usuarios.” (Uribe y Campuzano, 2013, p. 34). El cálculo de la huella hídrica azul para el sector doméstico se realiza de la siguiente forma:

$$HH_{\text{azul. doméstica}} = 0.365(Población * Dotación) \quad (11)$$

Donde:

HH<sub>azul.doméstica</sub> = huella hídrica azul para el sector doméstico (m<sup>3</sup>/año)

Población = habitantes de la región en estudio (habitantes)

Dotación = cantidad determinada consumida diariamente por cada habitante de la región analizada. (Litros/habitante/día)

En cuanto al cálculo de la huella hídrica gris para el sector doméstico se realiza la evaluación de cada una de las concentraciones (C) de los contaminantes más relevantes de las aguas residuales de origen doméstico:

- a. Sólidos suspendidos totales –SST- (mg/L)
- b. Nitrógeno total (mg/L)

Otra etapa importante que debe tomarse en consideración es la opción a alcantarillado y procesos de tratamiento de aguas residuales previo a verter las aguas en un cuerpo hídrico. La ecuación que permite el cálculo de la huella hídrica del sector doméstico es la que se establece a continuación:

$$HH_{gris} = \sum \frac{Q_{vertido} * C_{vertimiento}}{C_{max} - C_{nat}} \quad (12)$$

Con la ecuación anterior se puede obtener la cantidad de agua que se requiere para asimilar la carga contaminante proveniente del uso hídrico para el sector doméstico.

### **2.1.1.3. Fase III. Evaluación de sostenibilidad**

Posterior a la cuantificación de la huella hídrica por cada sector analizado, se requiere realizar una evaluación de sostenibilidad desde la perspectiva ambiental, analizando futuros escenarios en cuanto al uso de los recursos dentro de la cuenca, garantizando que las generaciones venideras tengan acceso a recursos naturales de buena calidad y en la cantidad apta para su subsistencia.

Es decir, que en esta fase se realiza el análisis de la huella hídrica desde la perspectiva del desarrollo sostenible, para cada componente analizado, desde un contexto ambiental.

### **2.1.1.4. Fase IV. Formulación de propuestas**

Finalmente, se debe realizar la fase en la que se proponen estrategias que conlleven a la creación o formulación de políticas públicas, ambientales, municipales y regionales en pro del ambiente y del recurso hídrico.

El nivel de propuesta se realiza en función de que el recurso analizado a través de la huella hídrica pueda ser sustentable espacial y temporalmente. En el caso de la presente investigación se elaboran propuestas fundamentadas para que las autoridades competentes tomen acciones para garantizar el desarrollo sostenible en la región que subtiende la cuenca en estudio.

La aplicación y el posterior análisis, correspondientes a las fases III y IV descritas en este proceso metodológico, se realizarán en la parte de resultados y análisis de los mismos en el presente trabajo de investigación.

## **2.2. Descripción de la metodología para realizar análisis emergéticos en cuerpos hídricos**

La segunda parte de análisis, desde la perspectiva de la economía ecológica de este estudio, comprende el análisis emergético de cuerpos lénticos, para lo cual se realizará el proceso que se describe a continuación.

### **2.2.1. Metodología para realizar análisis emergético**

De acuerdo con la planificación requerida para esta investigación científica, se presentan los siguientes lineamientos metodológicos que se necesitan para desarrollar estudios de esta índole.

Para determinar la arquitectura del ecosistema que representa un lago se utiliza el método de análisis emergético para obtener diagramas de flujo y tablas de evaluación emergética del cuerpo léntico que se esté analizando.

Posteriormente, se determina el flujo de materia y energía del ecosistema (cuenca en estudio), a través de análisis emergético, para finalmente determinar las densidades de potencia emergética y transformidades.

Luego, se determina la dinámica de estado del cuerpo hídrico en estudio a partir de indicadores emergéticos, obteniendo como resultado el análisis de índices emergéticos a nivel general.

En este sentido, se realizan los siguientes pasos para evaluar energéticamente un sistema léntico:

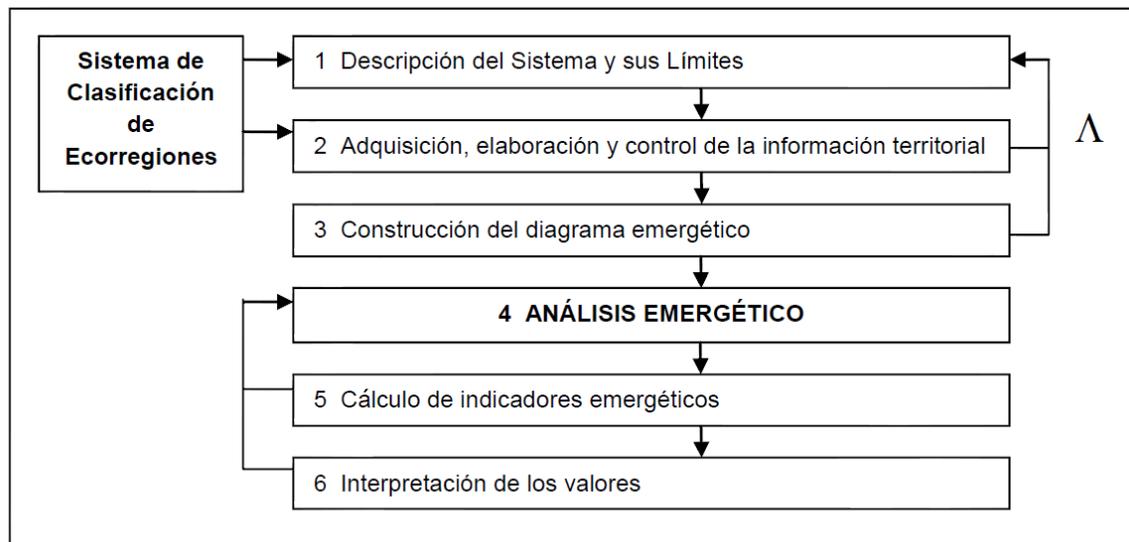


Figura 6. Etapas en la realización de análisis emergético. Adaptado de Sotomayor (2013, p. 37).

**Paso 1. Descripción del sistema y sus límites:** se requiere la delimitación del área de estudio; para ello se puede realizar una clasificación de las ecorregiones, utilizar una cuenca determinada o realizar encuadres de regiones desde la perspectiva político-administrativa.

## **Paso 2. Adquisición, elaboración y control de información territorial:**

se debe recopilar la información relativa al ecosistema o a la región que se desea analizar (cuerpos lénticos para el presente estudio investigativo). De esta forma se requiere conocer los parámetros o variables de interés.

### **Recursos naturales renovables no pagados**

- a. Área de la región a estudiar ( $m^2$ )
- b. Albedo (%)
- c. Lluvia o precipitación (m/año)
- d. Evapotranspiración (m/año)
- e. Escorrentía
- f. Gravedad ( $m/s^2$ )
- g. Densidad del agua ( $kg/m^3$ )
- h. Densidad del aire ( $kg/m^3$ )
- i. Promedio anual de la velocidad del viento (m/s)
- j. Viento geotrópico (m/s)

### **Recursos naturales no renovables no pagados**

- a. Tasa de erosión ( $gr/m^2/año$ )
- b. Materia orgánica (%)
- c. Contenido de energía por gramo orgánico (Kcal/gr)

### **Recursos naturales no renovables pagados**

- a. Fertilizante nitrogenado (gr)
- b. Fertilizante fosforado (gr)
- c. Electricidad (Kwh/año)

- d. Agua potable (m<sup>3</sup>)
- e. Comida en general (Kg)

De acuerdo con lo expresado por Sotomayor (2013, p. 38), se debe recopilar y elaborar la información “sobre la zona estudiada, para ello, mediante el sistema de clasificación de ecorregiones y entrevistas con autoridades o investigadores, se identificarán los elementos de origen natural y artificial, las diferentes relaciones entre ellos, los procesos y sistemas de producción.”

**Paso 3. Análisis emergético:** se realiza una tabla de evaluación emergética utilizando el software Microsoft Excel. En la tabla que se tabule se calculan los valores de emergía para cada actividad (renovable o no renovable, pagada o no pagada) que se esté analizando.

**Paso 4. Cálculo de indicadores emergéticos:** posteriormente a la realización de las tablas respectivas indicadas en el paso 4, se calculan los indicadores emergéticos tales como:

1. Índice de rendimiento emergético
2. Índice de inversión emergética
3. Índice de carga ambiental
4. Índice de sostenibilidad
5. Porcentaje de renovabilidad

**Paso 5. Interpretación de valores:** finalmente, cuando ya se hayan generado los cálculos de los indicadores emergéticos, se procede a interpretarlos de la forma siguiente:

**Índice de rendimiento energético –EYR-** (*Emergy yield ratio*, por sus siglas en inglés): se calcula dividiendo la emergía total y el valor de la emergía de los insumos comprados. Según Voora y Thrift (2010, p. 17), “sistemas con un EYR menor a uno son insostenibles.”

$$EYR = \frac{NP}{Y} \quad (13)$$

Donde:

NP = Recursos naturales no renovables pagados

Y = Densidad de potencia emergética

**Índice de inversión energética –EIR-** (*Emergy investment ratio*, por sus siglas en inglés): se calcula dividiendo el flujo emergético de los recursos renovables y no renovables que son pagados, dentro del flujo emergético de los recursos renovables y no renovables que no son pagados. La interpretación de este parámetro es que a valores más bajos son más sostenibles ya que dependen más de recursos que no provienen de la economía, en contraste con los que poseen un EIR más alto que indica que dependen mayormente de recursos provenientes de la economía.

$$EIR = \frac{NP+RP}{RR+NR} \quad (14)$$

Donde:

NP = Recursos naturales no renovables pagados

RP = Recursos naturales renovables pagados

RR = Recursos naturales renovables no pagados

NR = Recursos naturales no renovables no pagados

**Índice de carga ambiental –ELR-** (*Environmental loading ratio*, por sus siglas en inglés): es un índice de presión que el sistema ejerce sobre el medio ambiente, de tal manera que se le considera un índice que mide el estrés de los ecosistemas. De acuerdo con Brown y Ulgiati (2004) un ELR con valores inferiores a 2 indican un bajo impacto sobre el medio ambiente, valores entre 2 y 10 significan que el sistema causa un impacto moderado y mayor que 10 que el sistema causará un gran impacto en el medio ambiente.

$$EIR = \frac{NP+NR}{RR+RP} \quad (15)$$

Donde:

NP = Recursos naturales no renovables pagados

RP = Recursos naturales renovables pagados

RR = Recursos naturales renovables no pagados

NR = Recursos naturales no renovables no pagados

**Índice de sostenibilidad –ESI-** (*Emergy sustainability index*, por sus siglas en inglés): este índice establece la relación costo/beneficio de un producto o proceso en la economía en relación con el impacto que este cause al medio ambiente. Su interpretación es que a mayor valor, más sostenible es el ecosistema analizado.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (16)$$

Donde:

ESI = Índice de sostenibilidad

EYR = Índice de rendimiento emergético

ELR = Índice de carga ambiental

**Porcentaje de renovabilidad –R-** (Renewability, por sus siglas en inglés): un sistema con alto porcentaje de renovabilidad energética indica mayor sostenibilidad, es decir, que el sistema es capaz sobrevivir al estrés económico a diferencia de los sistemas que utilizan una gran cantidad de recursos no renovables. (Sotomayor, 2013).

$$R = \frac{RR+RP}{Y} \quad (17)$$

Donde:

RP = Recursos naturales renovables pagados

RR = Recursos naturales renovables no pagados

Y = Densidad de potencia energética

### **3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

En relación con la descripción metodológica explicada en el capítulo 2 del informe de esta investigación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar lo indicado en dicho capítulo.

#### **3.1. Evaluación de la huella hídrica**

Como se indicó anteriormente, esta investigación se divide en dos áreas, una relacionada con la evaluación de la huella hídrica y la otra relacionada con la aplicación de los métodos emergéticos para evaluar la sostenibilidad de sistemas lénticos. En este sentido, a continuación se presentan los resultados de la aplicación metodológica para evaluar la huella hídrica.

##### **3.1.1. Fase I. Definición del alcance general**

La primera fase para el desarrollo de la metodología de evaluación de la huella hídrica que se estableció para analizar la sostenibilidad de cuerpos lénticos (lagos), se aplica y describe a continuación.

##### **3.1.1.1. Objeto de estudio**

En este segmento se describe lo más relevante relacionado con el lago objeto de investigación, en este caso se analiza la cuenca que subtiende al lago de Atitlán. Dentro de la información descrita en este apartado están: zona de análisis, aspectos sociales y actividades económicas.

**a. La zona de análisis (lago a analizar)**

El lago de Atitlán se sitúa en el departamento de Sololá de la República de Guatemala. Se ubica a una altitud de 1565 metros sobre el nivel del mar (msnm). De acuerdo con Dix et al. (2012) el lago de Atitlán es de origen volcánico, localizándose dentro de una caldera de 85,000 años de edad (aproximadamente).

En el perímetro del lago se sitúan tres volcanes:

1. San Pedro, de aproximadamente 60,000 años desde su formación, con una elevación de 2,995 msnm.
2. Tolimán, de aproximadamente 30,000 años de edad, con una elevación de 3,158 msnm.
3. Atitlán, de aproximadamente 40,000 años de edad, con una elevación de 3,587 msnm.

“Más cerca al lago, de oeste al norte, se encuentran los restos de los volcanes Paquisís, Tecolote y San Marcos con edades de cerca de un millón de años.” (Dix, et al., 2012, p. 35).

De acuerdo con Azurdía (2014), la cuenca que subtiende el lago de Atitlán tiene una extensión de 541 kilómetros cuadrados, localizándose en las coordenadas 14°42' norte y 91°12' oeste.

El lago de Atitlán, en los últimos años, ha sufrido un proceso de eutrofización debido al aumento súbito de nutrientes (primordialmente nitratos y fosfatos), lo que ha generado el crecimiento de plantas acuáticas en su superficie.

## **b. Aspectos sociales**

De acuerdo con Dix et al. (2003), el departamento de Sololá ocupa el cuarto lugar a nivel nacional con mayor densidad demográfica, alcanzando los 250 habitantes por kilómetro cuadrado. Asimismo, Sololá representa el segundo departamento de menor extensión geográfica en el país. En este sentido, se torna un área de estudio compleja debido a que dentro del departamento que subtiende el lago de Atitlán hay una densidad poblacional alta (258,487 habitantes, según Suárez, 2011) y un área sin espejo de agua relativamente pequeña (54.1 km<sup>2</sup>); por consiguiente, se requiere mayor consumo de recursos naturales para la subsistencia y el afectado por toda esta actividad antrópica resulta ser el lago de Atitlán.

Los índices de desarrollo humano del departamento de Sololá reflejan la deplorable condición de pobreza en que viven los habitantes de dicho lugar. “Este nivel de pobreza explica que las prioridades de satisfacción de necesidades básicas influyen directamente en el tipo de uso y manejo que se da a los recursos naturales del área.” (Dix, et al., 2003, p. 93). Se agrega a esta difícil situación socioeconómica, la crisis social vivida en la época del conflicto armado que fue bastante intensa en la década de 1980 a 1989, así como las dificultades entre municipalidades, finqueros y campesinos, para determinar los límites de terrenos, tanto comunales como privados. Del total de la población, Dix et al. (2003) estiman que el 66.70 % de la población es rural, y el restante 33.30 % se considera urbana.

En cuanto a la situación económica del área de estudio, el departamento de Sololá (que subtiende el lago de Atitlán), representa el 2.5 % de la población económicamente activa del país (PNUD, 2000). Asimismo, se tiene que el 71.84 % de la población rural económicamente activa del departamento se dedica a

trabajar por cuenta propia o es familiar no remunerado, mientras que el 28.16 % es asalariado agrícola. (Dix et al., 2003). Aunque no existe ningún poblado con mayoría de habitantes “ladinos”, en casi todas las cabeceras municipales los habitantes son bilingües, ya que hablan castellano además de su idioma materno. De los municipios estudiados en el departamento, únicamente en San Lucas Tolimán se observa una minoría ladina de varias generaciones de habitar en el pueblo. Dix et al. (2003).

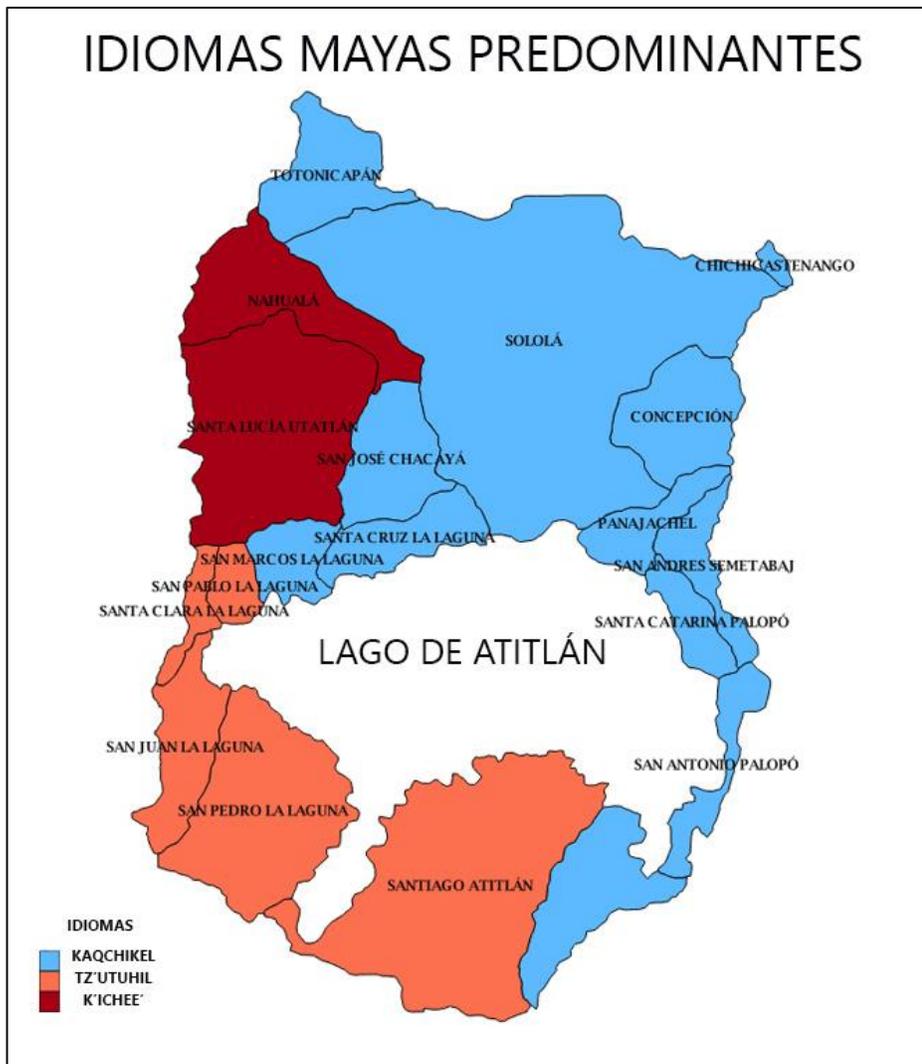


Figura 7. Idiomas de la región. Adaptado de Dix et al. (2003, p. 96).

La tasa de analfabetismo del departamento en 2012 era superior al 18 % (INE, 2013, p. 22), ocupando niveles bajos de alfabetismo a nivel nacional.

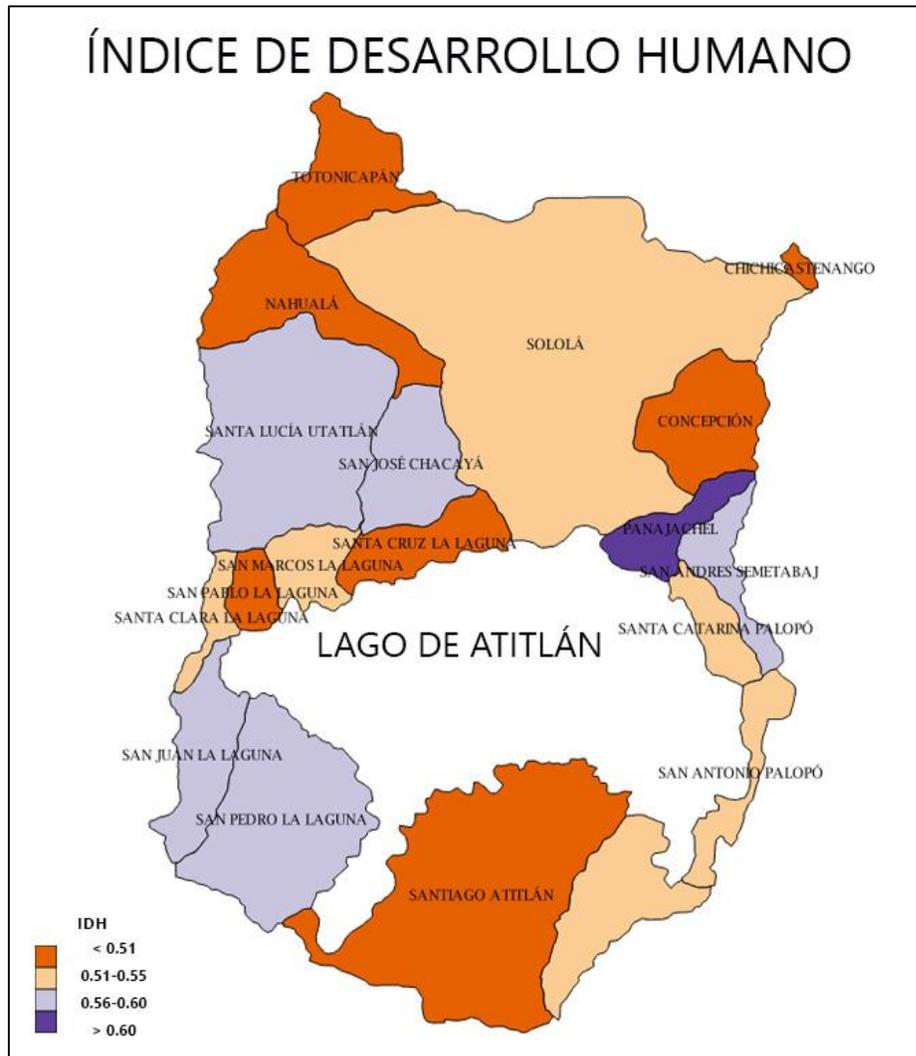


Figura 8. Índice de desarrollo humano (IDH). Adaptado de Dix et al. (2003, p.100).

### c. Actividades económicas

La población económicamente activa (PEA) se constituye de la manera siguiente: agricultura, 46 %; turismo, 18 %; y artesanías o industria manufacturera, 13 %. Todas estas actividades dependen de los recursos

naturales de la cuenca. (IARNA, 2015). “El lago Atitlán es un destino turístico importante para Guatemala y, con una cultura llena de tradición, colorido y vida, riqueza de biodiversidad y con respuestas marcadas a los cambios ambientales.” (Dix, et al., 2012, p. 36). Entre las actividades realizadas ante los cambios ambientales están: creación de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del lago de Atitlán y su Entorno –AMSCLAE-, instauración de comités para el desarrollo departamental y municipal, entre otros, con el fin de solventar las problemáticas coyunturales en relación con polución ambiental.

### 3.1.1.2. Alcance geográfico

De acuerdo con la descripción metodológica, es importante definir el área de estudio para la aplicación de los estudios de determinación de la huella hídrica y de la aplicación de análisis emergéticos para sistemas lénticos. En este caso se delimita el área de estudio al lago de Atitlán y la cuenca que lo subtiende, contando con la siguiente información relevante.

Tabla II. **Identificación del área de estudio (cuenca Atitlán)**

<b>Característica</b>	<b>Descripción o valor</b>
Cuenca	Atitlán
Municipios	19
Departamentos	3
Área	54,100 ha
Porcentaje del área en el país	0.5 %
Vertiente	Océano Pacífico
Disponibilidad total	333 millones de metros cúbicos

Fuente: elaboración propia con base en Suárez (2011).

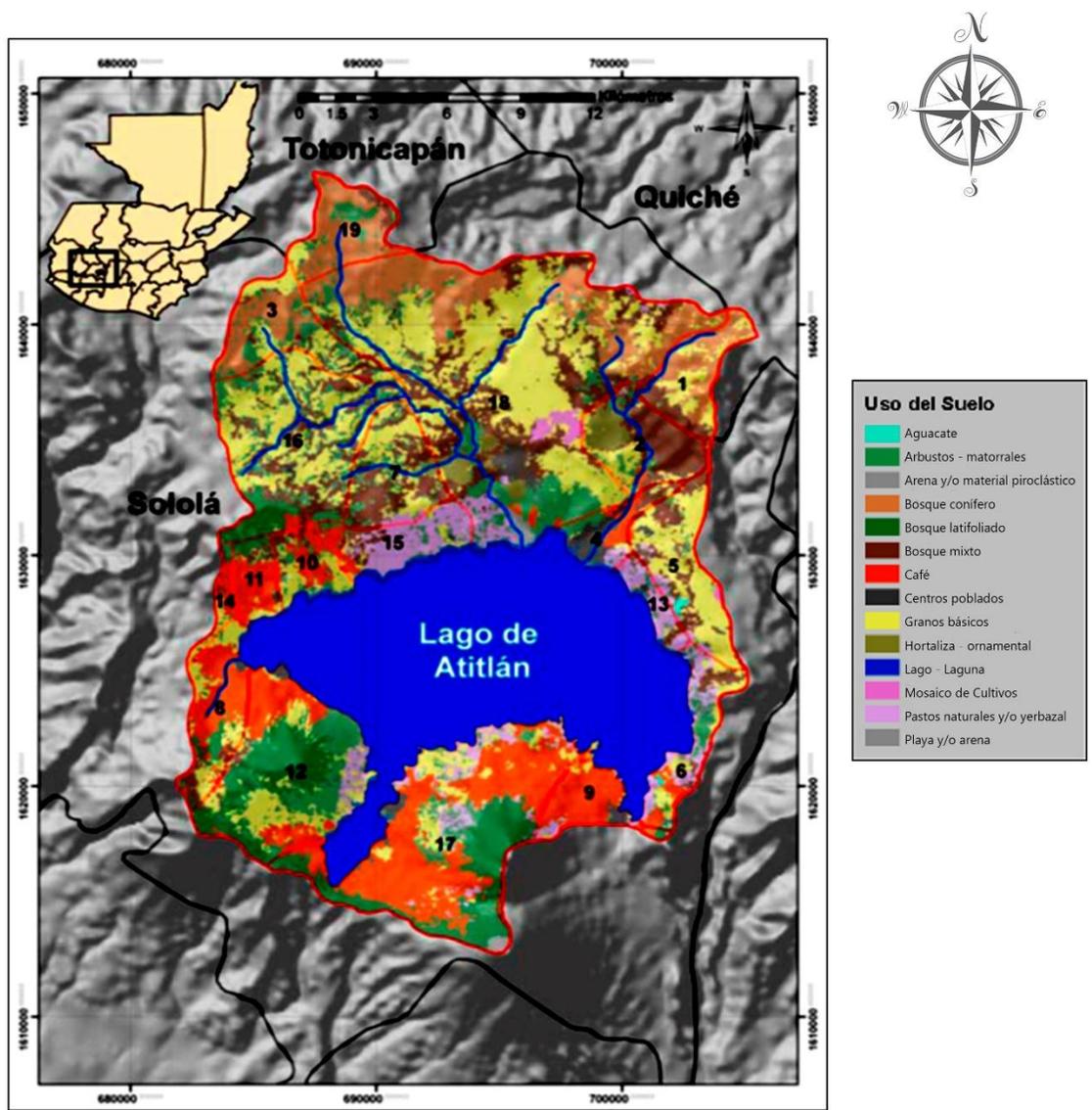


Figura 9. Cuenca del lago de Atilán. Adaptado de Suárez (2011, p.13).

De la figura anterior se obtienen los datos relevantes que se muestran en la siguiente tabla, los cuales servirán en la aplicación metodológica para la obtención de la huella hídrica y análisis emergético.

Tabla III. **Extensión territorial y población dentro de la cuenca de Atitlán**

No.	Departamento	Municipio	Área en hectáreas	Porcentaje del total de la cuenca	Población aprox. 2010
0	Sololá	Lago de Atitlán	11,965	22.12%	-
1	Quiché	Chichicastenango	1,153	2.13%	3,399
2	Sololá	Concepción	1,377	2.55%	5,783
3	Sololá	Nahualá	1,558	2.88%	3,352
4	Sololá	Panajachel	791	1.46%	14,985
5	Sololá	San Andrés Semetabaj	1,194	2.21%	5,617
6	Sololá	San Antonio Palopó	1,543	2.85%	10,114
7	Sololá	San José Chacayá	1,380	2.55%	3,737
8	Sololá	San Juan La Laguna	1,012	1.87%	5,122
9	Sololá	San Lucas Tolimán	2,506	4.63%	13,662
10	Sololá	San Marcos La Laguna	4,378	8.09%	3,472
11	Sololá	San Pablo La Laguna	628	1.16%	6,817
12	Sololá	San Pedro La Laguna	448	0.83%	17,147
13	Sololá	Santa Catarina Palopó	237	0.44%	4,524
14	Sololá	Santa Clara La Laguna	1,264	2.34%	8,728
15	Sololá	Santa Cruz La Laguna	1,061	1.96%	6,090
16	Sololá	Santa Lucía Utatlán	3,709	6.86%	18,725
17	Sololá	Santiago Atitlán	6,037	11.16%	39,827
18	Sololá	Sololá	10,670	19.72%	79,631
19	Totonicapán	Totonicapán	1,189	2.20%	7,755
<b>TOTAL</b>			<b>54,100</b>	<b>100.00%</b>	<b>258,487</b>

Fuente: elaboración propia, con base en Suárez (2011).

Como se puede observar en la tabla anterior, el mayor porcentaje de área dentro de la cuenca del lago de Atitlán corresponde al propio lago de Atitlán, aunado a los municipios de Sololá y Santiago Atitlán.

### **3.1.1.3. Alcance de información base**

En cuanto a la determinación de la huella hídrica para la cuenca de Atitlán, se utiliza de acuerdo con su uso de suelo, el cálculo de la huella hídrica para el sector agrícola y el de la huella hídrica para el sector doméstico, que son los que predominan en el área. El sector industrial, sector de generación de energía hidroeléctrica, y el sector minero no se consideran para el cálculo de la huella hídrica, ya que se carece de información de que existan dentro de la cuenca este tipo de actividades.

Las fuentes utilizadas para la determinación de la huella hídrica son las siguientes:

- a. **Parámetros climatológicos.** Se obtuvieron las bases de datos del INSIVUMEH, relacionadas con los siguientes parámetros: precipitación, temperatura media, temperatura promedio mínima, temperatura promedio máxima, humedad relativa, nubosidad, dirección del viento, velocidad del viento e insolación. Estos datos corresponden a los registros mensuales desde 1990 hasta el 2015, para tres estaciones meteorológicas ubicadas en el departamento de Sololá:
  2. El Capitán, que se localiza en el municipio de San Lucas Tolimán.
  3. Santiago Atitlán, que se ubica en el municipio de Santiago Atitlán.
  4. El Tablón, que se localiza en la circunscripción del municipio de Sololá.



Figura 10. Ubicación de las estaciones meteorológicas de Sololá.

Fuente: elaboración propia (captura de imagen de Google Earth, 2017).

b. **Usos de la tierra.** Se obtuvieron datos de mapas temáticos proveídos por publicaciones del Instituto Geográfico Nacional de Guatemala (2003). La clasificación del uso de la tierra de la cuenca del lago de Atitlán se muestra a continuación, a través de un mapa temático.

# MAPA DE ZONIFICACIÓN DE TIERRAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLÁN

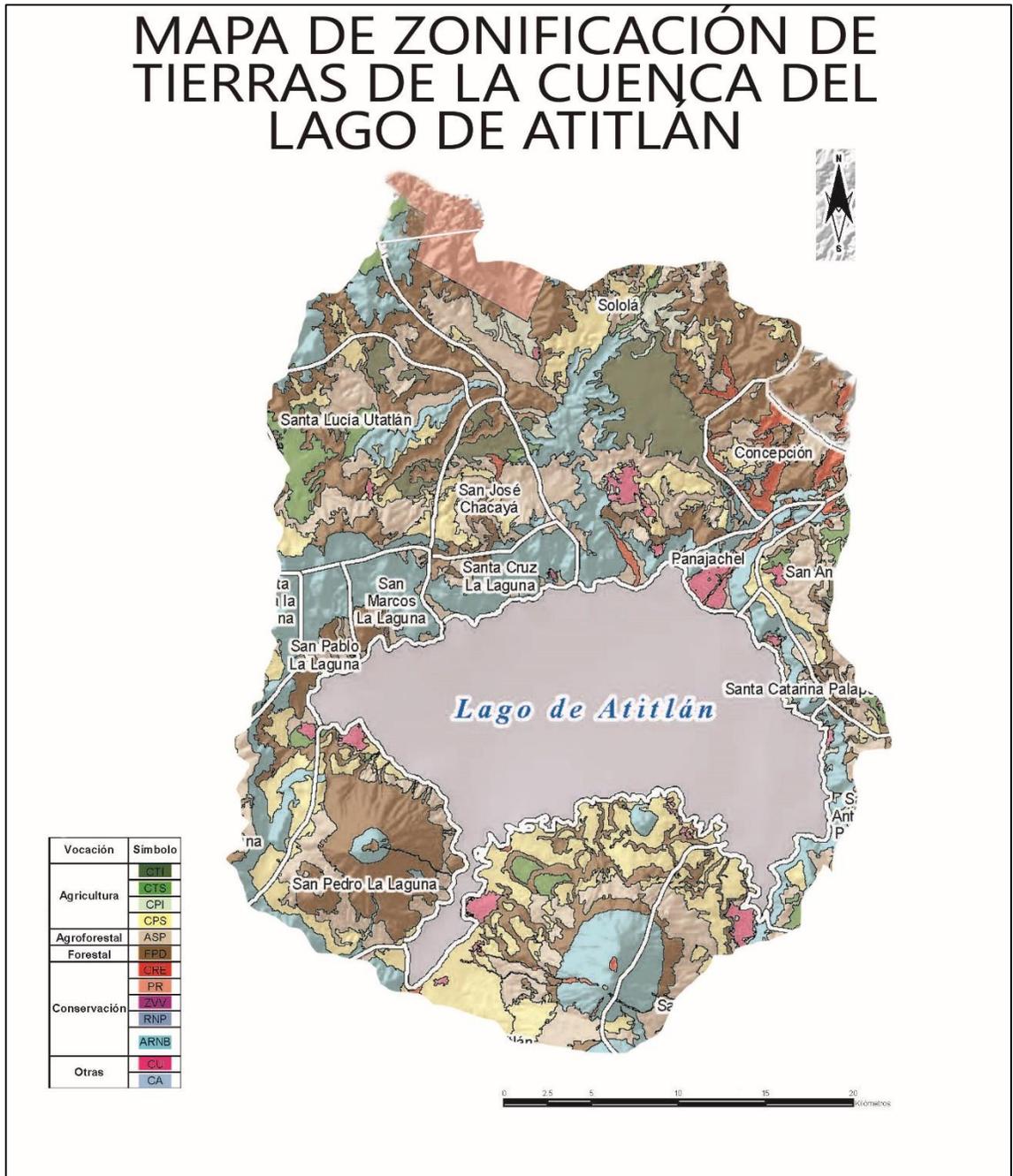


Figura 11. Usos del suelo del departamento de Sololá. Fuente: adaptado de MAGA (2012).

Tabla IV. Cobertura forestal de la cuenca de Atitlán, año 2006

Uso de la tierra	Área en hectáreas	Porcentaje
Lago	12,405	22.93%
Cultivos permanentes (granos básicos, café, mosaico de cultivos, aguacate y hortalizas)	18,548	34.28%
Bosques (mixto, conífero y latifoliado), arbustos y yerbazales	22,160	40.96%
Centros poblados	817	1.51%
Playa y/o arena	115	0.21%
Arena y/o material piroclástico	55	0.10%
<b>TOTAL</b>	<b>54,100</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: elaboración propia, con base en Suárez (2011).

