

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE**



**DETERMINACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL RÍO  
ZAHUAPAN, TLAXCALA**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE**

PRESENTA:  
ELIA SEDEÑO TORRES

BAJO LA DIRECCIÓN DE:  
DR. HIPÓLITO MUÑOZ NAVA  
DRA. MADAÍ ANGÉLICA GÓMEZ CAMARILLO

TUTORES:  
DRA. MARICELA HERNÁNDEZ VÁZQUEZ  
DR. SATURNINO OROZCO FLORES.  
DR. GRÉGORY MICHAËL CHARRE MEUNIER



San Felipe Ixtacuixtla, Tlax., Octubre 2015

## **AGRADECIMIENTOS**

- ❖ A Dios por darme fortaleza física y espiritual,
- ❖ A mi director de tesis Dr. Hipólito Muñoz Nava por su constancia y empeño para llevar a cabo éste trabajo,
- ❖ A todos los académicos e investigadores que forman parte del CIGyA y de la MCSA por su enseñanza y paciencia,
- ❖ A mi comité tutorial por sus importantes aportaciones al trabajo,
- ❖ Al Dr. Fernando Hernández Aldana por compartirme sus conocimientos durante mi estancia en la BUAP.

## **DEDICATORIA**

- ❖ A mis padres por su apoyo económico y su confianza,
- ❖ A mis hermanas y mi sobrina por su gran afecto,
- ❖ A todos mis amigos por sus ánimos y consejos,
- ❖ A mi compañero por estar conmigo en todo momento,
- ❖ A los que tuvieron que dejar este mundo durante ésta etapa de mi vida: a mi abuelita, mi madrina y mis amigos de la preparatoria.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	1
ÍNDICE DE TABLAS .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. ANTECEDENTES .....	11
2.1. Cuenca, subcuenca y microcuenca.....	11
2.2. Río Zahuapan.....	11
2.3. Clasificación de Sólidos.....	13
2.4. Antecedentes Internacionales .....	14
2.5. Antecedentes Nacionales.....	17
2.6. Antecedentes Estatales .....	18
2.7. Normatividad .....	19
3. JUSTIFICACIÓN.....	23
4. OBJETIVO GENERAL.....	24
5. HIPÓTESIS .....	24
6. METODOLOGÍA .....	25
6.1. Área de estudio.....	25
6.2. Delimitación de Microcuencas.....	25
6.3. Fuentes de Información de Concentración de Sólidos.....	26
6.4. Agrupación de puntos de muestreo.....	26
6.5. Selección de tipos de sólidos.....	27
6.6. Análisis estadístico de datos.....	27
6.7. Estimación de las áreas de cubierta vegetal por microcuenca .....	28
6.8. Relación de la población con la concentración de sólidos por microcuenca .....	28
7. RESULTADOS.....	30
7.1. Concentración promedio y desviación estándar de sólidos en las microcuencas ...	30
7.2. Concentración de sólidos de los años 2006, 2007, 2012 y 2013 .....	32
7.3. Prueba de distribución de los datos.....	36

7.4. Concentración de sólidos en épocas de lluvia y de sequía .....	39
7.5. Diferencias de concentración de sólidos entre factores: microcuencas y Año-Época .....	43
7.6. Relación de la concentración de sólidos y la cubierta vegetal .....	45
7.7. Relación de la concentración de sólidos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) para 2012 y 2013 con la densidad de población ( $\text{hab}\cdot\text{km}^2$ ) calculada con el censo de 2010.....	48
8. DISCUSIÓN.....	51
8.1. Concentración promedio y desviación estándar de los sólidos en las microcuencas .....	51
8.2. Concentración de sólidos para 2006, 2007, 2012 y 2013.....	52
8.3. Distribución de la concentración de sólidos .....	53
8.4. Concentración de sólidos en épocas de lluvia y de sequía .....	53
8.5. Diferencias de concentración de sólidos entre factores: microcuencas y Año-Época .....	54
8.6 Relación lineal de la concentración de sólidos y la cubierta vegetal.....	55
8.7. Relación de la concentración de sólidos para 2012 y 2013 con la densidad de población calculada con el censo de 2010.....	56
9. CONCLUSIONES .....	58
10. LITERATURA CITADA .....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de sólidos.....	13
Tabla 2. Años y puntos de muestreo por microcuenca.....	26
Tabla 3. Promedio y Desviación Estándar (D.E.) de los años 2006, 2007, 2012 y 2013, de la concentración de sólidos por microcuenca.....	32
Tabla 4. Análisis de varianza de la concentración de sólidos considerando las microcuencas y la época del año, en el Río Zahuapan.....	44
Tabla 5. Porcentaje de la superficie de las microcuencas en el Río Zahuapan clasificada como área agrícola y de bosque.....	47
Tabla 6. Valores del coeficiente de correlación (R) de las áreas agrícola y de bosque versus concentración sólidos a escala de microcuenca.....	47
Tabla 7. Densidad de población (hab·km <sup>2</sup> ) de las microcuencas y concentración de sólidos (mg·L <sup>-1</sup> ).....	49
Tabla 8. Valores del coeficiente de correlación (R) de la densidad de población versus concentración sólidos a escala de microcuenca.....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Concentración de sólidos 2006-2007 y 2012-2013 (microcuencas A-D) en el Río Zahuapan.....	34
Figura 1. (continuación) Concentración de sólidos 2006-2007 y 2012-2013 (microcuencas E-J) en el Río Zahuapan.....	35
Figura 1. (continuación) Concentración de sólidos 2006-2007 y 2012-2013 (microcuencas K-M) en el Río Zahuapan.....	36
Figura 2. Gráficas de ajuste de la concentración de sólidos con distribución normal (línea punteada) y con transformación logarítmica (línea continua), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.....	37
Figura 2. (continuación). Gráficas de ajuste de la concentración de sólidos con distribución normal (línea punteada) y con transformación logarítmica (línea continua), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.....	38
Figura 3. Concentración de sólidos en época de lluvia y de sequía (microcuencas A-F), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.....	40
Figura 3. (continuación). Concentración de sólidos en época de lluvia y de sequía (microcuencas G-L), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.....	41
Figura 3. (continuación). Concentración de sólidos en época de lluvia y de sequía (microcuenca M), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.....	42
Figura 4. Correlación de áreas agrícola y de bosque contra Sólidos Disueltos Totales de 2012.....	47
Figura 5. Correlación de densidad de población contra Sólidos Totales (a), Sólidos Disueltos Totales (b) y Sólidos Fijos Totales (c) de 2012 de la subcuenca del Río Zahuapan.....	50

## RESUMEN

La subcuenca del Río Zahuapan se ha visto alterada por agentes contaminantes en los últimos años. Los parámetros de calidad del agua son los que pueden ayudar a determinar el nivel de daño en el agua de los ríos, uno de ellos es la concentración de sólidos. Para este trabajo se consideraron cinco tipos de sólidos: sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos fijos totales (SFT) y sólidos volátiles totales (SVT). Por lo tanto, se recopilaron los datos de cinco tipos de sólidos que comprendieron los años 2006-2007 y 2012-2013, medidos en 40 puntos de muestreo, situados en 13 microcuencas del río. La concentración de sólidos totales, suspendidos, disueltos, fijos y volátiles fue agrupada con base en el criterio de época de lluvia y sequía, de acuerdo a los datos de precipitación pluvial de la Red Nacional de Monitoreo se obtuvieron a partir de las series I a la V de uso de suelo y vegetación publicadas por el INEGI los porcentajes de área agrícola y bosque de las 13 microcuencas, donde a lo largo de la ruta del Río Zahuapan se encontraron que los promedios de la concentración mostraron una tendencia creciente, desde su nacimiento (microcuenca **A**) hasta su confluencia con el río Atoyac (microcuenca **M**). Además tuvieron un comportamiento distinto entre épocas, donde los sólidos suspendidos y fijos que son de origen mineral, tienen una tendencia decreciente en época de sequía y mayor concentración en época de lluvia, lo que indica el deslave del suelo provocado por la erosión. El resultado de la evaluación del cambio de uso de suelo en las microcuencas, mostró que de 1971 al 2013 aumentó el área agrícola y disminuyó considerablemente el área de bosque, mostró un cambio drástico en el uso del suelo. Únicamente se obtuvo que la concentración de SDT en los años 2012 y 2013 fue significativamente relacionada con la vegetación y la densidad de población cercana de la subcuenca del Río Zahuapan ( $F_{\text{tab}} < 0.05$ ).

## ABSTRACT

The sub-basin of the Zahuapan River has been disrupted by pollutants in the last years. The parameters of water quality are those that can help determine the level of damage in the river water, one of them is the concentration of solids. For this work five types of solids were considered: total solids (TS), total dissolved solids (TDS), total suspended solids (TSS), total fixed solids (SFT) and total volatile solids (SVT). Therefore the data of five types of solids encompassing the years 2006-2007 and 2012-2013, were measured in 40 sampling points located on 13 microbasins of the river. The concentration of total, suspended, dissolved, fixed and volatil solids was grouped based on the criterion of rainy and dry seasons, according to the rainfall data of the National Monitoring Network. The percentage of agricultural area and forest of the 13 microbasin were obtained from the land use and vegetation Series I to V published by INEGI, where average concentrations showed an increasing trend along the route of the Zahuapan River, from the source (microbasin **A**) to its confluence with the Atoyac river (microbasin **M**). Furthermore they presented a different behavior between seasons, where suspended solids and fixed of mineral origin, showed low concentrations in the dry season and higher concentrations in the rainy season, indicating the soil runoff caused by erosion. The result of the evaluation of the change land use in the microbasin showed a drastic change from 1971 to 2013 the agricultural area increased considerably and forest surface decreased. Only it was found that the concentration of TDS in 2012 and 2013 was significantly related to vegetation and population density near the sub-basin of the Zahuapan River ( $F_{\text{tab}} < 0.05$ ).

## **1. INTRODUCCIÓN**

Para el estudio del origen y concentración de sólidos en el Río Zahuapan se realizó un análisis estadístico, en el que se incluyen diferentes tipos de sólidos y algunas variables ambientales, los asentamientos humanos y la cubierta vegetal, influyeron en su concentración y permitieron identificar su origen. Las características de los sólidos son disolución, suspensión (partículas más grandes) y dispersión de la luz ocasionada por las partículas coloidales (de 0.001 a 1µm de diámetro aproximadamente).

El papel principal del agua en los ecosistemas desde la atmósfera hasta que llega al suelo, es como un disolvente universal, el agua al penetrar en la atmósfera es prácticamente pura, inmediatamente a su ingreso se produce una interacción con las moléculas presentes en las capas atmosféricas, lo que da lugar a la modificación de su composición química. Una vez que el agua llega a la litósfera y penetra en el suelo, se produce una serie de reacciones con elementos y/o moléculas de la corteza terrestre, y esto lleva a la formación de partículas de diferente estructura y tamaño. Estas partículas pueden estar suspendidas o disueltas en el agua, lo que le confiere características de color, olor y sabor particulares, dependiendo del tipo de partículas que se formen. Muchos compuestos orgánicos interactúan con el material suspendido en el agua, formando coloides, estos compuestos pueden jugar un papel significativo en el transporte de contaminantes orgánicos en las aguas superficiales y afectar su movilidad. Más aún, estos últimos sufren degradación química y/o biodegradación a diferente velocidad y por distintas vías en comparación con la materia orgánica simplemente disuelta en el agua. Por otra parte, las arcillas que son componentes inorgánicos predominantes de la mayoría de los suelos e importantes en la retención de agua, tienen especial relevancia, ya que proceden de la meteorización de minerales primarios y son muy abundantes en los suelos (Spiro y Stigliani, 2004), que por efecto de la erosión ocasionada por las lluvias son arrastradas a los ríos, contribuyendo a su contaminación. El movimiento físico de estas moléculas en un río ocurre debido al movimiento gravitatorio de las masas de agua corriente abajo, lo que da como resultado una mezcla y dilución

relativamente rápida, esto permite que un contaminante introducido en el río en un vertido puntual, se disperse a través de su cauce.

A lo largo del Río Zahuapan se pueden observar inclinaciones de la pendiente, lo que representa una influencia negativa desde el punto de vista de la erosión, los escurrimientos consecuentes de las pendientes, no sólo disminuyen la eficacia de la precipitación pluvial en cuanto al abastecimiento de agua para el suelo, sino también acarrear solutos de éste. La erosión acelerada puede ocasionar la pérdida de toneladas de suelo rico en humus localizado en la superficie (Daubenmire, 1982), algunos de los materiales así transportados son: sales disueltas, partículas finas en suspensión, restos de plantas, animales, arena y rocas de distintos tamaños. Estos elementos una vez arrastrados a lo largo del recorrido del río llegan a su desembocadura, donde pueden generar concentraciones altas de sólidos (Gutiérrez, 1989). En algunos puntos de la subcuenca del Río Zahuapan la capacidad de autodepuración se ve disminuida por el azolve derivado del arrastre de materiales ocasionado por las precipitaciones pluviales en la zona de la Malintzi (Plan Municipal de Desarrollo, Tlaxcala 2011-2013).

La concentración de sólidos en el agua de los ríos se ve influida también por la vegetación, que impide que parte de la precipitación pluvial llegue al suelo, la fracción retenida en las superficies vegetales es devuelta a la atmósfera por evaporación (Martínez, 2006). Sin embargo, en las últimas décadas esta vegetación ha sido severamente perturbada por la tala y el uso inadecuado del suelo, lo que dio como resultado pérdida de cubierta vegetal, lo que favorece la erosión de parte de los suelos arrastrados por lluvias hacia el cauce de los ríos.

En el estado de Tlaxcala la vegetación es propia de los climas fríos o templados, con especies adaptadas para resistir bajas temperaturas y se distinguen varios tipos de vegetación en función de su posición altitudinal. El INEGI (2009), hizo una descripción de las comunidades vegetales de las diferentes regiones y como van sustituyéndose y/o modificándose con el tiempo, denominadas "Series". Cada serie se divide en estadios que diferencian la duración de las etapas florística y

fisonómica de la vegetación, así como las fases correspondientes a variaciones menores que tienen lugar dentro de cada estadio. La descripción formal de las diferentes series de vegetación, tiene una precisión y capacidad predictiva que permite estimar las posibilidades de hábitat, expresado como la diversidad en la sucesión de las especies vegetales de un territorio, de tal manera que la cartografía de ellas significa la definición y delimitación espacial de territorios homogéneos.