Como puede observarse en la tabla IV, el mayor porcentaje de cultivos lo ocupan las siembras de granos básicos aunados a siembras de café. Es importante hacer mención que la cuenca de Atitlán se formó por movimientos tectónico-volcánicos, por lo que es una cuenca tipo caldera con pendientes muy pronunciadas que restringen diversos usos de suelo.

- c. **Tipo de suelo.** El tipo de suelo es fundamental para el cálculo de la huella hídrica agrícola, se obtuvo de mapas temáticos proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional de Guatemala (2003). La figura 12 muestra la clasificación taxonómica del suelo en el departamento de Sololá.

# MAPA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS A NIVEL DE ORDEN DE LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLÁN



Figura 12. Taxonomía del suelo del departamento de Sololá. Fuente: adaptado de MAGA (2012).

d. **Consumo de agua por los habitantes de la cuenca de Atitlán.** Se recolectaron datos relacionados con la captación y distribución de agua potable, así como la disposición de agua residual para el cálculo de la huella hídrica del sector doméstico. Los datos corresponden al volumen de agua potable que es obtenido por sistemas de acueductos, al caudal distribuido a los usuarios, y el efluente de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

#### **3.1.1.4. Instrumentos de medición**

En esta parte se hace constar que los datos utilizados dentro de la metodología para determinar la sostenibilidad de lagos desde la economía ecológica, son los que se obtuvieron de estudios previos y mediciones realizadas por entes gubernamentales y/o privados, que se dedican a la investigación científica o a la generación de información. A pesar de ello, se realiza a continuación un listado de los instrumentos que se utilizan en las estaciones meteorológicas para la obtención de información que proveyó para este estudio el INSIVUMEH.

Pluviómetro

Pluviógrafo

Higrógrafo

Termohigrógrafo

Termómetro de máxima

Termómetro de mínima

Termógrafo

Heliógrafo

Actinógrafo

Evaporímetro de Piche

Tanque de evaporación

Anemocinemógrafo

Anemógrafo

Las especificaciones de los equipos utilizados por INSIVUMEH varían de acuerdo con los proveedores respectivos. En este estudio se utilizaron los datos proporcionados por dichos instrumentos, publicados por INSIVUMEH.

#### **3.1.1.5. Software requerido**

Se utilizó el *software* CROPWAT 8.0 de la FAO, que puede ser descargado de la *WEB* de forma gratuita y con el cual es posible la determinación de la huella hídrica azul y verde del sector agrícola. El uso de Microsoft Excel se torna importante para el desarrollo de cálculos, gráficas y tablas que sirven para el análisis de la huella hídrica en una cuenca específica, para determinar la sostenibilidad de un cuerpo léntico.

### **3.1.2. Fase II. Cuantificación de la huella hídrica**

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la cuantificación de la huella hídrica en la cuenca del lago de Atitlán.

#### **3.1.2.1. Sector agrícola**

El requerimiento que hace CROPWAT 8.0 para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se muestra en la siguiente figura. En caso no se cuente con información relacionada con insolación, CROPWAT 8.0 permite calcular esta variable en función de la latitud y longitud (coordenadas georeferenciadas).

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m <sup>2</sup> /día	ETo mm/día
Enero							
Febrero							
Marzo							
Abril							
Mayo							
Junio							
Julio							
Agosto							
Septiembre							
Octubre							
Noviembre							
Diciembre							
Promedio							

Figura 13. Registro de información climática para CROPWAT 8.0.

Fuente: elaboración propia (captura de imagen del *software* CROPWAT 8.0).

De acuerdo con la figura 13, los datos que se deben ingresar se muestran en casillas en color blanco, para que el programa realice los cálculos pertinentes y determine resultados parciales en las casillas que se muestran en color amarillo, que corresponden a la radiación y la evapotranspiración de referencia.

En este sentido, se muestran a continuación los datos obtenidos del promedio anual de 18 años (desde 1994 al 2015) de las variables climáticas correspondientes.

Tabla V. **Datos climáticos en la cuenca del lago de Atilán (1994-2015)**

Mes	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Humedad (%)	Viento (Km/día) *	Insolación (horas)
Enero	9.2	23.5	73	206	8.6
Febrero	9.5	24.0	73	205	8.6
Marzo	10.2	24.0	75	185	8.1
Abril	11.9	24.0	79	157	6.3
Mayo	13.2	23.5	83	148	5.1
Junio	13.4	23.2	85	138	4.7
Julio	13.2	23.9	78	167	6.3
Agosto	12.9	24.0	82	142	6.0
Septiembre	12.9	23.1	86	135	4.9
Octubre	12.1	23.3	84	137	10.4
Noviembre	11.1	23.5	77	183	7.1
Diciembre	10.0	23.3	74	199	8.3

\* La velocidad del viento se tomó en Km/hora y se convirtió a Km/día para el desarrollo de la metodología.

Fuente: elaboración propia, con datos de INSIVUMEH (1994 a 2015).

Luego de ingresar los datos requeridos, *CROPWAT 8.0* transforma la información y proporciona los valores de evapotranspiración de referencia.

The screenshot shows the 'ETO Penman-Monteith Mensual' window in CROPWAT 8.0. The input fields are: País: Guatemala, Estación: varias atilán, Altitud: 1500 m., Latitud: 14.70 °N, Longitud: 91.12 °W. The resulting table is as follows:

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	9.2	23.4	73	206	8.6	18.8	3.46
Febrero	9.5	23.9	73	205	8.6	20.4	3.80
Marzo	10.2	24.0	75	185	8.1	21.2	3.94
Abril	11.9	24.0	79	157	6.3	19.2	3.64
Mayo	13.2	23.5	83	148	5.1	17.3	3.31
Junio	13.4	23.2	85	138	4.7	16.6	3.14
Julio	13.2	23.9	78	167	6.3	19.0	3.69
Agosto	12.9	24.0	82	142	6.0	18.6	3.52
Septiembre	12.9	23.1	86	135	4.9	16.5	3.06
Octubre	12.1	23.3	84	137	10.3	23.2	3.81
Noviembre	11.1	23.5	77	183	7.1	17.1	3.19
Diciembre	10.0	23.3	74	199	8.3	17.8	3.28
Promedio	11.6	23.6	79	167	7.0	18.8	3.49

Figura 14. Datos ingresados en CROPWAT 8.0 para obtener los valores de radiación y evapotranspiración de referencia. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se procede a tabular la información de precipitación en el área de estudio (cuenca del lago de Atitlán):

Tabla VI. **Datos de precipitación promedio (milímetros) en la cuenca del lago de Atitlán (1994-2015)**

Mes	Precipitación (mm)
Enero	2.9
Febrero	6.6
Marzo	15.6
Abril	48.8
Mayo	166.2
Junio	273.5
Julio	163.8
Agosto	167.1
Septiembre	242.7
Octubre	171.1
Noviembre	44.5
Diciembre	15.4

Fuente: elaboración propia, con datos de INSIVUMEH (1994 a 2015).

The screenshot shows the CROPWAT software interface. The title bar reads "Precipitación mensual - C:\ProgramData\CROPWAT\data\rain...". Below the title bar, there is a field for "Estación" with the value "Varias Atitlán" and a dropdown for "Método Prec. Ef" set to "Fórmula FAO/AGLW". The main data table is as follows:

	Precipit.	Prec. efec
	mm	mm
<b>Enero</b>	2.9	0.0
<b>Febrero</b>	6.6	0.0
<b>Marzo</b>	15.6	0.0
<b>Abril</b>	48.8	19.3
<b>Mayo</b>	166.2	109.0
<b>Junio</b>	273.5	194.8
<b>Julio</b>	163.8	107.0
<b>Agosto</b>	167.1	109.7
<b>Septiembre</b>	242.7	170.2
<b>Octubre</b>	171.1	112.9
<b>Noviembre</b>	44.5	16.7
<b>Diciembre</b>	15.4	0.0
<b>Total</b>	<b>1318.2</b>	<b>839.5</b>

Figura 15. Precipitación efectiva (mm) calculada con el software CROPWAT

8.0. Fuente: elaboración propia (captura de imagen CROPWAT 8.0).

Con el programa CROPWAT 8.0 se puede calcular la precipitación efectiva de acuerdo con 4 formas posibles: porcentaje fijo, precipitación confiable (fórmula propuesta por la FAO), fórmula empírica y precipitación efectiva a través de la fórmula del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). Para el desarrollo metodológico de esta investigación se usó el método de precipitación confiable de la FAO.

Luego se requiere ingresar en CROPWAT 8.0, información relacionada con el tipo de siembra que hay en el área a analizar. En este caso se utilizó un valor promedio de granos, ya que según se indica en la tabla IV hay uso mixto entre granos básicos, café, hortalizas, entre otros. De tal manera que se utilizó un valor promedio dado en la base de datos de CROPWAT 8.0 para analizar granos pequeños.

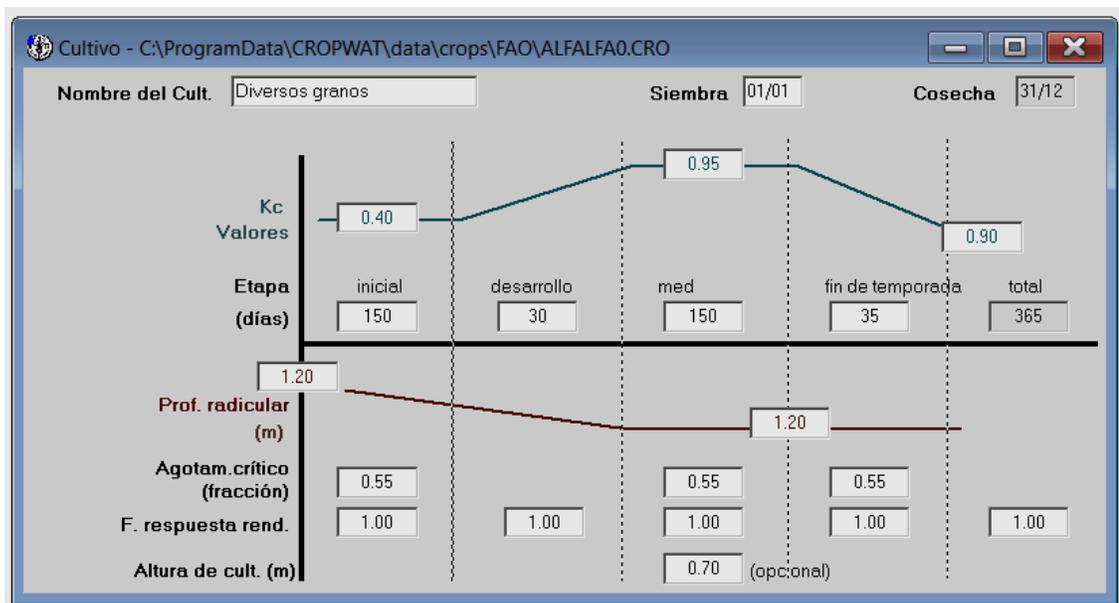


Figura 16. Cultivos dentro del área de estudio, utilizando información de la FAO, a través de CROPWAT 8.0.

Fuente: elaboración propia (captura de imagen CROPWAT 8.0).

Como puede notarse en la figura 16, hay ciertos valores que CROPWAT 8.0 calcula de forma automática aplicando los algoritmos característicos de este *software*. A continuación, se muestra una breve definición de cada variable calculada que se establece en la figura en mención.

- a. Coeficiente único del cultivo ( $K_c$ ): es un coeficiente adimensional que se asigna a cada cultivo tomando sus características importantes como periodos de siembra y cosecha (etapa de crecimiento), los que a su vez dependen de ciertas características climáticas y de suelo. Puede tener una variación típica de aproximadamente 0.3 al inicio del crecimiento hasta un valor de 1.0 durante la etapa media. Este valor es esencial para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo indicada en la literal b del numeral 2.1.1.2 de este informe.
- b. Profundidad radicular: se refiere a la profundidad a la que se encuentran las raíces de una planta específica. Generalmente se dimensiona en metros.

Los valores de factor de agotamiento crítico, factor de respuesta de rendimiento y la altura de cultivo son variables que dependen del tipo de planta; sin embargo, para esta metodología se utilizaron los valores proporcionados por el *software* CROPWAT 8.0 para granos pequeños.

Posterior a la obtención de los valores correspondientes a los cultivos que se presentan dentro de una región específica que se estudie, se procede a identificar las características relevantes de los tipos de suelo. Tomando en consideración un suelo promedio, se utilizó el valor medio propuesto por la FAO para la aplicación de CROPWAT 8.0, de tal manera que se obtiene la siguiente figura que muestra los datos identificados para este tipo de suelo:

Datos generales de suelo		
Nombre del suelo	Suelo predominante	
Humedad de suelo disponible total (CC-PMP)	290.0	mm/metro
Tasa maxima de infiltración de la precipitación	40	mm/día
Profundidad radicular máxima	900	centímetros
Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT)	0	%
Humedad de suelo inicialmente disponible	290.0	mm/metro

Figura 17. Datos generales del suelo del área de estudio, utilizando información de la FAO, a través de CROPWAT 8.0. Fuente: elaboración propia.

Los datos mostrados en la figura 17 se refieren a características específicas del tipo de suelo. Para datos más certeros se deben conocer los aspectos más relevantes de todos los tipos de suelo que existan dentro del área de estudio. Para esta metodología se utiliza un valor promedio de acuerdo con la información descrita en el programa CROPWAT 8.0 de la FAO. A continuación, con la información ingresada en el programa, se procede de forma automática a calcular el requerimiento de agua de cultivo; esta se divide en dos clases: precipitación efectiva (para calcular huella hídrica verde) y requerimiento de riego (para calcular huella hídrica azul).

Lo que realiza CROPWAT 8.0 para el cálculo de requerimiento de agua para los cultivos, es una programación en decadía (periodos de diez días) indicando las diversas etapas de los cultivos y la satisfacción del requerimiento de agua a través de la precipitación efectiva y el requerimiento de agua proveída de la extracción en la superficie o proveniente del subsuelo. Se presenta un total en milímetros por diez días al final de la tabla, de tal manera que se deben multiplicar los valores totales por un factor de 10 para tener el requerimiento total en milímetros. Los datos a los que se hace referencia en esta explicación se muestran en la siguiente figura:

Requerimiento de Agua del Cultivo

Estación ETo: varias atitlán      Cultivo: Diversos granos

Est. de lluvia: Varias Atitlán      Fecha de siembra: 01/01

Mes	Decada	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req. Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Ene	1	Inic	0.40	1.36	13.6	0.0	13.6
Ene	2	Inic	0.40	1.38	13.8	0.0	13.8
Ene	3	Inic	0.40	1.43	15.7	0.0	15.7
Feb	1	Inic	0.40	1.47	14.7	0.0	14.7
Feb	2	Inic	0.40	1.52	15.2	0.0	15.2
Feb	3	Inic	0.40	1.54	12.3	0.0	12.3
Mar	1	Inic	0.40	1.56	15.6	0.0	15.6
Mar	2	Inic	0.40	1.57	15.7	0.0	15.7
Mar	3	Inic	0.40	1.54	16.9	0.1	16.7
Abr	1	Inic	0.40	1.50	15.0	2.1	12.9
Abr	2	Inic	0.40	1.46	14.6	3.1	11.4
Abr	3	Inic	0.40	1.41	14.1	14.2	0.0
May	1	Inic	0.40	1.37	13.7	26.5	0.0
May	2	Inic	0.40	1.32	13.2	36.5	0.0
May	3	Des	0.40	1.31	14.4	46.0	0.0
Jun	1	Des	0.52	1.65	16.5	60.9	0.0
Jun	2	Des	0.69	2.17	21.7	73.2	0.0
Jun	3	Med	0.87	2.88	28.8	60.7	0.0
Jul	1	Med	0.93	3.26	32.6	42.6	0.0
Jul	2	Med	0.93	3.44	34.4	31.4	2.9
Jul	3	Med	0.93	3.38	37.2	33.1	4.1
Ago	1	Med	0.93	3.33	33.3	34.5	0.0
Ago	2	Med	0.93	3.28	32.8	33.9	0.0
Ago	3	Med	0.93	3.14	34.5	41.5	0.0
Sep	1	Med	0.93	2.93	29.3	53.7	0.0
Sep	2	Med	0.93	2.75	27.5	62.3	0.0
Sep	3	Med	0.93	3.02	30.2	54.1	0.0
Oct	1	Med	0.93	3.37	33.7	45.2	0.0
Oct	2	Med	0.93	3.64	36.4	39.4	0.0
Oct	3	Med	0.93	3.42	37.6	28.1	9.4
Nov	1	Med	0.93	3.16	31.6	13.8	17.9
Nov	2	Med	0.93	2.97	29.7	1.8	27.9
Nov	3	Fin	0.93	3.00	30.0	1.2	28.8
Dic	1	Fin	0.93	3.01	30.1	0.1	30.0
Dic	2	Fin	0.92	3.02	30.2	0.0	30.2
Dic	3	Fin	0.91	3.06	33.6	0.0	33.6
					<b>870.3</b>	<b>839.8</b>	<b>342.6</b>

Figura 18. Requerimiento de agua para los cultivos dentro del área de estudio, utilizando información de la FAO, a través de CROPWAT 8.0.

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se realiza con el *software* en referencia, la presentación gráfica del requerimiento de agua de cultivo suplida por la precipitación efectiva y por la extracción de agua superficial o subterránea (riego):

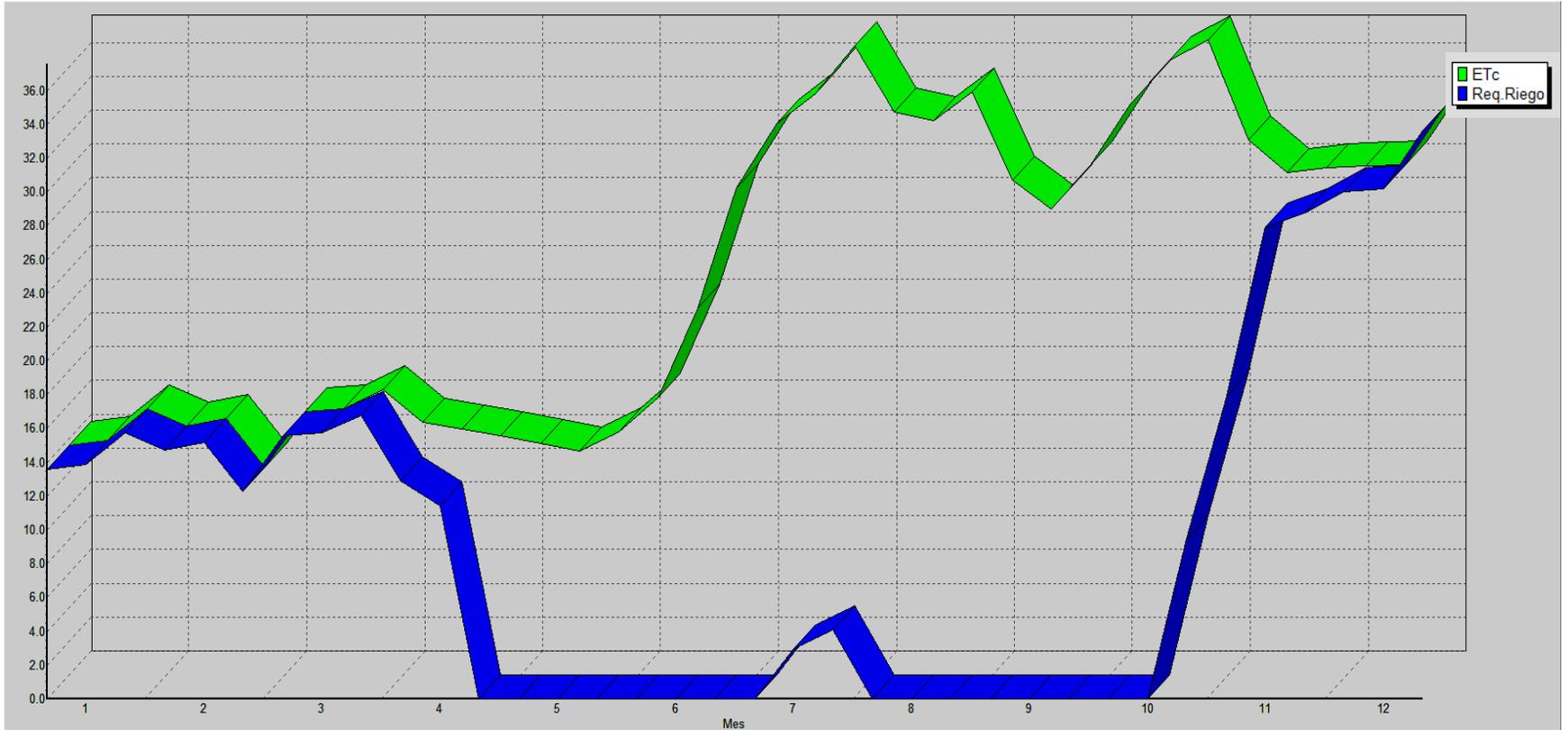


Figura 19. Gráfica de requerimiento de agua para los cultivos, abasteciéndose de precipitación efectiva (verde) y de riego (azul), a través de CROPWAT 8.0.

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica mostrada en la figura 19 se indican los periodos donde hay mayor consumo o extracción de agua, dependiendo de la precipitación efectiva característica en la zona. Estos valores están presentados en dimensionales (mm/decadía).

Luego, se procede a calcular la huella hídrica verde aplicando la fórmula descrita en la metodología.

Para el rendimiento de cultivos de granos, se utilizó un valor promedio de acuerdo con la Dirección de Planeamiento del MAGA (2013), en Guatemala; de tal manera que para el valor de rendimiento promedio se utilizó el valor de 30 quintales por manzana.

Entonces, “Y” (rendimiento de cultivo) es igual a 30 qq/mz = 2.11 Ton/ha

$$HH_{\text{cultivo.verde}} = \frac{CWU_{\text{verde}}}{Y} = \frac{8,398m^3/ha}{2.11Ton/ha} = 3,980.09 \frac{m^3}{Ton}$$

$$HH_{\text{cultivo.azul}} = \frac{CWU_{\text{azul}}}{Y} = \frac{3,426m^3/ha}{2.11Ton/ha} = 1,623.70 \frac{m^3}{Ton}$$

De acuerdo con datos de la FAO, en promedio para el análisis se tiene una aplicación de fertilizantes nitrogenados de 25 kg/ha.

La concentración máxima de nitrógeno que puede tener un cuerpo hídrico en Guatemala se define en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”. Este reglamento indica que la concentración máxima de nitrógeno para cuerpos receptores debe ser de 25 mg/L. El equivalente de esta concentración en kg/m<sup>3</sup>, aplicando conversiones, es de 0.025 kg/m<sup>3</sup>.

La concentración natural de nitrógeno total del lago de Atitlán, de acuerdo con los últimos estudios realizados (Dix et. al., 2012), es en promedio 0.2 mg/L. Realizando la conversión respectiva, esta cantidad es equivalente a 0.0002 kg/m<sup>3</sup>. Tomando en consideración los valores expresados en los párrafos anteriores, el cálculo de la huella hídrica gris es:

$$HH_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{25 \frac{kg}{ha}}{0.025 \frac{kg}{m^3} - 0.0002 \frac{kg}{m^3}} = 1,008.00 \frac{m^3}{ha}$$

Para obtener la huella hídrica en m<sup>3</sup>/Ton, se requiere dividir el resultado anterior entre el rendimiento del cultivo.

$$HH_{gris} = \frac{1008.00 \frac{m^3}{ha}}{2.11 \frac{Ton}{ha}} = 477.73 \frac{m^3}{Ton}$$

En la siguiente tabla se resumen los valores obtenidos de la metodología de huella hídrica para el sector agrícola.

Tabla VII. **Valores de huella hídrica dentro de la cuenca del lago de Atitlán, por tonelada**

Descripción	Valor	Dimensional
Huella hídrica verde	3,980.09	m <sup>3</sup> /Ton
Huella hídrica azul	1,623.70	m <sup>3</sup> /Ton
Huella hídrica gris	477.73	m <sup>3</sup> /Ton

Fuente: elaboración propia.

Para obtener los valores de la huella hídrica por año, es necesario hacer operaciones aritméticas entre la huella hídrica en m<sup>3</sup>/Ton y la cantidad de toneladas de productos cosechados en un año (Ton/año).

$$\text{Huella hídrica} \left( \frac{m^3}{\text{año}} \right) = \text{huella hídrica} \left( \frac{m^3}{\text{Ton}} \right) * \text{Cosecha} \left( \frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right)$$

De acuerdo con las áreas de siembra en la cuenca de Atitlán, y utilizando el rendimiento para granos descrito anteriormente, se obtiene que el valor correspondiente al área de siembra es de 18,548 hectáreas.

A partir del valor de cosecha de 18,548 hectáreas con un rendimiento de 2.11 Ton/ha, se obtiene un dato de: 39,136.28 Ton/año. Los valores de huella hídrica descritos en la tabla VII se pueden expresar en dimensionales de metros cúbicos por año, multiplicando dichos valores por un total de 39,136.28 toneladas por año de siembra, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla VIII. Valores de huella hídrica dentro de la cuenca del lago de Atitlán para el sector agrícola (siembras), por año**

Descripción	Valor	Dimensional
Huella hídrica verde	155,765,916.67	m <sup>3</sup> /año
Huella hídrica azul	63,545,577.84	m <sup>3</sup> /año
Huella hídrica gris	18,696,575.04	m <sup>3</sup> /año

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, de acuerdo con la teoría, la huella hídrica debe contemplar todos los procesos, de tal manera que los bosques que están dentro de la cuenca de Atitlán, también consumen parte del agua que precipita. Es importante hacer mención que si el bosque no se utiliza como plantación periódica, se verá afecto

únicamente a la huella hídrica verde. En contraste, si se hace una programación de riego para cultivar alguna especie de árbol catalogado como bosque, se debe cuantificar la huella hídrica azul, así como la huella hídrica gris, si es que se utiliza algún tipo de fertilizante agroquímico.

Para realizar el cálculo correspondiente a la huella hídrica verde para el sector agrícola correspondiente a los bosques, se parte de que en la cuenca de Atilán se tiene un total de 22,160 hectáreas que se catalogan o clasifican como bosques, ya sean mixtos, coníferos o latifoliados, así como arbustos y yerbazales.

Tomando el valor proporcionado por el *software* CROPWAT 8.0, se tiene el dato de CWU de 8,398 m<sup>3</sup>/ha, que corresponden al volumen de agua por hectárea que puede ser aprovechado; es decir, ya se considera como el valor de precipitación efectiva por un año calendario.

La huella hídrica verde para los bosques se determina como sigue:

$$HH_{\text{bosque.verde}} = CWU_{\text{verde}} * \text{área cultivada} = 8,398\text{m}^3/\text{ha} * 22,160\text{ha/año}$$

$$HH_{\text{bosque.verde}} = 186,099,680\text{m}^3/\text{año}$$

Tabla IX. **Valores de huella hídrica dentro de la cuenca del lago de Atilán para el sector agrícola (siembras y bosques), por año**

Descripción	Valor	Dimensional
Huella hídrica verde	341,865,596.67	m <sup>3</sup> /año
Huella hídrica azul	63,545,577.84	m <sup>3</sup> /año
Huella hídrica gris	18,696,575.04	m <sup>3</sup> /año

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2.2. Sector doméstico

Para el cálculo de la huella hídrica para el sector doméstico se requiere la información de cuántos habitantes residen dentro de la circunscripción del área de estudio (cuenca de Atitlán para esta investigación).

De acuerdo con la información presentada en la tabla III, se tiene un aproximado de 258,487 habitantes para el año 2010. Tomando un valor de tasa de crecimiento de 2.8 % que es un aproximado del tipo de sociedad que habita dentro de la cuenca de Atitlán, se estima una población para el año 2017 de 313,610 habitantes (utilizando el método geométrico para proyección de población). Debido a las actividades socioeconómicas de la población que reside dentro de la cuenca, se tomará un valor de dotación de agua potable de 150 L/hab/día (0.150 m<sup>3</sup>/hab/día). El consumo medio diario de agua potable para los habitantes es:

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= \text{Población} * \text{Dotación} = 313,610 \text{hab} * 0.150 \text{m}^3 / \text{hab} / \text{día} \\ &= 47,041.50 \text{m}^3 / \text{día} \end{aligned}$$

La huella hídrica para el sector doméstico es igual al consumo en un año específico; por consiguiente, se tiene el siguiente cálculo:

$$\text{Huella hídrica azul} = 47,041.50 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 17,170,147.50 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

En cuanto al valor de la huella hídrica gris, se toman en cuenta las siguientes premisas:

- a. Se asume que el 80 % del agua consumida es dispuesta en los sistemas de alcantarillado u otra opción de saneamiento.
- b. De acuerdo con Crites y Tchobanoglous (2000), las composiciones usuales de los sólidos suspendidos totales y nitrógeno total en las aguas residuales de origen doméstico son:
  - i. SST: 210 mg/L
  - ii. Nitrógeno total: 35 mg/L
- c. De acuerdo con Flores (2013), se tiene una concentración natural en el lago de Atitlán de 0.152 mg/L de nitrógeno total, 0.025 mg/L de sólidos suspendidos totales.
- d. Las concentraciones máximas con base en el Acuerdo Gubernativo de Guatemala 236-2006, deben ser:
  - i. SST: 150 mg/L
  - ii. Nitrógeno total: 25 mg/L
- e. Se asume que el 50 % de las aguas residuales están tratadas, con porcentajes de remoción del 85 % en los parámetros de sólidos suspendidos totales y nitrógeno total. (UNESCO, 2017).

Con esta información se tienen los siguientes datos para realizar el cálculo de la huella hídrica gris para el sector doméstico:

$$Q_{\text{vertido}} = 0.80 * 17,170,147.50 \text{ m}^3/\text{año} = 13,736,118 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Q_{\text{vertido sin tratamiento}} = 0.50 * 0.80 * 17,170,147.50 \text{ m}^3/\text{año} = 6,868,059 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$C_{\text{vertimientoSST con tratamiento}} = 0.50 * 0.85 * 0.210 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0.08925 \text{ mg}/\text{m}^3$$

$$C_{\text{vertimientoSST sin tratamiento}} = 0.210 \text{ mg}/\text{m}^3$$

$$C_{\text{vertimientoNT con tratamiento}} = 0.50 * 0.85 * 0.035 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0.014875 \text{ mg}/\text{m}^3$$

$$C_{\text{vertimientoNT sin tratamiento}} = 0.035 \text{ mg}/\text{m}^3$$

$$HH_{gris} = \sum \frac{Q_{vertido} * C_{vertimiento}}{C_{max} - C_{nat}}$$

$$HH_{gris \text{ SST con tratamiento}} = \frac{6,868,059 \frac{m^3}{año} * 0.08925 \frac{mg}{m^3}}{25,000 \frac{mg}{m^3} - 25 \frac{mg}{m^3}} = 24.54 \frac{m^3}{año}$$

$$HH_{gris \text{ SST sin tratamiento}} = \frac{6,868,059 \frac{m^3}{año} * 0.210 \frac{mg}{m^3}}{25,000 \frac{mg}{m^3} - 25 \frac{mg}{m^3}} = 57.75 \frac{m^3}{año}$$

$$HH_{gris \text{ NT con tratamiento}} = \frac{6,868,059 \frac{m^3}{año} * 0.014875 \frac{mg}{m^3}}{150,000 \frac{mg}{m^3} - 152 \frac{mg}{m^3}} = 0.68 \frac{m^3}{año}$$

$$HH_{gris \text{ NT sin tratamiento}} = \frac{6,868,059 \frac{m^3}{año} * 0.035 \frac{mg}{m^3}}{150,000 \frac{mg}{m^3} - 152 \frac{mg}{m^3}} = 1.60 \frac{m^3}{año}$$

$$HH_{gris \text{ sector doméstico}} = 24.54 + 57.75 + 0.68 + 1.60 = 84.57 \frac{m^3}{año}$$

### 3.1.3. Fase III. Evaluación de sostenibilidad

De acuerdo con Suárez (2011), la disponibilidad hídrica total en la cuenca de Atitlán asciende a la cantidad de 333 millones de metros cúbicos. Este valor refleja el volumen total de agua que precipita dentro de los límites de una cuenca hidrográfica (en este caso la cuenca de Atitlán), y que está disponible para su uso (riego, abastecimiento de agua potable, generación eléctrica, entre otros).

En cuanto al agua superficial, Oliva (2009) indica que el volumen de agua del lago de Atitlán es de 25 mil millones de metros cúbicos. Si se toma de referencia la utilización del agua para riego o para actividades domésticas, cuyos cálculos se realizaron en la determinación de la huella hídrica, se tiene que el volumen total a utilizar, proveniente de fuentes superficiales o subterráneas asciende a la cantidad de 80,715,725.34 m<sup>3</sup>/año. El valor que se aprovecha del agua precipitada con su respectiva eficiencia, es de acuerdo con los cálculos realizados: 155,765,916.67 m<sup>3</sup>/año.

Entonces, el agua extraída de las fuentes superficiales o subterráneas representan un 24.24 % del total disponible según análisis hidrográficos. De esta forma se interpreta que el estrés hídrico total representa un valor de 24.24 %.

#### **3.1.4. Fase IV. Formulación de propuestas**

Evaluando los principales aspectos relacionados con la sostenibilidad, se presentan las siguientes medidas de mitigación y adaptación a las consecuencias de los usos actuales de los recursos dentro de la cuenca de Atitlán.

##### **3.1.4.1. Reducción de la deforestación**

El porcentaje de suelo que ha cambiado de uso para fines agrícolas y agroindustriales va *in crescendo*; por ello la deforestación de áreas boscosas se hace inevitable ya que las actividades con fines de lucro parecieran ser más importantes; sin embargo, debe existir regulaciones gubernamentales para reducir la tasa de deforestación. La deforestación coadyuva a que la escorrentía superficial y subsuperficial hacia el lago de Atitlán, arrastre por este medio una cantidad considerable de contaminantes, que han venido afectando la calidad fisicoquímica del lago.

La propuesta para la reducción de la deforestación se basa en: describir las áreas deforestadas en los últimos 10 años (un periodo prudente), identificar el estado de la cobertura forestal de la cuenca de Atitlán, identificar los impactos de la tala indiscriminada de árboles, plantear alternativas del manejo de los bosques y realizar un plan de vigilancia y control.

**a. Describir las áreas deforestadas en los últimos años:** esta actividad corresponde a cuantificar y localizar las superficies que se han deforestado en tiempos recientes, para ver la tendencia que podría tener en el corto plazo. Con esta acción se pueden plantear ejes de seguimiento por parte de las autoridades correspondientes (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación o el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala.)

**b. Identificar el estado de la cobertura forestal en la cuenca:** se deben definir los criterios que caracterizan los bosques que se localizan dentro del área que subtienden la cuenca, tales como: diversidad, elementos físicos, bióticos y abióticos. Se debe incluir también un estudio social y económico de las poblaciones que residen dentro o en las periferias de la cuenca.

**c. Identificar los impactos por la tala indiscriminada de bosques:** esta tarea es sumamente importante, ya que se deben identificar las repercusiones desde la economía ambiental y de la economía tradicional, que conllevan la deforestación. Estos aspectos de análisis deben ser fáciles de medir o interpretar.

**d. Proponer un plan de vigilancia y control:** en esta fase se debe gestionar una planificación de seguimiento y control de las áreas identificadas como bosques. En dicho plan debe definirse la eficiencia que tendrá el mismo, así como la frecuencia de las actividades y quién debe realizar las mismas.

#### **3.1.4.1. Reducción de la degradación de suelos y agua**

La contaminación paulatina de suelos y agua a través de actividades antropogénicas, o derivadas de estas, ha contribuido a la disminución de la calidad de agua del lago de Atitlán. De acuerdo con datos de investigaciones previas (Dix, et. al. 2012; Dix, 2009, entre otros), se conoce que la calidad del agua de Atitlán aún se encuentra dentro de los límites del estado oligotrófico, aunque la probabilidad de que este cambie a un estado mesotrófico va aumentando. Por ello, se debe regular la aplicación de los fertilizantes que se utilizan para la siembra de productos agrícolas; asimismo, se requiere un monitoreo y plan de acción para tratar las aguas servidas que llegan crudamente al cuerpo hídrico.

#### **3.1.4.2. Reforestación y recuperación de suelos**

Como se describió anteriormente, la deforestación ha contribuido al florecimiento de algas y contaminantes en general que son llevados por escorrentía y por el flujo mismo de los sistemas lóticos que alimentan el lago de Atitlán. Por ello se requiere que áreas aptas para la siembra de bosques sean prontamente reforestadas, ya que esto ayudaría a interceptar gases de efecto invernadero; además servirían como agentes resilientes para evitar la contaminación del suelo y agua que subtiende la cuenca del lago de Atitlán.

Según la FAO (2006), la Tierra está perdiendo 25 mil millones de toneladas de suelos superficiales al año debido a la erosión. Los fertilizantes químicos, si bien incrementan el crecimiento de las plantas, no pueden reemplazar el suelo superficial. La pérdida de suelo superficial conlleva a la pérdida de seguridad alimentaria humana.

### **3.1.4.3. Control y tratamiento de descargas de aguas residuales**

Frecuentemente, los sistemas de drenaje en el área de Sololá son considerados fuentes de contaminación del agua subterránea, así como del agua superficial que alimenta el lago de Atitlán.

El saneamiento es un factor muy importante y determinante para la salud humana, así como para la sostenibilidad de la sociedad. Por ello, los enfoques de saneamiento y tratamiento de aguas servidas deben orientarse al control de los recursos hídricos.

En este sentido, un buen control ambiental de las aguas residuales debe cumplir al menos con los siguientes criterios: prevención de enfermedades, protección ambiental, reciclaje de nutrientes, viabilidad económica, aceptabilidad y simplicidad. A continuación, se presentan algunas acciones estratégicas de alta relevancia, para garantizar la sostenibilidad del lago de Atitlán.

### **3.1.4.4. Acciones estratégicas**

#### **a. Políticas y planificación**

Hasta hace poco tiempo, la planificación para sistemas de gestión integrada de recursos hídricos, generalmente se llevaba a cabo en los niveles superiores de gobierno, y las decisiones eran comunicadas a los niveles administrativos inferiores. Pero, actualmente se ha reconocido que cuando la planificación comienza en el ámbito local y luego avanza en dirección hacia las autoridades superiores, hay más posibilidades de alcanzar la sostenibilidad.

## **b. Promoción y capacitación**

Un elemento trascendental para el éxito de una gestión de recursos hídricos en una cuenca tan importante como la del lago de Atitlán, es ponerlo en marcha con participación de los vecinos del lugar, y con la instrucción adecuada. Además, es particularmente importante la inclusión de las mujeres en el proceso de potenciación y promoción de las actividades que enmarca un plan de gestión integral de recursos hídricos, desde el inicio.

En Guatemala, específicamente en las comunidades que se encuentran localizadas en la zona aledaña al lago de Atitlán, son generalmente las mujeres quienes se encargan del abastecimiento de agua, el saneamiento, la higiene y la alimentación en el hogar. Por ello, sus preocupaciones y perspectivas deben ser expresadas e integradas en cualquier actividad que se requiera para el diseño de un programa de manejo integrado del lago de Atitlán.

## **c. Inspección, monitoreo y seguimiento**

Todo proyecto de gestión de recursos hídricos debe incluir un mecanismo de seguimiento y evaluación. Para ello se debe contar con un grupo comunitario (local) debidamente capacitado para realizar chequeos rutinarios de cada etapa del plan de manejo de recursos hídricos.

Muchas veces los vecinos no son tomados en cuenta, por consiguiente, se enajenan de todo aquello que se suscita en relación con el lago de Atitlán, y esa indiferencia aumenta las probabilidades de contaminación y afectación del lago, por malas prácticas sanitarias.

#### **d. Plan de reducción y gestión ante desastres**

Se debe contar con un plan comunitario, local, municipal y gubernamental para la gestión ante desastres provocados por afectaciones climáticas, antrópicas, y otras, que puedan suscitarse dentro de la cuenca del lago de Atitlán. Para ello debe tomarse en consideración la vulnerabilidad estructural, vulnerabilidad geográfica, ordenamiento territorial, obras de infraestructura para mitigación, planes para preparación y respuesta ante desastres.

### **3.2. Resultados del análisis emergético**

Una vez realizados los pasos descritos para la determinación de la huella hídrica en la cuenca que subtiende el lago de Atitlán, se procede a presentar los resultados para realizar el análisis emergético en el mismo cuerpo hídrico.

#### **3.2.1. Descripción del sistema a analizar y sus límites**

La fase descriptiva de análisis se incluye en el apartado 3.1.1.1. de la presente investigación, resumiendo los datos a continuación:

- a. Zona de análisis: cuenca del lago de Atitlán.
- b. Extensión de la cuenca: 541 kilómetros cuadrados.
- c. Localización georeferenciada: 14°42' norte y 91°12' oeste (Punto localizado tomando como referencia el centro del lago de Atitlán).
- d. Actividades económicas: agricultura, 46 %; turismo, 18 %; artesanías o industria manufacturera, 13 %; otras, 23 %.
- e. Vertiente: Pacífico
- f. Disponibilidad hídrica total: 333 millones de metros cúbicos de agua.

- g. En el perímetro del lago de Atitlán se localizan 3 volcanes: San Pedro, Tolimán y Atitlán.
- h. Altitud: 1565 metros sobre el nivel del mar.

### **3.2.2. Alcances para determinación del análisis emergético**

Para la determinación del análisis emergético de la cuenca de Atitlán, se utilizaron los siguientes datos, indicando sus respectivas fuentes de información para su obtención:

- a. Área de la cuenca, la cual se obtuvo de Dix et. al (2003, p. 2).
- b. Insolación en la cuenca de Atitlán, que fue obtenida por aplicaciones climáticas web. Específicamente en la web: <http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html>.
- c. Albedo para la región tropical que subtiende el lago de Atitlán, que se obtuvo de <http://www.globalbedo.org/>
- d. Transformidades para diferentes recursos, que se obtuvieron de trabajos investigativos desarrollados por Odum (1996).
- e. Valores de lluvia, evapotranspiración, velocidad del viento, que se obtuvieron de la base de datos proporcionada por INSIVUMEH.
- f. Cantidad de fertilizante utilizado dentro de la cuenca, obtenido de estudios realizados dentro de la cuenca de Atitlán por el MAGA (2015).

#### **3.2.2.1. Instrumentos de medición**

En esta parte se hace constar que los datos utilizados dentro de la metodología para determinar sostenibilidad de lagos desde la economía ecológica, son los que se obtuvieron de estudios previos y mediciones realizadas por entes gubernamentales y/o privados, que se dedican a la investigación científica o a la generación de información. Se describe a continuación un listado

de los instrumentos que se utilizan en las estaciones meteorológicas para la obtención de información que proveyó para este estudio el INSIVUMEH: pluviómetro, pluviógrafo, higrógrafo, termohigrógrafo, termómetro de máxima, termómetro de mínima, termógrafo, heliógrafo, actinógrafo, evaporímetro de Piche, tanque de evaporación, anemocinómetro y anemógrafo

### **3.2.2.2. Recolección de datos**

Para la realización de este estudio de investigación, se tomó en consideración lo siguiente, relacionado con la recolección de información (datos).

#### **a. Variables climatológicas**

Los datos que fueron requeridos para el análisis emergético son los siguientes: lluvia, temperatura media, temperatura máxima promedio, temperatura mínima promedio, temperatura máxima absoluta, temperatura mínima absoluta, humedad relativa media, humedad máxima promedio, humedad mínima promedio, nubosidad, evaporación de tanque, dirección del viento y velocidad del viento.

#### **b. Estaciones meteorológicas**

Los datos utilizados para esta investigación fueron extraídos de las bases de datos del INSIVUMEH, correspondientes a las siguientes estaciones:

- i. Estación meteorológica de Santiago Atitlán con una altitud de 1580 msnm; con localización georreferenciada: latitud 14°37' y longitud 91°13'.
- ii. Estación meteorológica de El Tablón con una altitud de 2397 msnm; con localización georreferenciada: latitud 14°46' y longitud 91°10'.

- iii. Estación meteorológica de El Capitán con una altitud de 1562 msnm; con localización georreferenciada: latitud 14°38' y longitud 91°08'.

**c. Datos de las estaciones climatológicas**

Se presentan en la sección de anexos de este informe de investigación, las tablas que contienen la información proporcionada por INSIVUMEH, en relación con los datos climatológicos.

**d. Análisis de información**

Para realizar el análisis de datos es importante primero determinar cuáles son las variables dependientes y cuáles las independientes para realizar los cálculos necesarios y la transformación de datos.

**Variables dependientes:** las variables dependientes que se utilizan para determinar la sostenibilidad del lago desde la perspectiva de la economía ecológica son los siguientes: índice de rendimiento emergético (EYR), índice de inversión emergética (EIR), índice de carga ambiental (ELR), índice de sostenibilidad (ESI) y porcentaje de renovabilidad (%R).

**Variables independientes:** las variables independientes que son generalmente los datos que se obtuvieron de fuentes primarias y secundarias de información, son las siguientes: área de la cuenca, insolación, albedo, transformidades, precipitación, evapotranspiración, escorrentía, gravedad y densidad del agua. En el caso de estas últimas dos para el presente estudio (lago de Atitlán) se tomó un valor promedio.

### e. Cálculo de indicadores emergéticos

Se describe a continuación el proceso de cálculo para realizar el análisis emergético para evaluar lagos desde la perspectiva de la economía ecológica.

Tabla X. Cálculos para el análisis emergético

Componente	Método de cálculo	Dimensionales
<b>Recursos naturales renovables no pagados (RR)</b>		
<b>1 Energía solar</b>		
Área	5.41E+08	m <sup>2</sup>
Insolación	6,570.00	MJ/m <sup>2</sup> /año
Albedo	20.00	%
Conversión de megaJoules a Joules =	1,000,000.00	J/MJ
Energía	2.8435E+18	J/año
Transformidad	1	sej/J
<b>Flujo total</b>	<b>2.8435E+18</b>	<b>sej/año</b>
<b>2 Lluvia, energía potencial química</b>		
Área territorial	5.41E+08	m <sup>2</sup>
Lluvia	2	m/año
Evapotranspiración	1.4	m/año
Energía = (área)(lluvia)(evapo.)(En. libre de Gibbs en lluvia)		
= (___m <sup>2</sup> )(___m)(___%)(1,0E+06g/m <sup>3</sup> )(4.94J/g)	1.38E+07	J/año
Transformidad = 18200 sej/J [a]	18,200.00	sej/J
<b>Flujo total</b>	<b>2.51742E+11</b>	<b>sej/año</b>
<b>3 Lluvia, energía geopotencial</b>		
Área	5.41E+08	m <sup>2</sup>
Lluvia	2	m/año
Elevación media	800	m
Escorrentía	0.25	
Gravedad	9.8	m/s <sup>2</sup>
Densidad agua	1000	kg/m <sup>3</sup>

Continuación de la tabla X.

Energía =	2.12072E+15	J/año
Transformidad	27900	sej/J
<b>Flujo total</b>	<b>5.91681E+19</b>	<b>sej/año</b>
<b>4 Energía eólica</b>		
Área	5.41E+08	m <sup>2</sup>
Densidad del aire	1.23	kg/m <sup>3</sup>
Promedio anual de velocidad del viento	2.06	m/s
Viento geotrópico	6.86	m/s
Coeficiente de arrastre	0.001	
Energía = (área)(densidad del aire)(coef. de arrastre)(vel. del viento) <sup>3</sup>		
= (____m <sup>2</sup> )(1.3 kg/m <sup>3</sup> )(1.00 E-3)(____mps) <sup>3</sup> (3.14 E7 s/yr)		
Energía	1.82656E+14	J/año
Transformidad	2450	sej/J
<b>Flujo total</b>	<b>4.47507E+17</b>	<b>sej/año</b>
<b>5 Mano de obra</b>		
Jornadas hombre anuales	70000000	JornadasHombre/año
Gasto calórico	3200	Kcal/Jornada
Energía jornada hombre	9.37216E+14	J
Transformidad	670000	sej/J
Energía	6.27935E+20	sej
<b>6 Madera</b>		
Peso madera pino	864000000	kg
Contenido calórico madera pino	2150	kcal/kg
Flujo total energía	7.76477E+12	J
Transformidad	34900	sej/J
<b>Energía</b>	<b>2.7099E+17</b>	<b>sej</b>
<b>Recursos naturales no renovables, no pagados</b>		
<b>7 Pérdida de suelo, contenido orgánico</b>		
Área	5.41E+08	m <sup>2</sup>
Tasa de erosión	5000	gr/m <sup>2</sup> /año
Materia Orgánica	0.05	%

Continuación de la tabla X.

Contenido de Energía/gr. Orgánico	5.4	Kcal/gr.
Pérdida de energía= (Área)(Tasa de erosión)(Contenido de Energía en MO)		
(___m <sup>2</sup> )(___gr/m <sup>2</sup> /año)(__ %)(___Kcal/gr)(4186 J/Kcal)		
Energía	3.06E+15	J/año
Transformidad	74000	sej/J
<b>Flujo total</b>	<b>2.26E+20</b>	<b>sej/año</b>
<b>Recursos naturales no renovables, pagados</b>		
<b>8 Fertilizante nitrogenado</b>		
Cantidad de producto	1.73E+08	gramos
Transformidad	3.80E+09	sej/gramo
<b>Energía</b>	<b>6.57E+17</b>	<b>sej</b>
<b>9 Fertilizante fosforado</b>		
Cantidad de producto= 870 gr	2.63E+07	gramo
Transformidad = 6550000000 sej/g [j ]	6.55E+09	sej/gramo
<b>Energía</b>	<b>1.72E+17</b>	<b>sej</b>
<b>10 Electricidad</b>		
Gasto eléctrico anual	25000000	kwh/año
Contenido de Energía/KWh	3.60E+06	J
Energía	9.00E+13	J/año
Transformidad	336000	sej/J
<b>Energía</b>	<b>3.02E+19</b>	<b>sej/año</b>
<b>11 Agua potable</b>		
Volumen	1.41E+07	m <sup>3</sup>
Densidad	1.00E+06	g/m <sup>3</sup>
Energía	4.9	J/g
Energía	6.91E+13	J
Transformidad	4.54E+05	sej/J
<b>Flujo total</b>	<b>8.90E+15</b>	<b>sej/año</b>
<b>12 Comida en general</b>		
Kg de comida	9.38E+07	kg
Contenido calórico promedio	5000	Kcal/kg
Contenido de energía	4.69025E+11	J
Transformidad	5.33E+06	sej/J
<b>Energía</b>	<b>2.50E+18</b>	<b>sej</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Valores obtenidos del análisis emergético**

<b>Flujo emergético</b>	<b>Valor</b>
Recursos naturales renovables no pagados (RR)	6.80093E+20
Recursos naturales no renovables no pagados (NR)	2.26E+20
Recursos naturales renovables pagados (RP)	0
Recursos naturales no renovables pagados (NP)	3.36E+19
Densidad de potencia emergética (Y)	9.39907E+20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Índices emergéticos**

<b>Índice emergético</b>	<b>Valor</b>
Índice de rendimiento emergético (EYR)	27.99
Índice de inversión emergética (EIR)	0.04
Índice de carga ambiental (ELR)	0.38
Índice de sostenibilidad (ESI)	73.66
Porcentaje de renovabilidad (%R)	0.72

Fuente: elaboración propia.



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo metodológico seguido para el cálculo de la huella hídrica se resume en figura 20, que a través de un flujograma denota cada una de las fases necesarias para la determinación de la huella hídrica.

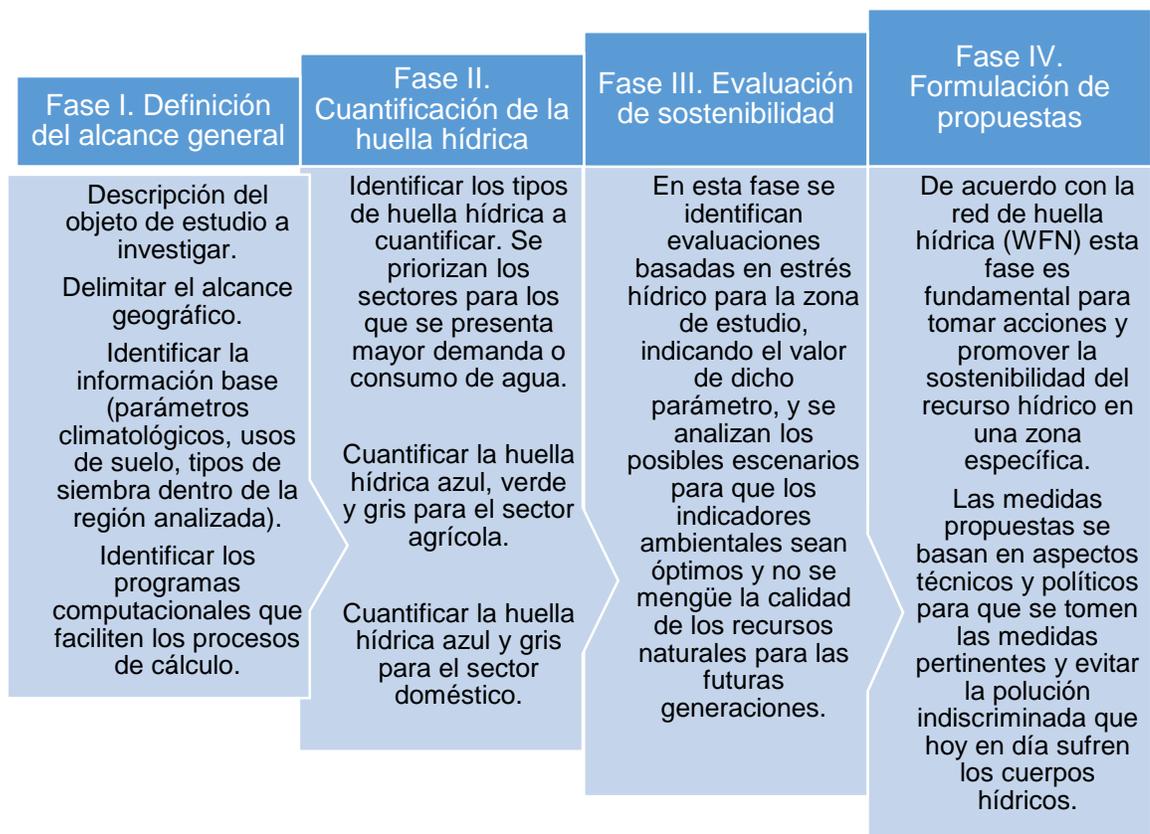


Figura 20. Flujograma de representación de cálculo de la huella hídrica.

Fuente: elaboración propia.

A partir de la secuencia metodológica planteada en la figura 20, se determinaron los valores de huella hídrica para el sector agrícola y el sector doméstico en la cuenca que subtiende el lago de Atitlán.

En el desarrollo metodológico planteado en esta investigación y que plasmó el cumplimiento del objetivo principal de la misma, en relación con el establecimiento de una metodología para estimar indicadores de la economía ecológica en sistemas lénticos, se encuentran ciertas limitantes que se basan fundamentalmente en la carencia de información actualizada relacionada con: variables climáticas, usos de suelo actuales e históricos, censo poblacional actual, entre otros.

En cuanto al objeto de estudio investigado (cuenca del lago de Atitlán), se tiene que política y administrativamente hay 19 municipios circunscritos a esta cuenca que representa el 0.5 % del área del país. El hecho de que existan tantos municipios (pertenecientes a 3 departamentos, Sololá, Totonicapán y Quiché) se vuelve una tarea difícil la definición e implementación de políticas sustentables para garantizar una buena calidad hídrica en el lago de Atitlán, debido a aspectos culturales y de costumbres, así como diferentes asignaciones presupuestarias para cada municipio, de tal manera que no todos apoyarían de la misma forma.

La cuenca que subtiende el lago de Atitlán es endorreica, y está en continuo proceso de contaminación de suelo y agua, por lo que es de vital importancia gestionar de manera adecuada el recurso hídrico y los factores que puedan afectarlo. Los poblados que cuentan con una mayor tasa de crecimiento, son al mismo tiempo los que más afectan el recurso hídrico, ya que para su subsistencia hacen uso inmoderado de los recursos naturales, generando deforestación, arrastre de sedimentos, contaminación ambiental, entre otros.

Asimismo, se tiene en consideración que la superficie que compone la cuenca de Atitlán posee una de las mayores densidades poblacionales en Guatemala (478 hab/km<sup>2</sup>, Suárez, 2011), ya que el área habitable por las pronunciadas pendientes que caracterizan la cuenca es limitada.

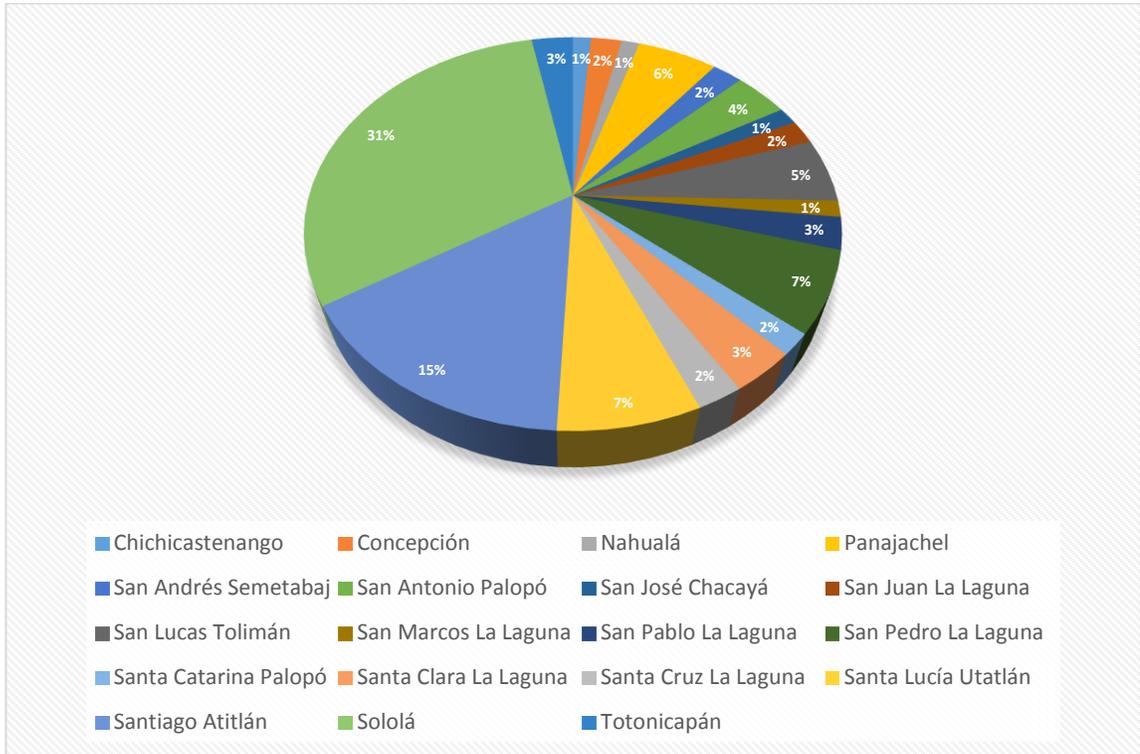


Figura 21. Población (expresada como porcentaje del total de la cuenca) en los municipios circunscritos en la cuenca de Atitlán.

Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en la figura 21, más del 50 % de la población reside en municipios localizados a las periferias del lago de Atitlán: Santiago Atitlán, Sololá y Panajachel, principalmente.

Esto significa que se dispondrán mayores cantidades de agua residual al lago (con y sin tratamiento). Los diversos usos de suelo dentro de la cuenca de Atitlán se indican en el siguiente gráfico.

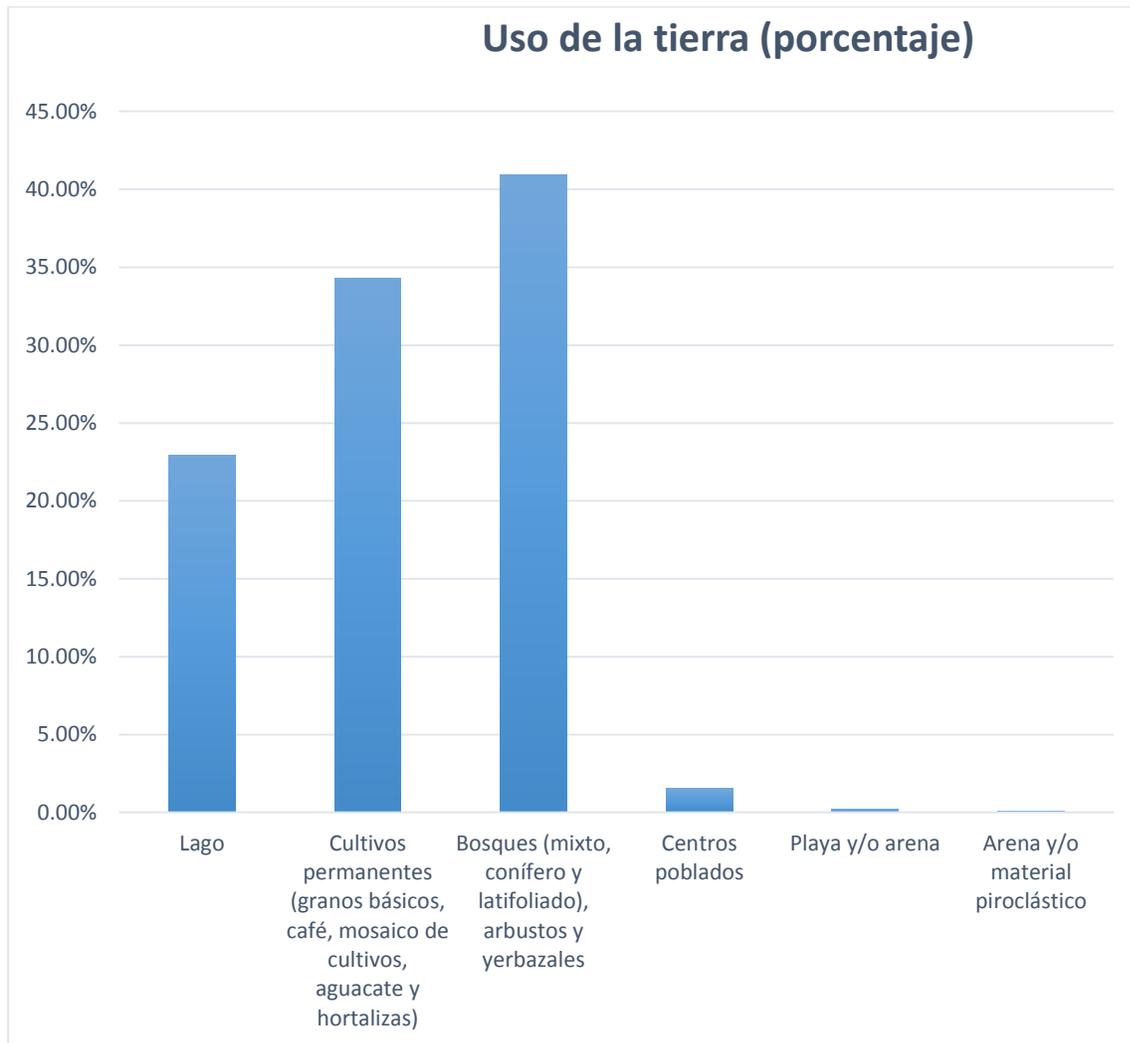


Figura 22. Uso de la tierra en la Cuenca del lago de Atilán.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 22 se muestra que el uso de suelo dentro de la cuenca de Atilán se compone en su mayoría del área que ocupan los bosques, el lago de Atilán y la siembra de granos básicos y café. Con la utilización del Sistema de Información Geográfica (GIS), se obtuvieron las siguientes imágenes que demuestran el cambio de uso de suelo dentro de la cuenca de Atilán.

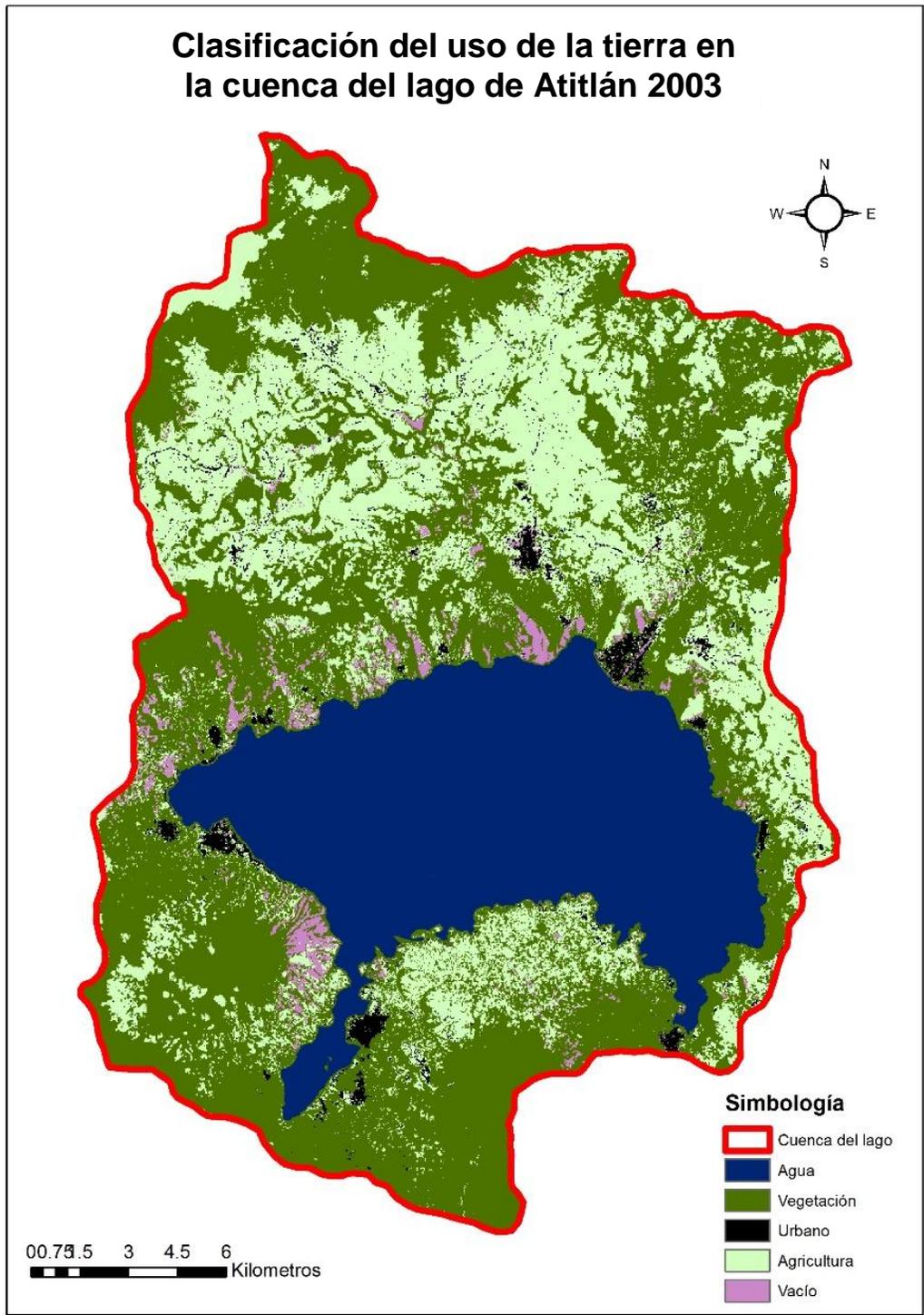


Figura 23. Clasificación del uso de la tierra en la cuenca de Atitlán para el año 2003. Fuente: elaboración propia.

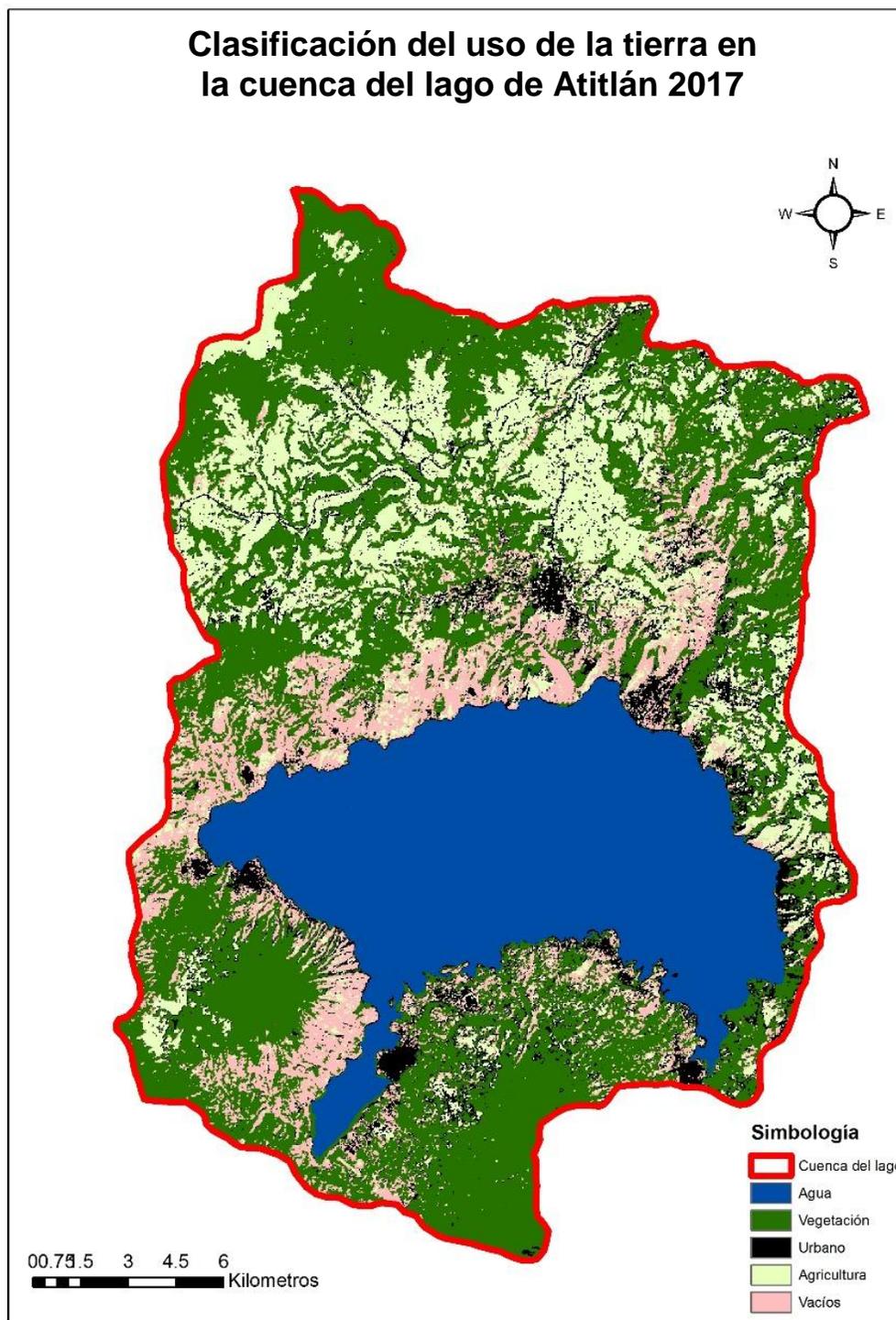


Figura 24. Clasificación del uso de la tierra en la cuenca de Atitlán para el año 2017. Fuente: elaboración propia.