Los factores antes señalados, además de los vertidos de las aguas residuales precedentes de las comunidades y las actividades antropogénicas, contribuyen a la formación de los diferentes tipos de sólidos que contaminan los ríos. Por ello el análisis de las bases de datos que reportan la concentración de los tipos de sólidos en el Río Zahuapan, brindan los elementos que orientan sobre su origen, su comportamiento en temporada de lluvia y sequía, el efecto de la cubierta vegetal y el impacto de los asentamientos humanos y las actividades productivas.

## **2. ANTECEDENTES**

Los ríos se definen como una corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca en otras corrientes, a un embalse natural o artificial, o al mar, las características más importantes de un río son su caudal y la trayectoria que sigue hasta llegar a su desembocadura (SEMARNAT, 2003a). Parte del agua de lluvia y del deshielo de las montañas se filtra hasta las capas interiores de la corteza terrestre creando corrientes subterráneas, éstas dan lugar a la formación de manantiales que a su vez, se convierten en arroyos, que al unirse con las aguas de otros arroyos forman ríos, la superficie o subsuelo por donde transcurre el agua de estos ríos se conoce como cuenca hidrológica.

### **2.1. Cuenca, subcuenca y microcuenca**

La cuenca hidrológica es una unidad natural y sus límites quedan establecidos por una división conocida como “parteaguas”, que es una línea imaginaria que une los puntos de máxima altura entre dos laderas adyacentes, de exposición opuesta, que van desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión (Ley de Aguas Nacionales, 2013). Las cuencas tienen límites bien definidos y salidas puntuales que están estructuradas jerárquicamente y que pueden subdividirse en subcuencas, delimitadas también por parteaguas y donde se concentran los escurrimientos que desembocan en el curso principal del río (SEMARNAT, 2013). Asimismo, cada subcuenca puede subdividirse en microcuencas, que corresponde a un territorio delimitado por un parteaguas, cuyas aguas superficiales drenan a través de un mismo curso de agua (López, 2008).

### **2.2. Río Zahuapan**

El Río Zahuapan ubicado en el Estado de Tlaxcala, forma parte de la cuenca del río Balsas. El cauce del río transcurre a través de 98 km (Muñoz, 2012) desde su nacimiento a 3,350 msnm, en la sierra de Tlaxco, cerca del paraje “El Pardo” (19° 40' 00" de latitud Norte y 98° 03' 00" de longitud Oeste), hasta donde se une con el río Atoyac a 2,079 msnm al sur del estado, cerca del pueblo de Santo Toribio en Xicohtzingo con Latitud Norte 19°08'17.23" y longitud Oeste 98°13'28.09" (INEGI, 2014). En su entorno se asientan 584 localidades (rurales y urbanas) pertenecientes a 42 municipios (PMD, 2011-2013), cuyas actividades

socioeconómicas, además de la agricultura y ganadería, incluyen alfarería, comercio, turismo y la industria, dentro de las cuales destacan los corredores industriales Apizaco-Xalostoc-Huamantla (con 14 unidades industriales), ciudad industrial Xicohténcatl (con 16 unidades industriales) y la industria aérea de Atlangatepec, que albergan entre otros al sector automotriz, de plásticos, textil y de confección, electrónico, autopartes, químico y metal-mecánico (INEGI, 1999). Estas actividades antropogénicas, generan compuestos xenobióticos que contaminan aire, suelo y agua; algunas veces más de una de estas matrices ambientales son afectadas al mismo tiempo, por el mismo contaminante. La contaminación del agua, recurso indispensable para la vida, derivada de la diversidad de agentes vertidos a los cuerpos de agua superficiales, a través de las descargas de aguas residuales urbanas e industriales y aguas de arrastre de las zonas agrícolas y ganaderas, compromete la salud y vida, no sólo del hombre sino de todo el ecosistema. Por otra parte, la contaminación del agua no sólo proviene de las actividades humanas, también ocurre contaminación por causas naturales como: eventos meteorológicos, erupciones o deslaves originados por las lluvias.

Muchos minerales, algunos contaminantes orgánicos y materiales proteínicos, son vertidos a los ríos, y quedan suspendidos en el agua en forma de partículas muy pequeñas. Los desechos domésticos aumentan el contenido de materia mineral y orgánica de las aguas naturales. En general, un solo uso municipal del agua contribuye con  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de los minerales disueltos en el agua y la contribución de estas sales disueltas por el uso municipal han tenido una influencia importante para la recirculación del agua de desecho (Snoeyink y Jenkins, 1999).

Así, las aguas residuales que son vertidas a los ríos contienen una gran variedad de contaminantes de diferente origen y composición molecular, la asociación de estos contaminantes promueve la formación de partículas complejas, los sólidos, a los que se adhieren moléculas como metales pesados (Cr, Cd, Pb, Zn) compuestos orgánicos volátiles (agroquímicos), compuestos orgánicos persistentes (plaguicidas), microorganismos (coliformes fecales), entre otros.

### 2.3. Clasificación de Sólidos

Los sólidos se pueden clasificar por su tamaño en: sólidos suspendidos (SS), aquellos que no pasan a través de un papel filtro con poro de  $2\mu$  y sólidos disueltos (SD), aquellos que pueden pasar por el papel filtro (poro de  $2\mu$ ). Por su naturaleza se clasifican en sólidos volátiles (SV), que generalmente están constituidos por compuestos orgánicos y sólidos fijos (SF), que son de origen mineral (Soledad, 2009).

Es importante señalar que, en el agua, los diferentes tipos de sólidos se van a encontrar asociados, de esta manera, la combinación de sólidos suspendidos fijos (SSF) y sólidos disueltos fijos (SDF) dan lugar a los sólidos totales fijos (STF), por ejemplo, los limos del suelo. Mientras que de la combinación de los sólidos disueltos volátiles (SDV) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) se obtienen los sólidos totales volátiles (STV), como la materia orgánica contenida en las aguas residuales y en conjunto todos ellos dan lugar a los Sólidos Totales (ST) (Tabla 1).

**Tabla 1:** Tipos de sólidos.

<b>Sólidos totales (ST)</b> Son las sales inorgánicas, materia orgánica y materiales disueltos en el agua	<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b> Constituidos por sólidos sedimentables y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.	<b>Sólidos suspendidos volátiles (SSV)</b> Fracción de sólidos suspendidos que se volatilizan a $600^{\circ}\text{C}$ .
		<b>Sólidos suspendidos fijos (SSF)</b> Residuos sólidos remanentes después del proceso de calcinación.
	<b>Sólidos disueltos totales (SDT)</b> Substancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua y que no son retenidas en el material filtrante.	<b>Sólidos disueltos fijos</b> Residuo remanente después del proceso de calcinación
		<b>Sólidos disueltos volátiles</b> Substancias que se volatilizan a $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$ .

**Fuente:** Metcalf and Eddy, 2003.

Otro factor que influye en la concentración de sólidos en el río es la vegetación, debido a que modifica el flujo de la precipitación pluvial hacia el suelo, parte del agua de lluvia retenida en las superficies vegetales no llega al suelo y es devuelta a la atmósfera mediante la evaporación (Martínez, 2006). En Tlaxcala, la cobertura vegetal es propia de los climas fríos o templados, con vegetación del tipo chaparral y pastizal, así como especies de árboles capaces de resistir bajas

temperaturas (12 a 16°C), como el oyamel (*Abies*), encino (*Quercus*), pino (*Pinus*) y sabino (*Taxodium mucronatum*) (INEGI, 2010a). Asimismo, la agricultura juega un papel importante en la concentración de sólidos en el río, debido a que el desmonte que se realiza para tener mayor superficie de campos de cultivo, ocasiona pérdida de la cobertura vegetal y suelo. En la subcuenca del río Zahuapan, la superficie de siembra es de 69,101 ha y los principales cultivos son maíz, cebada, trigo, frijol, avena, haba, chícharo, maguey, alfalfa; de acuerdo a datos reportados por el INEGI (2010a).

#### **2.4. Antecedentes Internacionales**

Dado que la contaminación de los ríos ha llegado a ser un problema de salud pública, numerosos grupos de investigadores se han abocado a estudiar el origen e impacto de esta contaminación, ya sea por causas naturales o antrópicas, Osorio *et al.* (2003) señalan que la concentración de los sólidos disueltos en la cuenca alta del río Medellín (España) permaneció prácticamente uniforme durante el período de muestreo, lo que parece indicar que esta cuenca está autoequilibrada, es decir, no se observaron cambios significativos en la concentración de los sólidos, relacionados con las variaciones en el caudal.

Por su parte, Rodríguez, *et al.* (2007), reportaron que en el río Mero (España) en un día en que la precipitación pluvial alcanzó 3.8 mm, la concentración de sólidos suspendidos inicialmente fue de 34 mg·L<sup>-1</sup> y la máxima de 42 mg·L<sup>-1</sup>, mientras que cuando la precipitación pluvial fue de 51 mm, la concentración inicial de SS fue de 14 mg·L<sup>-1</sup> y la máxima de 474 mg·L<sup>-1</sup>. Los resultados anteriores revelaron que existe una elevada variación entre la concentración de sólidos suspendidos registrados en los distintos eventos y que la concentración más elevada de sólidos suspendidos no sólo depende de la cantidad y duración de las precipitaciones, sino también de las condiciones de humedad.

En la Cuenca de Tárcoles en Costa Rica, Espinoza y Villalta (2004) reportaron en la subcuenca alta y media concentraciones máximas de 50 mg·L<sup>-1</sup> de SST, por debajo de la norma de calidad de agua de acuerdo a la legislación ambiental de Costa Rica, que establece un límite máximo permisible de 100 mg·L<sup>-1</sup>, sin

embargo en la parte baja de la cuenca se encontró una concentración de  $350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  lo que representa una situación crítica debido a la expansión urbana y agrícola.

Woitke *et al.* (2003), determinaron sólidos en suspensión y sedimentos, en el embalse Irongate donde comienza el río Danubio (Reino Unido). Observaron un nivel constante de altas concentraciones en algunos afluentes del Danubio. Sin embargo, la contaminación de este río fue considerada como baja, aunque en el tramo inferior del Irongate hubo acumulación de Cadmio.

Fuchs *et al.* en 1997, además de sedimentos, sólidos en suspensión y biopelícula en diferentes puntos del río Alb cerca de Karlsruhe (Alemania), analizaron el contenido de metales pesados (Pb, Cu, Cd) con el método de biofilm, comparando la contaminación medida con los resultados de los programas de seguimiento a largo plazo. Los resultados mostraron aumento de la concentración de metales pesados en áreas altamente urbanizadas, asimismo, se detectó contaminación por metales pesados en los sedimentos y biopelículas.

Pasquini *et al.* (2004) determinaron en el río Los Reartes en Argentina, la influencia de la distribución irregular de las precipitaciones pluviales anuales y observaron un proceso de dilución en el periodo lluvioso, mientras que en el período seco, la dilución estival sólo afectó algunos elementos (Cr y Li). La concentración de SDT, varió entre  $31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $114 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , la menor concentración se observó en los afluentes, que fue en aumento hacia la cuenca baja.

Los ríos reflejan las actividades que se desarrollan en el área de drenaje y responden de diversas formas según el periodo estacional (invierno-verano). Como reportaron Mancilla *et al.* (2009), en los ríos Carampangue, Lebú y Paicaví en Chile, los sólidos disueltos totales tuvieron una concentración de  $195,4 \pm 588,9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (8 mín-2065 máx) en verano y de  $9,08 \pm 5,52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  en invierno, esto refleja una contaminación natural asociada al arrastre causado por un aumento de caudal debido a mayores precipitaciones en invierno. Los cambios hidrológicos y perturbaciones físicas (alteración de hábitat, uso del suelo de la cuenca de

drenaje) y contaminación puntual o difusa de tipo química, son procesos que deterioran esta cuenca.

Un trabajo realizado por GAIA (Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental) y GIGA (Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental) en 2002 reportó que en el río San Juan en Colombia, la concentración de sólidos totales promedio fue de  $176 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , de los cuales  $103 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  correspondían a sólidos suspendidos después de un evento de lluvia. A lo largo de la corriente se observó un rango entre  $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de ST. El contenido total de sólidos correspondió a procesos de erosión en las cuencas, esta actividad genera un importante aporte de sólidos suspendidos a la corriente, que se movilizan significativamente durante eventos de lluvia y creciente.

Rivera *et al.* (2004) describieron que en los ríos Cautín e Imperial en Chile la calidad de las aguas es relevante porque es empleada para diversas actividades, como: fuera del curso del río (uso doméstico, agrícola e industrial), en el curso del río (recreación y estética) y como medio para la acuicultura y manejo de vida silvestre en general. En estos ríos los sólidos suspendidos reportaron valores mayores a  $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y menores a  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , lo que corresponden a la concentración relacionada con zonas de premontaña y llanura.

Hart en 2006, señaló que en el río Little (Estados Unidos) el sedimento suspendido en el agua ocurre naturalmente en los ríos como resultado de bancos de erosión, transformando la secuencia de canales y transportando un gran flujo de nutrimentos. El sedimento suspendido pudo ser producto de la erosión en áreas agrícolas y por el desarrollo urbano. Asimismo, en un estudio realizado en Carolina del Norte, se encontró que suelos dedicados a la agricultura produjeron alta concentración de sólidos en los arroyos de las inmediaciones.

Campos *et al.* (2007), comentaron que el proceso de erosión, arrastre, compactación y sedimentación de sólidos suspendidos es un proceso dinámico que afecta al cauce principal de los ríos Lluta y San José en la Provincia de Arica en Chile, en todo el recorrido. La destrucción de la estructura de los suelos y obras

públicas alteran el trayecto de los ríos, el paso del torrente produce el traslado de suelos agrícolas particularmente en aquellas zonas erosionables del río.

## **2.5. Antecedentes Nacionales**

A nivel nacional, Velázquez (2007), documentó que en el Río Turbio de la vertiente “Lerma-Chapala” en Jalisco, los ST atenúan la luz y reducen la transparencia del agua, lo que afecta la transmisión y dispersión de la luz indispensable para la fotosíntesis de las algas acuáticas. Es una zona industrial que registra una mayor concentración de ST, debido a que se acumula la carga, tanto de los sólidos disueltos como los suspendidos, vertidos a los efluentes conectados al río. Así mismo la influencia de la lluvia en el movimiento del agua en el río da lugar a la disolución de los compuestos vertidos, lo que aumenta la concentración de los ST.

Por su parte, Silva *et al.* (2002), realizaron estudios en la región de Atlixco, estado de Puebla, para determinar la concentración de contaminantes en verano y primavera. La alta concentración de ST encontrada fue resultado del vertido de las aguas residuales de este municipio, que excedieron el límite máximo de acuerdo a la NOM-127-SSAI-1994, citada por Silva *et al.* (2002), lo que demostró que la calidad del agua no era la apropiada para su uso en las actividades agrícolas.

En el río Cuautla en el Estado de Morelos, Santiago y Sandoval (2001) realizaron un estudio sobre coleópteros acuáticos (indicador biológico de contaminación) para determinar en qué medida la contaminación de los ríos, representada por los sólidos, pone en riesgo su subsistencia. Este estudio evaluó a 14 especies de tres familias (*dystiscidae*, *gyrinidae* e *hidrophilidae*) de coleópteros, tolerantes a la presencia de sólidos en el agua, que de acuerdo a la normativa de la SARH-1975, citada por Santiago y Sandoval (2001), la concentración no debe exceder el límite máximo aceptable para la protección a la vida acuática de 2000 mg·L<sup>-1</sup> para SDT y 1000 mg·L<sup>-1</sup> para ST. Por otra parte, la EPA en 1972, indicó que la concentración SST no debe ser mayor a 70-85 mg·L<sup>-1</sup>. Los resultados de la evaluación de los distintos puntos de muestreo revelaron la presencia de SDT, con una concentración mínima de 77 mg·L<sup>-1</sup> y máxima de 850 mg·L<sup>-1</sup>, para los ST se observó una concentración que va de 142 mg·L<sup>-1</sup> a 993 mg·L<sup>-1</sup> cuyo valor más alto

no rebasa los límites máximos de SARH-1975, para este tipo de sólidos y en tanto para los SST la concentración encontrada fue de  $142 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $993 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , valores totalmente fuera de la norma. Con estos resultados se pudo advertir como la presencia de los sólidos influye sobre algunos insectos que habitan los ecosistemas de los ríos.

Rubiños *et al.* (2006), reportaron que en el río Tulancingo en el Estado de Hidalgo los SDT fluctuaron de  $927 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $12,970 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , mientras que los sólidos disueltos se cuantificaron de  $65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , con este resultado se reportó una alta contaminación de las aguas del río Tulancingo.

## **2.6. Antecedentes Estatales**

A nivel estatal, de acuerdo con la información recopilada por las investigaciones sobre Río Zahuapan, se sabe que su caudal presenta un alto grado de contaminación, Jiménez y Hernández (2011) reportaron que la concentración de ST al inicio del caudal es baja y conforme avanza su recorrido va aumentando. La concentración promedio de ST en el río va de  $248 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $961.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , el valor más bajo  $248 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , se observó a la salida de la presa de Atlangatepec, que inclusive fue menor que en el nacimiento del río, donde alcanzó un promedio de  $392.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Oswald (2003), reportó que en los afluentes de la cuenca del alto Balsas se vierten descargas provenientes de industrias textiles con altas concentraciones de colorantes, que al incorporarse al Zahuapan, ocasionan daño a la fauna y flora acuática y terrestre.

Los estudios realizados por Muñoz *et al.* (2012), en el Río Zahuapan, de septiembre de 2006 a agosto de 2007, reportaron que la concentración de ST varió de  $2.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $2,152.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; para los STF de  $60.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $1,968.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y para STV de  $8.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a  $1,328.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , estas cifras rebasaron los estándares de calidad del agua en México.

Numerosos estudios relacionan tanto la contaminación natural, como la antrópica con el daño a los ecosistemas. Para el caso de Río Zahuapan, en los últimos años

se han vertido aguas sin tratar, es fundamental conocer el tipo de contaminantes que está recibiendo y para ello la identificación de los sólidos constituye una forma de conocer el origen de dicha contaminación.

Aunque las investigaciones sobre el Río Zahuapan han aportado datos sobre los sólidos que lo contaminan, existe escasa evidencia sobre sus diferentes formas y procedencia, por ello, un estudio específico de sólidos en la corriente del río aportará información relevante de carácter ambiental.

## **2.7. Normatividad**

Un aspecto importante para el desarrollo de este trabajo fue conocer la normatividad que establece el límite permitido de la concentración de sólidos en el agua de los ríos. Dentro de la legislación nacional se integraron *los criterios ecológicos de calidad del agua*, CE-CCA-001/89 (SEMARNAT, 1989), los cuales son definidos en la Ley del agua limpia (EPA, 2013), como la descripción de condiciones aceptables de la calidad del agua, que están expresadas en forma numérica de acuerdo a un criterio de concentración (o magnitud en caso de parámetros). De igual manera, se incluyen *los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales* NOM-001-ECOL-1996 (SEMARNAT, 2003a) y *los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público* NOM-003-ECOL-1997 (SEMARNAT, 2003b).

Con base en los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 (SEMARNAT, 1989) se evalúa la concentración de los SDT en las fuentes de abastecimiento de agua potable, donde los niveles máximos permisibles son de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , para riego agrícola  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , para uso pecuario de  $1,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; respecto a los SST, los niveles máximos permisibles son de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para fuente de abastecimiento de agua potable, para riego agrícola  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y para uso pecuario no hay criterio ecológico.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2003a), *establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en*

*aguas y bienes nacionales* (basada en la APHA, AWWA, WPCF, 1995 y en los Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residuales E.U.), cuyos parámetros para SS en aguas de los ríos empleadas para riego agrícola, indica que el límite máximo permisible para contaminantes básicos es de  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , para el promedio mensual y para el promedio diario es de  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Para uso público urbano el promedio mensual es de  $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y un promedio diario de  $125 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , en la que respecta a la protección de vida acuática, el promedio mensual máximo es de  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y el promedio diario de  $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

La SEMARNAT, publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, *que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público* (SEMARNAT, 2003b) basada en la APHA, AWWA, (Métodos normalizados para el análisis de agua y aguas residuales E.U.). Los límites máximos permisibles para los SST en agua de reúso para servicios al público con contacto directo son de  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y de reúso para servicios al público con contacto indirecto u ocasional de  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Las aguas de reúso para servicio al público con contacto directo incluidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997, se refiere a aquellas empleadas para el llenado de lagos y canales artificiales, recreativos como paseos en lancha, remo, canotaje, esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines. En cuanto al reúso de aguas tratadas en servicios al público con contacto indirecto u ocasional, se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia, la NOM-003-SEMARNAT-1997 considera en este rubro el riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes del sistema contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

En los trabajos realizados en el río Amajac en el Estado de Hidalgo, Álvarez *et al.* (2006), encontraron que según el uso al que se destine el agua y de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, la concentración de SDT observada en los puntos

de muestreo fue de  $7.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $8.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , lo que de acuerdo a los límites máximos de la norma: a) requiere de tratamiento mayor para usarse en el abastecimiento público, como es el caso de presa “La Estanzuela”, en la ciudad de Pachuca, Hidalgo; b) es aceptable, más no recomendable para uso recreativo, como en el caso de la presa el Cedral, cercana a la capital de Hidalgo; c) puede afectar especies sensibles de vida acuática, por ejemplo, en la Presa el Comalillo, en el municipio de Atotonilco el Grande; d) no requiere tratamiento para uso agrícola o industrial y e) su uso con fines de navegación no presenta inconveniente. Esta contaminación probablemente esté relacionada con el agua residual urbana, que es vertida al río sin ningún tratamiento previo.

Olguín *et al.* (2010), reportaron para el río Sordo en Veracruz, que la concentración de SDT refleja la presencia de las sales, ácidos minerales o contaminantes similares presentes en el río y los valores observados oscilaron entre  $110 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $413 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para la temporada de secas y entre  $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $275 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para la de lluvias. En todos los casos, los valores de SDT se encontraron dentro de los límites permisibles establecidos por la norma de la Organización Mundial de la Salud de las Naciones Unidas ( $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), citado por Olguín *et al.* (2010).

Galindo *et al.* (2005) señalaron que la contaminación del río Cazones en Veracruz aumenta cada vez más, aunque aún no sobrepasa los límites máximos permisibles según la normatividad vigente NOM-001-ECOL-1996, sin embargo, los lugares que presentan la mayor concentración de sólidos disueltos totales con  $998 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  están en zonas urbanas, probablemente relacionada con el número de descargas de aguas residuales.

Las normas internacionales propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Unión Europea (UE) en el 2004, citadas por Mella (2006), establecen los límites de contaminantes de agua potable, niveles guía de la OMS para ST establecen que en México la concentración no debe exceder los  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , mientras que para Estados Unidos los estándares indican como límite  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y para la Unión Europea  $1500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Mella, 2006). En cambio, la concentración

de los SDT, de acuerdo a lo establecido por la OMS tanto Canadá, como para Estados Unidos no debe exceder los  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Truque, 2006).

Así, el estudio de los sólidos que contaminan los ríos ha sido objeto de atención de los investigadores, para conocer su concentración, diferentes formas y características; su relación con la precipitación pluvial y cubierta vegetal.

El análisis sobre su procedencia y los puntos donde se concentran en mayor o menor cantidad, genera información valiosa para orientar la toma de decisiones de las autoridades responsables, e implementar acciones de protección y remediación que minimicen el impacto de la contaminación en los ecosistemas relacionados con los ríos.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

En el Estado de Tlaxcala las aguas del Río Zahuapan, subcuenca del alto Balsas, reciben descargas de agua provenientes de las escorrentías en temporada de lluvias y de origen antrópico derivadas de las actividades industriales, agropecuarias y municipales, lo que impacta en la calidad del agua para su consumo, recreación y no menos importante mantener el equilibrio ecológico.

Estas descargas que contaminan el río, generan la formación de sólidos que arrastrados por la corriente, contaminan a su vez otros importantes cuerpos de agua, la flora y fauna terrestres y acuáticas comprometiendo la salud humana. Por tal motivo, es importante identificar su origen, el tipo de sólidos y su concentración en el Río Zahuapan, como parámetro esencial que aporte información sobre el grado de contaminación y permita orientar la toma de decisiones e implementar medidas de mitigación del daño.

#### **4. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la concentración de Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos Totales (SFT), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Volátiles Totales (SVT) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), y su relación con las épocas de sequía y lluvia, la cubierta vegetal y la densidad de población, en la subcuenca del Río Zahuapan.

#### **Objetivos específicos**

- Analizar la concentración de ST, SFT, SDT, SVT y SST, a nivel de microcuenca, de los años 2006, 2007, 2012 y 2013, y desagregados en épocas de lluvia y sequía; en la subcuenca del Río Zahuapan.
- Estimar el tipo de distribución estadística que tienen los datos de concentración de ST, SFT, SDT, SVT y SST.
- Cuantificar estadísticamente las diferencias de concentración de ST, SFT, SDT, SVT y SST en las microcuencas en las épocas de lluvia y sequía.
- Estimar la relación lineal de la concentración de ST, SFT, SDT, SVT y SST, con la cubierta vegetal (agrícola y bosque) y la población de la subcuenca del Río Zahuapan.

#### **5. HIPÓTESIS**

Con base en que la concentración de sólidos presentes en la corriente de agua del Río Zahuapan, depende de la precipitación pluvial, la cubierta vegetal y la densidad de población se establece la hipótesis de que existe relación lineal entre estas variables a nivel de microcuenca.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Área de estudio

Este trabajo se realizó en el Río Zahuapan, subcuenca del alto Balsas y tributario del río Atoyac. Se forma de los escurrimientos de la Sierra de Tlaxco, nace cerca de un paraje conocido localmente como El Pardo (19° 40' 28" latitud norte y 98° 01' 08" longitud oeste) a una elevación de 3,088 msnm, desde donde desciende a través de planicies, vegas ribereñas y barrancas, en su trayectoria se nutre de numerosos arroyos y ríos permanentes y/o estacionales. Con un recorrido de 98 km, interrumpido a los 23 km de su nacimiento por la presa de Atlangatepec, recorre el Estado de Tlaxcala por su parte central, en dirección norte a sur, con una pendiente media de 0.011. Finalmente, cerca de Santo Toribio, Xicohtzingo (19°08'17.23" latitud norte y 98°13'28.09" longitud oeste), a 2,079 msnm, al sur del estado de Tlaxcala se une con el río Atoyac y a partir de este punto, la confluencia de estos ríos se interna en el Estado de Puebla.

### 6.2. Delimitación de Microcuencas

La subcuenca del Río Zahuapan se delimitó en trece microcuencas, de acuerdo al método propuesto por Muñoz *et al.* (2013), en el que utilizaron archivos Drawing Exchange Format (DXF) de las curvas de nivel topográfico de todo el Estado de Tlaxcala (a 10m). Estos archivos se procesaron en el programa ArcMap™ versión 9.3, para generar el modelo digital de elevación del tipo TIN (del inglés *Triangulated Irregular Network*). Por otra parte, en el programa Terrain Analysis System (TAS) versión 2.0.9 (Lindsay, 2005), se cargó el modelo digital de elevación y las coordenadas de los puntos de descarga elegidos a lo largo del río. La ejecución del programa TAS produjo archivos tipo *grid's* de la delimitación de las microcuencas (generados en píxeles por ser de tipo raster), que fue necesario transformar a archivo *shapefile* (shp) o de tipo vectorial, los archivos resultantes de estos dos procesos se cargaron en el programa ArcMap™ para generar los polígonos de las microcuencas. A cada microcuenca se le asignó una letra para su identificación y manejo en este trabajo, empezando con la "A" para la microcuenca

donde nace el Río Zahuapan y terminando con la “M” para aquella donde se une con el río Atoyac.

### 6.3. Fuentes de Información de Concentración de Sólidos

Se utilizaron los registros de la concentración de sólidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Estatal del Agua (CEAT) y de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, estos registros contienen la información sobre la concentración de sólidos de 2006-2007 y 2012-2013. Cabe señalar que cada una de estas instituciones considera diferentes puntos y tiempos de muestreo del agua, no obstante, en todas ellas la evaluación del agua se llevó a cabo bajo los estándares de la NMX-AA-034-SCFI-2001. En total se tomaron en cuenta los registros de 40 puntos de muestreo en la subcuenca del Río Zahuapan (Tabla 2).

**Tabla 2.** Años y puntos de muestreo por microcuenca

Microcuenca	Años	PM*
A	2006-2007 y 2012-2013	1
B	2006-2007 y 2012-2013	3
C	2006-2007 y 2012-2013	1
D	2006-2007 y 2012-2013	3
E	2006-2007 y 2012-2013	3
F	2006-2007 y 2012-2013	4
G	2006-2007 y 2012-2013	3
H	2006-2007 y 2012-2013	3
I	2006-2007 y 2012-2013	3
J	2006-2007 y 2012-2013	3
K	2006-2007 y 2012-2013	5
L	2006-2007 y 2012,-2013	6
M	2006-2006 y 2012-2013	2
Total		40

\*PM= Puntos de Muestro

### 6.4. Agrupación de puntos de muestreo

Los datos de los puntos de muestreo fueron agrupados espacialmente con base en su ubicación en cada microcuenca y temporalmente considerando los años que comprende este estudio. Así, algunas microcuencas tuvieron un solo punto de muestreo, mientras que otras, dos o más. Además de la agrupación temporal de los datos por año, también se agruparon con base en las temporadas de lluvia y

sequía, esta última agrupación permitió valorar los efectos de las lluvias sobre la concentración de sólidos objeto de estudio.