Es importante, de acuerdo con lo observado en las figuras 23 y 24, hacer hincapié en que las zonas urbanas están creciendo rápidamente, incrementándose casi 4 veces el tamaño de las urbes en un periodo de 14 años. Asimismo, se nota que hay mucha deforestación en las áreas circunvecinas al lago, lo que propicia mayor escorrentía y, por ende, mayor contaminación debido a descargas de nutrientes en él.

El abastecimiento de agua para consumo humano en los poblados que conforman la cuenca del lago de Atitlán, se hace a partir de nacimientos y con una red completa de distribución, con práctica de cloración en lo relativo a desinfección. Algunos poblados utilizan el agua del lago de Atitlán para consumo humano, previo tratamiento. De acuerdo con Dix (2012), el 40 % de la población de Panajachel consume agua del lago de Atitlán, el 95 % de la población de San Lucas Tolimán, el 55 % de Santiago Atitlán, y el 85 % de San Pedro La Laguna hacen lo mismo. Cabe hacer mención que no toda el agua que utilizan del lago es tratada.

En cuanto al ordenamiento territorial, es notable que muchos municipios de Guatemala carecen de un plan en funcionamiento para el ordenamiento territorial. Esto no quiere decir que no haya gestiones para realizar uno, o que no haya uno en “papeles”; sin embargo no se han llevado a cabo gestiones para un evidente ordenamiento territorial que prohíba la construcción en zonas de alto riesgo como casas que se ubican dentro de la ribera del río Quiscab y San Francisco (afluentes del lago de Atitlán).

En relación con el marco legal, se tiene que muchas de las reglamentaciones, normas y leyes no son cumplidas por todos los actores que intervienen o deberían intervenir en la gestión integrada del recurso hídrico “lago de Atitlán”. Lo que llama más la atención, es que muchas personas (autoridades

y habitantes en general) saben del problema de polución de la cuenca, y aún siguen conservando costumbres o prácticas que incrementan la contaminación de la cuenca tales como: descarga de aguas servidas sin tratamiento, disposición de desechos sólidos en los ríos que alimentan el lago de Atitlán, deforestación de bosques para siembra de cultivos que requieren agrofertilizantes, entre otros.

En relación con los cálculos de huella hídrica, se deben analizar (como se indicó en la metodología) ciertas variables climatológicas, las cuales se grafican a continuación:

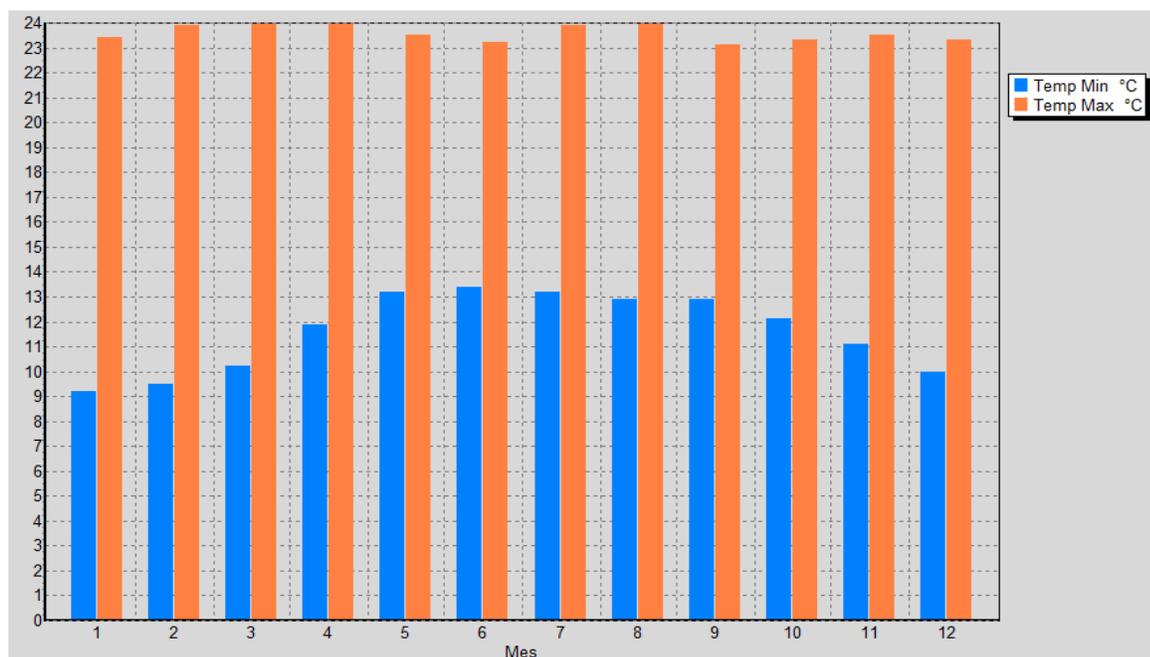


Figura 25. Temperaturas máximas y mínimas (promedio) en la cuenca de Atitlán para los 12 meses del año.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 25 puede notarse que las temperaturas máximas a lo largo del año no difieren mucho entre sí, al igual que los valores de temperatura mínima, de tal manera que esto indica que el lago de Atitlán es un cuerpo hídrico con

características tropicales. De igual manera, lo que genera primeramente el *software* CROPWAT 8.0 es el valor que corresponde a la precipitación efectiva que se considera, en esta metodología propuesta, como el agua requerida para el cultivo proveniente de la atmósfera (huella hídrica verde). A continuación, se presenta la gráfica que muestra el comportamiento mensual de la precipitación y la precipitación efectiva (calculada en función de los parámetros climatológicos):

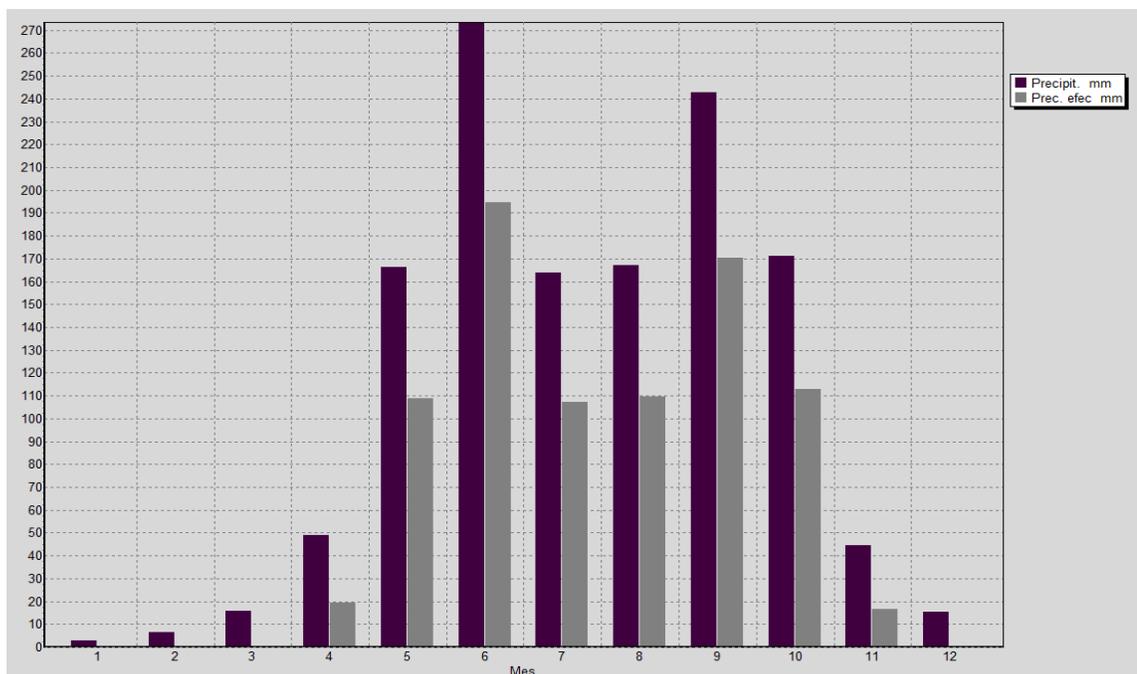


Figura 26. Precipitación (mm) y precipitación efectiva (mm) en la cuenca del lago de Atitlán.

Fuente: elaboración propia.

Es de esperarse que para los meses de mayo a octubre haya mayor precipitación dentro del área de la cuenca, debido a los regímenes de lluvia en el país guatemalteco (época lluviosa), por lo que la huella hídrica verde para estos meses es mayor que para el periodo comprendido de finales de octubre a principios de mayo.

De igual forma debe analizarse la información relacionada con los tipos de cultivos característicos de la cuenca, en este caso, al carecer de información actualizada del uso específico del suelo para siembra, se asumió que hay siembra de granos básicos en las áreas identificadas para cultivo. Una vez realizados los análisis pertinentes de las variables climatológicas, uso y tipo de suelo, se obtuvieron los valores siguientes de huella hídrica para el sector agrícola:

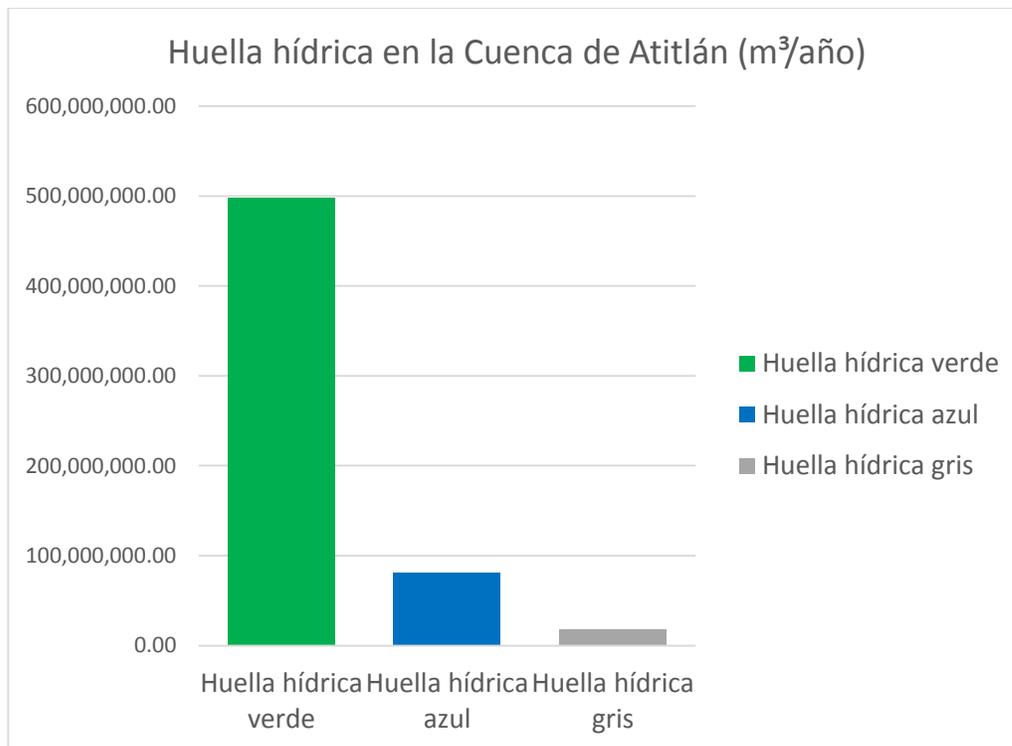


Figura 27. Huella hídrica para el sector agrícola en la cuenca de Atitlán.

Fuente: elaboración propia.

La interpretación de la figura 27 es que la mayor cantidad de agua consumida para cultivos, dentro de la cuenca de Atitlán proviene de la precipitación, siendo aproximadamente un 71 % del total del agua consumida. De

igual manera se tiene que el 29 % del agua requerida para riego es extraída de la superficie o del subsuelo para poder satisfacer las demandas de los cultivos.

El agua requerida para el funcionamiento del sector agrícola, exclusivamente en cultivos dentro de la cuenca, es de aproximadamente 219.3 millones de metros cúbicos por año. Asimismo, la huella hídrica verde total resulta de la sumatoria de la huella hídrica de los cultivos y de la huella hídrica del área que ocupan los bosques, lo que da un valor de 497.6 millones de metros cúbicos de agua verde por año. El valor de la huella hídrica gris anual para el sector agrícola es del orden de 18.7 millones de metros cúbicos de agua. Este valor corresponde a la cantidad de volumen de agua que sirve como amortiguador ambiental para asimilar la carga contaminante del sector agrícola.

Como puede notarse, la huella hídrica gris es aproximadamente un 3.2 % del valor de la sumatoria de la huella hídrica verde y azul (que representan el agua de consumo para los cultivos y bosques). Por consiguiente, se considera que la carga contaminante no es tan alta; sin embargo hay que tomar medidas, ya que en un corto plazo puede incrementarse la cantidad de carga contaminante al haber más áreas de cultivos y disminuirse la superficie boscosa. Aunado a esto, la calidad fisicoquímica y biológica del lago de Atitlán va mermando, por lo que la huella hídrica gris podría crecer y sería insustentable este recurso hídrico. Para el caso del sector doméstico, se tiene el siguiente análisis:

Tabla XIII. **Valores de huella hídrica para el sector doméstico en la cuenca de Atitlán**

Descripción	Valor	Dimensional
Huella hídrica azul	17,170,147.50	m <sup>3</sup> /año
Huella hídrica gris	84.57	m <sup>3</sup> /año

Fuente: elaboración propia.

La tabla XI indica que la cantidad de agua utilizada para el sector doméstico es relativamente alta en relación con el valor de la huella hídrica gris, la cual es bastante baja; lo que se interpreta como las actividades domésticas (no industriales ni de otros procesos) generan contaminación que un volumen bajo de agua es capaz de soportar. En cuanto a la interpretación de los análisis emergéticos, a continuación se explican los valores para determinar si el cuerpo hídrico es o no sostenible.

Tomando en consideración que el volumen de agua del lago de Atitlán corresponde a 24.5 km<sup>3</sup> (24,500,000,000 de metros cúbicos), y la huella hídrica gris corresponde a un valor de 18,696,659.61 de metros cúbicos por año, se puede establecer que continuando las actividades económicas y sociales actuales, la capacidad de amortiguamiento del lago de Atitlán podría durar más de 1,000 años; claro está, que si se incrementan las actividades de siembra, reduciendo los bosques, así como utilizando mayor cantidad de agroquímicos, disminuiría el tiempo que podría servir de amortiguamiento el cuerpo de agua que representa el lago de Atitlán. También, se tiene que tomar en cuenta que si el volumen de agua azul (extraída de fuentes superficiales) se obtiene del espejo de agua del lago de Atitlán, el volumen de dicho sistema disminuiría, restando también tiempo de vida del ecosistema que representa el lago de Atitlán.

Como parte del análisis de sostenibilidad del recurso hídrico que representa el lago de Atitlán, se hizo el estudio de cuatro escenarios para ver las posibles variaciones en los valores de huella hídrica para diferentes años, partiendo como base el escenario número uno (1) que corresponde a la situación actual, es decir, año 2018, y valuando las variaciones para los años proyectados 2028, 2068 y 2118. Se muestran los diversos escenarios en las siguientes tablas:

Tabla XIV. **Valores de huella hídrica para el escenario 1 (situación actual, año 2018) en la cuenca de Atitlán**

Descripción	Valor	Dimensional	Descripción	Escenario 1 (situación actual) año 2018	Dimensional
Huella hídrica verde cultivos	3,980.09	m³/Ton	Área de cultivos	18,548.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	39,136.28	Ton/año
			Huella hídrica verde	155,765,916.67	m³/año
Huella hídrica verde bosques	8,398.00	m³/ha	Área de bosques	22,160.00	ha/año
			Huella hídrica verde	186,099,680.00	m³/año
Huella hídrica azul cultivos	1,623.70	m³/Ton	Área de cultivos	18,548.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	39,136.28	Ton/año
			Huella hídrica azul	63,545,577.84	m³/año
Huella hídrica gris cultivos	477.73	m³/Ton	Área de cultivos	18,548.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	39,136.28	Ton/año
			Huella hídrica gris	18,696,575.04	m³/año
Huella hídrica azul doméstico			Habitantes	313,610.00	hab
			Dotación	150.00	L/hab/día
			Consumo	47,041.50	m³/día
			Huella hídrica azul	17,170,147.50	m³/año
Huella hídrica gris sector doméstico			Concentración de SST lago	25.00	mg/m³
			Concentración de SST permitida	25,000.00	mg/m³
			Concentración de NT lago	152.00	mg/m³
			Concentración de NT permitida	150,000.00	mg/m³
			Caudal vertido	13,736,118.00	m³/año
			Caudal vertido sin tratamiento	6,868,059.00	m³/año
			Concentración de SST con tratamiento	0.08925	mg/m³
			Concentración de SST sin tratamiento	0.21	mg/m³
			Concentración de NT con tratamiento	0.014875	mg/m³
			Concentración de NT sin tratamiento	0.035	mg/m³
			HHgris con tratamiento (SST)	24.54	m³/año
			HHgris sin tratamiento (SST)	57.75	m³/año
			HHgris con tratamiento (NT)	0.68	m³/año
			HHgris sin tratamiento (NT)	1.60	m³/año
HHgris doméstico	84.57	m³/año			

Fuente: elaboración propia

Tabla XV. Valores de huella hídrica para el escenario 2 (año 2028) en la cuenca de Atitlán

Descripción	Valor	Dimensional	Descripción	Escenario 2 (proyección 10 años) año 2028	Dimensional
Huella hídrica verde cultivos	3,980.09	m³/Ton	Área de cultivos	19,428.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	40,993.08	Ton/año
			Huella hídrica verde	163,156,147.78	m³/año
Huella hídrica verde bosques	8,398.00	m³/ha	Área de bosques	21,280.00	ha/año
			Huella hídrica verde	178,709,440.00	m³/año
Huella hídrica azul cultivos	1,623.70	m³/Ton	Área de cultivos	19,428.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	40,993.08	Ton/año
			Huella hídrica azul	66,560,464.00	m³/año
Huella hídrica gris cultivos	477.73	m³/Ton	Área de cultivos	19,428.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	40,993.08	Ton/año
			Huella hídrica gris	19,583,624.11	m³/año
Huella hídrica azul doméstico			Habitantes	413,353.00	hab
			Dotación	150.00	L/hab/día
			Consumo	62,002.95	m³/día
			Huella hídrica azul	22,631,076.75	m³/año
Huella hídrica gris sector doméstico			Concentración de SST lago	28.75	mg/m³
			Concentración de SST permitida	25,000.00	mg/m³
			Concentración de NT lago	174.80	mg/m³
			Concentración de NT permitida	25,000.00	mg/m³
			Caudal vertido	18,104,861.40	m³/año
			Caudal vertido sin tratamiento	9,052,430.70	m³/año
			Concentración de SST con tratamiento	0.08925	mg/m³
			Concentración de SST sin tratamiento	0.21	mg/m³
			Concentración de NT con tratamiento	0.014875	mg/m³
			Concentración de NT sin tratamiento	0.035	mg/m³
			HHgris con tratamiento (SST)	32.35	m³/año
			HHgris sin tratamiento (SST)	76.13	m³/año
			HHgris con tratamiento (NT)	5.42	m³/año
			HHgris sin tratamiento (NT)	12.76	m³/año
HHgris doméstico	126.66	m³/año			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Valores de huella hídrica para el escenario 3 (año 2068) en la cuenca de Atitlán

Descripción	Valor	Dimensional	Descripción	Escenario 3 (proyección 50 años) año 2068	Dimensional
Huella hídrica verde cultivos	3,980.09	m³/Ton	Área de cultivos	22,948.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	48,420.28	Ton/año
			Huella hídrica verde	192,717,072.23	m³/año
Huella hídrica verde bosques	8,398.00	m³/ha	Área de bosques	17,760.00	ha/año
			Huella hídrica verde	149,148,480.00	m³/año
Huella hídrica azul cultivos	1,623.70	m³/Ton	Área de cultivos	22,948.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	48,420.28	Ton/año
			Huella hídrica azul	78,620,008.64	m³/año
Huella hídrica gris cultivos	477.73	m³/Ton	Área de cultivos	22,948.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	48,420.28	Ton/año
			Huella hídrica gris	23,131,820.36	m³/año
Huella hídrica azul doméstico			Habitantes	1,247,515.00	hab
			Dotación	150.00	L/hab/día
			Consumo	187,127.25	m³/día
			Huella hídrica azul	68,301,446.25	m³/año
Huella hídrica gris sector doméstico			Concentración de SST lago	37.38	mg/m³
			Concentración de SST permitida	25,000.00	mg/m³
			Concentración de NT lago	227.24	mg/m³
			Concentración de NT permitida	25,000.00	mg/m³
			Caudal vertido	54,641,157.00	m³/año
			Caudal vertido sin tratamiento	27,320,578.50	m³/año
			Concentración de SST con tratamiento	0.08925	mg/m³
			Concentración de SST sin tratamiento	0.21	mg/m³
			Concentración de NT con tratamiento	0.014875	mg/m³
			Concentración de NT sin tratamiento	0.035	mg/m³
			HHgris con tratamiento (SST)	97.68	m³/año
			HHgris sin tratamiento (SST)	229.84	m³/año
			HHgris con tratamiento (NT)	16.40	m³/año
			HHgris sin tratamiento (NT)	38.60	m³/año
			HHgris doméstico	382.52	m³/año

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Valores de huella hídrica para el escenario 4 (año 2118) en la cuenca de Atitlán

Descripción	Valor	Dimensional	Descripción	Escenario 4 (proyección 100 años) año 2118	Dimensional
Huella hídrica verde cultivos	3,980.09	m³/Ton	Área de cultivos	27,348.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	57,704.28	Ton/año
			Huella hídrica verde	229,668,227.79	m³/año
Huella hídrica verde bosques	8,398.00	m³/ha	Área de bosques	13,360.00	ha/año
			Huella hídrica verde	112,197,280.00	m³/año
Huella hídrica azul cultivos	1,623.70	m³/Ton	Área de cultivos	27,348.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	57,704.28	Ton/año
			Huella hídrica azul	93,694,439.44	m³/año
Huella hídrica gris cultivos	477.73	m³/Ton	Área de cultivos	27,348.00	ha
			Rendimiento	2.11	Ton/ha
			Producción	57,704.28	Ton/año
			Huella hídrica gris	27,567,065.68	m³/año
Huella hídrica azul doméstico			Habitantes	4,962,510.00	hab
			Dotación	150.00	L/hab/día
			Consumo	744,376.50	m³/día
			Huella hídrica azul	271,697,422.50	m³/año
Huella hídrica gris sector doméstico			Concentración de SST lago	56.06	mg/m³
			Concentración de SST permitida	25,000.00	mg/m³
			Concentración de NT lago	340.86	mg/m³
			Concentración de NT permitida	25,000.00	mg/m³
			Caudal vertido	217,357,938.00	m³/año
			Caudal vertido sin tratamiento	108,678,969.00	m³/año
			Concentración de SST con tratamiento	0.08925	mg/m³
			Concentración de SST sin tratamiento	0.21	mg/m³
			Concentración de NT con tratamiento	0.014875	mg/m³
			Concentración de NT sin tratamiento	0.035	mg/m³
			HHgris con tratamiento (SST)	388.86	m³/año
			HHgris sin tratamiento (SST)	914.96	m³/año
			HHgris con tratamiento (NT)	65.56	m³/año
			HHgris sin tratamiento (NT)	154.25	m³/año
HHgris doméstico	1523.63	m³/año			

Fuente: elaboración propia

Los datos mostrados en las tablas anteriores (XIV, XV, XVI y XVII) se resumen en la siguiente tabla, que corresponde a los valores totales de las huellas hídricas verde, azul y gris para el sector agrícola y doméstico, dentro de la cuenca de Atitlán:

**Tabla XVIII. Resumen de valores de la huella hídrica para 4 escenarios en la cuenca de Atitlán**

<b>Año</b>	<b>Huella hídrica verde (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Huella hídrica azul (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Huella hídrica gris (m<sup>3</sup>/año)</b>
2018	341,865,596.67	80,715,725.34	18,696,659.61
2028	341,865,587.78	89,191,540.75	19,583,750.77
2068	341,865,552.23	146,921,454.89	23,132,202.88
2118	341,865,507.79	365,391,861.94	27,568,589.31

Fuente: elaboración propia.

Puede apreciarse en la tabla anterior, que el valor de la huella hídrica verde para diversos escenarios varía muy poco, ya que el área destinada para siembra y para bosques se alteran mínimamente en el lapso de tiempo analizado; es decir, si la frontera agrícola se expande, esa expansión se da generalmente hacia las áreas que actualmente tienen bosques, de tal manera que la precipitación efectiva que se tiene dentro de la cuenca será similar, no importando el tipo de vegetación que se tenga. La variación se dará en el requerimiento de riego, ya que los cultivos sí requieren la adición extra de agua proveniente de aguas continentales (ríos, lagos, entre otros). Puede verse por tal razón que conforme avanzan los años el requerimiento hídrico que se eleva demasiado corresponde al sector agrícola para cultivos y el sector doméstico para abastecer la demanda diaria en la población.

Para un lapso de 100 años se espera un incremento de casi 5 veces el requerimiento hídrico actual dentro de la cuenca, en lo que corresponde a la

huella hídrica azul. Asimismo, al haber mayor consumo de agua para consumo humano, así como para la siembra de cultivo, se repercute en la cantidad de agua necesaria para asimilar la carga contaminante producto de la aplicación de fertilizantes, así como el agua residual de origen doméstico que es tratada y la que no es tratada, que en conjunto conllevan una mayor contaminación hacia el cuerpo de agua que contiene el lago de Atitlán.

La siguiente figura muestra la tendencia que hay en proyección, de las tres huellas hídricas calculadas de acuerdo con la metodología propuesta; de tal manera que el crecimiento logarítmico de la población hará crecer la demanda del recurso hídrico extraído de aguas superficiales o subterráneas, alterando el ciclo hidrológico, llegando incluso al límite del estrés hídrico dentro de la cuenca.

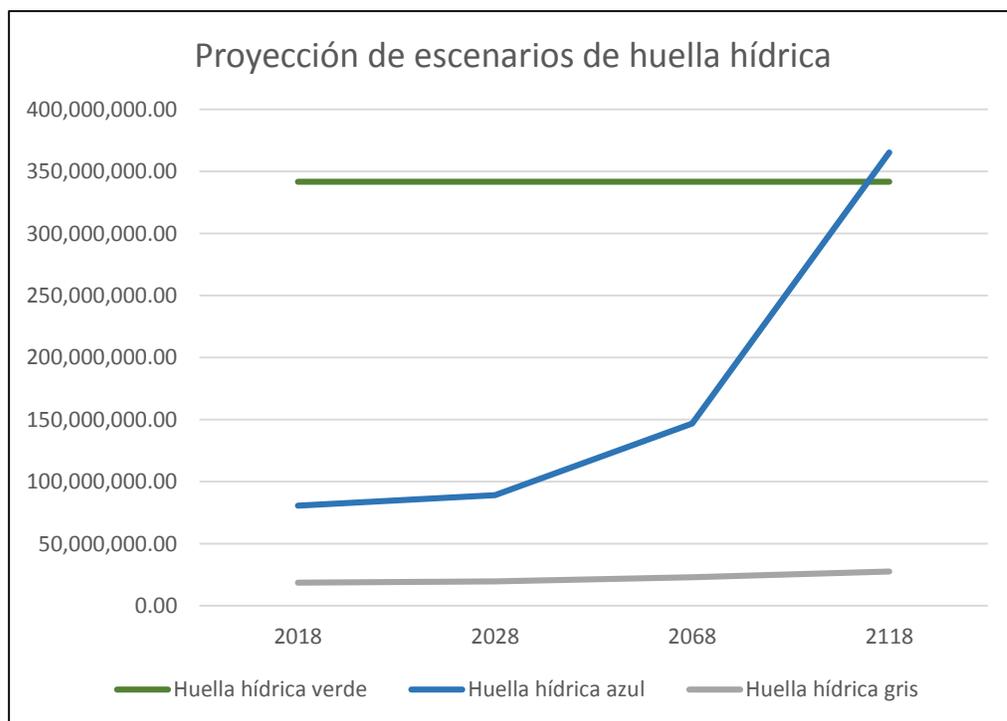


Figura 28. Proyección de escenarios de huella hídrica para un rango de 100 años.

Fuente: elaboración propia.

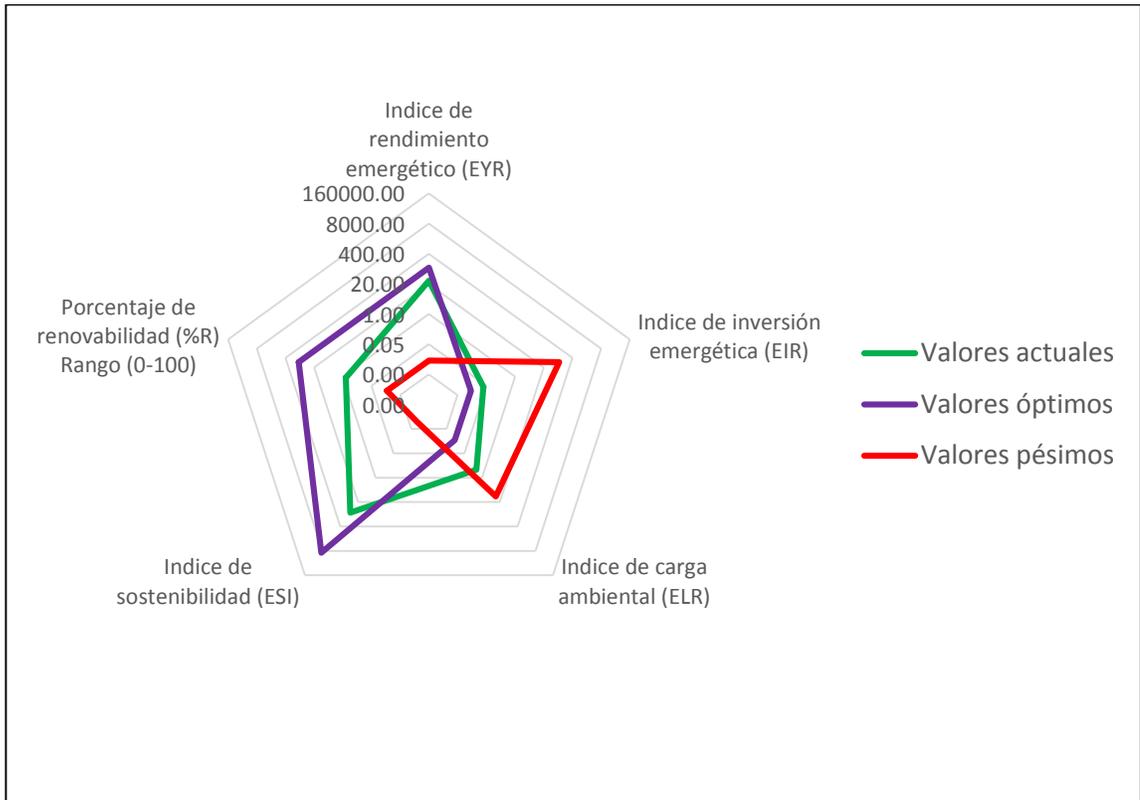


Figura 29. Índices energéticos en la cuenca de Atilán.

Fuente: elaboración propia.

En relación con la figura 29, se puede notar que de acuerdo con los índices energéticos, el lago de Atilán se encuentra más cerca de los valores óptimos que los valores pésimos, tomando en cuenta la interpretación de cada uno de los cinco índices descritos.

De acuerdo con la literatura, sistemas ecológicos con índices de rendimientos energéticos menores a 1, son insostenibles. En este caso, el valor de este índice corresponde a 27.99, el cual es mayor a la unidad; por lo cual se puede decir hasta el momento, que la interacción termodinámica y aprovechamiento de energía en la cuenca de Atilán es sostenible.

En cuanto al índice de inversión de energía, se tiene que entre más bajo es el valor, se es menos dependiente de recursos provenientes de la economía, por lo tanto, en el caso de la cuenca de Atitlán, se afirma que los recursos naturales utilizados son mayormente no pagados, por lo que es sostenible desde este punto de vista.

El índice de carga ambiental (0.38) contenido en la tabla XII, se interpreta de la siguiente manera: valores inferiores a 2 indica que hay un bajo impacto en el medio ambiente; valores de entre 2 y 10 significa que el sistema impacta de forma moderada, y mayores que 10, significan que el uso de recursos dentro de la cuenca afecta altamente el ambiente. En este caso, el valor obtenido fue de 0.38 el cual es menor a 2, lo que significa que hay un bajo impacto ambiental derivado de las acciones antrópicas dentro de la cuenca, debido al uso de los recursos naturales.

En cuanto al índice de sostenibilidad, se tuvo un valor de 73.66. Este indica una relación entre costo/beneficio de los procesos productivos dados dentro de la cuenca; entre más alto es este valor, mayor sostenibilidad existe. En este caso se puede considerar que se tiene un valor medio, lo que significa que, si se continúa con mayor contaminación y explotación irracional del uso de la tierra, se disminuirá la sostenibilidad de la cuenca de Atitlán.

En relación con el porcentaje de renovabilidad, se obtuvo un valor de 72 por ciento. Esto indica que la mayor parte de los recursos utilizados dentro de la cuenca son renovables. El restante 28 por ciento corresponde a recursos no renovables, los cuales inciden en la sostenibilidad del recurso natural adscrito dentro de la cuenca de Atitlán.

## Reflexiones finales

El objetivo principal de este trabajo de investigación se centró en *“establecer la metodología para estimar indicadores de la economía ecológica en un cuerpo léntico, basándose en las características físicas, biológicas, químicas, sociales, culturales y económicas dentro de la cuenca que lo subtiende”*, por tanto, se realizó un proceso teórico en relación con la economía ecológica aplicada a un cuerpo léntico y su aplicación se llevó a cabo bajo las características propias de la cuenca del lago de Atitlán. El objetivo fue alcanzado, puesto que no solo cubrió cada uno de los requerimientos del método científico, sino que se constata con las discusiones teóricas, empíricas y hallazgos que este trabajo investigativo logró determinar que bajo las características actuales el lago de Atitlán está aún dentro de los límites de la sostenibilidad, pero que si se continúa dañando al ambiente y el ecosistema que representa dicho cuerpo hídrico, seguramente dejará de ser sostenible.

La aportación teórica de esta tesis versa en el tratamiento teórico del enfoque de economía ecológica en recursos hídricos, y también, en la aportación de la metodología que permite la determinación de la sostenibilidad de los sistemas lénticos. Es así como en el objetivo particular número uno se describe la necesidad de fundamentar teórica y metodológicamente la aplicación de la huella hídrica en los sistemas lénticos. De esta forma, los conceptos centrales de la economía ecológica utilizados fueron la huella hídrica y el análisis emergético.

Algunos parámetros fisicoquímicos parecieran determinar un estado saludable de los cuerpos lénticos, sin embargo, al momento de analizar la calidad de un sistema hídrico se debe realizar de una forma integrada y no cada parámetro por separado. Es por ello, que la demanda de la economía ecológica versa en la vinculación de los fenómenos sociales sobre el medio ambiente, y no

del medio ambiente como tal. Este trabajo aporta desde la vinculación de los recursos renovables y no renovables, tanto pagados como los que no; lo que permite plantear la estructura central de la discusión de la economía ecológica.

Es válido utilizar la economía ecológica para determinar la sostenibilidad de recursos hídricos (específicamente sistemas lénticos); para ello se propuso y validó una metodología secuencial basándose en parámetros climatológicos y aspectos socioeconómicos de la cuenca que subtiende un cuerpo hídrico específico (en este caso el lago de Atitlán). Donde se observa que la metodología propuesta arroja datos interesantes en relación con los indicadores propuestos que radican en la determinación de la sostenibilidad del cuerpo léntico.

La eutrofización de forma natural sin la influencia del ser humano se ha presentado en análisis sobre lagos, pero no profundizan en la combinación de la relación entre la sociedad y el espacio físico. Es por ello que el enfoque antrópico que brinda este trabajo permite considerar el proceso de eutrofización a partir del ser humano que interviene en los diferentes procesos de los recursos hídricos que modifican los aspectos físicos, químicos y biológicos.