### **6.5. Selección de tipos de sólidos**

La clasificación de los sólidos que contaminan los ríos es muy amplia e implica diferentes tipos y subtipos, para este trabajo se seleccionaron los más representativos, estos fueron: sólidos totales (ST), sólidos volátiles totales (SVT), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y los sólidos fijos totales (SFT). Los tres primeros se cuantifican directamente en laboratorio, de acuerdo a la norma técnica estándar NMX-AA-034-SCFI-2001 (SEMARNAT, 2001); los SDT se calculan por la diferencia de los ST menos los SST. La parte inerte o mineral, comúnmente llamada “sólidos fijos” (SFT), tanto en su forma disuelta como suspendida, no está considerada en esta norma técnica, por lo que se calculan con base en la diferencia de los ST menos los SVT. Para la selección de estos sólidos se tomó en consideración: su tamaño, SST (mayores a  $2\mu$ ) y los SDT (menor de  $2\mu$ ); y su naturaleza, determinada por el tipo de moléculas que los conforman: los SVT generalmente compuestos orgánicos (volatilizables a  $600^{\circ}\text{C}$ ) y SFT sales minerales.

### **6.6. Análisis estadístico de datos**

Se realizó el análisis estadístico para evaluar las diferencias de la concentración de los sólidos seleccionados para este trabajo, entre las microcuencas y entre las épocas de lluvia y sequía. Con base en la agrupación de los puntos de muestreo, se definieron los grupos con relación al tiempo y espacio, considerando el factor Año-Época, con 8 niveles (temporada anual de lluvia y sequía) y el factor Microcuenca, con 13 niveles (microcuencas **A-M**). En primera instancia, los datos fueron sometidos a una prueba gráfica de normalidad, con una transformación logarítmica con base  $e$  (base del logaritmo natural, número real irracional y trascendental cuyo valor es 2.71828), para ajustarlos a una distribución normal, los datos así transformados se sometieron a un análisis de varianza de tipo factorial (dos factores). Se utilizó un nivel de significancia de 0.05 como criterio para

determinar si los factores tuvieron diferencias significativas, para el estadístico F de Fisher. Si  $F_{cal} < F_{tab}$ , 0.05, entonces se acepta la hipótesis estadística de que las medias de los niveles de cada factor son iguales, por otro lado si  $F_{cal} > F_{tab}$ , 0.05, entonces no se acepta dicha hipótesis, lo cual indica que hay diferencias estadísticas entre las medias de los niveles.

### **6.7. Estimación de las áreas de cubierta vegetal por microcuenca**

Para conocer la relación de la concentración de los sólidos con la cubierta vegetal es necesario calcular el área de la misma. La cubierta vegetal, que para este trabajo se refiere a la estimación de las áreas forestal y agrícola de cada microcuenca, se realizó empleando el programa MapWindow GIS versión 4.8.8. Para ello se utilizaron los polígonos de las microcuencas, descritos en el párrafo anterior, y los polígonos de uso de suelo, publicados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía en Informática (INEGI, 2009). Con el programa antes señalado, los polígonos de uso de suelo fueron cortados por los polígonos de las microcuencas, de esta manera, se separaron los polígonos de bosque y de uso de suelo para la agricultura por microcuenca. Finalmente, se calcularon sus áreas con la herramienta “*Calculate Polygon Areas*” del programa ya mencionado. Las áreas de bosque y uso agrícola fueron expresadas como porcentajes, en relación al área total de cada microcuenca.

### **6.8. Relación de la población con la concentración de sólidos por microcuenca**

La relación de la concentración de los sólidos en la corriente del Río Zahuapan con la población se estudió a escala de microcuenca y se estimó mediante el coeficiente de correlación, que se calculó considerando las variables: 1) promedio de la concentración de sólidos y 2) la densidad de población de la microcuenca A a la microcuenca L. Respecto a la variable 1 se emplearon las concentraciones de los cinco tipos de sólidos, a saber ST, SVT, SST, SDT y SFT. Para calcular la variable 2, se realizó el siguiente procedimiento. Primero se bajó la información de población del censo de INEGI (2010b), con la tabla que contiene los datos de

población y localidades georeferenciadas (coordenadas geográficas) se generó un archivo *shapefile* de todo el Estado de Tlaxcala. Este archivo con las localidades y sus poblaciones fue cortado por los polígonos de las microcuencas, tal como se hizo para calcular el área de la cubierta vegetal y con ellos se calculó la población que habita en cada microcuenca. La correlación se realizó con los datos de concentración de sólidos de 2012-2013, y con datos de población del censo de 2010.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Concentración promedio y desviación estándar de sólidos en las microcuencas

Los número (n) de datos, el promedio y la desviación estándar (D.E) de la concentración de Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos Totales (SFT), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Volátiles Totales (SVT) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) de las microcuencas se encuentran en la Tabla 3. El número total de datos, para el periodo de tiempo comprendido en este trabajo, resultó igual a 604, la microcuenca **L** tuvo el mayor número de datos con 99 y la microcuenca **A** tuvo el menor con 23, cabe mencionar que en la microcuenca **A** no hubo corriente de agua en el cauce del río en los meses de sequía lo cual reduce el número de muestras.

Se obtuvo el mayor promedio de ST en la microcuenca **M** con un valor de 835.8 mg·L<sup>-1</sup> y el menor promedio en la microcuenca **A** con un valor de 289.8 mg·L<sup>-1</sup>. El promedio de SFT presentó el mayor valor en la microcuenca **I** igual a 629.1 mg·L<sup>-1</sup> y el menor valor en la microcuenca **A** igual a 233.6 mg·L<sup>-1</sup>. Los SDT mostraron el mayor promedio en la microcuenca **H** con un valor de 573.4 mg·L<sup>-1</sup> y la microcuenca **A** tuvo el menor promedio igual a 219.6 mg·L<sup>-1</sup>. Los SVT y los SST tuvieron su máximo promedio en la microcuenca **M** con un valor de 216.7 mg·L<sup>-1</sup> y 346.7 mg·L<sup>-1</sup>, respectivamente. El menor promedio de SVT se obtuvo en la microcuenca **A** con un valor de 56.3 mg·L<sup>-1</sup> y el menor promedio de SST se obtuvo en la microcuenca **D** con un valor de 67.7 mg·L<sup>-1</sup>.

Los promedios de la concentración de ST, SFT, SDT, SVT y SST mostraron una tendencia creciente conforme a la dirección de la corriente del río. Es decir, la concentración fue menor en la microcuenca **A** y aumentó constantemente hasta alcanzar su máximo valor en la microcuenca **M**. Hubo un incremento en la microcuenca **B** que sobresale de esta tendencia.

Las desviaciones estándar de los datos de concentración de ST, SFT y SDT resultaron menores a los promedios, excepto en la microcuenca **A**. Para SVT ocurrió lo mismo que el caso anterior pero la excepción fueron las microcuencas **A** y **C**. En el caso de los SST las desviaciones estándar fueron menores a los promedios en las microcuencas **C**, **D** y **E**, y mayores en las microcuencas **A**, **B** y de las microcuencas **F** a la **M**.

Los ST mostraron mayor desviación estándar en la microcuenca **M** con un valor de  $439.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , seguida de la microcuenca **A** con valor de  $436.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , los datos de ST tuvieron la menor desviación estándar en la microcuenca **D**. Las mayores desviaciones estándar de SFT y SDT las presentó la microcuenca **A** con valores de  $395.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y  $269.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectivamente. La menor desviación estándar de SFT presentó en la microcuenca **C** con un valor de  $106.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y la microcuenca **D** tuvo la menor desviación estándar de SDT con un valor de  $139.3$ . Para los SVT, la microcuenca **M** tuvo la mayor desviación estándar con un valor de  $211.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y la menor desviación estándar la tuvo la microcuenca **D** con un valor de  $37.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Los SDT presentaron la mayor desviación estándar en la microcuenca **M** con un valor de  $528.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y la menor desviación estándar en la microcuenca **C** con un valor de  $42.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Las desviaciones estándar de los datos de concentración de ST, SFT, SDT y SVT mostraron una tendencia sin patrón respecto a la dirección de la corriente del río. La desviación estándar de los SST tuvo una tendencia similar, es decir creciente respecto a la dirección de la corriente del río, a la mostrada por los promedios. Cabe enfatizar que en las microcuencas **C** y **D** se encontraron las menores desviaciones estándares de los cinco tipos de sólidos considerados en este trabajo.

## 7.2. Concentración de sólidos de los años 2006, 2007, 2012 y 2013

La tendencia de la concentración de sólidos en los años considerados, para cada microcuenca, se muestran en las gráficas de la Tabla 3.

**Tabla 3.** Promedio y Desviación Estándar (D.E.) de los años 2006, 2007, 2012 y 2013, de la concentración de sólidos por microcuenca.

Microcuenca	Sólidos Totales			Sólidos Fijos Totales			Sólidos Disueltos Totales		
	n	Promedio	D.E.	n	Promedio	D.E.	n	Promedio	D.E.
A	23	289.8	436.7	23	233.6	395.2	23	219.6	269.9
B	42	616.7	389.5	42	447.9	331.0	42	427.1	211.0
C	35	393.5	196.2	35	265.8	106.9	35	326.9	194.8
D	38	422.9	152.6	38	331.4	127.6	38	354.7	139.3
E	40	525.0	322.6	40	406.4	320.5	40	439.4	323.5
F	60	519.3	206.4	60	396.0	187.6	60	424.4	181.1
G	39	605.8	293.5	39	501.7	270.1	39	504.1	151.1
H	40	680.5	203.4	40	557.8	198.5	40	573.4	173.9
I	39	770.6	355.9	39	629.1	332.7	39	531.6	167.6
J	41	766.8	382.6	41	609.6	378.3	41	543.7	154.4
K	64	785.2	342.4	64	607.5	310.7	64	557.3	243.1
L	99	764.7	315.8	99	619.0	290.0	99	535.5	154.0
M	44	835.8	439.0	44	619.1	380.4	44	489.2	165.9
	Sólidos Volátiles Totales			Sólidos Suspendidos Totales					
	n	Promedio	D.E.	n	Promedio	D.E.			
A	23	56.3	73.5	23	70.2	180.1			
B	42	168.8	117.8	42	166.0	225.8			
C	35	127.7	151.8	35	66.4	42.8			
D	38	91.6	37.1	38	67.7	54.5			
E	40	118.6	74.6	40	85.1	72.5			
F	60	123.3	70.6	60	94.8	101.2			
G	39	104.1	41.8	39	101.7	197.2			
H	40	122.7	39.1	40	107.0	143.5			
I	40	122.7	39.1	39	238.8	330.2			
J	41	157.3	108.7	41	223.0	326.2			
K	64	177.7	107.9	64	227.8	295.3			
L	99	145.4	54.2	99	229.2	383.4			
M	44	216.7	211.1	44	346.7	528.2			

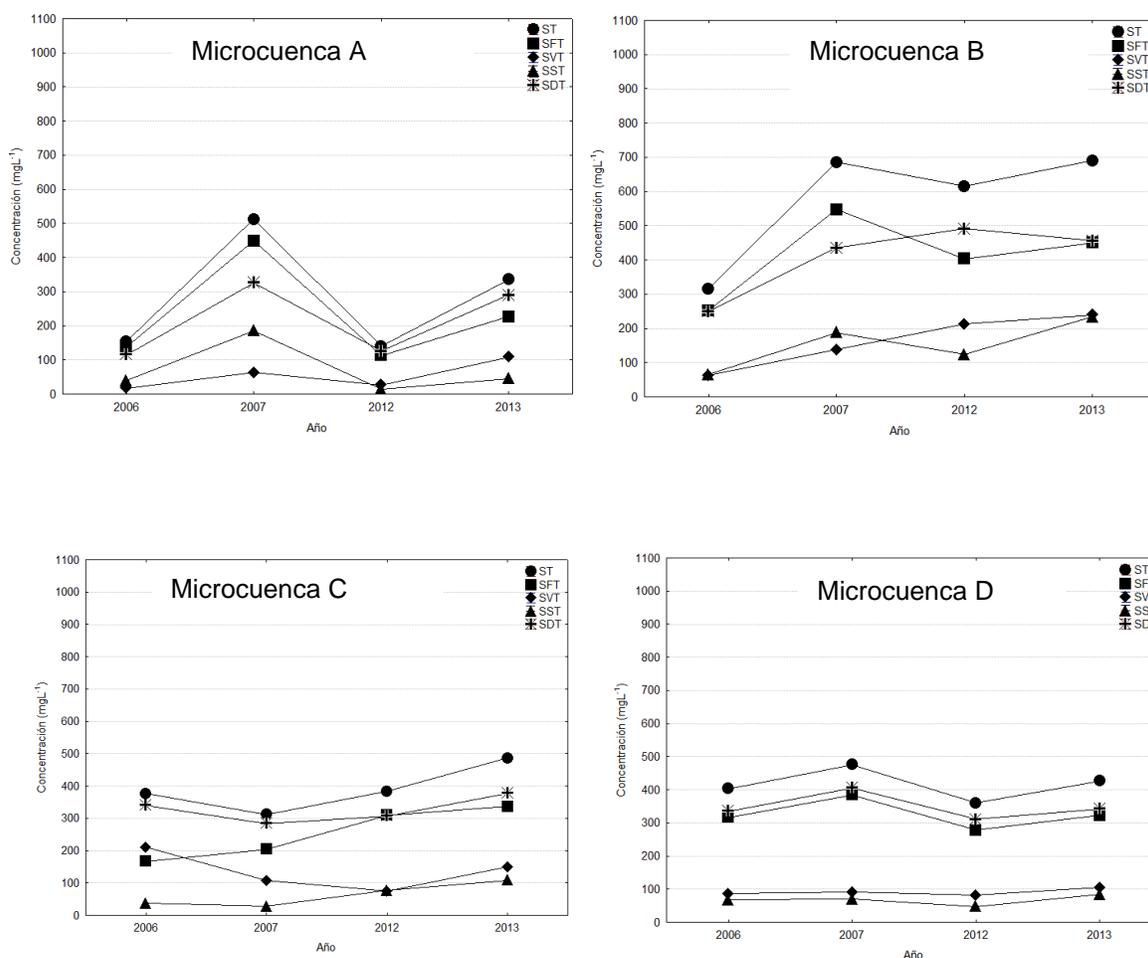
En la microcuenca **A**, las concentraciones de ST, SFT, SST y SDT alcanzaron el máximo valor en el año 2007 respecto a los años 2006, 2012 y 2013, por ejemplo los ST alcanzaron una concentración de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , seguidos de los SFT y los SDT. Las concentraciones de los años 2006 y 2012 tuvieron valores comparables o similares los cuales no rebasaron los  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Los SVT y los SST tuvieron las menores concentraciones, alrededor de  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , comparadas con los ST, SFT y SDT. Las concentraciones de los sólidos, aquí considerados, en la microcuenca **B** tuvieron un comportamiento distinto al de la microcuenca **A**, los años 2007 y 2013 presentaron las mayores concentraciones comparados con 2006 y 2012, los ST, SFT y SDT tuvieron mayores concentraciones que los SVT y SDT. Se observó

que las concentraciones tuvieron una tendencia a aumentar de 2006 a 2013. En esta microcuenca los ST llegaron a una concentración de  $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , seguidos de los SFT y los SDT; las concentraciones de los SVT y los SFT en 2013 fueron mayores a  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

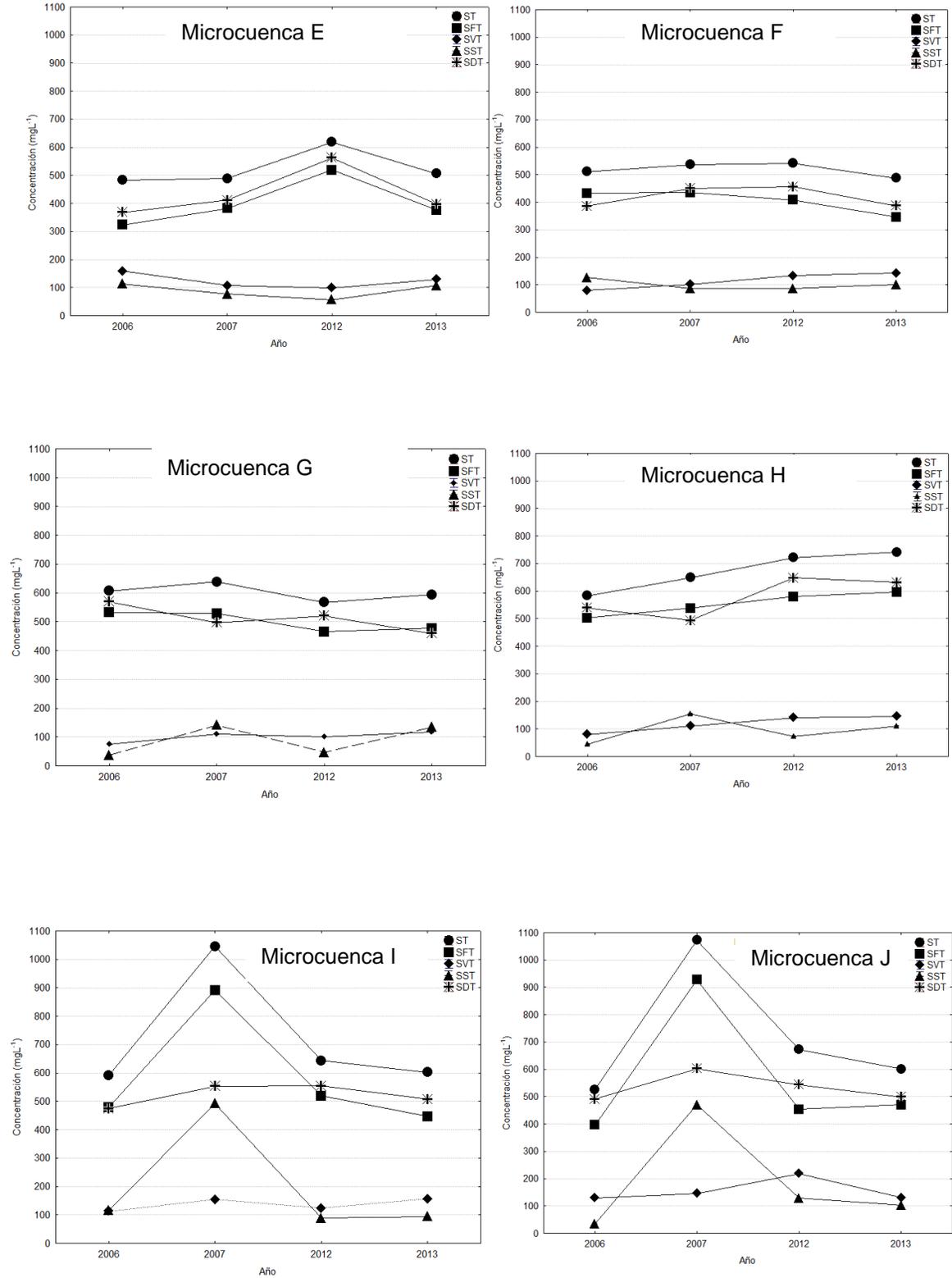
En las microcuencas **C**, **D**, **E**, **F**, **G** y **H** las concentraciones de los cinco tipos de sólidos tuvieron un comportamiento comparable o una tendencia similar, no se observó años con concentraciones sobresalientes de los demás años, como en las microcuencas **A** y **B**, pero si se observó una tendencia a aumentar de 2006 a 2013. Comparando las gráficas se puede ver que las concentraciones aumentan de la microcuenca **C** a la **H**, por ejemplo los ST tuvieron un valor de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , en la primera microcuenca, y alcanzaron un valor mayor de  $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , en la segunda microcuenca. Es importante señalar que de la microcuenca **B** a la **C** hubo una disminución de la concentración. Como en el caso de las microcuencas **A** y **B**, las concentraciones de ST, SFT y SDT fueron mayores que SVT y SST, pero en las microcuencas **D**, **E**, **F**, **G** y **H**, esta diferencia fue más acentuada, por ejemplo, en la microcuenca **H** la diferencia entre los ST y los SST fue mayor de  $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Gráficas con tendencia similar resultaron en las microcuencas **I**, **J**, **K** y **L**. Nuevamente, pero más acentuado que en las microcuencas **A** y **B**, las concentraciones mostraron un máximo valor en el año 2007 y después disminuyeron. En estas cuatro microcuencas prácticamente las concentraciones no mostraron variaciones sustanciales, por ejemplo, los ST fueron mayores a  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  en estas microcuencas. Respecto al orden de preponderancia, como en el caso de las microcuencas ya descritas anteriormente, los ST, SFT SDT tuvieron mayores concentraciones que los SVT y SST. En estas cuatro microcuencas se observa un incremento de concentración respecto al grupo conformado por las microcuencas de la **C** a la **H**; por ejemplo, en el grupo de microcuencas de la **I** a la **J**, los SFT tuvieron concentraciones alrededor de  $900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , mientras que en las microcuencas de la **C** a la **H**, la concentración de SFT estuvo entre  $400$  a  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

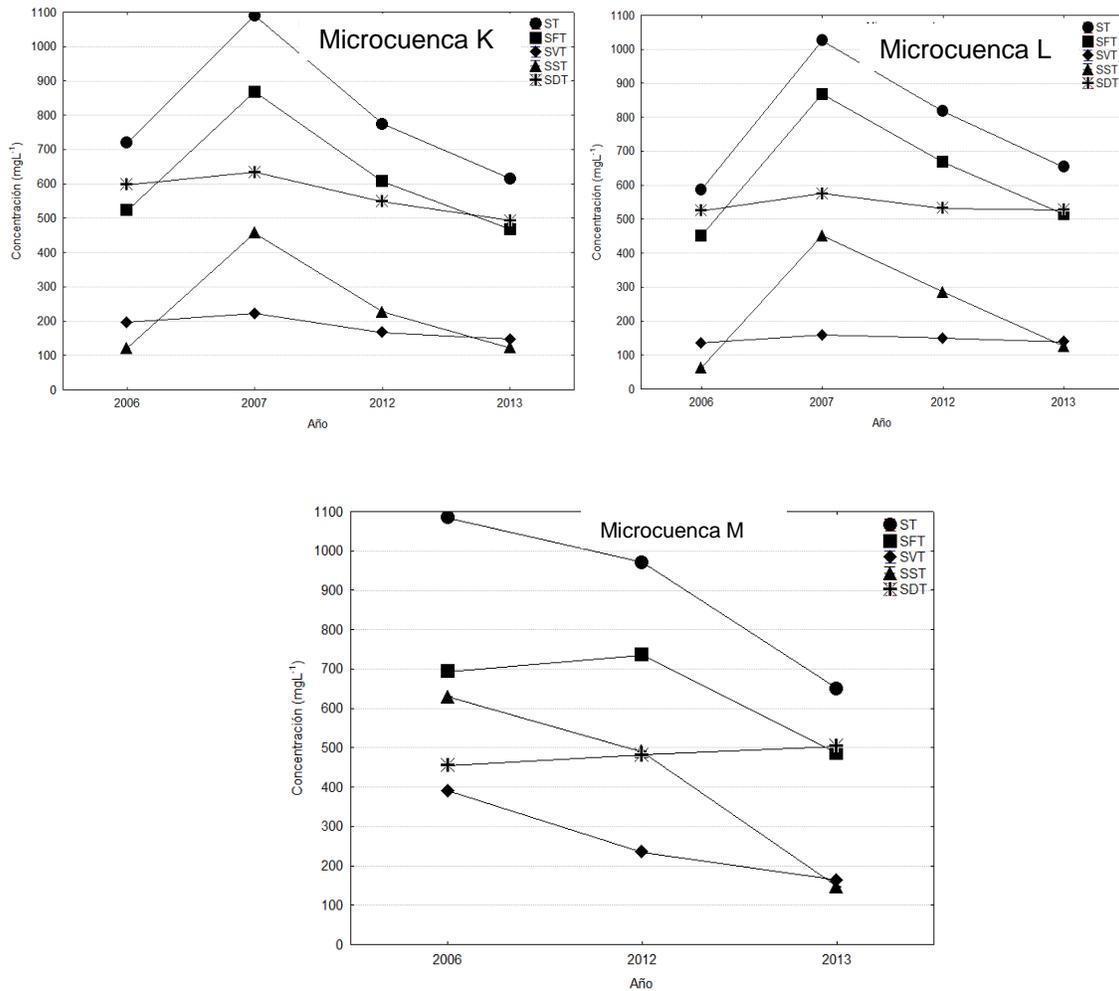
En la microcuenca **M** se obtuvo un resultado distinto a las demás microcuencas. A primera vista, el comportamiento de las concentraciones en esta microcuenca es completamente contrario a los de la microcuenca **B**, es decir, en lugar de aumentar de 2006 a 2013 las concentraciones disminuyeron en este periodo de tiempo, por ejemplo la concentración de ST fue de aproximadamente  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  en 2006 y disminuyó a menos de  $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  en 2013. Los SDT son los únicos tipos de sólidos que tuvieron un ligero incremento en este lapso de tiempo. También se observó que no hay una clara diferenciación de concentraciones de ST, SFT y SDT con respecto a las concentraciones de SVT y SST como lo hubo en las otras microcuencas.



**Figura 1.** Concentración de sólidos 2006-2007 y 2012-2013 (microcuencas A-D) en el Río Zahuapan.



**Figura 1.** (continuación) Concentración de sólidos 2006-2007 y 2012-2013 (microcuenca E-J) en el Río Zahuapan.



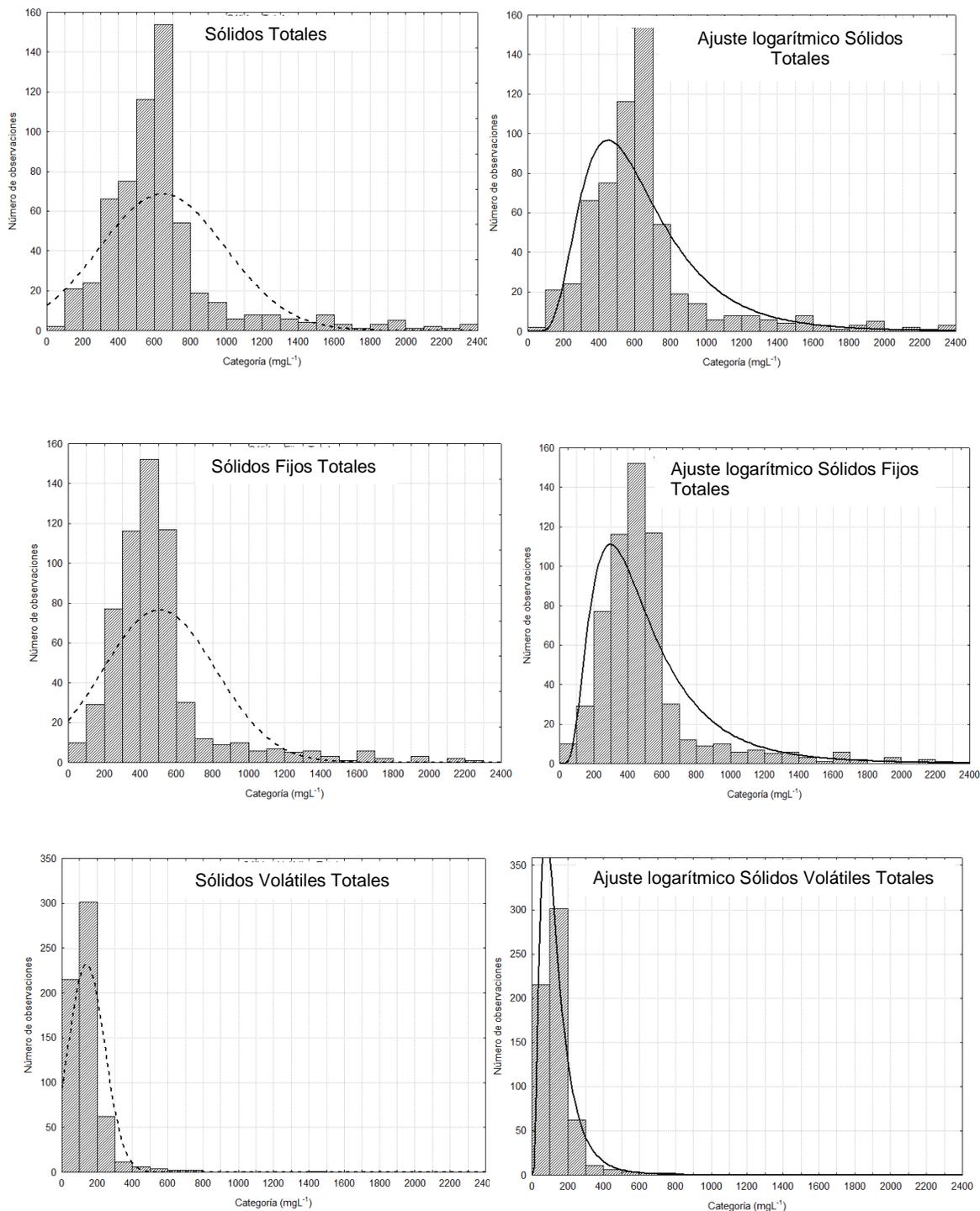
**Figura 1.** (continuación) Concentración de sólidos 2006-2007 y 2012-2013 (microcuencas K-M) en el Río Zahuapan