El enfoque teórico elaborado en esta tesis doctoral plantea una orientación de dos naturalezas en conjunto; por un lado, la interacción de la sociedad y por otro la naturaleza, que, descrito de otra forma, amalgama los sistemas económicos y ecológicos. De esta cuenta, se observa la influencia que tiene la sociedad sobre el lago, y que, a partir de la clasificación de recursos naturales renovables no pagados, recursos naturales no renovables no pagados y recursos naturales no renovables pagados, se pudo obtener información en relación con el ecosistema o la región analizada. Cada uno de los enfoques de los recursos naturales renovables pagados o no, y los no renovables, son las variables a través de las cuales se planteó la metodología de sostenibilidad de este trabajo.

La dirección hacia las cuales los diversos investigadores han girado la discusión de la economía ecológica se centra en la construcción y búsqueda del paradigma científico que yace en la estrategia y gestión del desarrollo sostenible. Sin embargo, para la construcción de dicho paradigma, un factor determinante es la vinculación entre el ser humano con el medio ambiente orgánico e inorgánico; ya que toda actividad antrópica requiere del uso de recursos que provienen de la naturaleza, y esto lleva a la presentación de flujos de entrada y salida del sistema, lo que en cierta medida denota que hacia el lago se estarían realizando excreciones. Por tanto, la esfera que presenta la combinación de los elementos naturales y sociales denotan enfoques que se pueden observar a partir del esquema materializado, son palpables y observables; pero también denota aspectos inmateriales no observables, sin ser palpables.

La metodología propuesta denota el mantenimiento de la capacidad del sistema en vinculación entre la economía y el medio ambiente; sin embargo, incluye una perspectiva longitudinal en el tiempo, que permite considerar los diferentes elementos que puedan hacer sostenible el recurso a lo largo del tiempo. Esto lleva a la misma discusión entre lo que se plantea en la expresión de libre mercado, que no toma en cuenta las consecuencias ambientales, sino que simplemente trabaja a partir de la oferta y demanda, con la consecución de beneficios económicos a corto plazo, sin el planteamiento de escenarios futuros. Lo que erróneamente ha llevado a considerar a diferentes sectores de la sociedad que los recursos naturales se caracterizan por ser infinitos e ilimitados, lo que contradice la perspectiva sostenible.

La huella hídrica no solo permite plantear escenarios para la toma de decisiones, sino que plantea fundamentos mucho más profundos como la modelación predictiva de fenómenos sociales. Asimismo, se puede relacionar el análisis de la huella hídrica como un indicador de sostenibilidad que identificaría

los efectos de la sociedad. Por tanto, la asociación de la huella hídrica en relación con actividades socioeconómicas plantea la base metodológica de este trabajo que busca un enfoque de sostenibilidad. Dado que, la agricultura (técnicas, rendimientos, aspectos de irrigación y variables climatológicas) son actividades sociales que denotan el dominio de los hombres sobre los diferentes ciclos de la naturaleza; también la huella hídrica se puede medir a partir del consumo de los recursos agrícolas dentro de un área geográfica determinada.

Debido a que la aplicación de la economía ecológica en Guatemala ha sido muy escasa, y mucho menos se ha presentado la investigación desde la perspectiva de los recursos hídricos, demandó en esta tesis un esfuerzo empírico y teórico importante, dado que existe carencia de información y de equipos especializados. Esto es observable en la aplicación a nivel superficial por parte de instituciones que se enfocan en cubrir ciertos elementos de interés y no la gran cobertura que esta tesis aborda de la sostenibilidad de lagos. Si bien la tesis resulta de un grado alto de aportación, incluye la inmersión al conocimiento sobre un tema muy poco abordado y que se ve limitado por la carencia de información. Por tanto, este trabajo genera diferentes líneas de investigación a seguir que se describen en las recomendaciones, y que permiten, gracias a este trabajo de investigación, plantear líneas de discusiones de interés en el mundo académico.

La emergía también lleva implícita la relación entre la sociedad y el medio ambiente; ya que la emergía emplea la cantidad necesaria de energía para producir cualquier objeto o servicio, de manera directa o indirecta, y por lo general se busca su cuantificación en equivalentes de la energía solar. Por ello, se han utilizado las variables de “valor donante” y “valor receptor”; el primero se asocia a lo que la gente desea pagar por el producto, mientras que el valor donante tiene relación con la cantidad necesaria para realizar el producto o servicio a partir de la cadena ambiental y socioeconómica. Por ello, en el análisis emergético se

puede asignar un valor ambiental y otro económico del producto o servicio a partir de cantidades de energías utilizadas para su creación.

Debido a que el agua es un recurso natural que se encuentra presente en todos los procesos antrópicos, y que conlleva en cierto sentido al uso irracional; es a través del análisis emergético como se obtiene la información en relación con el recurso y cuánto se aprovecha de él, así como la cantidad que es pagada a partir de los diferentes procesos por su utilización. Por ello se observó en este trabajo que existe un desbalance entre el agua del lago de Atitlán que es utilizada para la producción de los diferentes servicios y productos de la sociedad, donde se aporta más emergía que la que se paga por su uso.

Los valores de huella hídrica para el sector agrícola reflejan que la mayor cantidad de agua utilizada para los cultivos proviene de la precipitación pluvial (79 %) comparada con el agua superficial o subterránea (21 %).

El valor de la huella hídrica azul para el sector doméstico es de 17.1 millones de metros cúbicos al año, que se interpreta como el agua necesaria para el diario vivir de los habitantes dentro de la cuenca de Atitlán.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la metodología de la huella hídrica, se determinó que la carga contaminante que pone en peligro la sostenibilidad del lago de Atitlán es la relacionada con el sector agrícola (cultivos); de acuerdo con la metodología se obtuvo que la huella hídrica gris es un 8.5 % del valor del agua utilizada en el proceso agrícola.

En cuanto a los índices emergéticos que se obtuvieron, se concluye que con las condiciones actuales que se tienen dentro de la cuenca de Atitlán, es válido decir que se presenta un nivel de sostenibilidad; sin embargo, los índices

de renovabilidad y de sostenibilidad indican que de crecer el área urbana y de uso de suelo para siembra, pueden disminuirse estos índices ocasionando la insostenibilidad a corto plazo del sistema hídrico.

Como objetivo particular número cuatro se planteó lo siguiente: *“Realizar un análisis de la optimización de la sostenibilidad de cuerpos lénticos, con base en la interpretación de los valores de los parámetros determinados con la economía ecológica”*, en este sentido se menciona en la metodología que existen variables independientes como el área de la cuenca, insolación, albedo, transformidades, precipitación, evapotranspiración, escorrentía, gravedad, densidad de agua, densidad del aire, población, gasto eléctrico anual y nutrientes, de donde se obtuvieron los datos para la determinación de las variables dependientes.

Las variables planteadas en la metodología de la sostenibilidad de cuerpos lénticos denotan en buena medida la alteración que se ha brindado por parte de la sociedad por ejemplo: el gasto eléctrico anual depende en buena medida del consumo que realizan las personas en diferentes actividades urbanas y otras relacionadas con la agricultura; los fertilizantes agroquímicos utilizados en las siembras, por escorrentía, llegan a los cuerpos hídricos debido a efectos de la gravedad y la permeabilidad del suelo; la acción antrópica resulta ser muy interesante en cuanto al análisis de incidencia en el ecosistema debido a acciones directas e indirectas, por ejemplo, en invierno se produce escurrimiento superficial y subsuperficial que lleva un alto contenido de nutrientes debido a los desechos sólidos, líquidos y a la aplicación de químicos agropecuarios o industriales.

Es decir, la sostenibilidad planteada en este trabajo a partir de las bases metodológicas de la economía ecológica sobre un cuerpo léntico incide en

elementos de la sociedad que denotan el consumo de bienes extraíbles de la naturaleza; por tanto, los resultados obtenidos en la presente investigación a partir de las variables propuestas denotan la capacidad del sistema económico y del medio ambiente para satisfacer las necesidades y deseos de los seres humanos a largo plazo. Por ejemplo, el índice de inversión energética denota la disparidad existente entre los recursos naturales renovables y los recursos naturales no renovables no pagados, con los recursos renovables y los recursos no renovables pagados; es decir, al realizar la población un mayor consumo de recursos pero que son pagados disminuye el índice de inversión y, por tanto, denota un amplio margen de sostenibilidad que puede ser atendida.

La disparidad existente entre los recursos renovables y no renovables no pagados con los recursos renovables y no renovables pagados, es que no existe una alta devolución económica de la población que hace uso de los diferentes recursos en la cuenca del lago de Atitlán, ya que el porcentaje del Índice de Inversión Energética (EIR) es bajo, alrededor de 0.04. Sin embargo, conforme se optimicen dichos recursos en relación con el pago por el uso de los recursos renovables, este porcentaje incrementaría; lo que permitiría aumentar el índice de Inversión Energética (EIR) y por tanto, contiene un alto nivel de sostenibilidad. Los recursos renovables y no renovables seleccionados permiten sustentar la alta relación que plantea la metodología propuesta en este trabajo, en contraste de los recursos que dependen de la economía y que, al mismo tiempo, denotan la posibilidad de la sostenibilidad del cuerpo léntico analizado (lago de Atitlán).

El Índice de Rendimiento Energético (EYR) denota por un lado los recursos naturales no renovables pagados, en contraste con la densidad de potencia energética. Es decir, mientras exista una diferencia entre los recursos que se pagan y los que no son renovables, la potencia energética indicará que la posibilidad de que el sistema léntico sea sostenible es mayor, ya que al ser mayor

el uso de recursos no renovables y que el potencial energético sea similar, esto no brindará características del tratamiento del cuerpo léntico como sistema. Además, la búsqueda de la satisfacción de los deseos y necesidades de los seres humanos se debe a un planteamiento de largo plazo, y entre mayor sea el uso de recursos naturales no renovables, menor será la sostenibilidad del recurso léntico. Al plantear en la metodología de este trabajo el Índice de Rendimiento Energético, se establece un indicativo que permite determinar la capacidad o el nivel de sostenibilidad de un cuerpo léntico, lo cual iría asociado con los aspectos económicos que plantea la economía ecológica.

En relación con el Índice de Carga Ambiental (ELR en sus siglas en inglés), se realiza el contraste entre los recursos naturales renovables con los recursos no renovables. En este sentido, si los recursos no renovables llegan a ser mayores que los renovables, esto indica que el sistema plantea un mayor uso de recursos que tienen un mayor impacto sobre el medio ambiente. Por tanto, la metodología propuesta, considera los recursos renovables que permitirían determinar la sostenibilidad del cuerpo léntico, pero también, incluye los recursos no renovables que tienen mayor incidencia e influencia sobre un cuerpo léntico. Es decir, la metodología planteada incluye recursos que tienen mayor influencia sobre el cuerpo léntico, por ello, la comparación entre recursos naturales renovables y no renovables mantiene la vinculación con el sistema léntico, la escorrentía, la precipitación, evapotranspiración, albedo, insolación, gasto eléctrico anual, nutrientes, densidad de agua, densidad de aire, entre otros.

El porcentaje de renovabilidad se centra en el análisis de todos los recursos naturales renovables, es decir, contempla a aquellos recursos que se hayan o no pagado y que permite delimitar la potencia que tendría el sistema léntico para su renovabilidad. Puesto que la renovabilidad del cuerpo léntico depende de la capacidad de sobrevivir ante algún estrés económico. En el caso

del lago de Atitlan se observa un porcentaje alto de renovabilidad (73 %), ya que, en su mayoría, los recursos planteados son correlacionados con la economía; lo cual brinda una relación entre la sostenibilidad a partir de la huella hídrica y el análisis emergético.

El índice de sostenibilidad (ESI) es afín con el rendimiento emergético y la carga ambiental, es decir, que establece la vinculación entre el costo y beneficio de los productos o procesos de la economía con el impacto sobre el medio ambiente, es decir que el rendimiento emergético está asociado con el nivel de aprovechamiento que se tiene de los recursos renovables y no renovables sobre el efecto ambiental. En el caso del lago de Atitlán se observó un índice alto (74.49), lo que implica que se presentaría una brecha considerable que permitiría plantear la sostenibilidad del cuerpo léntico a partir de los efectos ocasionados por la población sobre el lago.

Entre las principales aportaciones que esta tesis doctoral genera, se encuentran las siguientes:

1. Se plantea metodológicamente la discusión de dos conceptos novedosos de la economía ecológica (huella hídrica y análisis emergético) en relación con la sostenibilidad de cuerpos lénticos. No obstante, para lograr la aportación teórica de esta tesis, se realizó un trabajo exhaustivo teórico de los conceptos principales y teorías que se abordan, lo que permitió determinar la discusión actual sobre la sostenibilidad de cuerpos lénticos; por tanto, se logró avizorar un vacío en el conocimiento que a través del método científico con esta tesis se está logrando cubrir y discutir.
2. Otro de los grandes aportes de esta tesis se centra en la obtención de datos y el trabajo empírico realizado; ya que al carecer de diferentes

informaciones y de instituciones que tuvieran una base de datos, precisó de la utilización de diferentes herramientas que producen datos y resultados sumamente importante.

3. Si bien la emergía ha sido abordada a diferentes escalas de fenómenos sociales donde se entremezclan con el medio ambiente, esta tesis profundiza en una línea teórica poco abordada como el análisis emergético de cuerpos lénticos. Esto lleva a la discusión de la sostenibilidad y fenómenos económicos, sobre recursos que son finitos, principalmente, sobre cuerpos que se han contaminado y desapareciendo.

## CONCLUSIONES

1. La metodología determinada en este estudio de investigación, fue aplicada en la cuenca del lago de Atitlán, a partir de variables climáticas, parámetros de calidad del agua del lago, así como aspectos físicos, sociales y económicos de la población que reside dentro de la cuenca que subtiende al lago de Atitlán. Se obtuvieron datos que indican que el lago en estudio se considera de buena calidad, de acuerdo con el análisis emergético y la aplicación de la huella hídrica.
2. Se desarrolló una metodología para determinar la huella hídrica en un sistema léntico, la cual conlleva el proceso siguiente: definición del alcance general del estudio, cuantificación de la huella hídrica, evaluación de la sostenibilidad, y formulación de propuestas.
3. De acuerdo con los valores obtenidos en el análisis de la huella hídrica aplicada a la cuenca que subtiende el lago de Atitlán, se deduce que actualmente hay sostenibilidad en dicho cuerpo hídrico, tomando en consideración que el 71 % del agua consumida en los cultivos proviene de la precipitación y que el 29 % proviene de agua superficial o subsuperficial. Asimismo, de acuerdo con los datos obtenidos para el funcionamiento del sector agrícola dentro de la cuenca del lago de Atitlán, se requieren 578.35 millones de metros cúbicos de agua por año (497.63 millones de metros cúbicos correspondientes a la huella hídrica verde y 80.72 millones de metros cúbicos que reflejan la huella hídrica azul).

4. Analizando los valores obtenidos en los índices emergéticos aplicados para la determinación de sostenibilidad de cuerpos lénticos, se obtuvieron los valores siguientes: Índice de Rendimiento Emergético (EYR) de 27.99, Índice de Inversión Emergética (EIR) de 0.04, Índice de Carga Ambiental (ELR) de 0.38, Índice de Sostenibilidad (ESI) de 73.66 y el porcentaje de renovabilidad (%R) de 72 %. Estos valores reflejan que la interacción termodinámica dentro del lago de Atitlán y el aprovechamiento de la energía en la cuenca, actualmente, es sostenible.

#### **Conclusiones adicionales:**

5. Según la proyección de escenarios de las actividades que se desarrollan dentro de la cuenca de Atitlán, se prevé un aumento significativo en el valor de la huella hídrica azul (aproximadamente 5 veces en un lapso de 100 años), lo que generaría estrés hídrico, ya que la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades agrícolas y domésticas se verían afectadas. Asimismo se aprecia un crecimiento gradual del valor de la huella hídrica gris, lo que indica que la cantidad de agua dulce necesaria para asimilar la carga contaminante, será mayor con cada año transcurrido. En cuanto a la huella hídrica verde, que corresponde al volumen de agua proveniente de la precipitación que puede utilizarse con fines agrícolas, no se ve afectada, ya que el área que actualmente ocupan los cultivos y los bosques podrían variar entre sí, pero no variarían la demanda.
6. En cuanto a los índices emergéticos que se calcularon en el proceso metodológico, resulta que con las condiciones actuales de la cuenca del lago de Atitlán se interpreta que hay sostenibilidad: sin embargo, el índice de renovabilidad y de sostenibilidad indican que al crecer el área urbana

(poblados más grandes) y aumentar el área de siembra, pueden disminuirse dichos índices ocasionando la insostenibilidad a corto plazo del lago de Atitlán.

7. La optimización de los índices energéticos y de la aplicación de la huella hídrica para determinar la sostenibilidad de lagos se basa en: ordenar territorialmente los municipios circunscritos dentro de la cuenca del lago de Atitlán, realizar tratamiento de aguas residuales previo a disponerlas en ríos o riachuelos, disminuir la deforestación, mejorar la calidad de fertilizantes utilizados dentro de la cuenca para evitar que estos contaminen el lago y depender mayormente de recursos renovables para la subsistencia.



## RECOMENDACIONES

1. Entre las líneas futuras de investigación que este trabajo aporta se encuentran las siguientes:
  - a. Debido a que la economía ecológica incluye otros conceptos e indicadores como el metabolismo social, análisis del ciclo de vida, el desempeño ambiental, la huella ecológica y el bienestar o calidad de vida que no fueron tomados en este trabajo, sería interesante el analizar la sostenibilidad de un cuerpo léntico a través de estos conceptos. Esto brindaría diferentes líneas de investigación y nuevas metodologías, lo cual permitiría la discusión teórica de una perspectiva novedosa en los cuerpos lénticos y su sostenibilidad en la actualidad.
  - b. La escala analizada en la presente investigación se centra en la escala macro y que considera geográficamente la totalidad de la cuenca, por tanto, las siguientes líneas de investigación que se pueden desarrollar serían a partir de las diferentes escalas que brinda la huella hídrica: como delimitación geográfica de una subcuenca, municipio, área urbana y área rural. También, se puede profundizar en investigaciones futuras a partir del análisis de los productos y servicios que se dan al interior de la cuenca, y distinguir la delimitación del área de análisis a partir de empresas, clientes, productos y servicios que converjan en un área geográfica delimitada.
  - c. Debido a la escasez de información para la aplicación de diferentes variables e indicadores, una línea de investigación futura que permitiría plantear escenarios que se vinculan con la interacción

humana, sería profundizar en dinámicas sociales a través de encuestas y entrevistas estructuradas sobre los diferentes elementos que componen la sostenibilidad de lagos a partir de la huella hídrica y el análisis emergético. Ya que al poseer las instituciones públicas, privadas y académicas mayor información dentro de una cuenca que vincule la economía ecológica y la sostenibilidad de lagos, permitiría escudriñar en dinámicas sociales más complejas y de fondo. Puesto que uno de los retos de esta investigación radicó en la obtención de información y datos; por tanto, este trabajo aporta al conocimiento a partir del planteamiento metodológico y empírico generado por esta investigación.

2. Se recomienda a las autoridades designadas a la obtención de datos técnicos y científicos, depurar las bases de datos y generar líneas basales rigurosas para manejo de datos, por ejemplo, sobre variables climáticas, parámetros de calidad del agua, entre otros. Esto con la finalidad de facilitar las investigaciones futuras en relación con los cuerpos lénticos, asimismo, el hecho de que instituciones públicas, privadas y académicas cuenten con información que permita tomar decisiones adecuadas y que representen los fenómenos sociales actuales. Principalmente, con recursos naturales que son finitos para el existir de los seres humanos como sociedad, por consiguiente, el enfoque sustentable depende en buena medida de la información con la que se cuente para la toma de decisiones e investigaciones futuras.
3. Las instituciones académicas a través de sus entidades responsables en el manejo de información y la generación de conocimiento, deben facilitar los medios y herramientas para propiciar la investigación sobre temas trascendentales en la actualidad. Para ello, la Facultad de Ingeniería de la

Universidad de San Carlos de Guatemala debería ser una de las principales entidades que desarrolle diferentes investigaciones y que cuente con la capacidad de generación de información relacionada con el uso de suelo, variables climáticas y dinámicas sociales en relación con los cuerpos lénticos. Puesto que, para adentrar en la discusión al conocimiento actual, las entidades académicas deben ser las pioneras en estas temáticas.

4. Se propone a la administración del Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad las siguientes líneas de investigación:
  - a. Análisis la sostenibilidad de sistemas lóticos.
  - b. Estudio de sistemas lénticos y lóticos desde diferentes indicadores de la economía ecológica.
  - c. Validación de la metodología propuesta en esta investigación, en otros cuerpos hídricos.
  - d. Modelación de escenarios en cuencas hidrográficas variando la información relacionada con siembras, rendimientos y coeficientes de cultivos, aplicando sistemas de información georreferenciada GIS.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acuerdo gubernativo 236-2006. (2006). *Reglamento de las descargas y reúso de las aguas residuales y de la disposición de lodos. Guatemala*. Recuperado de <http://vestex.com.gt/wp-content/uploads/2015/04/Reglamento-descargas-de-aguas-residuales-AG236-2006.pdf>.

Agroder. (2012). *Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica*. México: WWF México y AgroDer. Recuperado de <http://www.huellahidrica.org/Reports/AgroDer,%202012.%20Huella%20h%C3%ADdrica%20en%20M%C3%A9xico.pdf>.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de cultivos*. N°56 Ed. FAO. Italia. ISSN 0254-5293.

Arévalo, D., Lozano J., Sabogal, J. (2011). *Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola*. España: Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo.

Asociación Patronato Vivamos Mejor, Municipalidad de San Pedro La Laguna, *The Nautre Conservanci –TNC- (2003). Plan de manejo 2003-2007, parque regional Municipal Chuwanimajuyu’, San Pedro La Laguna, Guatemala*. Guatemala.

Azurdia, I. (2014). *Ponencia: Estado actual del lago de Atitlán*. Guatemala, Memorias I Simposio de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en la cuenca del Lago Atitlán, Unidos por el Lago.

Bastianoni, S., Marchettini, N. (1996). *Ethanol Production from Biomass: Analysis of Process Efficiency and Sustainability*. *Biomass and Bioenergy*, Vol.11, N°5.

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof. 2008. *El Cambio Climático y el Agua*. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>.

Brown, M., Tennenbaum S., Odum, H.T. (1991). *Emergy analysis and policy perspectives for the sea of Cortez, México*. Estados Unidos, Center for Wetlands, University of Florida.

Brown, M., Ulgiati, S. (2004). *Emergy analysis and environmental accounting*. Estados Unidos: Encyclopedia Energy 2.

Buenfil, A. (2001). *Emergy Evaluation of Water*. Estados Unidos, University of Florida.

Cadenas, A. (s.f.). *La economía ecológica como ciencia del desarrollo sostenible*. Recuperado de: <http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistanº20/Alfredo%20Cadenas%20Mar%C3%ADn.pdf>

- Castelli, L., Herrero, A., Arévalo, D. (2012). *Cálculo y análisis de la huella hídrica de la provincia de San Luis. Sectores agrícola y pecuario*. Argentina: Ministerio del Campo, Gobierno de la Provincia de San Luis.
- Castilla, C. (1994). *Economía ecológica: estudio de valoración de los ecosistemas forestales de Canarias*. España: Servicio de publicaciones Universidad de la Laguna.
- Cátedra de protección y conservación de la naturaleza. (2010). *Eutrofización*. Argentina.
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. (2013). *Resumen de resultados. Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del Río Porce*. Colombia: CTA.
- Common, M., Stagl, S. (2008). *Introducción a la Economía Ecológica*. España, Editorial Reverté, S. A.
- Costanza, R. (1989). *What is Ecological Economics? Ecological Economics, Vol. 1, No.1*.
- Crites, R., Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A. ISBN10:958-41-0042-4.
- Cuevas, M., Fallot, A. (2014). *Resumen de métodos para estimar el consumo de agua en el análisis socio-económico de un territorio de Bosque Modelo*. Francia: hal-01089513. Recuperado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01089513/document>.

Dirección de planeamiento del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2013). *El agro en cifras 2013*. Guatemala. Recuperado de <http://web.maga.gob.gt/download/El-agro-en-cifras-small.pdf>.

Dix, M., Medinilla, O. y Castellanos, E. (2003). *Diagnóstico ecológico-social en la cuenca de Atitlán*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.

Dix, M. (2009). *Estudios ecológicos: el lago de Atitlán, antes y ahora*. Guatemala. Recuperado de [http://bvc.cea-atitlan.org.gt/35/1/Dix-New%20lago Oct09.pdf](http://bvc.cea-atitlan.org.gt/35/1/Dix-New%20lago%20Oct09.pdf).

Dix, M., Orozco, M., Cabrera, D., Bocel, E., Toledo, A., y Symonds, E. (2012). *El Lago Atitlán, Guatemala: su estado ecológico octubre 2009 – diciembre 2011*. Guatemala: Artículo de investigación, Revista 24 Universidad del Valle de Guatemala.

Dobias, J., Leshem, I. (2008). *Wastewater treatment systems and the implementation of a wetland in Atitlán lake Basin, Guatemala*. Guatemala.

Espinoza, C; et. al. (2005). *Limnología y eutroficación*. Chile. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/330643814/Limnologia-y-Eutrofizacion>.

Field, C., Barros, V., Dokken, D. (2014). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas*. Suiza. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf).

Flores, A. (2013). *Hyperspectral remote sensing of water quality in lake Atitlán*. Guatemala.

- García, M. (2003). *Apuntes de economía ecológica*. España: Boletín Económico de ICE No. 2767.
- Girón, N. (2004). *Calidad del agua del lago de Atitlán*. Guatemala. Recuperado de [http://bvc.cea-atitlan.org.gt/52/1/1/%282%29%20Informe%20Calidad%20del%20Agua%20Lago%20Atitl%C3%A1n\\_2004.pdf](http://bvc.cea-atitlan.org.gt/52/1/1/%282%29%20Informe%20Calidad%20del%20Agua%20Lago%20Atitl%C3%A1n_2004.pdf).
- Gómez-Vela, M; Sabeh, E. (2000). *Calidad de vida. Evolución del concepto y su influencia en la investigación y la práctica*. Instituto Universitario de Integración en la Comunidad, Facultad de Psicología, Universidad de Salamanca, España.
- González, M., Toledo, V. (2011). *Metabolismos, naturaleza e historia: hacia una teoría socioecológica de las transformaciones*. España: Icaria editorial.
- Harmeling, S. (2010). *Global climate risk index 2010*. Alemania. Recuperado de: <http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/References/Climate%20Change/GLOBAL%20CLIMATE%20RISK%20INDEX%202010.pdf>.
- Herdocia, M. (1999). *Detección y cuantificación de sustancias químicas para establecer índices de contaminación en aguas superficiales del lago de Atitlán*. Guatemala.
- Hoekstra, A., Mekonnen, M. (2011). *Global Water Scarcity: The Monthly Blue Water Footprint Compared to Blue Water Availability for The World's Mayor River Basins. Report N°53*. Holanda.
- IARNA (2015). *Florecimiento de cianobacterias en el lago de Atitlán, agosto 2015*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar.

Instituto Geográfico Nacional. (2003). *Mapas temáticos del departamento de Sololá*. Guatemala.

Instituto Geográfico Nacional. (2004). *Mapas temáticos del departamento de Sololá*. Guatemala.

Lanuza, V. (2001). *Valoración de servicios ambientales en la cuenca sur del lago de Atitlán Guatemala*. Guatemala. Recuperado de [http://bvc.cea-atitlan.org.gt/6/1/\(5\)%20280%20Servs%20Ambi%20en%20Ati.pdf](http://bvc.cea-atitlan.org.gt/6/1/(5)%20280%20Servs%20Ambi%20en%20Ati.pdf).

López, E., Pino, J. (2013). *Indicadores de economía ecológica para alcanzar la sustentabilidad. Ejemplo de caso: América Latina*. Cuba: Editorial universitaria. ISBN 978-959-16-1448-3.

Martínez Alier, J. (1998). *Curso de Economía Ecológica*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Serie de textos básicos para la formación ambiental. ISBN 968-7913-03-7.

Mihelcic, J., Zimmerman, J. (2012). *Ingeniería Ambiental. Fundamentos. Sustentabilidad*. Diseño. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A.

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2005). *Informe de las visitas de campo y monitoreo de calidad de agua, en el lago de Atitlán, Sololá*. Recuperado de [http://www.marn.gob.gt/documentos/informes/calidad\\_agua.pdf](http://www.marn.gob.gt/documentos/informes/calidad_agua.pdf).

Mosconi, P., Vázquez, J. (s.f.). *Análisis emergético del proceso constructivo de un edificio de oficinas*. Argentina. Recuperado de

<http://docplayer.es/61162182-Analisis-emergetico-del-proceso-constructivo-de-un-edificio-de-oficinas.html>.

Newhall, C.G., Paull, C.K., Bradbury, J.P., Higuera-Gundy, A., Poppe, L.J., Self, S., Bonar, N., Ziagos, J. (1987). *Recent geologic history of Lake Atitlán, a caldera lake in western Guatemala*. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377027387900552>.

OCDE. (1982). *Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control*. Francia: Organization for Economic and Co-operative Development.

Odum, H. T. (1996). *Environmental Accounting. Emery and Environmental Decision Making*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

PNUD (2000). Guatemala: *La fuerza incluyente del desarrollo humano*. Guatemala: Sistema de Naciones Unidas de Guatemala.

Ramírez, A., Viña, G. (1998). *Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*. Colombia: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Rojas, J. (2013). *Cambio climático y sociedad del futuro*. Chile: X Congreso de la sociedad chilena de Limnología. Universidad de Concepción.

Romero, B. (2003). *El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental*. Recuperado de <http://www.iie.org.mx/boletin032003/tend.pdf>.

Rótolo, G. (2011). *Enfoque emergético en el análisis de los servicios ecosistémicos para la planificación regional*. Argentina. Recuperado de

[https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta.2011-em\\_rotolo-ch27-enfoque\\_emergente\\_tico\\_en\\_el\\_analisis\\_0.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta.2011-em_rotolo-ch27-enfoque_emergente_tico_en_el_analisis_0.pdf)

Schettini, R. (2004). *Economía y medio ambiente*. Ecuador. Recuperado de <ftp://ftp.puce.edu.ec/Facultades/Economia/7%C2%B0%20Nivel/Economia%20Ambiental/La%20Econom%C3%ADa%20Ecol%C3%B3gica.doc>.

SEGEPLAN (2006). *Estrategia para la gestión integrada de los recursos hídricos de Guatemala*. Diagnóstico, Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia de Guatemala – Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Guatemala.

Soto, S. (2004). *Determinación de los niveles actuales de fósforo en el lago de Atitlán*. Tesis de química farmacéutica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Sotomayor, E. (2013). *Análisis emergético y territorial de agroecosistemas campesinos. Estudio de caso Hijuela N°5 Pilolcura, Valdivia*. Tesis Universidad Austral de Chile.

Suárez, G. (2011). *Cuencas hidrográficas de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Toledo, V. (2013). *El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica*. Relaciones, 136, p. 41-71. ISSN 0185-3929.

Unidos por El Lago (2013). *Estado del lago de Atitlán, Informe 2013*. Guatemala.

- UNESCO. (2017). *Aguas residuales. El recurso desaprovechado*. Francia: place de Fontenoy, 75352 París 07 SP. Recuperado de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>.
- Uribe, D., Campuzano, C. (2013). *Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca. Huella hídrica en Cuenca Porce*. Colombia.
- Villalobos, L., López, P. (2002). *Análisis de la situación de ocurrencia de incendios forestales en la reserva de uso múltiple de la cuenca del lago de Atitlán durante el período 1999-2001*. Guatemala.
- Voora, V., Thrift, C. (2010). *Using emergy to value ecosystem goods and services*. Estados Unidos: Alberta Environment. Recuperado de [http://www.iisd.org/pdf/2010/using\\_emergy.pdf](http://www.iisd.org/pdf/2010/using_emergy.pdf)
- Wackernagel, M.; Rees, W.E. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Philadelphia: New Society. Estados Unidos.
- Wagner, C., Adrian, R. (2009). *Cyanobacteria dominance: Quantifying the effects of Climate Change*. Estados Unidos. Recuperado de [http://www.aslo.org/lo/toc/vol\\_54/issue\\_6\\_part\\_2/2460.html](http://www.aslo.org/lo/toc/vol_54/issue_6_part_2/2460.html)
- Weiss, C. (1970). *Water Quality Investigations Guatemala, Atitlán Lake 1968-1970*. Guatemala.