### 7.3. Prueba de distribución de los datos

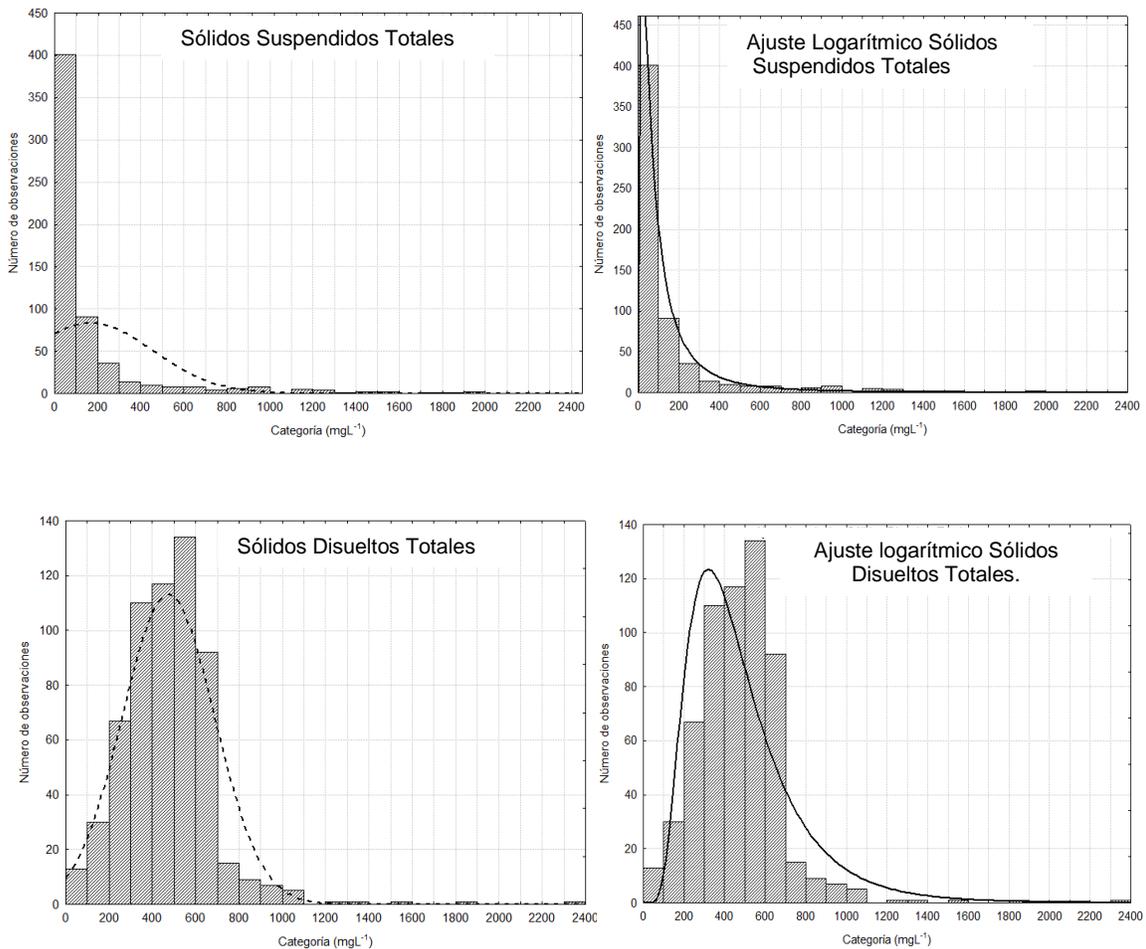
La prueba de distribución, de todos los datos considerados, de las concentraciones de ST, SFT, SVT, SST y SDT, realizada con el programa Statistica® (Statsoft, 2007) arrojó las gráficas que se encuentran en la Figura 2.

Las columnas o barras tienen un ancho que representa un intervalo seleccionado de concentración a cada  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . La altura de las barras indica el número de observaciones o muestras que tuvieron una concentración que se encontró en este intervalo. Por ejemplo, para los Sólidos Totales (ST), la barra de mayor altura

cercana a las 160 observaciones fue la del intervalo cuya concentración es de 600 a 700  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Comparando la distribución de las alturas de las barras con respecto



**Figura 2.** Gráficas de ajuste de la concentración de sólidos con distribución normal (línea punteada) y con transformación logarítmica (línea continua), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.



**Figura 2.** (continuación) Gráficas de ajuste de la concentración de sólidos con distribución normal (línea punteada) y con transformación logarítmica (línea continua), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.

a la curva de distribución normal ajustada, representada por la línea discontinua, sesgada a la izquierda. Este patrón se observó, incluso de manera más acentuada, en los otros tipos de sólidos, a saber SFT, SVT, SST y SDT. Una distribución sesgada a la izquierda indicó que los datos tuvieron una distribución logarítmica tal como se muestra en las gráficas contiguas, donde se puede observar que las barras se ajustan mejor a la curva de ajuste logarítmica (línea continua) comparada con la línea de distribución normal. Este resultado sugirió que transformando los datos mediante su logaritmo natural podrían tener una distribución normal. Efectivamente, la prueba de Shapiro-Wilk mostró que los

datos transformados de ST, SVT y SST tuvieron una distribución normal debido a que el valor de  $W$  calculado ( $W$  es el estadístico de la prueba) resultó mayor a el valor de  $W$  crítico a 5% de nivel de significancia para  $n=604$  (donde  $n$  es el número de datos). Para SFT y SDT el valor de  $W$  calculado fue menor al valor de  $W$  crítico, pero sin lugar a dudas la transformación logarítmica aproximó los datos a una distribución normal debido a que los valores de  $W$  calculado con los datos transformados resultaron mayores que los valores de  $W$  calculado con los datos crudos.

#### **7.4. Concentración de sólidos en épocas de lluvia y de sequía**

En este apartado se describe el resultado obtenido al agrupar los datos de concentración de sólidos considerando las épocas de lluvia y sequía, las cuales ocurren anualmente en el área de estudio.

Con esta forma de agrupar los datos, se obtuvo un resultado similar al obtenido en el apartado 7.2 “Concentración de sólidos de los años 2006, 2007, 2012 y 2013”. Es decir, las gráficas (Figura 3) se pueden clasificar, por el tipo de tendencia de las curvas de concentración, en gráficas de las microcuencas: **A**, **B**, **C-H**, **I-L** y **M**.

En la microcuenca **A** se observó claramente que las concentraciones de los ST, SFT, SDT y SST son mayores en la época de lluvias que en la época de sequía, esto ocurrió principalmente en los años 2007 y 2013. En el siguiente apartado 7.5 se presentará la argumentación para afirmar sí esta diferenciación es significativa teniendo como base el análisis estadístico. En la gráfica de la microcuenca **B**, no se observó una diferenciación entre las épocas de sequía y de lluvias. En el siguiente apartado 7.5 se presentará la argumentación estadística para afirmar sí esta diferenciación es significativa teniendo como base el análisis estadístico. En el grupo de gráficas de las microcuencas **C** a la **H**, se observó que las curvas de las concentraciones tuvieron un comportamiento semejante entre las épocas de lluvia y de sequía, siendo mayores las concentraciones de ST, SFT y SDT en comparación con las de SVT y SST, también se observó un aumento de

concentración en las microcuencas G y H respecto a las microcuencas C, D, E y F.

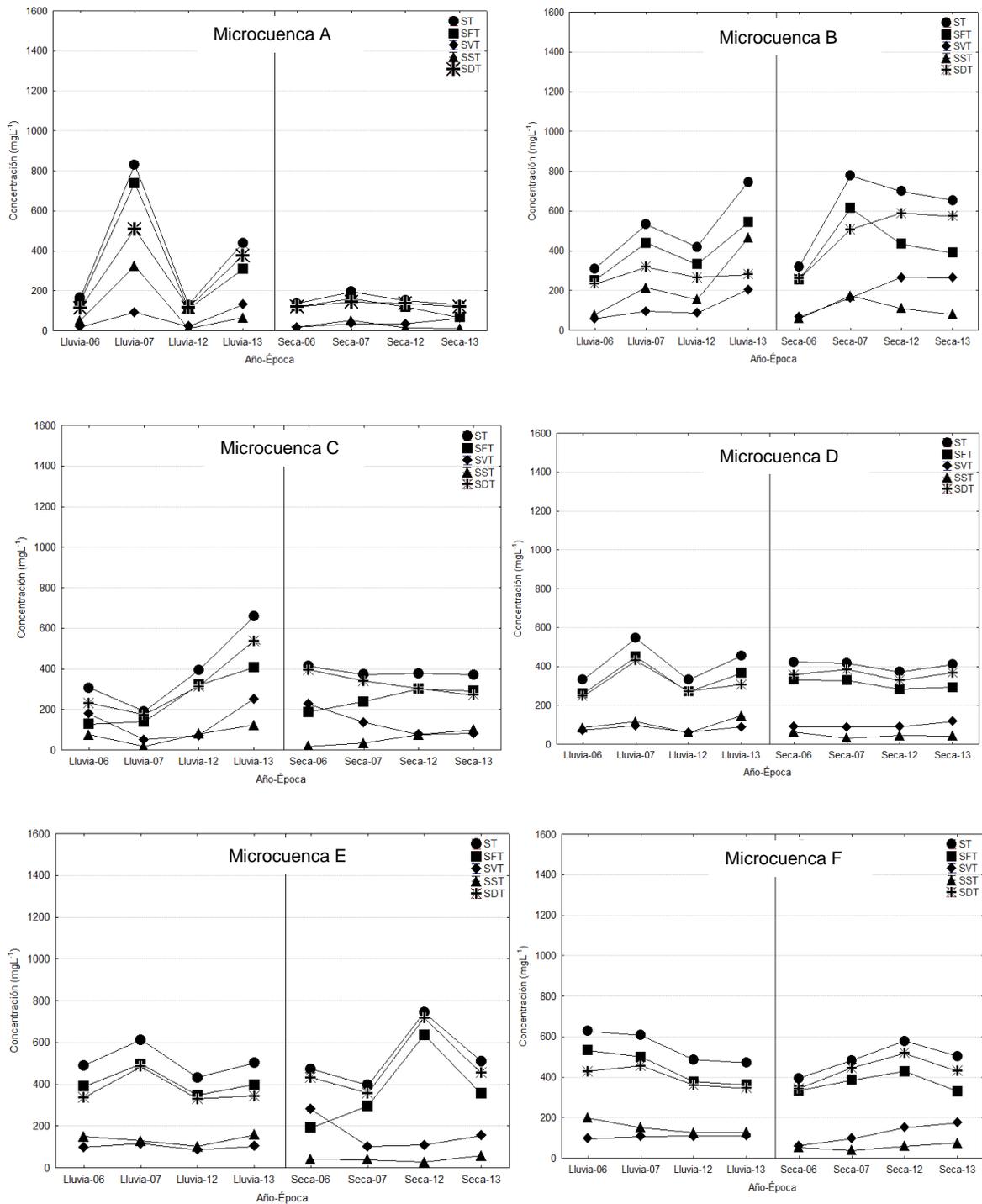
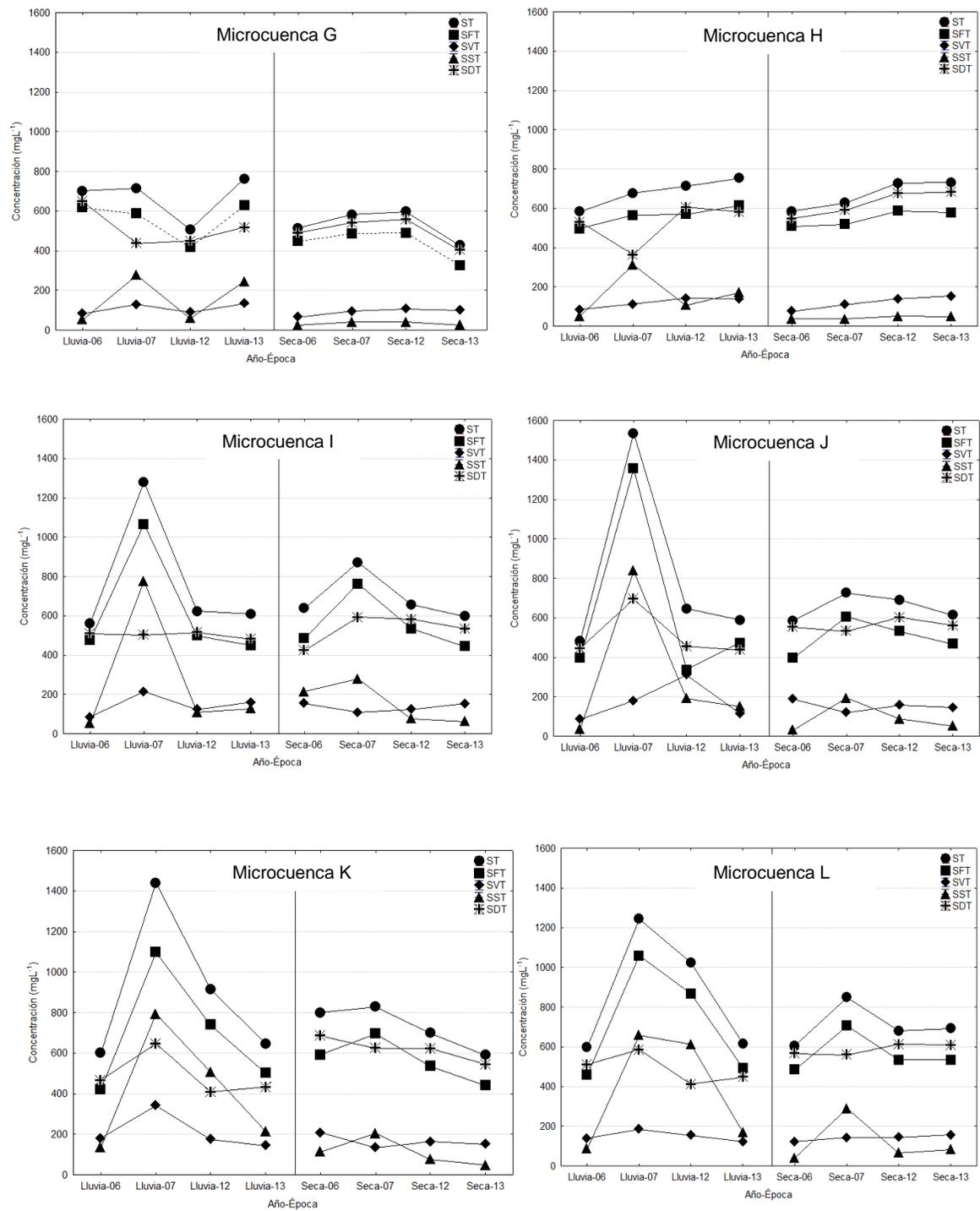
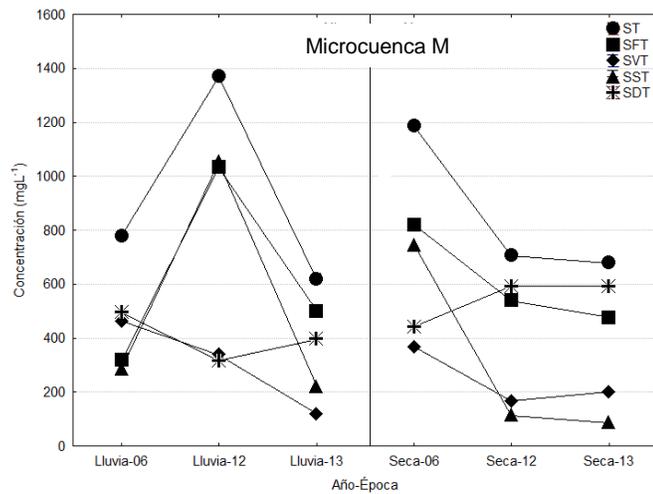


Figura 3. Concentración de sólidos en época de lluvia y de sequía (microcuencas A-F), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.



**Figura 3.** (continuación) Concentración de sólidos en época de lluvia y de sequía (microcuencas G-L), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.



**Figura 3.** (continuación). Concentración de sólidos en época de lluvia y de sequía (microcuenca M), 2006-2007 y 2012-2013 en el Río Zahuapan.

Las curvas de las tendencias de concentración en el grupo de gráficas de las microcuencas **I**, **J**, **K** y **L** mostraron comportamientos semejantes. Se nota claramente que las concentraciones son mayores en la época de lluvias que en la de sequía, destacando sobre todo la temporada de lluvias del año 2007. Es notorio también el hecho de que en la temporada de lluvias no hay una diferenciación clara de las concentraciones de ST, SFT y SDT de las concentraciones de SVT y SST como ocurrió en la temporada de sequía. En las gráficas de las microcuencas **I**, **K** y **L** se observó un traslape de las concentraciones de SST y SDT por el aumento de concentración de SST en la época de lluvia. En la microcuenca **J** éste traslape ocurrió, además por la combinación del aumento de la concentración de SST con la disminución de SDT en la época de lluvias de 2012.

En la gráfica de la microcuenca **M**, se observó que no hay una diferenciación de las concentraciones entre la época de lluvia y de sequía, como ocurrió en las microcuencas anteriores. En la época de lluvias las concentraciones de ST, SFT y SST fueron mayores respecto a los otros dos años. En la época de sequía se observaron las mayores concentraciones en 2006 y tuvieron una tendencia descendente de concentración al 2013.

### **7.5. Diferencias de concentración de sólidos entre factores: microcuencas y Año-Época**

Los resultados descritos en los anteriores apartados, mostraron que hubo diferencias de concentración de sólidos en las microcuencas y en las épocas de lluvia y sequía de los años 2006, 2007, 2012 y 2013. El resultado de la cuantificación, para evaluar si estas diferencias de concentración son significativas estadísticamente, empleando el análisis de varianza de tipo factorial, los datos crudos transformados mediante el logaritmo natural para su ajuste a una distribución normal, y un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , se presenta a continuación.

La Tabla 4 contiene el resultado del análisis de varianza, por tipo de sólido, que arrojó el programa Statistica<sup>®</sup>. La información de mayor interés en esta tabla son los valores de los estadísticos  $F_{cal}$  y  $F_{tab,0.05}$ . Porque en el caso de  $F_{cal}$  es el resultado del cociente entre los cuadrados medios de un factor y los cuadrados medios del error; a su vez los cuadrados medios son el resultado del cociente entre suma de cuadrados y los grados de libertad.  $F_{tab, 0.05}$  es importante porque es el valor crítico del estadístico F a un nivel de significancia igual a 0.05. Si  $F_{cal} < F_{tab, 0.05}$ , entonces se acepta la hipótesis estadística de que la medias de cada nivel son iguales, por otro lado si  $F_{cal} > F_{tab, 0.05}$ , entonces se rechaza dicha hipótesis, lo cual indica que hay diferencias estadísticas entre las medias de los niveles de cada factor.

En la Tabla 4 se observa que en todos los tipos de sólidos considerados (ST, SFT, SVT, SST y SDT) el valor de  $F_{cal}$  del factor Microcuenca resultó mayor en todos los casos que el del factor Año-Época y de la interacción Microcuenca\*Año-Época. El estadístico  $F_{cal}$ , en el factor Microcuenca, tuvo mayor valor para los ST y menor para SST, el orden fue  $ST > SFT > SDT > SVT > SST$ . En el factor Año-Época, este estadístico tuvo el mayor valor para SST y menor para ST, el orden fue  $SST > SDT > SVT > SFT > ST$ . En el caso de la interacción Microcuenca\*Año,  $F_{cal}$  tuvo el mayor valor para ST y menor en SDT, el orden fue  $ST > SVT > SFT > SST > SDT$ .

La comparación de los valores de los estadísticos F, mostró que en todos los tipos de sólidos, en los factores Microcuencas, Año-Época e interacción Microcuenca\*Año-Época, los valores de  $F_{cal}$  fueron mayores que los valores del valor crítico  $F_{tab, 0.05}$ , lo cual significa que hay diferencias estadísticas de las concentraciones de los sólidos, entre las microcuencas, entre las épocas del año y en la interacción de ambos. Las concentraciones de los ST en las épocas de año fueron los que estuvieron más cerca del límite que marca la diferencia significativa, debido a que el valor de  $F_{cal}$  igual a 2.249 se aproximó al valor de  $F_{tab, 0.05}$  igual a 2.322.

**Tabla 4.** Análisis de varianza de la concentración de sólidos considerando las microcuencas y la época del año, en el Río Zahuapan.

<b>Sólidos Totales</b>					
<b>Factor</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Cuadrados Medios</b>	<b><math>F_{cal}</math></b>	<b><math>F_{tab, 0.05}</math></b>
Microcuenca	47.241	11	4.295	38.094	1.808
Año-Época	1.267	5	0.253	<b>2.249</b>	<b>2.232</b>
Microcuenca*Año-Época	22.181	82	0.270	2.399	1.300
Error	56.595	502	0.113		
<b>Sólidos Fijos Totales</b>					
Microcuenca	62.910	11	5.719	28.425	1.808
Año-Época	5.722	5	1.144	5.688	2.232
Microcuenca*Año-Época	35.661	82	0.435	2.161	1.300
Error	101.004	502	0.201		
<b>Sólidos Volátiles Totales</b>					
Microcuenca	46.063	11	4.188	14.830	1.808
Año-Época	7.217	5	1.443	5.112	2.232
Microcuenca*Año-Época	50.188	82	0.612	2.168	1.300
Error	141.752	502	0.282		
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>					
Microcuenca	66.632	11	6.057	7.847	1.808
Año-Época	58.917	5	11.783	15.265	2.232
Microcuenca*Año-Época	131.490	82	1.604	2.077	1.300
Error	387.497	502	0.772		
<b>Sólidos Disueltos Totales</b>					
Microcuenca	36.524	11	3.320	17.738	1.808
Año-Época	5.690	5	1.138	6.079	2.232
Microcuenca*Año-Época	22.293	82	0.272	1.452	1.300
Error	93.972	502	0.187		

0.05 es el nivel de significancia. Cuando el valor de  $F_{cal}$  excede el valor de  $F_{tab}$ , la hipótesis de que las medias son iguales debe ser rechazada. Los valores en negritas indican el caso cuando  $F_{cal} \approx F_{tab, 0.05}$ .

## **7.6. Relación de la concentración de sólidos y la cubierta vegetal**

En la Tabla 5 se encuentran los resultados del trabajo enfocado a generar la información para la estimación del grado de relación lineal entre la concentración de sólidos con la cubierta vegetal, agrícola y de bosque.

En primera instancia, se puede ver que la suma de estos dos tipos de vegetación, agrícola y bosque, representó más del 80% de la superficie en cada microcuenca e incluso en las microcuencas **A** y **H** representaron el 100% de su área. En la microcuenca **C** estos tipos de vegetación representaron el porcentaje más bajo, alrededor del 80%.

Los datos mostraron que las áreas agrícolas aumentaron de manera consistente de la microcuenca **A** a la microcuenca **D**, de las microcuencas **E** a la **H** hubo cambios alternos de incrementos y decrementos de una microcuenca a otra, es decir, de la microcuenca **D** a la microcuenca **E** hubo una disminución, luego de la microcuenca **E** a la microcuenca **F** hubo un aumento, este patrón se repitió hasta la microcuenca **L**. Los porcentajes de área de bosque tuvieron una tendencia inversa a la de las áreas agrícolas, es decir disminuyeron de la microcuenca **A** a la microcuenca **D**, y de las microcuencas **E** a la **H** hubo cambios alternos como sucedió con las áreas agrícolas.

En relación con los cambios de los porcentajes de área agrícola con respecto a los años de 1971-1986, 1993-1998, 2002-2003, 2007-2008 y 2012-2013, que comprenden las series I, II, III, IV y V, respectivamente, se observó que ocurrieron incrementos de la serie I a la serie II y de la serie II a la serie III en las microcuencas **A**, **B**, **C**, **D**, **E**, **G**, y la **I**, en las otras microcuencas los cambios fueron menores comparados con los anteriores, incluso en la microcuenca **F** hubo un descenso del porcentaje de área agrícola. En el caso de los cambios de los porcentajes de área de bosque, los resultados mostraron que las mayores disminuciones de área de bosque ocurrieron de la serie I a la serie II y de la serie II a la serie III en todas las microcuencas de la **A** a la microcuenca **L**. Sin embargo,

también ocurrieron disminuciones de área de bosque de la serie III a la serie IV en la microcuenca **F**, y en la microcuenca **H** de la serie IV a la serie V.

El resultado del método para estimar la relación de los porcentajes de las áreas agrícola y de bosque, de la serie V, con la concentración de sólidos de los años 2012 y 2013, se encuentra en la Tabla 5. Los valores de los coeficientes de correlación (R), entre las áreas agrícolas de las microcuencas **A** a la **L** con la concentración de los sólidos ST, SFT, SVT, SST y SDT, resultaron positivas, excepto para la concentración de SVT del año 2013, el cual resultó negativa. La relación estimada con el estadístico R, es significativa estadísticamente cuando el valor de p es menor a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , y altamente significativa a un valor  $\alpha=0.01$ . En la Tabla 6, se puede observar que los valores de p resultaron mayores al valor de  $\alpha=0.05$ , lo cual indica que la relación, medida con el valor de R, no fue significativa, incluso a un valor menos estricto de  $\alpha=0.1$ , excepto el caso de la relación entre las áreas agrícolas de las microcuencas y las concentraciones de los SDT del año 2012, cuyo valor de p fue menor al valor de  $\alpha=0.05$  ( $0.044 < 0.05$ ), esto significa que la relación entre estas variables es significativa, pero no altamente significativa debido a que p ya no es menor sino mayor a  $\alpha=0.01$  ( $0.044 > 0.01$ ). Respecto a los coeficientes de correlación, entre las áreas de bosque de las microcuencas con la concentración de los cinco tipos de sólidos considerados, resultaron negativas, excepto para la concentración de SVT del año 2013, el cual resultó positiva. Los valores de p resultaron mayores al valor de  $\alpha=0.05$ , lo cual indicó que esta relación no fue significativa estadísticamente, exceptuando la relación entre las áreas de bosque de las microcuencas y las concentraciones de SDT del año 2012, cuyo valor de p fue menor al valor de  $\alpha=0.05$  ( $0.034 < 0.05$ ), pero ya no fueron altamente significativas debido a que p fue mayor que  $\alpha=0.01$  ( $0.034 > 0.01$ ). Con un valor menos estricto de  $\alpha=0.1$ , las relaciones entre las concentraciones de ST y SFT del año 2012, fueron significativas debido a que el valor de p fue menor al valor de  $\alpha=0.1$  ( $0.072 < 0.1$ ) y ( $0.071 < 0.1$ ), respectivamente. Las figuras 4a y 4b muestran gráficamente las relaciones, que resultaron significativas, entre los porcentajes de área agrícola y

de bosque de las microcuencas de la serie V con las concentraciones de Sólidos Disueltos Totales del año 2012, respectivamente.

**Tabla 5.** Porcentaje de la superficie de las microcuencas del Río Zahuapan clasificada como área agrícola y de bosque.