## **ANEXOS**



**Estación meteorológica Santiago Atitlán, municipio de Santiago Atitlán, departamento de Sololá.**

**Tabla XIX. Precipitación en la estación meteorológica Santiago Atitlán**

<b>AÑO</b>	<b>VARIAB</b>	<b>DIMEN</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>ANUAL</b>
1990	LLUVIA	MM	****	****	***	****	****	****	109.0	70.5	213.1	51.5	16.8	22.1	483.0
1991	LLUVIA	MM	1.3	****	3.5	6.5	179.6	267.7	62.0	86.5	132.3	163.8	5.7	28.4	849.5
1992	LLUVIA	MM	0.1	0.7	20.1	92.8	103.3	223.3	103.6	79.7	96.4	138.9	46.7	4.1	909.7
1993	LLUVIA	MM	19.5	****	19.7	48.6	168.0	285.8	147.5	215.0	141.0	114.9	4.3	****	1115.7
1994	LLUVIA	MM	****	3.2	****	115.3	63.0	151.3	38.6	146.4	130.8	13.7	44.2	56.7	763.2
1995	LLUVIA	MM	1.7	1.2	56.7	116.3	153.5	269.9	153.4	221.2	262.3	341.8	0.2	51.5	1629.7
1996	LLUVIA	MM	15.8	1.0	6.0	200.5	267.9	251.2	179.0	221.4	177.5	127.7	27.7	0.0	1475.7
1997	LLUVIA	MM	20.3	14.5	75.4	108.6	78.6	193.2	87.7	74.2	298.2	252.2	166.6	51.3	1312.2
1998	LLUVIA	MM	4.4	0.4	48.3	0.0	67.6	145.1	200.6	128.0	347.4	0.0	289.7	291.8	1523.3
1999	LLUVIA	MM	2.0	4.8	0.0	31.4	62.6	346.1	123.5	141.7	372.1	276.4	54.9	14.3	1429.8
2000	LLUVIA	MM	0.0	0.0	28.4	38.9	261.2	219.8	398.0	197.2	284.4	23.2	88.5	0.0	1539.6
2001	LLUVIA	MM	1.1	4.0	15.7	10.9	189.5	269.5	103.2	121.1	317.7	104.3	6.5	16.7	1160.2
2002	LLUVIA	MM	2.5	1.7	0.0	82.6	192.3	249.1	99.1	50.9	357.4	65.2	41.1	***	1141.9
2003	LLUVIA	MM	1.0	3.9	51.5	42.2	135.9	325.4	146.6	82.9	169.4	284.1	8.9	0.0	1251.8
2004	LLUVIA	MM	4.8	31.7	35.3	99.7	180.7	123.8	159.2	58.2	170.7	234.9	***	0.7	1099.7
2005	LLUVIA	MM	0.0	0.0	126.8	8.3	241.1	469.7	168.2	141.0	19.5	496.1	25.2	9.2	1705.1
2006	LLUVIA	MM	****	****	17.2	39.4	266.8	405.8	156.1	167.4	167.7	140.8	14.5	45.3	1421.0
2007	LLUVIA	MM	0.0	0.0	1.5	168.8	60.5	247.4	110.0	243.3	156.5	281.0	9.1	6.1	1284.2
2008	LLUVIA	MM	2.8	15.6	4.1	30.1	82.7	326.5	230.1	244.8	335.8	118.5	4.6	0.4	1396.0
2009	LLUVIA	MM	0.0	0	0.0	85.1	324.9	279.7	97.3	71.5	135.5	55.6	63.8	53.2	1166.6
2010	LLUVIA	MM	3.3	133.9	77.0	128.9	452.0	461.6	501.2	434.5	441.1	18.8	62.6	0.0	2714.9
2011	LLUVIA	MM	0.0	6.2	8.7	46.2	87.7	353.5	273.4	211.2	569.4	478.6	1.5	0.3	2036.7
2012	LLUVIA	MM	0.0	7.0	5.9	62.0	243.3	332.9	40.5	220.6	90.0	106.0	12.4	0.0	1120.6
2013	LLUVIA	MM	14.5	0.7	56.5	6.8	221.4	353.2	238.5	172.5	373.0	217.6	25.4	0.0	
2014	LLUVIA	MM	0.0	0.4	51.1	15.5	135.8	362.7	28.7	84.5	285.0	257.0	21.0	0.0	

Tabla XX. Días de lluvia en la estación meteorológica Santiago Aititlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	LLUVIA	DIAS							16.0	15.0	24.0	14.0	4.0	6.0	79
1991	LLUVIA	DIAS	1.0	0.0	2.0	4.0	21.0	21.0	10.0	13.0	17.0	18.0	2.0	1.0	110
1992	LLUVIA	DIAS	0.0	1.0	3.0	11.0	20.0	24.0	18.0	13.0	19.0	9.0	8.0	1.0	127
1993	LLUVIA	DIAS	3.0	0.0	6.0	8.0	12.0	23.0	14.0	22.0	18.0	18.0	1.0	0.0	125
1994	LLUVIA	DIAS	0.0	1.0	0.0	7.0	14.0	21.0	6.0	20.0	17.0	16.0	9.0	3.0	114
1995	LLUVIA	DIAS	1.0	1.0	2.0	12.0	19.0	24.0	17.0	26.0	29.0	23.0	1.0	9.0	164
1996	LLUVIA	DIAS	4.0	1.0	3.0	17.0	17.0	26.0	23.0	19.0	13.0	17.0	6.0	0.0	146
1997	LLUVIA	DIAS	2.0	2.0	5.0	8.0	13.0	21.0	10.0	10.0	22.0	20.0	11.0	4.0	128
1998	LLUVIA	DIAS	1.0	1.0	4.0	0.0	8.0	15.0	17.0	19.0	23.0	24.0	8.0	0.0	120
1999	LLUVIA	DIAS	2.0	2.0	0.0	4.0	9.0	25.0	17.0	20.0	26.0	20.0	7.0	3.0	135
2000	LLUVIA	DIAS	0.0	0.0	3.0	5.0	19.0	20.0	7.0	14.0	25.0	9.0	5.0	0.0	107
2001	LLUVIA	DIAS	1.0	1.0	3.0	2.0	19.0	12.0	16.0	12.0	21.0	12.0	4.0	2.0	105
2002	LLUVIA	DIAS	2.0	2.0	0.0	4.0	12.0	21.0	12.0	7.0	25.0	127.0	7.0	1.0	220
2003	LLUVIA	DIAS	1.0	2.0	6.0	5.0	16.0	27.0	13.0	14.0	17.0	13.0	6.0	0.0	120
2004	LLUVIA	DIAS	4.0	3.0	4.0	9.0	18.0	14.0	13.0	10.0	21.0	16.0	3.0	0.0	115
2005	LLUVIA	DIAS	0.0	0.0	10.0	2.0	17.0	22.0	22.0	21.0	19.0	16.0	4.0	3.0	136
2006	LLUVIA	DIAS	7.0	2.0	3.0	5.0	17.0	26.0	18.0	14.0	20.0	14.0	11.0	4.0	141
2007	LLUVIA	DIAS	0.0	0.0	2.0	8.0	12.0	22.0	14.0	18.0	22.0	18.0	1.0	1.0	118
2008	LLUVIA	DIAS	1.0	6.0	2.0	4.0	15.0	24.0	23.0	22.0	26.0	20.0	1.0	1.0	145
2009	LLUVIA	DIAS	0.0	0.0	0.0	4.0	24.0	22.0	13.0	16.0	16.0	9.0	9.0	4.0	117
2010	LLUVIA	DIAS	3.0	6.0	7.0	13.0	20.0	21.0	26.0	27.0	30.0	6.0	7.0	0.0	166
2011	LLUVIA	DIAS	0.0	4.0	4.0	7.0	8.0	25.0	22.0	21.0	26.0	18.0	1.0	1.0	137
2012	LLUVIA	DIAS	0.0	7.0	4.0	14.0	20.0	24.0	7.0	22.0	18.0	15.0	2.0	0.0	133
2013	LLUVIA	DIAS	2.0	1.0	7.0	2.0	16.0	21.0	15.0	22.0	27.0	20.0	2.0	1.0	
2014	LLUVIA	DIAS	0.0	1.0	6.0	3.0	22.0	25.0	11.0	12.0	26.0	18.0	3.0	0.0	

Tabla XXI. Temperatura media en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMEDIA	°C	*****	*****	*****	*****	*****	*****	19.3	19.3	17.9	18.3	19.3	18.4	18.8
1991	TMEDIA	°C	18.5	18.5	18.4	19.9	20.0	19.5	20.9	17.6	18.7	17.7	17.9	18.2	18.8
1992	TMEDIA	°C	17.2	16.7	19.6	20.3	20.0	18.8	19.8	19.2	19.0	18.9	19.1	18.6	18.9
1993	TMEDIA	°C	17.6	16.6	18.8	20.0	20.1	19.0	20.4	19.3	18.6	19.3	19.6	18.6	19.0
1994	TMEDIA	°C	18.1	18.5	19.0	19.8	20.0	22.5	20.5	19.4	19.4	18.5	18.6	18.8	19.4
1995	TMEDIA	°C	17.4	18.1	18.5	19.6	19.5	19.4	19.8	19.0	18.4	18.5	20.4	18.0	18.9
1996	TMEDIA	°C	17.0	17.6	18.1	19.1	19.3	19.4	18.9	18.5	18.5	18.3	18.6	17.5	18.4
1997	TMEDIA	°C	16.6	18.7	18.6	18.2	19.4	19.1	20.9	20.2	18.4	18.1	18.7	18.7	18.8
1998	TMEDIA	°C	18.0	17.0	18.8	20.3	20.4	20.0	19.4	19.3	19.8	17.4	18.1	18.0	18.9
1999	TMEDIA	°C	18.1	16.8	17.9	21.6	19.7	19.0	19.5	18.7	18.0	17.7	18.1	17.2	18.5
2000	TMEDIA	°C	17.2	17.7	17.6	18.7	18.8	19.3	20.1	19.9	18.2	18.6	19.0	18.2	18.6
2001	TMEDIA	°C	16.8	18.7	17.7	19.8	19.6	20.0	20.5	20.2	18.3	19.3	24.9	18.6	17.3
2002	TMEDIA	°C	18.3	20.5	24.0	18.2	19.9	19.5	20.5	20.0	18.7	18.7	18.7	19.4	19.2
2003	TMEDIA	°C	19.1	18.6	18.6	19.7	19.9	19.1	20.2	19.4	18.8	19.2	19.7	****	19.3
2004	TMEDIA	°C	17.7	18.3	20.1	19.1	19.5	20.0	19.6	19.9	18.9	18.0	****	18.3	19.0
2005	TMEDIA	°C	17.5	18.0	18.8	19.7	19.8	19.3	19.5	19.8	19.5	18.6	19.0	18.5	19.0
2006	TMEDIA	°C	****	*****	18.4	19.2	19.3	19.2	20.1	20.3	18.5	19.1	18.5	18.7	19.1
2007	TMEDIA	°C	19.0	18.1	19.3	19.4	19.9	19.6	19.8	19.2	19.2	18.3	19.6	17.8	19.1
2008	TMEDIA	°C	18.3	18.0	18.8	19.7	20.2	19.1	19.3	19.0	18.8	18.9	18.2	18.1	18.9
2009	TMEDIA	°C	17.8	18.2	18.3	19.2	19.2	19.3	20.7	20.6	19.7	19.2	18.6	16.4	18.9
2010	TMEDIA	°C	18.1	18.9	19.0	20.0	20.3	19.8	19.4	19.2	18.8	18.8	17.8	16.5	18.9
2011	TMEDIA	°C	17.6	18.2	18.5	19.2	20.0	19.5	19.3	18.9	18.9	18.3	18.7	18.6	18.8
2012	TMEDIA	°C	18.4	18.6	18.8	19.0	19.6	19.2	20.2	19.4	18.9	18.7	18.9	19.8	19.1
2013	TMEDIA	°C	19.1	18.5	18.8	19.7	19.9	19.5	19.6	18.4	18.7	19.3	20.5	19.2	
2014	TMEDIA	°C	18.4	16.5	19.7	19.0	19.7	19.3	21.4	19.8	18.6	18.9	19.2	18.7	

Tabla XXII. Temperatura máxima promedio en °C en la estación meteorológica Santiago Atilán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMAXPR	°C	****	****	****	****	****	****	25.3	26.1	24.9	25.1	25.8	25.5	25.5
1991	TMAXPR	°C	25.6	26.6	26.6	27.1	26.2	25.0	26.5	25.8	25.5	24.5	25.2	25.2	25.8
1992	TMAXPR	°C	25.1	25.5	26.6	6.4	25.6	25.2	25.2	25.3	25.2	25.0	24.9	25.4	23.8
1993	TMAXPR	°C	24.9	25.7	25.8	26.3	25.9	23.9	26.6	25.1	24.4	24.8	25.8	25.2	25.4
1994	TMAXPR	°C	25.5	25.5	26.3	26.6	25.4	24.7	26.7	25.3	25.4	24.4	25.0	25.2	25.5
1995	TMAXPR	°C	24.8	25.5	25.5	25.2	25.2	24.5	24.9	24.1	23.9	23.9	25.7	24.2	24.8
1996	TMAXPR	°C	24.2	25.0	25.1	24.9	24.2	24.3	24.7	24.6	24.6	24.5	25.0	25.1	24.7
1997	TMAXPR	°C	24.3	25.6	25.7	25.1	25.2	24.2	26.9	27.0	24.0	24.0	24.6	24.6	25.1
1998	TMAXPR	°C	25.1	25.1	26.5	27.1	27.4	26.3	25.0	25.4	22.7	24.9	25.0	24.8	25.4
1999	TMAXPR	°C	24.2	25.0	25.9	26.9	25.4	23.9	24.7	32.9	23.7	23.9	23.6	24.3	25.4
2000	TMAXPR	°C	24.2	24.8	24.9	25.9	24.1	24.8	26.3	25.5	24.0	25.3	24.5	24.9	24.9
2001	TMAXPR	°C	24.3	25.9	24.9	26.6	25.4	25.3	25.5	26.0	23.0	25.5	27.0	25.5	25.2
2002	TMAXPR	°C	25.5	34.0	26.5	26.2	29.5	24.6	26.2	26.5	24.0	***	***	***	27.0
2003	TMAXPR	°C	25.7	26.0	25.7	26.2	25.4	23.9	26.1	25.7	24.4	25.0	25.9	***	25.5
2004	TMAXPR	°C	24.4	24.8	26.5	24.5	17.0	25.4	25.2	25.9	24.6	28.7	***	25.3	24.8
2005	TMAXPR	°C	25.1	25.9	25.2	25.8	24.9	24.4	24.9	25.4	25.2	24.7	25.1	9.2	23.8
2006	TMAXPR	°C	***	****	25.8	25.8	24.7	24.4	25.7	26.2	24.8	25.1	24.9	25.0	25.2
2007	TMAXPR	°C	25.7	25.6	25.5	26.3	25.9	25.6	27.3	24.9	25.0	24.1	17.4	25.5	24.9
2008	TMAXPR	°C	25.4	25.2	26.0	26.3	25.9	24.4	24.9	25.6	25.3	24.5	25.0	25.2	25.3
2009	TMAXPR	°C	24.8	25.4	25.9	26.5	24.5	24.6	27.0	26.5	26.1	28.4	24.7	24.8	25.8
2010	TMAXPR	°C	25.3	25.6	26.0	26.0	25.4	24.5	24.5	24.2	23.5	24.9	24.3	24.1	24.9
2011	TMAXPR	°C	25.1	25.4	25.5	25.7	25.7	28.4	24.7	25.7	24.8	23.5	25.3	26.0	25.5
2012	TMAXPR	°C	23.9	24.8	25.8	25.4	25.1	24.8	26.5	25.0	25.1	25.1	25.8	25.9	25.3
2013	TMAXPR	°C	25.6	25.4	25.4	26.2	25.4	24.9	25.4	25.2	24.0	25.7	25.4	25.5	
2014	TMAXPR	°C	25.4	25.2	25.6	28.6	28.4	27.0	29.2	28.8	24.8	24.5	25.3	25.5	

Tabla XXIII. Temperatura mínima promedio en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMINPR	°C	****	****	****	****	****	****	13.6	14.6	13.7	13.1	13.3	11.1	13.2
1991	TMINPR	°C	10.5	10.5	10.8	13.3	14.2	13.5	12.9	13.3	13.4	13.0	12.8	11.9	12.5
1992	TMINPR	°C	10.1	9.9	12.3	14.4	14.2	15.3	14.3	14.2	14.3	13.4	12.2	11.6	13.0
1993	TMINPR	°C	10.2	9.8	11.0	13.6	14.0	15.0	14.9	15.1	13.8	14.0	12.7	11.0	12.9
1994	TMINPR	°C	10.2	10.2	10.9	13.0	14.5	14.2	14.7	14.4	14.7	1.6	13.0	12.2	12.0
1995	TMINPR	°C	9.9	10.3	11.1	13.8	14.1	14.8	17.8	14.6	14.7	14.3	11.9	10.8	13.2
1996	TMINPR	°C	7.7	8.2	9.9	13.8	14.6	14.5	14.4	13.9	14.5	13.7	13.2	10.2	12.4
1997	TMINPR	°C	9.6	11.7	12.0	12.4	14.0	14.4	15.8	15.3	14.8	13.8	14.4	11.1	13.3
1998	TMINPR	°C	11.0	8.8	11.6	13.4	14.2	15.2	15.1	14.4	14.6	11.5	14.6	13.5	13.2
1999	TMINPR	°C	10.4	9.2	9.9	13.4	14.0	14.3	14.2	14.3	14.5	13.9	13.9	10.6	12.7
2000	TMINPR	°C	14.7	16.8	16.9	19.1	****	7.8	14.0	17.9	14.0	14.5	12.3	11.1	14.3
2001	TMINPR	°C	8.7	11.1	10.5	13.5	15.1	19.6	14.8	15.3	14.1	18.3	12.1	11.3	10.8
2002	TMINPR	°C	10.0	10.8	12.0	12.5	11.5	15.0	15.6	14.8	14.9	***	***	***	13.4
2003	TMINPR	°C	16.8	10.4	12.1	13.2	15.0	15.4	15.1	14.6	14.1	14.7	13.9	***	14.1
2004	TMINPR	°C	10.4	11.2	13.9	12.8	14.9	15.7	14.4	14.7	14.0	14.3	***	11.2	13.4
2005	TMINPR	°C	10.3	18.0	13.3	13.5	13.9	14.8	14.9	15.5	15.2	14.4	13.5	12.0	14.1
2006	TMINPR	°C	****	****	11.0	13.1	14.1	15.3	15.6	15.4	14.6	15.0	12.5	13.9	14.1
2007	TMINPR	°C	9.0	10.4	11.8	13.3	11.8	14.4	14.5	14.7	14.7	13.8	13.6	10.3	12.7
2008	TMINPR	°C	11.2	9.9	11.1	12.3	14.0	14.1	14.0	13.1	13.6	11.3	11.7	11.2	12.3
2009	TMINPR	°C	10.4	10.5	9.7	12.4	14.0	14.5	15.4	15.0	14.3	13.6	12.6	9.9	12.7
2010	TMINPR	°C	10.5	12.1	11.2	13.5	15.0	14.9	14.4	14.2	14.1	12.2	10.4	7.2	12.5
2011	TMINPR	°C	9.5	9.6	10.2	12.1	14.1	14.4	14.3	14.6	14.0	13.1	10.4	9.8	12.2
2012	TMINPR	°C	7.9	8.2	11.9	11.8	14.0	13.5	13.6	13.2	12.6	11.6	9.4	12.5	11.7
2013	TMINPR	°C	9.5	7.6	8.2	13.5	15.3	12.8	13.4	12.4	12.5	13.1	10.8	11.1	
2014	TMINPR	°C	8.7	9.4	8.8	13.6	12.6	11.6	9.4	10.4	13.4	12.8	12.1	10.2	

Tabla XXIV. Temperatura máxima absoluta en °C en la estación meteorológica Santiago Aitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMAXAB	°C							27.0	28.5	27.0	27.3	27.5	28.3	28.5
1991	TMAXAB	°C	27.5	29.5	29.8	29.0	28.3	28.8	29.3	27.8	27.3	26.6	27.5	27.3	29.8
1992	TMAXAB	°C	27.3	28.5	29.8	31.0	28.8	28.2	25.2	28.5	29.0	27.5	27.3	27.3	31.0
1993	TMAXAB	°C	27.5	29.0	28.0	27.5	27.3	29.0	28.5	29.0	28.5	27.3	27.5	27.0	29.0
1994	TMAXAB	°C	28.0	28.0	29.3	29.5	27.0	28.0	29.3	28.5	28.8	28.0	27.5	29.0	29.5
1995	TMAXAB	°C	27.0	28.5	29.0	29.0	27.5	27.0	28.0	26.3	26.3	26.8	28.0	28.3	29.0
1996	TMAXAB	°C	26.5	26.5	26.5	27.3	26.8	26.0	28.3	27.0	26.0	27.5	28.0	27.5	28.3
1997	TMAXAB	°C	26.8	27.5	28.5	27.5	28.5	27.5	30.5	28.8	27.5	27.0	27.5	27.5	30.5
1998	TMAXAB	°C	28.3	29.5	28.3	28.5	31.8	29.5	28.0	27.8	26.0	29.5	26.0	29.0	31.8
1999	TMAXAB	°C	27.5	24.8	28.3	30.0	28.0	26.3	27.8	28.5	26.0	25.8	27.0	28.0	30.0
2000	TMAXAB	°C	27.3	24.8	26.3	31.3	25.8	28.3	28.8	28.5	***	***	***	***	31.3
2001	TMAXAB	°C	26.8	28.5	26.5	29.5	27.5	29.0	28.0	29.0	33.5	27.8	27.0	27.3	33.5
2002	TMAXAB	°C	28.8	28.8	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	28.8
2003	TMAXAB	°C	28.0	29.0	30.5	28.5	29.5	26.0	27.8	29.3	27.3	27.0	28.0	***	30.5
2004	TMAXAB	°C	28.0	27.5	29.0	26.5	27.3	29.5	27.3	28.5	27.3	28.1	***	27.5	29.5
2005	TMAXAB	°C	27.8	27.5	26.5	28.5	28.0	25.5	28.8	29.3	30.5	27.3	28.3	27.5	30.5
2006	TMAXAB	°C			28.0	28.3	27.5	28.0	29.5	28.8	27.8	28.5	26.5	26.8	29.5
2007	TMAXAB	°C	28.5	27.6	28.2	29.0	27.8	28.2	28.0	28.4	25.8	26.4	26.4	27.2	29.0
2008	TMAXAB	°C	27.6	27.4	28.8	29.2	28.0	28.0	27.6	28.6	27.2	27.6	27.2	26.4	29.2
2009	TMAXAB	°C	26.4	27.2	28.0	29.4	27.0	27.0	29.6	28.8	28.2	28.4	27.4	28.0	29.6
2010	TMAXAB	°C	27.2	28.4	27.6	27.0	29.2	26.6	26.8	26.6	27.0	27.8	26.4	26.0	29.2
2011	TMAXAB	°C	27.6	27.0	28.2	29.0	28.0	28.4	27.8	27.0	27.0	27.0	27.0	28.0	29.0
2012	TMAXAB	°C	26.4	26.4	29.0	28.4	27.2	28.0	28.6	27.6	28.2	29.0	27.0	26.6	29.0
2013	TMAXAB	°C	27.4	28.6	27.8	28.4	28.4	27.2	27.8	27.0	27.8	28.8	27.4	25.5	
2014	TMAXAB	°C	27.0	26.0	<b>28.6</b>	<b>28.6</b>	<b>28.4</b>	<b>27.0</b>	<b>29.2</b>	<b>28.8</b>	<b>28.0</b>	<b>27.0</b>	<b>28.0</b>	<b>27.0</b>	

Tabla XXV. Temperatura mínima absoluta en °C en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMINAB	°C	***	***	***	***	***	***	11.0	10.5	11.0	10.0	1.0	6.5	1.0
1991	TMINAB	°C	7.0	5.5	6.8	10.8	12.0	11.3	9.5	9.8	10.0	10.5	6.8	6.5	5.5
1992	TMINAB	°C	7.0	4.5	7.0	11.8	9.0	15.3	14.3	11.5	11.5	11.5	9.8	6.5	4.5
1993	TMINAB	°C	5.8	7.0	6.5	11.3	12.0	12.0	11.8	12.3	12.0	11.3	9.0	5.0	5.0
1994	TMINAB	°C	7.0	7.0	6.5	10.3	11.3	11.8	10.8	12.5	11.5	9.5	10.0	7.0	6.5
1995	TMINAB	°C	6.8	7.0	8.0	10.3	12.3	12.8	11.5	11.0	12.8	11.5	9.0	6.0	6.0
1996	TMINAB	°C	0.2	5.5	6.3	11.5	13.0	12.8	10.5	9.5	12.3	11.5	9.8	6.8	0.2
1997	TMINAB	°C	6.8	8.5	9.3	7.8	11.5	9.5	13.0	12.8	13.0	11.0	12.0	7.0	6.8
1998	TMINAB	°C	7.5	5.5	6.3	10.0	9.5	13.0	13.0	12.8	11.5	7.3	12.5	9.5	5.5
1999	TMINAB	°C	7.5	8.3	7.3	7.3	12.0	12.0	12.0	11.5	12.8	9.5	8.0	5.0	5.0
2000	TMINAB	°C	4.5	9.0	13.0	15.0	***	11.3	9.0	11.5	***	***	***	***	4.5
2001	TMINAB	°C	5.8	6.3	7.3	9.8	12.0	11.5	12.0	12.5	11.0	11.0	8.8	8.0	5.8
2002	TMINAB	°C	0.0	8.3	8.5	***	***	***	***	***	***	***	***	***	0.0
2003	TMINAB	°C	9.0	7.8	9.0	10.8	12.0	13.0	11.3	12.0	12.3	12.5	10.5	***	7.8
2004	TMINAB	°C	7.5	7.5	10.0	17.6	12.5	12.3	12.8	11.0	12.5	11.9	***	8.0	7.5
2005	TMINAB	°C	5.5	6.0	11.5	10.3	12.5	9.0	12.8	13.3	13.3	9.5	7.8	8.3	5.5
2006	TMINAB	°C			8.3	8.5	11.5	13.0	12.3	12.5	13.0	12.0	5.5	9.0	5.5
2007	TMINAB	°C	9.0	7.8	9.6	10.8	10.4	12.4	12.2	12.2	12.0	8.4	8.0	6.0	6.0
2008	TMINAB	°C	6.4	5.6	8.4	8.4	11.0	12.0	10.2	10.0	9.8	8.6	11.0	8.6	5.6
2009	TMINAB	°C	6.8	6.6	15.4	10.4	12	12.4	11.8	11.8	12.8	11	7	4	4.0
2010	TMINAB	°C	7.4	9.8	7.4	10.0	11.0	12.0	12.2	13.4	10.0	9.0	7.6	3.8	3.8
2011	TMINAB	°C	6.6	7.0	7.0	6.0	9.6	11.4	11.0	10.5	12.2	9.0	6.0	6.0	6.0
2012	TMINAB	°C	3.2	5.0	8.0	6.0	12.0	11.2	10.0	10.2	8.2	7.2	3.2	11.0	3.2
2013	TMINAB	°C	4.0	5.0	4.2	5.0	12.0	9.4	10.8	9.0	9.8	10.2	10.8	11.1	
2014	TMINAB	°C	4.0	6.0	8.8	8.8	12.6	11.6	9.4	10.4	11.0	11.0	8.0	6.0	

Tabla XXVI. Humedad relativa media en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	HRMED	%	***	***	***	***	***	***	73	78	89	88	78	75	80
1991	HRMED	%	79	72	76	86	87	77	80	88	89	75	75	69	79
1992	HRMED	%	79	79	77	80	83	93	80	84	84	86	87	71	82
1993	HRMED	%	74	76	77	81	84	90	77	80	88	86	74	73	80
1994	HRMED	%	71	70	75	79	82	87	75	84	83	88	82	75	79
1995	HRMED	%	77	76	81	83	88	89	84	91	93	90	77	85	85
1996	HRMED	%	79	77	78	86	90	90	86	87	90	90	75	79	84
1997	HRMED	%	80	72	77	86	85	89	78	79	91	90	86	87	83
1998	HRMED	%	84	87	83	83	83	90	90	95	85	75	87	84	86
1999	HRMED	%	77	79	85	81	87	90	85	87	83	88	83	87	84
2000	HRMED	%	80	80	87	84	90	89	85	86	***	***	***	***	85
2001	HRMED	%	86	78	86	83	85	81	84	86	92	87	84	74	84
2002	HRMED	%	82	79	81	85	86	90	83	83	90	90	81	***	85
2003	HRMED	%	73	79	85	86	86	92	84	87	91	88	82	***	85
2004	HRMED	%	81	81	71	84	86	83	85	86	91	83	***	76	82
2005	HRMED	%	75	76	86	85	84	91	85	83	87	88	75.0	82	83
2006	HRMED	%	*****	****	80	81	88	87	81	82	89	88	82	79	84
2007	HRMED	%	72	80	69	80	77	83	78	84	85	85	64	74	78
2008	HRMED	%	63	75	95	72	***	***	81	83	88	82	71	72	78
2009	HRMED	%	70	64	67	75	84	85	71	76	85	85	80	79	77
2010	HRMED	%	71	81	82	81	84	85	87	88	88	79	78	77	82
2011	HRMED	%	73	71	67	78	81	86	85	82	88	87	77	79	80
2012	HRMED	%	71	73	69	78	84	84	74	83	82	84	72	69	77
2013	HRMED	%	65	75	76	81	80	86	83	85	90	86	77	75	
2014	HRMED	%	72	78	82	80	86	89	72	81	89	87	73	74	

Tabla XXVII. Humedad máxima promedio en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2005	HUMAXPRO	%	88	85	92	89	94	98	90	91	91	91	88	97	91
2006	HUMEDMAX	%	***	***	***	***	***	***	***	***	***	98	95	92	95
2007	HUMEDMAX	%	88	94	94	97	97	97	91	100	97	96	90	94	95
2008	HUMEDMAX	%	93	96	95	95	97	97	96	97	98	94	88	95	95
2009	HUMEDMAX	%	93	87	83	89	95	90	85	88	96	96	93	97	91
2010	HUMEDMAX	%	91	96	96	95	95	95	96	96	97	92	94	92	95
2011	HUMEDMAX	%	92	92	87	95	93	94	95	96	97	96	92	84	93
2012	HUMEDMAX	%	89	90	87	93	94	95	90	94	93	95	89	85	91
2013	HUMEDMAX	%	86	88	93	91	93	92	93	92	96	94	79	76	
2014	HUMEDMAX	%	77	85	88	90	95	92	95	95	97	97	85	84	

Tabla XXVIII. Humedad mínima promedio en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2005	HUMINPRO	%	59	57	74	79	79	55	76	74	80	85	69	72	72
2006	HUMINPRO	%	51	21								46	32	34	37
2007	HUMINPRO	%	26	45	44	27	59	57	54	56	57	64	45	43	48
2008	HUMINPRO	%	45	51	47	48	24	59	55	89	63	61	47	48	53
2009	HUMINPRO	%	45	41	43	50	63	66	44	23	53	53	50	45	48
2010	HUMINPRO	%	43	50	54	56	64	62	39	63	66	49	50	40	53
2011	HUMINPRO	%	41	44	37	47	55	59	56	56	57	61	40	41	50
2012	HUMINPRO	%	32	47	41	45	57	59	41	54	51	56	39	63	49
2013	HUMINPRO	%	36	43	41	56	56	59	52	54	68	58	50	46	
2014	HUMINPRO	%	41	49	42	47	56	59	55	59	68	64	54	48	

Tabla XXIX. Nubosidad (octas) en la estación meteorológica Santiago Atilán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	NUBOSI	OCTAS	***	***	***	***	***	***	5	5	6	6	5	4	5
1991	NUBOSI	OCTAS	4	2	0	5	0	0	5	6	6	0	3	4	3
1992	NUBOSI	OCTAS	4	5	5	5	6	0	6	6	6	6	5	4	5
1993	NUBOSI	OCTAS	4	4	5	6	7	7	5	7	7	7	6	5	6
1994	NUBOSI	OCTAS	4	4	5	5	7	5	4	5	6	5	5	5	5
1995	NUBOSI	OCTAS	4	4	5	5	5	6	5	6	6	6	4	5	5
1996	NUBOSI	OCTAS	4	4	5	6	6	6	6	5	6	5	4	4	5
1997	NUBOSI	OCTAS	4	5	5	5	5	5	5	5	6	5	5	5	5
1998	NUBOSI	OCTAS	5	4	4	5	5	5	6	7	7	7	7	6	6
1999	NUBOSI	OCTAS	6	6	6	6	4	6	7	7	7	6	6	5	6
2000	NUBOSI	OCTAS	6	6	6	6	7	5	6	7	***	***	***	***	6
2001	NUBOSI	OCTAS	5		5	5	***	***	5	5	***	5	***	***	5
2002	NUBOSI	OCTAS	4	5	4	***	***	***	***	***	***	***	***	***	4
2003	NUBOSI	OCTAS	4	4	5	5	4	6	5	5	6	5	5	***	5
2004	NUBOSI	OCTAS	5	5	4	5	6	6	6	4	6	5	***	5	5
2005	NUBOSI	OCTAS	4	4	6	5	5	5	6	6	5	5	5	5	5
2006	NUBOSI	OCTAS	***	***	5	5	6	6	5	3	4	4	3	3	4
2007	NUBOSI	OCTAS	2	2	3	4	5	4	5	5	5	6	3	3	4
2008	NUBOSI	OCTAS	3	3	2	4	4	5	5	5	5	5	3	3	4
2009	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	4	5	5	4	5	5	5	4		4
2010	NUBOSI	OCTAS	3	4	4	5	5	6	6	6	6	4	4	3	5
2011	NUBOSI	OCTAS	3	4	4	5	5	6	6	5	6	5	3	3	5
2012	NUBOSI	OCTAS	4	4	4	5	6	6	4	6	5	5	4	5	5
2013	NUBOSI	OCTAS	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5
2014	NUBOSI	OCTAS	3	4	4	4	5	5	4	4	6	6	2	2	4

Tabla XXX. Evapotranspiración en la estación meteorológica Santiago Aitilán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	EVTANQ	MM	****	****	****	****	****	****	4.8	4.8	4.0	3.1	4.3	4.1	4.2
1991	EVTANQ	MM	4.2	5.5	5.2	4.6	3.7	4.7	5.5	4.6	4.1	4.1	4.5	4.0	4.6
1992	EVTANQ	MM	4.1	3.3	2.1	5.2	3.9	0.0	4.5	4.3	3.8	4.1	3.3	4.5	3.6
1993	EVTANQ	MM	4.4	5.3	5.0	4.3	6.6	2.7	3.8	3.0	3.2	3.7	33.4	4.4	6.7
1994	EVTANQ	MM	4.7	5.2	5.4	5.2	3.8	3.6	5.2	3.7	3.7	3.8	3.7	4.3	4.4
1995	EVTANQ	MM	4.2	4.9	4.8	3.9	3.9	3.6	4.2	3.1	4.2	4.4	4.2	3.5	4.1
1996	EVTANQ	MM	3.9	4.9	4.9	3.7	4	3.4	4.3	4.3	3.3	3.6	8.1	4.3	4.4
1997	EVTANQ	MM	3.9	5.2	5.2	4.2	4.2	3.8	5.0	4.5	4	3.9	3.6	3.4	4.2
1998	EVTANQ	MM	4	4.3	4.9	3.9	4.7	7.8	7.2	3.7	3.8	4.1	3.8	6.0	4.9
1999	EVTANQ	MM	4.2	4.8	4.8	5.3	4.4	4.2	9.1	6.5	2.9	5.5	4.2	4.1	5.0
2000	EVTANQ	MM	4.5	4.7	4.3	4.5	3	6.3	4.4	8.6	****	****	****	****	5.0
2001	EVTANQ	MM	4.4	5.1	4.7	5.0	****	5.5	4.0	4.2	4.5	****	4.0	4.3	4.7
2002	EVTANQ	MM	4.4	4.9	5.6	****	****	****	****	****	****	****	****	****	5.0
2003	EVTANQ	MM	5.0	4.7	4.8	5.0	5.6	5.2	4.4	3.8	4.0	4.7	4.2	****	4.7
2004	EVTANQ	MM	4.3	4.4	6.1	6	3.4	4.4	4.3	****	****	****	****	****	4.7
2005	EVTANQ	MM	5	5.3	3.9	4.2	4.1	3.3	3.3	3.5	3.5	3.9	4.4	4.1	4.0
2006	EVTANQ	MM	****	****	5.6	4.7	3.4	2.4	3.5	4.3	3.2	2.9	3.7	3.8	3.8
2007	EVTANQ	MM	5.0	4.5	5.7	5.6	3.7	3.8	3.9	2.8	3.2	2.6	4.6	4.1	4.1
2008	EVTANQ	MM	4.9	4.0	4.9	4.9	3.8	2.8	3.1	3.3	2.5	2.8	4.9	4.2	3.8
2009	EVTANQ	MM	4.5	5.7	5.7	4.8	3.0	3.5	4.4	4.3	3.7	3.7	3.5	3.6	4.2
2010	EVTANQ	MM	4.7	3	4.4	4.1	3.4	2.7	2.9	3.7	***	***	***	***	3.6
2011	EVTANQ	MM													
2012	EVTANQ	MM									3.0	2.9	4	1.5	
2013	EVTANQ	MM	3.9	3.7	4.6	3.2	3	2.8	3.8	3.3	2.9	2.7			
2014	EVTANQ	MM	3.5	3.2											

Tabla XXXI. Dirección del viento en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1993	DIRVIEN	GRAD	****	****	****	'NE	'NE	***	'NE	N	'NE	'NE	N	N	'NE
1994	DIRVIEN	GRAD	'NE	N	N	N	S	'NE	S	S	SW	N	NW	NW	VAR
1995	DIRVIEN	GRAD	NW	S	N	SW	S	S	S	N	SW	SW	S	SW	S
1996	DIRVIEN	GRAD	'NE	'NE	'NE	'NE	'NE	SW	SW	SW	S	SW	N	N	'NE
1997	DIRVIEN	GRAD	SE	SE	SE	SE	SE	SR	S	SE	SE	E	SE	SE	SE
1998	DIRVIEN	GRAD	S	S	NW	S	N	W	S	S	S	N	N	S	S
1999	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	N	S	C	N	S	N	S	N	S	S
2000	DIRVIEN	GRAD	NW	N	S	SW	S	N	SW	S	****	****	****	****	VAR
2001	DIRVIEN	GRAD	NW	N	S	SW	S	N	SW	VAR	****	****	****	****	VAR
2002	DIRVIEN	GRAD	VAR	C	VAR	****	****	****	****	****	****	****	****	****	VAR
2003	DIRVIEN	GRAD	N	VAR	VAR	VAR	N	VAR	N	N	VAR	N	VAR	****	VAR
2004	DIRVIEN	GRAD	VAR	VAR	N	VAR	VR	VAR	VR	N	VAR	C	****	'NE	VAR
2005	DIRVIEN	GRAD	'NE	'NE	SW	SW	S	W	W	SW	SW	E	SW	SW	SW
2006	DIRVIEN	GRAD	****	****	SW	SW	SW	W	VAR	VAR	NW	VAR	VAR	VAR	VAR
2007	DIRVIEN	GRAD	'NE	NW	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	SW	C	C	VAR	C	VAR
2008	DIRVIEN	GRAD	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2009	DIRVIEN	GRAD	C	VAR	VAR	C	C	C	VAR	SW	C	W	W	NW	C
2010	DIRVIEN	GRAD	W	W	NW	NW	NW	NW	VAR	W	W	NW	NW	C	NW
2011	DIRVIEN	GRAD	****	NW	NW	NW	NW	W	NW	NW	E	W	W	W	NW
2012	DIRVIEN	GRAD	NW												
2013	DIRVIEN	GRAD	NW	NW	NW	NW	C	W	W	SW	NW	SW	NW	NW	NW
2014	DIRVIEN	GRAD	NW	NW	NW		NW	NW	NW	NW	NW	SW	NW	NW	NW

Tabla XXXII. Velocidad del viento en la estación meteorológica Santiago Atitlán

AÑO	VARIAB	DIMEN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1993	VELOC. VIENTO	K/HRA	7.0	0.0	0.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	13.0	6.3
1994	VELOC. VIENTO	K/HRA	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
1995	VELOC. VIENTO	K/HRA	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
1996	VELOC. VIENTO	K/HRA	13.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	13.0	7.0	8.0
1997	VELOC. VIENTO	K/HRA	7.0	13.0	13.0	7.0	7.0	7.0	13.0	13.0	13.0	7.0	7.0	7.0	9.5
1998	VELOC. VIENTO	K/HRA	7.0	7.0	13.0	13.0	13.0	7.0	13.0	13.0	13.0	7.0	7.0	13.0	10.5
1999	VELOC. VIENTO	K/HRA	13.0	28.0	7.0	13.0	13.0	13.0	13.0	7.0	7.0	13.0	0.0	13.0	11.7
2000	VELOC. VIENTO	K/HRA	13.0	28.0	7.0	13.0	13.0	28.0	35.0	***	***	***	***	15.5	19.1
2001	VELOC. VIENTO	KM/HRA	***	17.8	***	***	13.9	***	***	15.0	***	***	***	***	15.6
2002	VELOC. VIENTO	KM/HRA	18.2	21.0	18.0	***	***	***	***	***	***	***	***	***	19.1
2003	VELOC. VIENTO	KM/HRA	16.0	14.0	18.0	14.0	13.2	9.0	16.0	14.0	17.0	16.0	16.0	***	14.8
2004	VELOC. VIENTO	KM/HRA	16.0	14.3	6.0	5.8	4.6	4.5	4.6	4.8	12.2	3.8	***	14.0	8.2
2005	VELOC. VIENTO	KM/HRA	10.0	16.3	10.0	10.0	12.0	10.3	13.8	12.0	9.0	12.7	13.9	11.1	11.8
2006	VELOC. VIENTO	KM/HRA	***	***	13.5	12.0	10.4	10.0	10.5	10.1	8.4	8.2	11.8	11.8	10.7
2007	VELOC. VIENTO	KM/HRA	12.1	9.1	11.4	6.8	7.5	6.8	8.3	6.7	6.1	5.5	13.5	6.6	8.4
2008	VELOC. VIENTO	KM/HRA	10.7	5.9	6.0	6.0	5.3	5.0	4.2	4.4	4.4	7.5	9.8	9.2	6.5
2009	VELOC. VIENTO	KM/HRA	6.8	11.0	6.7	7.0	4.5	4.3	7.0	7.0	6.6	8.5	9.0	7.7	7.2
2010	VELOC. VIENTO	KM/HRA	10.5	7.1	7.4	7.5	7.5	7.5	6.7	5.4	6.8	8.2	7.8	***	7.5
2011	VELOC. VIENTO	KM/HRA	8.4	8.0	8.5	7.3	7.8	7.4	6.7	7.3	7.0	7.1	7.4	9.3	7.7
2012	VELOC. VIENTO	KM/HRA	9.1	10.3	10.3	7.1	7.2	7.2	8.5	7.0	7.5	7.0	8.7	7.5	8.1
2013	VELOC. VIENTO	KM/HRA	9.4	9.3	8.7	6.0	5.0	4.3	4.7	4.5	3.8	3.5	4.0	7.4	
2014	VELOC. VIENTO	KM/HRA	10.5	11.0	3.9	3.4	3.5	3.0	4.0	2.6	2.0	2.0	2.0	2.0	

**Estación meteorológica El Tablón, municipio de Sololá, departamento de Sololá.**

**Tabla XXXIII. Temperatura media en °C, en la estación meteorológica El Tablón**

<b>AÑO</b>	<b>VARIAB</b>	<b>DIMENS</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>ANUAL</b>
1994	TMEDIA	°C	12.9	13.3	14.4	14.8	15.6	14.7	15.3	15.0	14.8	14.8	14.8	14.4	14.6
1995	TMEDIA	°C	12.9	14.1	14.3	15.5	15.3	15.3	15.5	14.7	14.7	14.5	14.3	13.8	14.6
1996	TMEDIA	°C	12.4	12.6	13.0	14.5	15.0	15.3	15.1	15.3	15.4	14.8	13.9	13.2	14.2
1997	TMEDIA	°C	12.3	13.1	14.3	15.5	16.0	15.5	16.0	15.8	14.8	14.8	14.4	13.4	14.7
1998	TMEDIA	°C	13.8	13.8	15.1	16.2	16.3	15.8	15.0	16.0	14.5	15.3	14.6	13.5	15.0
1999	TMEDIA	°C	13.3	12.9	14.7	15.5	15.8	14.5	14.9	14.9	14.1	14.0	12.9	13.0	14.2
2000	TMEDIA	°C	12.3	12.7	14.0	15.0	14.7	14.8	15.1	15.0	14.3	14.4	14.5	13.0	14.2
2001	TMEDIA	°C	12.3	13.7	13.5	15.5	15.5	14.9	15.1	15.5	14.3	15.3	13.6	14.0	14.4
2002	TMEDIA	°C	13.6	14.2	14.3	15.8	16.0	15.4	15.8	15.8	14.6	15.1	14.3	-99.9	15.0
2003	TMEDIA	°C	13.5	13.8	14.1	15.7	16.2	15.3	15.8	15.9	14.9	14.7	14.7	-99.9	15.0
2004	TMEDIA	°C	12.9	12.6	13.6	14.7	15.4	15.3	15.1	16.0	15.3	15.3	14.6	13.6	14.5
2005	TMEDIA	°C	12.9	14.3	14.9	16.1	15.6	15.3	15.2	15.6	15.3	14.4	14.2	13.7	14.8
2006	TMEDIA	°C	-99.9	13.4	14.0	14.6	15.3	15.2	15.7	15.9	14.9	15.6	14.1	14.3	14.8
2007	TMEDIA	°C	13.9	13.6	14.5	15.3	12.0	15.6	15.4	15.2	14.9	14	14.1	14.2	14.4
2008	TMEDIA	°C	12.5	13.4	13.9	15.2	15.7	14.9	14.8	15	14.7	14.5	12.5	13.5	14.2
2009	TMEDIA	°C	12.7	12.7	13.3	14.8	14.9	14.9	15.8	15.8	15.6	15.3	14.3	***	14.6
2010	TMEDIA	°C	13	14.3	15.1	15.5	16.2	15.9	15.7	15.1	14.7	14.3	13.6	12.4	14.7
2011	TMEDIA	°C	13.6	****	13.5	15.2	15.9	15.5	15.4	15.5	15.1	14.3	15.3	13.8	14.8
2012	TMEDIA	°C	13.2	14.4	13.8	14.8	15.5	15.2	15.7	15.1	15.2	15.0	14.5	13.9	14.7
2013	TMEDIA	°C	14	13.9	14.6	14.4	15.4	15.8	15.9	15.4	14.6	15.4	vacaciones	13.9	14.8
2014	TMEDIA	°C	13.4	13.8	15.3	15.3	15.7	15.6	16.8	16.1	14.8	14.9	14.2	13.8	14.9
2015	TMEDIA	°C	10	13.7	14.4	15.9	16.6	16.3	16.2	16.5					14.9

Tabla XXXIV. Temperatura máxima promedio en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	TMAXPR	°C	19.3	19.8	21.1	20.3	20.1	19.1	20.1	20.0	19.4	19.9	20.6	20.8	20.0
1995	TMAXPR	°C	19.8	21.5	20.4	20.2	20.2	20.0	20.3	19.3	19.7	19.4	20.0	20.1	20.1
1996	TMAXPR	°C	16.7	19.8	19.8	19.4	19.6	19.8	20.1	20.8	20.9	20.2	19.4	20.1	19.7
1997	TMAXPR	°C	19.3	19.5	20.2	21.2	21.4	19.4	20.6	20.8	19.6	19.4	19.3	19.6	20.0
1998	TMAXPR	°C	19.4	20.4	21.0	22.1	21.9	21.1	20.0	21.0	19.2	20.5	19.7	19.2	20.5
1999	TMAXPR	°C	20.3	19.9	21.3	21.6	21.8	19.1	19.8	20.4	18.8	19.4	18.3	19.5	20.0
2000	TMAXPR	°C	19.2	19.7	21.3	21.0	19.2	25.6	20.2	19.8	19.4	20.0	****	20.0	20.5
2001	TMAXPR	°C	19.8	*****	20.0	21.5	20.4	19.6	20.0	*****	19.3	20.7	19.9	20.6	20.2
2002	TMAXPR	°C	20.7	21.3	21.1	21.9	21.4	20.1	20.8	21.3	19.2	20.8	20.2	****	20.8
2003	TMAXPR	°C	20.2	20.9	20.9	21.4	21.4	19.8	20.8	21.4	20.5	20.2	20.9	****	20.8
2004	TMAXPR	°C	19.6	19.4	20.3	21.2	20.5	19.8	20.3	21.4	20.9	21.1	21.2	20.8	20.5
2005	TMAXPR	°C	24.0	21.9	20.7	22.8	20.9	19.9	20.7	20.6	20.9	19.6	20.3	20.7	21.1
2006	TMAXPR	°C	*****	21.3	18.7	14.9	15.3	20.0	20.8	21.4	20.9	21.5	21.2	20.7	19.7
2007	TMAXPR	°C	20.8	21.7	21.6	22.3	21.2	20.8	21.3	20.9	20.9	19.7	21.0	21.4	21.1
2008	TMAXPR	°C	20.0	20.5	20.8	23.0	21.0	19.6	19.9	20.5	20.9	19.4	19.0	19.9	20.4
2009	TMAXPR	°C	20.0	23.0	20.2	21.3	20.3	20.1	20.9	21.4	22.2	21.9	21.8		21.2
2010	TMAXPR	°C	21.1	22.0	22.6	21.2	21.1	20.8	20.5	19.3	20.0	20.8	20.3	20.6	20.9
2011	TMAXPR	°C	21.4	NO	20.4	21.9	22.1	21.9	22.0	22	21.3	21.1	19.9	20.1	21.3
2012	TMAXPR	°C	20.6	22.2	21.7	21.8	21.4	20.4	21.8	21.2	27.7	21.7	21.9	22.1	22.0
2013	TMAXPR	°C	21.3	21.1	21.3	21.6	19.2	20.4	21.5	21	19.4	21.3	vacaciones	19.4	20.7
2014	TMAXPR	°C	20.7	20.8	21.9	21.4	20.3	19.9	21.8	21	20.0	20.6	19.9	19.4	20.7
2015	TMAXPR	°C	19.5	20.2	20.6	22.0	22.2	21.2	21.7	23					21.3

Tabla XXXV. Temperatura mínima promedio en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	TMINPR	°C	6.0	6.7	7.6	8.0	19.2	9.4	10.3	10.0	10.1	9.0	8.5	8.4	9.4
1995	TMINPR	°C	5.5	6.7	6.9	9.3	9.6	10.4	10.4	9.8	10.8	10.3	8.8	8.2	8.9
1996	TMINPR	°C	5.2	5.4	6.0	9.8	10.7	10.7	10.3	10.0	10.1	10.6	9.0	6.5	8.7
1997	TMINPR	°C	5.4	7.3	7.6	8.6	9.9	10.6	11.2	10.8	10.3	9.5	10.4	6.1	9.0
1998	TMINPR	°C	6.5	4.2	7.1	8.4	9.0	11.3	10.1	10.6	9.1	10.5	9.6	7.3	8.6
1999	TMINPR	°C	6.4	5.5	5.7	8.0	9.4	10.2	10.0	9.9	10.5	9.0	7.6	6.5	8.2
2000	TMINPR	°C	5.4	5.0	5.9	7.8	10.3	10.2	*****	*****	*****	0.0	*****	6.6	5.5
2001	TMINPR	°C	4.2	*****	6.0	8.7	10.8	9.9	9.7	10.0	9.1	10.0	6.6	7.3	8.0
2002	TMINPR	°C	5.8	7.2	6.6	8.9	9.9	10.7	10.4	10.1	9.9	9.0	8.0	*****	8.8
2003	TMINPR	°C	7.3	5.9	6.8	7.9	10.4	10.7	10.4	10.2	9.7	9.9	9.5	*****	9.0
2004	TMINPR	°C	6.2	6.3	6.7	8.5	10.1	10.2	9.3	9.4	7.7	9.4	7.4	6.3	8.1
2005	TMINPR	°C	5.0	6.1	8.7	9.0	10.9	11.1	10.4	10.7	11.0	9.3	9.0	7.9	9.1
2006	TMINPR	°C	*****	6.5	5.5	9.0	10.3	11.1	10.8	10.7	10.2	10.3	7.2	8.4	9.1
2007	TMINPR	°C	7.5	5.8	4.8	9.2	10.4	10.5	9.8	10.6	10.3	9.9	9.4	6.9	8.8
2008	TMINPR	°C	6.3	7.2	7.8	7.4	10.7	11.2	10.6	9.4	10.4	10.7	6.2	6.8	8.7
2009	TMINPR	°C	5.8	6.3	6.4	8.6	10.4	10.6	11.5	11.3	10.7	9.7	8.4		9.1
2010	TMINPR	°C	5.9	8.5	8.2	10.5	11.4	11.7	12.0	12.5	11.5	9.8	9.1	4.8	9.7
2011	TMINPR	°C	6.9	NO	7.8	9.2	10.7	11.4	11.2	10.9	11.2	9.9	8	8.1	9.6
2012	TMINPR	°C	6.9	8.3	7.8	9	10.6	10.7	9.9	10.4	10	10.3	8.8	6.9	9.1
2013	TMINPR	°C	8.1	6.5	8.7	8.1	9.8	10.9	9.8	9.7	10.6	10.5	vacaciones	7.8	9.1
2014	TMINPR	°C	7.0	6.8	8.1	9.6	12	11.2	11.6	10.6	10.8	9.8	9.2	9.7	9.7
2015	TMINPR	°C	7.8	6.4	8.1	9.4	10.7	10.1	10.1	5					8.5

Tabla XXXVI. Temperatura máxima absoluta en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	TMAXAB	°C	22.5	23.5	26.0	23.5	23.5	22.5	22.0	22.0	22.0	22.0	25.2	24.4	26.0
1995	TMAXAB	°C	22.5	26.5	24.5	23.5	23.0	22.5	22.0	22.0	22.0	22.5	22.5	22.5	26.5
1996	TMAXAB	°C	23.0	23.5	25.0	24.5	22.5	21.5	21.5	23.5	23.0	23.0	22.5	23.0	25.0
1997	TMAXAB	°C	21.5	23.0	22.5	24.0	25.5	22.0	22.5	23.0	21.5	23.0	21.0	22.5	25.5
1998	TMAXAB	°C	22.0	24.0	23.5	24.0	25.5	23.5	21.5	23.0	22.5	23.5	22.5	21.5	25.5
1999	TMAXAB	°C	23.0	25.5	23.6	26.5	23.5	22.0	25.0	22.5	21.5	22.5	21.5	22.5	26.5
2003	TMAXAB	°C	25.0	25.5	26.0	25.0	26.0	22.5	22.5	23.0	22.5	23.5	23.5	***	26.0
2004	TMAXAB	°C	22.5	23.5	23.5	25.0	24.5	21.5	22.5	23.5	24.5	23.5	24.5	24.5	25.0
2005	TMAXAB	°C	24.0	27.0	23.0	26.0	25.5	23.0	23.5	23.0	23.5	23.0	22.0	23.5	27.0
2006	TMAXAB	°C	*****	25.2	24.5	24.5	25.5	22.0	23.0	23.5	23.5	24.0	24.0	24.0	25.5
2007	TMAXAB	°C	24.5	25.8	23.6	28.8	24.4	23.7	23.5	23.0	23.2	19.7	24.2	24.0	28.8
2008	TMAXAB	°C	26.4	23.0	24.3	25.0	24.8	23.0	22.8	22.4	23.8	22.4	21.4	23.2	26.4
2009	TMAXAB	°C	23.6	23.0	23.0	25.2	23.0	22.0	24.0	23.2	24.0	24.2	25.2		25.2
2010	TMAXAB	°C	30.4	24.4	26.0	24.4	24.8	24.0	24.4	24.4	22.8	23.0	23.4	24.0	30.4
2011	TMAXAB	°C	24.5	NO	22.5	26.0	25.0	24.0	24.4	24.4	24.0	23.0	24.7	24.0	26.0
2012	TMAXAB	°C	24.0	24.0	25.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	23.0	23.0	25.0	25.0
2013	TMAXAB	°C	23.0	24.0	25.0	26.0	23.0	23.0	24.0	23.0	23.0	24.0	vacaciones	23.0	23.7
2014	TMAXAB	°C	23.0	24.0	26.0	24.0	23.0	23.0	24.0	23.0	22.0	24.0	23.0	22.0	23.4
2015	TMAXAB	°C	22.0	24.0	24.0	25.0	25.0	24.0	24.0	24.0					24.0

Tabla XXXVIII. Temperatura mínima absoluta en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	TMINAB	°C	1.0	1.5	5.0	5.0	7.5	7.5	7.5	7.0	5.0	4.5	4.5	1.0	1.0
1995	TMINAB	°C	0.5	1.5	3.0	5.5	7.5	7.0	5.5	7.0	8.5	8.5	5.5	2.5	0.5
1996	TMINAB	°C	0.5	2.0	1.5	5.5	8.5	8.5	7.5	6.0	6.5	6.5	4.0	1.5	0.5
1997	TMINAB	°C	2.0	4.5	3.0	5.0	7.0	8.0	8.0	7.0	8.5	4.5	5.5	0.0	0.0
1998	TMINAB	°C	0.5	0.5	3.5	4.5	4.0	7.5	8.5	6.5	6.5	7.0	5.0	1.5	0.5
1999	TMINAB	°C	5.3	1.0	0.0	2.5	7.0	7.0	8.0	7.5	8.0	5.5	0.5	0.0	0.0
2003	TMINAB	°C	4.0	1.5	2.5	5.0	7.5	8.0	5.5	11.5	11.5	8.0	5.5	****	1.5
2004	TMINAB	°C	2.0	0.5	0.5	1.8	5.5	7.5	6.0	4.0	1.0	5.0	0.0	1.0	0.0
2005	TMINAB	°C	-2.0	1.5	6.0	6.0	8.5	9.0	7.5	6.5	8.0	2.5	1.5	3.5	-2.0
2006	TMINAB	°C	*****	1.5	2.0	2.5	7.0	5.0	7.0	8.0	7.5	6.5	2.0	3.5	1.5
2007	TMINAB	°C	4.0	1.0	4.8	4.8	8.0	7.2	5.2	10.6	8.0	3.8	5.2	1.6	1.0
2008	TMINAB	°C	1.0	0.4	3.6	4.8	6.8	8.0	7.2	5.2	6.2	8.4	2.6	1.6	0.4
2009	TMINAB	°C	1.8	2.0	3.0	5.4	8.0	7.2	8.2	8.0	7.2	5.0	3.0		1.8
2010	TMINAB	°C	1.2	3.0	5.0	7.0	8.0	7.0	8.6	10.0	9.2	4.2	4.0	0.5	0.5
2011	TMINAB	°C	2.0		4.0	3.2	6.0	8.0	8.0	7.0	8.0	3.0	2.4	4.0	2.0
2012	TMINAB	°C	1.0	2.0	1.5	6.0	7.5	7.0	3.0	6.0	8.0	4.0	5.0	2.0	1.0
2013	TMINAB	°C	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	9.0	6.0	4.0	7.0	7.0	N/D	2.0	4.9
2014	TMINAB	°C	2.0	2.0	4.0	6.0	9.0	8.0	9.0	9.0	7.0	6.0	3.5	8.0	6.1
2015	TMINAB	°C	1.0	4.0	4.0	7.0	8.0	5.0	7.0	5.0					5.1

Tabla XXXVIII. Humedad relativa media en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	HRMED	%	73	65	71	75	78	72	71	76	79	80	75	74	74
1995	HRMED	%	68	62	71	76	82	85	77	87	85	85	66	72	76
1996	HRMED	%	66	64	72	81	83	82	79	75	81	81	74	69	76
1997	HRMED	%	77	84	83	85	74	74	84	74	74	71	74	74	77
1998	HRMED	%	74	69	69	74	70	78	78	****	89	81	85	88	78
1999	HRMED	%	76	80	81	77	78	90	****	84	91	87	78	69	81
2000	HRMED	%	66	75	74	69	88	83	78	81	91	83	88	71	79
2001	HRMED	%	74	71	75	71	84	84	81	80	89	79	75	74	78
2002	HRMED	%	69	65	68	63	76	89	81	80	92	81	81	****	77
2003	HRMED	%	74	72	76	79	77	87	76	73	73	84	78	****	77
2004	HRMED	%	72	75	80	76	82	81	79	80	87	****	****	****	79
2005	HRMED	%	****	65	83	76	80	88	84	82	82	84	74	73	79
2006	HRMED	%	****	66	67	72	80	85	8	80	88	88	82	81	72
2007	HRMED	%	81	79	78	82	86	86	82	85	87	85	81	***	83
2008	HRMED	%	79	81	79	74	84	86	84	86	90	85	82	76	82
2009	HRMED	%	74	73	71	80	77	88	78	81	87	85	81	***	80
2010	HRMED	%	74	81	79	84	83	85	86	95	91	82	80	72	83
2011	HRMED	%	72	NO	76	75	80	85	83	85	87	86	77	72	80
2012	HRMED	%	75	72	72	77	83	84	75	84	82	85	80	79	79
2013	HRMED	%	80	77	75	79	83	82	78	82	90	85	vacaciones	75	81
2014	HRMED	%	76	73	71	74	82	84	71	75	84	84	79	76	77
2015	HRMED	%	75	75	74	78	76	79	77	76					76

Tabla XXXIX. Precipitación en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	LLUVIA	MM	16.2	1.7	0.0	41.0	170.5	169.1	120.7	183.4	140.7	125.1	40.4	26.8	1035.6
1995	LLUVIA	MM	0.0	1.1	0.0	4.7	59.4	100.1	299.6	154.0	352.6	271.7	174.7	25.8	1443.7
1996	LLUVIA	MM	5.0	1.6	0.9	139.8	148.4	263.0	214.7	169.2	391.0	145.4	47.6	19.2	1545.8
1997	LLUVIA	MM	5.9	23.9	3.1	11.3	117.0	323.8	126.9	135.7	422.6	191.3	95.0	45.9	1502.4
1998	LLUVIA	MM	0.7	0.0	0.0	7.5	84.4	206.7	255.0	248.1	220.8	287.5	279.4	2.3	1592.4
1999	LLUVIA	MM	0.5	5.2	3.0	6.8	74.3	378.9	236.8	186.0	395.9	262.7	8.9	16.3	1575.3
2000	LLUVIA	MM	0.0	0.0	1.4	45.5	275.1	340.7	67.2	205.1	372.2	111.0	12.3	****	1430.5
2001	LLUVIA	MM	0.0	0.0	4.8	9.5	226.8	223.2	216.8	156.5	366.0	63.9	19.7	5.2	1292.4
2002	LLUVIA	MM	1.7	2.8	0.9	13.9	115.3	181.7	130.6	77.5	320.9	102.6	27.1	****	975.0
2003	LLUVIA	MM	0.0	7.7	29.1	82.4	120.3	254.4	176.8	132.3	276.0	123.4	29.4	****	1231.8
2004	LLUVIA	MM	0.0	1.0	16.0	28.1	245.2	202.0	113.9	95.2	237.8	131.4	10.5	2.1	1083.2
2005	LLUVIA	MM	2.2	0.0	2.3	28.6	166.1	469.1	222.2	230.4	313.1	386.5	9.5	6.8	1836.8
2006	LLUVIA	MM	*****	0.2	4.7	62.0	181.3	359.7	195.1	130	211.3	212.3	113.9	26.1	1497.0
2007	LLUVIA	MM	3.6	0.0	6.0	46.1	84.9	98.0	127.5	218	266.3	180.3	7.5	1.7	1040.1
2008	LLUVIA	MM	2.1	5.8	3.4	0.0	139.0	468.1	297.1	272	303.8	143.3	6.3	0.3	1641.6
2009	LLUVIA	MM	0.0	0.0	0.0	24.1	264.2	307.7	80.5	214	181.6	45.9	64.0		1181.7
2010	LLUVIA	MM	0.0	13.0	3.4	104.5	527.0	313.2	253.5	382	72.2	59.6	17.2	0.0	1745.1
2011	LLUVIA	MM	0.0		8.0	23.6	59.2	255.6	368.8	218	251.5	403.6	0.0	0.0	1588.7
2012	LLUVIA	MM	0.0	0.0	24.3	44.6	262.2	228.7	68.6	305	162.6	137.0	25.2	0.0	1258.0
2013	LLUVIA	MM	<b>8.6</b>	<b>4.8</b>	19.9	20.6	134.6	273.5	210.3	245.5	319.1	<b>N/D</b>	vacaciones	<b>4.3</b>	1241.2
2014	LLUVIA	MM	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	26.6	10.0	232.5	448.2	44.9	90.6	282.4	<b>137.0</b>	14.2	<b>1.0</b>	1287.4
2015	LLUVIA	MM	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	12.6	56.0	54.3	242.2	70.9	84.6					520.6

Tabla XL. Días de lluvia en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	LLUVIA	DIAS	2	4	0	5	14	20	11	21	18	13	8	5	121
1995	LLUVIA	DIAS	0	3	0	2	9	16	22	24	29	28	18	5	156
1996	LLUVIA	DIAS	2	1	1	16	22	24	26	17	20	23	8	4	164
1997	LLUVIA	DIAS	1	5	4	4	13	27	12	12	22	20	15	6	141
1998	LLUVIA	DIAS	1	0	0	1	9	16	21	22	24	23	12	2	131
1999	LLUVIA	DIAS	0	0	0	0	0	3	21	0	0	0	0	0	24
2000	LLUVIA	DIAS	0	0	2	4	23	21	8	18	26	10	3	0	115
2001	LLUVIA	DIAS	0	0	2	3	18	13	22	14	22	9	4	2	109
2002	LLUVIA	DIAS	1	1	1	2	11	20	20	10	24	16	10	3	119
2003	LLUVIA	DIAS	0	9	7	2	14	24	16	15	22	11	9	***	120
2004	LLUVIA	DIAS	0	0	3	4	19	21	16	16	22	17	4	3	125
2005	LLUVIA	DIAS	1	0	2	5	21	26	25	22	21	18	3	3	147
2006	LLUVIA	DIAS	***	1	2	5	6	25	22	8	25	20	8	9	131
2007	LLUVIA	DIAS	4	0	1	9	11	21	15	19	24	18	5	***	127
2008	LLUVIA	DIAS	2	4	2	0	13	23	25	23	27	15	1	3	138
2009	LLUVIA	DIAS	0	0	0	2	23	22	16	19	21	9	8	***	120
2010	LLUVIA	DIAS	0	3	1	11	19	22	23	30	28	8	6	0	151
2011	LLUVIA	DIAS	0	NO	1	7	12	22	23	20	23	18	0	0	126
2012	LLUVIA	DIAS	0	0	4	11	14	18	15	23	18	15	4	0	122
2013	LLUVIA	DIAS	1	3	4	4	15	25	15	21	27	N/D	vacaciones	1	116
2014	LLUVIA	DIAS	0	0	4	3	18	22	10	13	27	17	4	1	119
2015	LLUVIA	DIAS	0.0	0.0	1.0	4.0	9.0	15.0	11.0	10					50

Tabla XLI. Insolación en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	INSOLA	HORAS	271.1	253.9	275.9	256.7	180.6	207.3	236.1	197.4	189.9	235.6	240.7	268.3	234.5
1995	INSOLA	HORAS	292.8	276.5	273.3	181.0	143.4	129.1	115.0	112.5	*****	*****	*****	*****	190.5
1996	INSOLA	HORAS	300.3	264.0	265.3	128.2	152.7	144.9	171.7	205.6	188.5	186.0	221.6	258.2	207.3
1997	INSOLA	HORAS	148.4	67.6	265.2	213.6	215.2	138.1	213.8	*****	112.2	*****	*****	*****	171.8
1998	INSOLA	HORAS	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	63.8	153.2	170.0	240.0	156.8
1999	INSOLA	HORAS	254.0	247.0	296.1	85.8	60.2	115.7	167.8	*****	84.1	*****	*****	265.4	175.1
2004	INSOLA	HORAS	*****	*****	*****	*****	*****	*****	214	264	183	220	261	279	236.8
2005	INSOLA	HORAS	285.2	280.0	198.4	234.0	170.5	141.0	195.3	186.0	174.0	167.4	249.0	254.2	211.3
2006	INSOLA	HORAS	260.8	251.4	279.0	222.0	151.9	139.5	195.0	227.2	183.0	193.2	240.4	***	213.0
2007	INSOLA	HORAS	264.4	234.7	266.6	217.8	152.9	179.6	208.2	158.5	162.7	267.0	246.8	291.5	220.9
2008	INSOLA	HORAS	286.8	236.9	111.0	126.0	175.6	136.3	143.7	178.7	123.5	148.8	263.8	268.5	183.3
2009	INSOLA	HORAS	268.5	256.6	253.9	164.3	0.0	117.1	209.1	215.4	200.6	2009.4	236.2	***	357.4
2010	INSOLA	HORAS	284.4	215.0	260.2	170.2	170.3	136.1	138.0	102.5	114.0	244.2	210.4	282.1	194.0
2011	INSOLA	HORAS	275.1	NO	246.0	211.2	384.4	110.0	179.8	190.1	135.6	142.5	90.4	215.9	198.3
2012	INSOLA	HORAS	247.4	246.5	252.2	214.0	146.2	131.7	229.0	153.0	201.4	185.8	109.2	211.7	194.0
2013	INSOLA	HORAS	258.7	259.0	264.0	171.7	163.2	154.4	223.9	169.0	102.3	179.1	vacaciones	233.1	198.0
2014	INSOLA	HORAS	284.6	247.1	257.4	198.7	131.7	126.4	238.2	221.0	131.3	154.4	241.9	259.8	207.7
2015	INSOLA	HORAS	282.5	260.4	240.0	230.0	128.0	160.8	205.2	206.5					214.2

Tabla XLII. Humedad máxima en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2007	HUMEDMAX	%	93	93	93	93	94	94	93	96	96	97	92	89	94
2008	HUMEDMAX	%	93	95	87	83	96	99	92	99	98	98	98	98	95
2009	HUMEDMAX	%	97	96	94	92	96	99	95	96	95	99	96		96
2010	HUMEDMAX	%	96	100	100	99	99	92	95	97	96	91	92	86	95
2011	HUMEDMAX	%	88	NO	90	87	88	93	94	93	95	95	81	83	90
2012	HUMEDMAX	%	86	88	87	89	91	92	88	94	91	93	92	93	90
2013	HUMEDMAX	%	91	91	87	90	91	92	89	93	96	94	vacaciones	88	91
2014	HUMEDMAX	%	90	89	87	88	91	84	83	87	87	93	89	86	88
2015	HUMEDMAX	%	86	88	88	88	88	88	90	89					88

Tabla XLIII. Humedad mínima en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2007	HUMEDMIN	%	35	35	37	45	49	51	52	53	81	66	45	77	52
2008	HUMEDMIN	%	38	46	49	32	58	68	75	60	69	68	52	46	55
2009	HUMEDMIN	%	44	44	46	44	33	66	55	59	76	73	66	***	55
2010	HUMEDMIN	%	54	49	61	73	74	76	77	82	84	71	63	53	69
2011	HUMEDMIN	%	53	NO	59	58	69	75	70	74	74	73	61	81	68
2012	HUMEDMIN	%	55	54	54	62	71	75	59	72	70	73	65	57	64
2013	HUMEDMIN	%	65	60	61	65	70	69	64	67	80	71	vacaciones	58	66
2014	HUMEDMIN	%	56	53	52	58	71	73	55	60	76	70	64	61	62
2015	HUMEDMIN	%	56	57	56	64	62	68	61	60					61

Tabla XLIV. Evapotranspiración en la estación meteorológica El Tablón

ANO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	EVTANQUE	MM	4.4	5.4	5.3	6.1	4.6	5.0	4.9	3.8	3.7	3.2	3.1	3.2	4.4
1995	EVTANQUE	MM	4.0	5.2	3.7	4.8	4.0	3.2	3.4	2.8	2.1	2.3	4.3	3.8	3.6
1996	EVTANQUE	MM	4.1	4.5	4.1	3.2	3.3	3.1	3.2	4.2	4.0	2.8	2.8	3.6	3.6
1997	EVTANQUE	MM	3.3	4.1	4.4	4.6	4.7	3.0	4.3	4.6	3.0	3.0	3.2	3.3	3.8
1998	EVTANQUE	MM	3.6	4.8	5.4	6.4	5.2	4.5	4.1	4.8	3.0	3.4	3.2	3.7	4.3
1999	EVTANQUE	MM	4.0	5.4	6.0	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	5.1
2003	EVTANQUE	MM	4.0	4.5	4.6	4.7	4.0	2.8	4.6	4.3	3.3	2.9	3.2	*****	3.9
2004	EVTANQUE	MM	4.0	3.6	4.7	4.8	3.4	3.6	3.5	3.9	2.7	3.2	3.7	3.2	3.7
2005	EVTANQUE	MM	N/D	5.1	3.7	4.4	3.1	2.6	3.7	3.9	3.1	2.7	3.0	3.0	3.5
2006	EVTANQUE	MM		4.3	4.7	4.5	3.1	2.7	3.4	3.4	3.1	3	3.0	2.0	3.4
2007	EVTANQUE	MM	4.7	4.1	4.6	4.4	4.4	3.1	3.4	3.2	3.1	2.2	3.2	4.0	3.7
2008	EVTANQUE	MM	3.3	3.3	3.8	4.9	3.9	2.5	3.1	3.3	2.6	2.3	3.2	3.1	3.3
2009	EVTANQUE	MM	3.2	4	4.6	4.6	3.1	2.6	3.9	4.1	3.5	3.1	2.8	***	3.6
2010	EVTANQUE	MM	3.3	3.7	4.2	4.1	3.5	3	2.9	2.4	2.4	3.3	2.4	3.5	3.2
2011	EVTANQUE	MM	3.4	NO	4.5	3.7	4.1	2.9	3.2	3.1	2.8	2.4	1.1	3.3	3.1
2012	EVTANQUE	MM	3.2	3.9	4.7	4.1	3.5	2.9	4.1	3.3	3.2	4.2	3.5	3.5	3.7
2013	EVTANQUE	MM	3.2	4.2	4.7	4.6	3.6	3.1	4.7	3.8	2.1	N/D	vacaciones	2.5	3.6
2014	EVTANQUE	MM	3.6	4.4	5.4	4.1	3.4	3	4.4	3.5	2.8	2.7	3.3	1.1	3.4
2015	EVTANQUE	MM	2.7	4.2	4.5	4.6	4.4	3.9	3.9	4.2					4.0

Tabla XLV. Nubosidad en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	4	5	5	4	5	5	4	4	3	3
1995	NUBOSI	OCTAS	3	3	4	5	5	5	5	6	6	6	4	4	5
1996	NUBOSI	OCTAS	2	2	4	6	6	5	5	5	5	5	3	6	5
1997	NUBOSI	OCTAS	3	4	4	4	4	6	5	5	6	5	5	3	4
1998	NUBOSI	OCTAS	3	2	4	4	5	5	5	5	6	5	4	3	5
1999	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	3	4	6	5	5	8	5	5	2	3
2003	NUBOSI	OCTAS	2	2	4	4	8	8	5	4	5	6	3	*****	4
2004	NUBOSI	OCTAS	2	3	3	3	5	7	6	4	6	6	1	2	3
2005	NUBOSI	OCTAS	2	1	5	5	8	5	6	4	6	8	3	4	5
2006	NUBOSI	OCTAS	*****	2	3	5	6	6	5	6	5	7	4	3	5
2007	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	5	5	5	4	6	6	6	3	2	3
2008	NUBOSI	OCTAS	2	4	4	3	6	6	6	5	6	6	3	3	6
2009	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	3	6	6	4	5	5	5	4		3
2010	NUBOSI	OCTAS	3	5	4	5	6	6	6	7	7	4	3	2	6
2011	NUBOSI	OCTAS	3		4	5	5	6	6	6	7	6	2	3	6
2012	NUBOSI	OCTAS	4	4	4	5	6	6	5	6	5	5	4	2	4
2013	NUBOSI	OCTAS	4	4	5	6	7	7	7	6	8	N/D	4	5	6
2014	NUBOSI	OCTAS	3	5	5	6	8	7	6	6	8	7	5	3	8
2015	NUBOSI	OCTAS	3	4	3	6	5	6	6	6					5

Tabla XLVI. Velocidad del viento en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	VIENTO	KM/HO	8.7	8.8	6.7	6.1	4.9	4.7	7.5	5.3	5.8	4.3	6.6	8.5	6.5
1995	VIENTO	KM/HO	7.7	8.0	6.0	5.0	3.7	3.6	5.0	2.9	3.2	3.7	7.4	6.3	5.2
1996	VIENTO	KM/HO	6.8	7.3	5.7	4.9	4.7	3.5	4.8	4.0	2.9	4.1	8.9	7.8	5.5
1997	VIENTO	KM/HO	5.7	8.6	6.8	5.0	5.6	3.8	7.4	7.0	3.2	4.1	6.2	4.4	5.7
1998	VIENTO	KM/HO	6.8	4.5	5.7	5.0	5.1	4.5	4.6	4.2	1.9	3.3	5.7	8.2	5.0
1999	VIENTO	KM/HO	7.7	7.2	7.0	6.3	4.9	3.4	5.4	3.9	2.9	4.7	8.6	8.5	5.9
2003	VIENTO	KM/HO	8.3	6.3	5.1	4.9	5.5	2.9	5.3	4.9	4.4	4.2	7.0	****	5.3
2004	VIENTO	KM/HO	6.8	7.5	6.7	8.9	4.6	4.2	****	****	****	****	****	****	6.5
2005	VIENTO	KM/HO	11.1	7.2	2.0	4.4	3.5	2.2	4.5	3.2	1.5	2.3	9.5	6.2	4.8
2006	VIENTO	KM/HO	****	8.2	4.0	3.0	2.0	5.1	3.4	4.1	1.7	2.1	5.0	6.5	4.1
2007	VIENTO	KM/HO	13.0	3.3	5.5	3.0	2.9	3.0	5.8	2.0	2.5	2.4	10.0	6.2	5.0
2008	VIENTO	KM/HO	14.0	5.6	5.0	5.0	2.2	4.1	3.2	2.5	2.0	9.3	11.0	8.1	6.0
2009	VIENTO	KM/HO	8.0	9.0	5.0	3.7	2.5	2.1	3.8	3.3	2.0	2.4	3.7	****	4.1
2010	VIENTO	KM/HO	5.6	3.1	2.3	2.1	4.2	3.0	2.2	2.0	2.4	5.0	5.6	6.7	3.7
2011	VIENTO	KM/HO	6.4	8.9	5.6	2.5	2.9	3.6	2.2	2.4	2.4	2.5	5.6	10.9	4.7
2012	VIENTO	KM/HO	9.6	5.4	6.4	2.5	2.4	2.2	4.2	2.0	2.5	3.8	5.1	11.9	4.8
2013	VIENTO	KM/HO	7.6	7.6	6.6	3.0	3.5	2.8	3.3	2.8	2.2	2.9	2	7.7	4.3
2014	VIENTO	KM/HO	7.0	4.0	4.7	4.7	3.5	2.1	5.4	3.0	1.5	2.7	11.5	12.7	5.2
2015	VIENTO	KM/HO	6.7	4.7	8.0	3.1	3.0	4.1	3.3	3.0					4.5

Tabla XLVII. Dirección del viento en la estación meteorológica El Tablón

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994	DIREVIENT	GRADO	'NE	'NE	'NE	SE	'NE	'NE	'NE	'NE	'NE	SE	'NE	'NE	'NE
1995	DIREVIENT	GRADO	'NE	'NE	SE	SE	SE	SE	'NE	SE	SE	SE	'NE	'NE	SE
1996	DIREVIENT	GRADO	SE	'NE	SE	SE	SE	SE	'NE	'NE	'NE	SE	'NE	'NE	VAR
1997	DIREVIENT	GRADO	SE	SE	SE	SE	'NE	SE	'NE	'NE	'NE	'NE	N	'NE	'NE
1998	DIREVIENT	GRADO	SE	SE	SE	SE	SE	'NE	'NE	'NE	SE	SE	'NE	'NE	SE
1999	DIREVIENT	GRADO	'NE	SE	SE	E	*****	SE	'NE	SE	SE	'NE	NW	'NE	SE
2003	DIREVIENT	GRADO	N	N	SE	E	E	VRB	N	E	E	VRB	N	*****	E
2004	DIREVIENT	GRADO	N	N	N	N	E	E	E	E	E	E	N	E	E
2005	DIREVIENT	GRADO	N	E	SE	E	E	E	E	E	E	E	N	E	E
2006	DIREVIENT	GRAD	*****	N	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
2007	DIREVIENT	GRADO	E	SE	E	E	E	E	E	E	E	E	N	N	E
2008	DIREVIENT	GRADO	N	N	VARIA	E	E	E	E	E	E	N	N	N	E
2009	DIREVIENT	GRADO	N	N	N	E	NE	NE	E	NE	E	E	E	***	VAR
2010	DIREVIENT	GRADO	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	N	E	E
2011	DIREVIENT	GRADO	E	NO	E	E	E	E	E	E	E	E	E	N	E
2012	DIREVIENT	GRADO	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
2013	DIREVIENT	GRADO	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	N	E
2014	DIREVIENT	GRADO	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	N	E
2015	DIREVIENT	GRADO	N	E	N	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E

**Estación meteorológica El Capitán, municipio de San Lucas Tolimán, departamento de Sololá.**

**Tabla XLVIII. Temperatura media en la estación meteorológica El Capitán**

<b>AÑO</b>	<b>VARIAB</b>	<b>DIMENS</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>ANUAL</b>
1990	TMEDIA	°C	19.0	18.8	19.0	19.7	20.0	20.5	19.6	21.1	19.1	18.9	20.1	18.0	19.5
1991	TMEDIA	°C	17.8	17.9	17.6	19.3	19.2	20.1	19.2	18.9	18.2	17.0	17.7	16.6	18.3
1992	TMEDIA	°C	15.3	14.6	19.2	19.0	20.4	19.9	--	17.8	19.9	17.2	18.5	18.9	18.2
1993	TMEDIA	°C	17.9	18.3	18.7	20.0	12.8	16.8	20.3	17.2	16.1	17.3	16.7	15.9	17.3
1994	TMEDIA	°C	16.0	16.2	17.1	17.9	18.6	18.5	19.8	18.1	18.5	17.7	17.7	17.2	17.8
1995	TMEDIA	°C	17.8	18.3	18.6	19.7	19.8	19.4	18.3	18.8	18.5	18.4	18.6	17.8	18.7
1996	TMEDIA	°C	17.0	17.5	17.9	19.2	19.1	18.0	18.7	18.8	18.5	18.9	--	---	18.4
1997	TMEDIA	°C	17.2	18.3	18.8	20.6	19.7	19.2	21.6	20.8	19.0	18.7	18.6	17.6	19.2
1998	TMEDIA	°C	17.9	17.3	19.7	20.4	21.0	20.5	19.6	19.8	18.9	18.7	18.5	18.2	19.2
1999	TMEDIA	°C	18.0	17.5	18.0	19.7	21.0	18.8	19.4	19.1	17.8	18.1	17.7	17.0	18.5
2000	TMEDIA	°C	18.0	17.5	18.0	19.7	***	***	***	***	***	***	***	***	18.3
2005	TMEDIA	°C	17.7	18.3	19.6	19.6	19.8	19.5	19.7	19.8	19.5	18.1	18.8	18.3	19.1
2006	TMEDIA	°C	****	18.5	17.5	19.0	19.4	19.3	19.4	20.0	19.0	19.3	18.4	18.4	18.9
2007	TMEDIA	°C	19.0	18.1	18.8	19.6	19.8	19.3	19.7	19.1	18.8	18.0	18.7	18.0	18.9
2008	TMEDIA	°C	18.3	17.6	18.9	20.0	19.7	19.1	19.3	18.2	18.8	18.7	18.4	18.3	18.8
2009	TMEDIA	°C	18.0	18.6	18.5	19.7	19.0	19.1	20.7	20.2	19.7	19.6	18.6	18.1	19.2
2010	TMEDIA	°C	18.3	19.3	19.5	20.3	20.3	19.6	19.1	19.2	18.8	18.9	18.4	17.3	19.1
2011	TMEDIA	°C	18.4	18.4	18.4	19.4	20.2	19.5	19.2	19.3	19.0	17.9	18.7	18.7	18.9
2012	TMEDIA	°C	17.9	18.6	18.7	19.3	19.4	19.1	19.9	18.9	18.8	18.8	18.7	18.7	18.9
2013	TMEDIA	°C	19.8	19.9	19.5	19.9	19.7	19.6	20.0	19.3	18.8	19.2	18.9	18.7	19.4
2014	TMEDIA	°C	19.3	18.7	18.6	19.4	19.7	19.4	21.3	20.0	18.6	19.0	19.0	18.4	19.2
2015	TMEDIA	°C	19.1	18.5		20.3	20.2	20.4		20.6					9.9

Tabla XLIX. Temperatura máxima promedio en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMAXPR	°C	26.7	26.0	25.8	26.3	25.6	25.7	25.7	26.7	25.5	25.8	26.3	25.8	26.0
1991	TMAXPR	°C	25.4	26.1	25.4	25.5	25.3	24.7	25.5	25.1	24.8	22.8	24.7	24.3	25.0
1992	TMAXPR	°C	23.9	23.8	24.9	25.1	23.3	22.7	*****	25.6	24.1	24.6	23.8	24.9	24.2
1993	TMAXPR	°C	24.1	25.4	23.7	24.4	23.2	21.7	24.9	24.2	22.0	23.9	23.9	23.5	23.7
1994	TMAXPR	°C	24.5	24.1	24.3	24.6	23.6	24.3	26.2	24.8	25.5	23.7	24.8	24.6	24.6
1995	TMAXPR	°C	24.2	24.7	24.5	24.4	24.5	23.4	24.5	23.4	23.3	23.4	25.4	23.9	24.1
1996	TMAXPR	°C	23.4	23.6	23.4	24.0	23.5	23.7	23.9	*****	*****	*****	*****	*****	23.6
2005	TMAXPR	°C	24.8	25.4	25.1	25.6	23.7	23.3	25.0	25.4	25.1	23.6	25.1	25.1	24.8
2006	TMAXPR	°C	25.1	25.5	25.4	25.1	24.2	24.3	25.7	26.3	24.0	24.3	24.8	24.9	25.0
2007	TMAXPR	°C	25.7	25.6	26.2	26.1	26.0	25.9	26.1	25.7	25.5	24.6	28.0	27.5	26.1
2008	TMAXPR	°C	27	25.5	26	26	25.7	24.2	25.2	25.2	24.6	24.9	26.4	26.1	25.6
2009	TMAXPR	°C	25.5	26.3	26.3	26.3	25.0	24.8	27.2	26.7	26.0	25.9	26.1	26.4	26.0
2010	TMAXPR	°C	26.6	26.2	25.9	26.1	24.4	24.5	24.5	23.9	23.3	24.6	25.0	24.8	25.0
2011	TMAXPR	°C	25.4	25.4	25.1	25.2	25.1	24.4	24.4	24.2	24.3	23.3	26.5	25.9	24.9
2012	TMAXPR	°C	25.0	24.9	25.2	25.8	24.2	23.5	25.3	24.0	24.7	24.8	26.6	26.1	25.0
2013	TMAXPR	°C	26.4	25.3	26.5	25.9	24.8	24.2	25.1	24.6	23.4	24.7	25.0	25.0	25.0
2014	TMAXPR	°C	25.0	24.6	25.9	26.5	25.8	24.4	25.2	24.5	23.8	24.0	25.0	25.0	24.9
2015	TMAXPR	°C	25.4	25.0		26.1	25.5	25.7		29.5					13.1

Tabla L. Temperatura mínima promedio en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMINPR	°C	12.5	12.4	12.6	14.2	15.6	15.8	15.0	15.3	15.2	14.0	14.5	11.8	14.1
1991	TMINPR	°C	11.0	11.0	11.6	14.1	14.7	14.8	13.3	13.2	13.5	11.7	10.3	10.2	12.5
1992	TMINPR	°C	8.5	7.9	10.4	14.6	18.4	17.8	-----	12.5	12.8	12.0	11.4	11.5	12.5
1993	TMINPR	°C	9.3	9.6	12.1	12.8	12.9	13.2	13.8	13.5	12.3	13.0	11.2	9.6	11.9
1994	TMINPR	°C	9.4	9.3	10.7	12.3	13.2	13.8	14.1	13.3	13.6	12.1	12.1	11.5	12.1
1995	TMINPR	°C	9.8	10.4	11.6	13.4	13.8	14.1	14.4	14.2	14.1	13.4	12.0	11.2	12.7
1996	TMINPR	°C	9.1	9.8	11.2	13.4	14.2	13.9	13.8	-----	-----	-----	-----	-----	12.2
2005	TMINPR	°C	11.0	11.7	14.5	14.8	15.6	16.0	14.9	15.4	15.1	14.4	12.9	12.0	14.0
2006	TMINPR	°C		12.2	12.5	13.6	15.3	15.3	16.3	15.3	14.8	15.3	13.0	12.9	14.2
2007	TMINPR	°C	12.6	11.5	12.8	14.4	15.1	14.5	14.6	14.8	14.5	13.9	12.4	10.9	13.5
2008	TMINPR	°C	11.0	11.1	12.3	13.0	15.1	14.9	14.5	14.1	14.9	14.6	11.9	11.3	13.2
2009	TMINPR	°C	11.3	11.4	12.0	14.3	14.4	15.1	14.9	15.0	14.8	14.3	13.4	14.9	13.8
2010	TMINPR	°C	11.6	13.4	13.0	14.7	16.1	15.6	15.1	15.5	15.1	13.3	12.1	9.7	13.8
2011	TMINPR	°C	11.5	11.7	11.3	13.5	14.9	14.8	14.6	14.2	14.4	13.4	11.6	11.3	13.1
2012	TMINPR	°C	11.1	12.8	12.2	13.8	14.9	14.8	14.6	14.9	13.9	13.6	11.5	11.4	13.3
2013	TMINPR	°C	12.0	11.9	13.1	13.5	14.4	15.0	14.0	14.1	14.4	14.2	12.8	15.0	13.7
2014	TMINPR	°C	13.8	14.8	13.5	12.6	12.5	15.6	14.6	15.5	13.9	13.4	12.3	10.9	13.6
2015	TMINPR	°C	11.2	11.1		16.7	13.3	14.2		11.5					6.5

Tabla LI. Temperatura máxima promedio en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMAXAB	°C	30.3	29.7	29.8	30.0	28.7	28.8	28.5	29.9	29.4	28.3	30.0	30.1	30.3
1991	TMAXAB	°C	27.4	29.9	30.0	27.4	27.4	28.9	28.2	25.2	28.6	26.3	28.2	27.0	30.0
1992	TMAXAB	°C	26.9	28.8	27.2	31.0	27.1	25.2	-----	27.5	28.2	27.0	27.2	27.5	31.0
1993	TMAXAB	°C	27.3	29.8	26.0	26.4	28.8	30.0	28.0	28.0	26.2	27.3	28.2	26.8	30.0
1994	TMAXAB	°C	28.7	27.4	27.5	27.8	25.3	29.0	30.0	29.0	28.2	27.7	28.3	29.1	30.0
1995	TMAXAB	°C	27.5	28.8	28.4	29.4	27.7	25.0	27.0	26.5	26.2	27.2	29.1	26.5	29.4
1996	TMAXAB	°C	26.1	24.7	26.3	26.8	27.2	26.6	28.0	-----	-----	-----	-----	-----	28.0
2005	TMAXAB	°C	27.5	28.5	26.5	29.0	29.0	25.5	29.0	29.5	28.0	27.0	28.5	27.5	29.5
2006	TMAXAB	°C		29.5	29.0	29.0	26.5	29.5	30.0	29.5	29.5	28.0	28.0	27.5	30.0
2007	TMAXAB	°C	29.0	27.5	30.0	29.8	28.0	30.0	29.8	29.5	29.5	28.0	31.0	30.4	31.0
2008	TMAXAB	°C	30.0	30.4	29.5	30.0	28.4	28.8	30.0	28.8	27.6	29.0	29.5	28.8	30.4
2009	TMAXAB	°C	27.8	29.5	29.4	31.0	27.0	27.0	30.2	29.5	28.5	29.0	30.5	30.0	31.0
2010	TMAXAB	°C	29.8	31.0	27.0	29.8	30.8	27.0	27.5	27.0	27.0	27.2	27.5	26.0	31.0
2011	TMAXAB	°C	29.0	27.8	28.0	28.5	27.5	28.8	28.5	26.5	29.5	28.0	27.8	28.0	29.5
2012	TMAXAB	°C	27.0	27.0	28.2	27.5	25.8	26.0	27.0	26.0	26.8	28.0	29.0	30.0	30.0
2013	TMAXAB	°C	29.5	29.0	28.2	29.0	29.0	27.0	28.0	26.8	23.4	24.7	25.0	25.0	27.0
2014	TMAXAB	°C	28.0	29.7	27.6	28.0	25.8	27.0	28.6	28.4	23.8	24.0	25.0	25.0	26.7
2015	TMAXAB	°C	28.5	27.0		28.2	27.8	28.5		29.5					11.8

Tabla LIII. Temperatura mínima absoluta en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	TMINAB	°C	9.9	9.6	9.0	10.8	13.2	14.2	12.6	13.0	12.0	10.1	9.0	8.1	8.1
1991	TMINAB	°C	7.8	7.0	7.8	11.6	12.0	12.2	10.0	11.0	11.2	6.8	5.7	5.5	5.5
1992	TMINAB	°C	6.0	3.6	6.5	10.0	16.0	16.2		10.3	9.1	9.2	8.8	6.3	3.6
1993	TMINAB	°C	5.0	7.0	8.6	10.8	10.8	12.0	10.0	11.0	11.2	10.9	7.1	5.2	5.0
1994	TMINAB	°C	7.2	6.2	6.8	10.8	11.9	11.8	10.8	10.0	11.0	9.1	9.0	7.0	6.8
1995	TMINAB	°C	6.9	7.0	7.3	10.9	11.4	12.2	12.2	10.7	12.3	12.0	10.0	6.3	6.3
1996	TMINAB	°C	2.2	6.2	7.0	11.7	12.9	12.0	10.9	-----	-----	-----	-----	-----	2.2
2005	TMINAB	°C	8.0	7.5	12.5	12.5	13.5	14.0	13.5	14.0	13.5	10.0	9.0	10.0	7.5
2006	TMINAB	°C		9.0	9.0	9.5	14.0	13.0	12.5	12.5	13.0	13.5	7.0	10.0	7.0
2007	TMINAB	°C	10.0	9.0	11.2	11.5	11.5	11.2	12.0	12.0	12.0	13.9	10.0	8.0	8.0
2008	TMINAB	°C	8.0	7.5	10.2	10.8	13.2	13.2	12.0	11.5	12.0	10.6	9.0	8.2	7.5
2009	TMINAB	°C	9.0	8.5	6.5	12.5	13.2	13.2	13.5	12.4	13.8	12.0	10.0	12.0	6.5
2010	TMINAB	°C	8.8	11.5	9.8	12.0	12.8	13.8	11.5	15.5	14.0	10.5	9.4	6.0	6.0
2011	TMINAB	°C	9.0	9.8	9.2	8.8	12.0	12.8	12.5	12.8	13.8	9.5	9.5	9.5	8.8
2012	TMINAB	°C	8.5	9.5	10.0	9.8	12.8	12.8	12.5	13.5	10.0	10.0	7.0	8.0	7.0
2013	TMINAB	°C	9.8	10.0	8.5	11.4	11.0	13.0	12.0	11.0	14.4	14.2	12.8	15.0	11.9
2014	TMINAB	°C	8.5	9.6	11.0	9.7	12.5	12.8	12.0	11.5	13.9	13.4	12.3	10.9	11.5
2015	TMINAB	°C	7.0	8.5		10.0	10.6	12.0		11.5					4.9

Tabla LIII. Humedad relativa en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	HRMED	%	75	79	74	79	84	86	80	76	85	86	71	77	79
1991	HRMED	%	76	67	75	84	91	88	71	79	84	86	72	67	78
1992	HRMED	%	77	76	74	77	84	88	82	87	91	84	84	74	82
1993	HRMED	%	76	72	77	88	94	92	83	83	91	90	77	80	84
1994	HRMED	%	78	68	79	81	86	77	68	79	77	79	76	70	77
1995	HRMED	%	66	64	70	79	82	88	82	89	86	87	73	76	79
1996	HRMED	%	68	66	70	78	84	85	81	*****	*****	*****	*****	*****	76
2005	HRMED	%	64	70	83	78	87	90	87	85	87	88	76	78	81
2006	HRMED	%	*****	66	70	87	88	89	83	84	80	88	80	75	81
2007	HRMED	%	61	68	63	82	77	83	71	80	79	79	66	72	73
2008	HRMED	%	68	71	68	65	64	72	77	78	78	76	64	62	70
2009	HRMED	%	60	55	59	66	****	****	61	69	77	75	72	73	67
2010	HRMED	%	65	70	72	71	74	77	79	82	83	72	65	58	72
2011	HRMED	%	60	58	55	65	71	76	71	71	76	75	61	56	66
2012	HRMED	%	57	58	63	69	80	81	67	77	76	78	63	66	70
2013	HRMED	%	61	64	56	71	73	75	72	76	82	81	83	72	72
2014	HRMED	%	86	78		82	83	88	75	81	86	87	67	66	73
2015	HRMED	%	75	65		83	84	82		82					39

Tabla LIV. Humedad máxima en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2007	HUMEDMAX	%	94	92	87	97	96	95	93	95	95	93	89	96	97
2008	HUMEDMAX	%	91	83	93	88	85	89	94	95	94	91	86	87	95
2009	HUMEDMAX	%	85	80	89	92	-		85	89	95	94	91	95	95
2010	HUMEDMAX	%	91	96	94	93	88	95	96	97	97	93	89	84	97
2011	HUMEDMAX	%	86	79	81	87	88	92	88	84	94	92	85	82	94
2012	HUMEDMAX	%	83	80	88	93	96	92	90	95	94	94	88	92	96
2013	HUMEDMAX	%	85	90	82	94	94	92	92	83	95	93	91	85	90
2014	HUMEDMAX	%	96	93		90	90	94	87	92	95	93	80	89	83
2015	HUMEDMAX	%	81	91		92	92	90		89					45

Tabla LV. Humedad mínima en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2007	HUMEDMIN	%	46	37	35	50	38	54	48	52	53	63	38	37	46
2008	HUMEDMIN	%	40	43	39	38	45	56	50	55	58	52	37	34	46
2009	HUMEDMIN	%	35	30	31	43	-		38	43	52	51	44	42	41
2010	HUMEDMIN	%	32	44	46	48	59	61	56	68	66	49	44	38	51
2011	HUMEDMIN	%	40	41	36	45	55	61	57	61	62	63	41	34	50
2012	HUMEDMIN	%	37	37	36	43	56	60	42	53	51	51	32	35	44
2013	HUMEDMIN	%	35	35	35	41	39	51	46	44	65	77	73	67	51
2014	HUMEDMIN	%	72	69		70	73	77	65	73	81	77	62	63	65
2015	HUMEDMIN	%	56	57		82	71	68		68					34

Tabla LVI. Precipitación en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	LLUVIA	MM	0.0	20.3	13.5	62.8	108.5	167.5	170.3	92.5	144.7	83.7	14.2	8.1	865.8
1991	LLUVIA	MM	0.9	0.0	0.5	4.7	155.5	265.8	53.9	98.8	136.3	148.8	1.0	25.3	891.5
1992	LLUVIA	MM	0.0	0.5	11.7	16.0	67.4	179.1	100.2	111.6	113.2	152.6	66.4	1.4	820.1
1993	LLUVIA	MM	11.0	0.0	25.5	133.5	188.1	305.6	205.8	194.3	173.0	128.8	0.0	0.0	1365.6
1994	LLUVIA	MM	3.0	0.0	0.0	42.4	86.7	106.0	64.3	124.4	136.1	131.7	25.9	19.0	739.5
1995	LLUVIA	MM	0.0	0.0	23.3	43.5	120.6	309.6	134.2	209.1	204.9	181.7	2.5	38.6	1268.0
1996	LLUVIA	MM	1.9	0.0	0.0	155.6	163.1	237.3	197.4	211.2	212.0	102.8	11.5	-----	1292.8
1997	LLUVIA	MM	5.7	7.9	3.5	16.0	79.9	266.1	25.3	41.4	278.1	218.6	94.1	13.2	1036.2
1998	LLUVIA	MM	0.0	0.0	7.0	0.0	75.3	152.5	217.8	97.9	283.6	196.6	333.3	0.8	1364.8
1999	LLUVIA	MM	6.7	0.0	0.8	10.1	130.4	305.6	152.0	191.1	344.5	160.0	14.7	0.0	1315.9
2000	LLUVIA	MM	6.7	0.0	0.8	10.1	***	***	***	***	***	***	***	***	17.6
2005	LLUVIA	MM	0.0	0.0	11.4	41.0	150.8	397.8	183.2	146.7	178.7	346.8	15.9	2.7	1475.0
2006	LLUVIA	MM		3.0	2.0	32.3	150.4	281.0	198.9	113.9	156.4	126.0	28.0	15.4	1107.3
2007	LLUVIA	MM	0.0	0.0	1.2	92.8	57.4	195.2	106.6	189.7	162.0	202.4	14.0	0.5	1021.8
2008	LLUVIA	MM	0.0	15.8	2.5	21.4	128.4	6.0	297.6	241.6	331.2	168.5	20.5	0.0	1217.7
2009	LLUVIA	MM	0.0	0.0	0.0	64.2	156.4	322.0	153.6	70.5	131.7	111.7	91.9	***	1102.0
2010	LLUVIA	MM	4.2	29.7	36.7	107.3	625.9	375.1	285.6	382.5	522.2	64.7	19.0	0.0	2452.9
2011	LLUVIA	MM	0.0	10.6	13.0	64.8	88.5	243.9	342.7	211.6	49.4	284.5	0.5	1.6	1311.1
2012	LLUVIA	MM	0.0	7.5	1.7	38.6	253.6	290.6	49.4	213.0	144.0	122.3	11.7	0.0	1132.4
2013	LLUVIA	MM	1.3	0.0	7.6	10.2	156.1	210.5	177.2	189.7	144.0	122.3	11.7	0.0	1030.6
2014	LLUVIA	MM	0	1.6		1.8	194.7	485.6	0.92	78.6	302	198.3	19.3	0	116.6
2015	LLUVIA	MM	0	13.2		14.4	70.9	249.6		49.2					67

Tabla LVII. Días de lluvia en la estación meteorológica El Capitán

ANO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	LLUVIA	DIAS	0	4	7	12	12	21	16	14	22	14		4	122
1991	LLUVIA	DIAS	1	0	1	4	20	20	10	9	16	14	2	1	97
1992	LLUVIA	DIAS	0	1	4	7	15	24	14	15	16	9	7	1	112
1993	LLUVIA	DIAS	1	0	5	8	17	17	14	21	21	15	0	0	118
1994	LLUVIA	DIAS	1	0	0	4	10	18	6	20	13	14	4	2	91
1995	LLUVIA	DIAS	0	0	3	14	14	22	20	28	28	19	1	7	156
1996	LLUVIA	DIAS	1	0	0	13	19	23	18	18	15	14	6		126
1997	LLUVIA	DIAS		2	3	6	7	24	5	8	20	17	7	3	100
1998	LLUVIA	DIAS	0	0	1	0	6	12	19	20	24	23	7	1	113
1999	LLUVIA	DIAS	1	0	1	6	14	24	12	18	28	18	5	0	126
2000	LLUVIA	DIAS	0	0	1						0			1	
2001	LLUVIA	DIAS												0	
2002	LLUVIA	DIAS												0	
2003	LLUVIA	DIAS									19	5			24
2004	LLUVIA	DIAS				4	18	15	13	9	21	13	4	0	97
2005	LLUVIA	DIAS	0	0	7	5	21	27	22	23	20	13	4	1	143
2006	LLUVIA	DIAS	3	1	2	7	17	24	17	12	18	18	5	2	122
2007	LLUVIA	DIAS	0	0	1	12	12	19	15	19	23	16	1	1	119
2008	LLUVIA	DIAS	0	4	3	6	13	22	24	23	22	19	1	0	133
2009	LLUVIA	DIAS	0	0	0	4	23	26	12	15	15	14	7	3	119
2010	LLUVIA	DIAS	1	4	4	12	19	21	25	28	25	9	2	0	145
2011	LLUVIA	DIAS	0	2	2	8	12	21	21	19	20	19	1	1	124
2012	LLUVIA	DIAS	0	2	2	9	20	21	8	22	18	13	2	0	115
2013	LLUVIA	DIAS	2	0	5	3	19	19	14	16	18	13	2	0	
2014	LLUVIA	DIAS	0	0	2	8	21	27	10	14	25	17	3	0	
2015	LLUVIA	DIAS													

Tabla LVIII. Nubosidad en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	NUBOSI	OCTAS	2	4	3	5	6	6	5	5	6	5	4	3	5
1991	NUBOSI	OCTAS	3	2	3	5	6	6	5	5	5	4	3	3	5
1992	NUBOSI	OCTAS	2	3	3	4	6	6	5	5	6	5	5	3	5
1993	NUBOSI	OCTAS	2	2	4	5	5	6	5	6	6	5	3	2	5
1994	NUBOSI	OCTAS	2	3	3	4	4	5	4	5	5	4	4	3	4
1995	NUBOSI	OCTAS	2	2	3	5	5	6	5	6	6	6	3	4	5
1996	NUBOSI	OCTAS	3	3	4	6	6	6	6	5	5	5	4	-----	5
1997	NUBOSI	OCTAS	3	4	4	5	5	6	4	5	6	5	5	3	5
1998	NUBOSI	OCTAS	2	3	4	4	4	5	5	5	6	5	4	2	4
1999	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	4	4	5	6	5	6	5	4	2	4
2005	NUBOSI	OCTAS	1	1	4	5	3	5	5	7	6	5	4	3	5
2006	NUBOSI	OCTAS		3	3	4	6	6	5	5	5	6	4	3	5
2007	NUBOSI	OCTAS	2	3	3	5	5	5	5	6	6	6	3	2	5
2008	NUBOSI	OCTAS	2	4	4	5	5	6	6	5	NO	6	3	3	5
2009	NUBOSI	OCTAS	3	2	3	3	6	6	4	5	5	5	3	****	4
2010	NUBOSI	OCTAS	3	4	3	5	5	6	6	28	7	4	4	2	7
2011	NUBOSI	OCTAS	3	3	4	4	5	6	6	5	6	6	3	2	5
2012	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	4	6	6	4	6	5	5	2	2	4
2013	NUBOSI	OCTAS	3	3	3	5	5	6	5	5	7	7	3	3	3
2014	NUBOSI	OCTAS	3	3		4	5	7	4	5	6	8	3	2	3
2015	NUBOSI	OCTAS	3	2		4	5	5		4					5

Tabla LX. Velocidad del viento en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	VVIENT	KM/HRA	2.2	2.5	11.0	10.1	13.2	10.3	12.0	11.6	8.4	8.1	11.5	10.6	10.7
1991	VVIENT	KM/HRA	9.4	3.3	8.8	8.6	7.7	7.0	6.4	6.4	4.6	3.3	7.2	5.9	6.6
1992	VVIENT	KM/HRA	6.6	5.2	5.6	5.8	3.2	3.5	4.0	6.7	6.3	4.8	6.0	9.2	5.5
1993	VVIENT	KM/HRA	5.2	7.8	7.1	6.6	6.2	3.4	8.2	8.9	8.5	8.2	7.3	8.2	7.3
1994	VVIENT	KM/HRA	9.1	7.7	8.2	8.5	6.5	5.4	7.9	6.3	5.7	5.8	7.2	7.5	6.9
1995	VVIENT	KM/HRA	8.6	7.8	7.0	6.2	7.2	6.2	7.0	4.4	13.4	5.0	7.1	7.4	7.1
1996	VVIENT	KM/HRA	8.0	8.0	18.6	6.4	5.6	7.1	5.2	5.1	6.0	5.3	13.0	-----	8.0
1997	VVIENT	KM/HRA	8.0	11.1	9.5	8.6	8.9	6.8	8.2	8.1	7.1	7.4	7.6	7.8	8.0
1998	VVIENT	KM/HRA	7.2	7.7	9.1	7.6	7.3	7.6	7.5	7.5	5.5	6.9	7.5	6.8	7.3
1999	VVIENT	KM/HRA	8.8	10.2	8.3	8.5	7.8	7.2	8.0	8.2	6.7	7.1	10.7	9.4	8.2
2005	VVIENT	KM/HRA	8.1	9.8	8.1	8.2	7.7	8.8	8.5	6.9	6.2	7.3	8.6	8.3	7.9
2006	VVIENT	KM/HRA		9.7	9.0	8.5	7.3	6.5	6.4	7.2	7.2	7.2	8.7	9.7	7.8
2007	VVIENT	KM/HRA	9.2	8.3	9.8	7.7	7.4	6.1	6.7	6.0	5.4	5.5	7.0	6.4	6.8
2008	VVIENT	KM/HRA	10.1	6.1	6.9	7.0	5.6	5.8	6.4	4.6	5.4	6.9	9.7	7.5	6.6
2009	VVIENT	KM/HRA	7.0	10.6	9.0	7.4	5.1	5.1	5.5	5.0	6.8	6.1	5.1		6.1
2010	VVIENT	KM/HRA	5.6	6.8	6.5	6.3	5.1	4.8	4.5	4.6	4.9	5.3	6.2	6.6	5.5
2011	VVIENT	KM/HRA	6.5	7.1	6.6	6.3	6.6	4.8	4.6	4.7	5.0	4.4	5.2	6.4	5.5
2012	VVIENT	KM/HRA	6.1	4.9	6.5	4.9	3.7	3.5	4.0	5.4	3.7	3.7	4.1	4.3	4.4
2013	VVIENT	KM/HRA	5.0	4.4	7.0	3.7	3.9	3.4	4.4	3.6	3.7	3.7	4.1	4.3	4.3
2014	VVIENT	KM/HRA	4.2	2.9		3.7	3.1	3.1	3.3	3.3	2.8	2.6	3.2	5.8	8.1
2015	VVIENT	KM/HRA	4.5	4.0		2.8	2.9	2.6		3.1					

Tabla LX. Dirección del viento en la estación meteorológica El Capitán

AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1991	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1992	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1993	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1994	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1995	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1996	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1997	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1998	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
1999	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2000	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2005	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2006	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2007	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2008	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2009	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	N	S	S	S	S	****	S
2010	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2011	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	SE	S	S	S	S	S	S	VAR	S
2012	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	SE	S	S	S	S	S
2013	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2014	DIRVIEN	GRAD	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
2015	DIRVIEN	GRAD	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