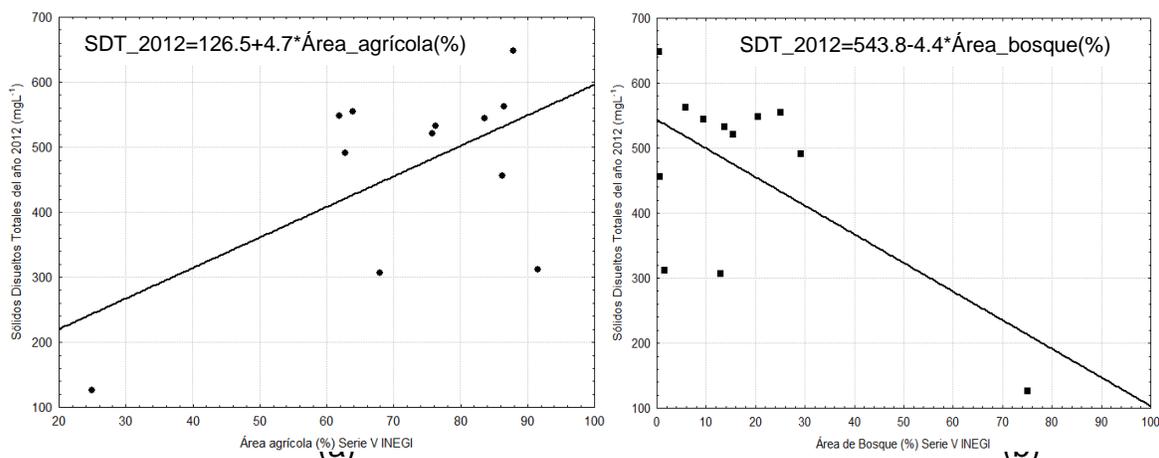
Micro cuenca	Agrícola					Bosque				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
A	12.71	16.30	25.47	24.95	24.95	78.90	74.20	74.52	75.05	75.04
B	47.30	52.45	62.85	63.29	62.76	36.10	31.01	28.98	27.86	29.18
C	59.97	60.26	74.73	68.50	67.93	17.05	15.71	12.23	12.21	12.89
D	84.98	84.86	91.62	91.58	91.58	2.99	2.62	1.64	1.66	1.66
E	75.74	75.94	86.52	86.51	86.49	11.59	11.91	5.77	5.81	5.80
F	93.71	87.54	86.48	86.20	86.19	3.66	4.15	5.22	0.60	0.60
G	71.25	71.63	75.82	75.78	75.78	18.16	16.64	15.43	15.43	15.42
H	90.84	90.78	90.52	90.52	87.91	9.15	9.22	9.45	9.49	0.50
I	61.90	66.34	70.08	70.07	63.93	28.30	24.58	25.17	25.12	25.12
J	83.61	82.89	83.61	83.64	83.64	11.30	9.90	9.60	9.48	9.48
K	59.93	59.93	61.82	61.88	61.88	22.70	21.29	20.51	22.78	20.51
L	72.82	74.80	77.90	76.42	76.28	17.71	15.63	13.64	13.66	13.80

Los números romanos indican la Serie de uso de suelo publicada por INEGI.

**Tabla 6.** Valores del coeficiente de correlación (R) de las áreas agrícola y de bosque versus concentración sólidos a escala de microcuenca.

	Área agrícola						Área de bosque				
	R	p	Significancia			R	p	Significancia			
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.1$			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.1$	
ST	2012	0.481	0.113	NS	NS	NS	-0.536	0.072	NS	NS	S
	2013	0.353	0.260	NS	NS	NS	-0.402	0.195	NS	NS	NS
SFT	2012	0.476	0.118	NS	NS	NS	-0.538	0.071	NS	NS	S
	2013	0.438	0.154	NS	NS	NS	-0.470	0.123	NS	NS	NS
SVT	2012	0.341	0.278	NS	NS	NS	-0.358	0.253	NS	NS	NS
	2013	-0.085	0.792	NS	NS	NS	0.013	0.968	NS	NS	NS
SST	2012	0.088	0.786	NS	NS	NS	-0.175	0.586	NS	NS	NS
	2013	0.143	0.657	NS	NS	NS	-0.181	0.573	NS	NS	NS
SDT	2012	0.588	0.044	NS	S	S	-0.614	0.034	NS	S	S
	2013	0.371	0.235	NS	NS	NS	-0.414	0.181	NS	NS	NS

NS= No significativo, S= Significativo.



**Figura 4.** Correlación de áreas agrícola y de bosque contra Sólidos Disueltos Totales de 2012.

### **7.7. Relación de la concentración de sólidos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) para 2012 y 2013 con la densidad de población ( $\text{hab}\cdot\text{km}^2$ ) calculada con el censo de 2010**

Los resultados del desarrollo de la metodología para estimar la relación de la densidad de población, calculada empleando datos del censo de 2010, con la concentración de sólidos de los años 2012 y 2013, se encuentran en la Tabla 7.

La columna Densidad Pob., de la Tabla 7, muestra que en la microcuenca **A** el resultado de la estimación densidad de población fue la menor de todas las microcuencas con un valor de  $0.11 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$ , luego aumentó en la microcuenca **B**, después disminuyó en la microcuenca **C**, a partir de esta microcuenca hubo un incremento de manera constante hasta alcanzar un máximo en la microcuenca **J** con un valor de  $1721.7 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$ , en las microcuencas **K** y **L** disminuyó a valores de  $349.0 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$  y  $316.4 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$ . La densidad de población promedio de las microcuencas **A** a la **L** fue igual a  $493.3 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$ .

En la Tabla 8 se encuentran los valores del coeficiente de correlación de la densidad de población versus concentración de ST, SFT, SVT, SFT y SDT. En la columna, donde se encuentra R, se puede ver que los valores de este estadístico son positivos, exceptuando el caso de SST del año 2013, el cual resultó negativo. Como se ha descrito en el apartado 7.6, la relación estimada con el estadístico R, es significativa estadísticamente cuando  $p < \alpha = 0.05$  y altamente significativa cuando  $p < \alpha = 0.01$ . Comparando los valores de p con los de  $\alpha$ , se tuvo como resultado que en la mayoría, de los casos estudiados, la relación de la densidad de población no fue significativa, exceptuando el caso de la relación de la concentración de SDT del año 2013 con la densidad de población, pero en ningún caso la relación fue altamente significativa, es decir a un nivel de significancia más estricta, es decir cuando  $\alpha = 0.01$ , por el contrario, cuando el nivel de significancia es menos estricta, por ejemplo  $\alpha = 0.1$ , las relaciones de la densidad de población con las concentraciones de SFT de 2013, SVT de 2012, SDT de 2012 y 2013, fueron significativas debido a que  $p < \alpha$ , para los casos arriba mencionados esas comparaciones fueron  $0.092 < 0.1$ ,  $0.075 < 0.1$ ,  $0.76 < 0.01$  y  $0.039 < 0.01$ ,

respectivamente. La Figura 5 muestra gráficamente la relación significativa positiva que se encontró entre los tipos sólidos, arriba mencionados, y la densidad de población.

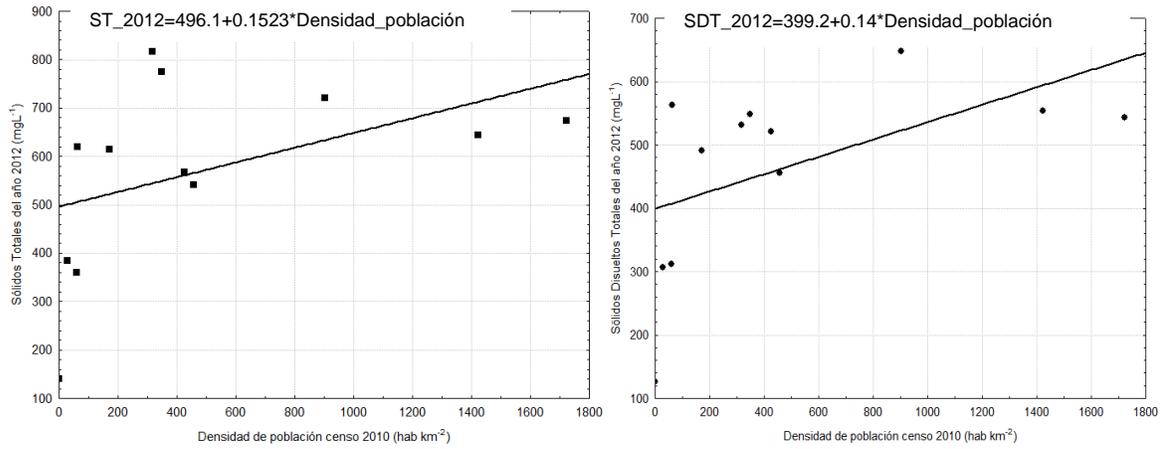
**Tabla 7.** Densidad de población (hab·km<sup>2</sup>) de las microcuencas y concentración de sólidos (mg·L<sup>-1</sup>)

Micro cuenca	Densidad Pob.	Concentración									
		ST		SFT		SVT		SST		SDT	
		2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
A	0.11	140.0	335.0	113.0	226.7	27.0	108.3	13.5	45.5	126.4	289.5
B	171.36	614.8	689.6	402.8	450.4	212.0	239.2	123.2	233.8	491.2	455.6
C	28.72	384.0	486.2	309.2	336.6	74.8	149.6	76.9	108.6	306.9	377.4
D	60.66	359.6	427.2	278.5	322.0	81.1	105.2	48.2	83.9	311.4	342.1
E	63.48	619.2	506.0	519.6	376.8	99.6	129.2	56.8	107.6	562.3	398.2
F	457.89	541.6	487.6	408.0	345.6	133.6	142.0	85.8	100.4	455.6	387.2
G	425.80	567.1	594.4	465.8	477.6	101.3	116.8	46.1	134.5	520.9	459.9
H	902.14	721.2	742.0	580.4	596.0	140.8	146.0	73.1	110.5	648.0	631.4
I	1422.76	643.2	602.4	519.6	446.0	123.6	156.4	88.9	95.0	554.2	507.2
J	1721.69	672.8	601.2	454.0	470.0	218.8	131.2	129.0	102.3	543.7	498.8
K	349.00	774.2	615.4	607.1	467.8	167.1	147.6	226.3	122.0	548.0	493.3
L	316.37	817.1	654.1	668.1	514.2	149.0	139.2	285.1	126.3	532.0	527.7

**Tabla 8.** Valores del coeficiente de correlación (R) de la densidad de población versus concentración sólidos a escala de microcuenca.

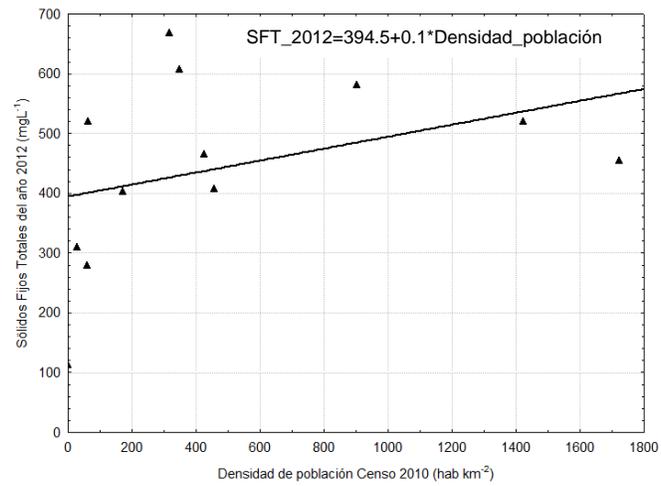
		R	p	Significancia		
				$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.1$
ST	2012	0.447	0.145	NS	NS	NS
	2013	0.448	0.144	NS	NS	NS
SFT	2012	0.365	0.244	NS	NS	NS
	2013	0.508	0.092	NS	NS	S
SVT	2012	0.532	0.075	NS	NS	S
	2013	0.029	0.928	NS	NS	NS
SST	2012	0.111	0.731	NS	NS	NS
	2013	-0.088	0.785	NS	NS	NS
SDT	2012	0.530	0.076	NS	NS	S
	2013	0.600	0.039	NS	S	S

NS= No significativo, S=Significativo.



(a)

(b)



(c)

**Figura 5.** Correlación de densidad de población contra Sólidos Totales (a), Sólidos Disueltos Totales (b) y Sólidos Fijos Totales (c) de 2012, de la subcuenca del Río Zahuapan.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1. Concentración promedio y desviación estándar de los sólidos en las microcuencas

El resultado de la concentración de sólidos en las microcuencas demostró que la concentración de los ST, SFT, SDT, SVT y SST, tuvieron un incremento sostenido de la microcuenca **A** a la **I**, esto indica que estos tipos de sólidos se acumulan en la corriente del río; corriente abajo del río los SVT y SST tuvieron un incremento importante de la microcuenca **L** a la **M**, provocando que los ST aumenten pero no los SFT y SDT, de no ser por este incremento la concentración de estos sólidos se mantendría constante de las microcuencas **I** a la **M**, incluso los SDT tuvieron un decremento de la microcuenca **K** a la **M**. Una concentración constante de ninguna manera indica que no hay entradas de sólidos al río, sino que las entradas son iguales a las salidas de la corriente de agua, por ejemplo, la disminución de los SDT puede ser causado por sedimentación al lecho. Las concentraciones promedio de ST, en todas las microcuencas del Río Zahuapan, fueron menores  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , límite establecido por la OMS (Truque, 2006). Sin embargo, los SDT a partir de la microcuenca **G** tuvieron concentraciones promedio mayores al límite de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  establecido por los criterios ecológicos CE-CCA-001/89 (SEMARNAT, 1989) y por la OMS (Truque, 2006). Respecto a los SST, ninguna microcuenca del Río Zahuapan tuvo una concentración promedio menor al límite de  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  establecido en la NOM-001-ECO-1996 (SEMARNAT, 2003a), comparando estos promedios con el límite de  $70\text{-}85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de la EPA, las microcuencas que cumplieron con este límite fueron la **A**, **C**, **D** y **E**. Con base en esta información, se puede decir que el Río Zahuapan cumple cabalmente con la normatividad respecto a los ST, pero esto no ocurre a partir de la microcuenca **F** a la **M** para los límites de SDT y SST. Desafortunadamente en la normatividad no hay límites de SFT y SVT, con los cuales hacer una comparación de los valores encontrados en este trabajo para el Río Zahuapan. Lo destacable de los SFT y SDT es que los primeros tuvieron valores mayores a los segundos, lo cual indica que en el río predominan los sólidos de origen mineral o inorgánico.

## 8.2. Concentración de sólidos para 2006, 2007, 2012 y 2013

Los resultados en los años considerados mostraron que las microcuencas **A** y **B**, aunque son contiguas, tuvieron un comportamiento diferente de la concentración de sólidos. En la microcuenca **A** las concentraciones alcanzaron su máximo valor en el año 2007, mientras que en la microcuenca **B**, los máximos se alcanzaron en los años 2007 y 2013. De la microcuenca **C** a la microcuenca **H**, las concentraciones de los sólidos tuvieron tendencias a aumentar consistentemente de 2006 hasta 2013. Otro grupo de microcuencas fue conformado por las microcuencas de la **I** a la **L**, de manera semejante a las microcuencas **A** y **B**, estas microcuencas tuvieron su máxima concentración en el año 2007. Por el contrario, en la microcuenca **M** la tendencia fue una disminución del año 2006 al año 2013. Estos comportamientos mostraron que las variaciones de concentración no fueron similares en el río durante los años considerados.

Comparando las concentraciones con respecto a los límites establecidos en la normatividad, los resultados mostraron que en las microcuencas **I**, **J**, **K** y **L** las concentraciones promedio de ST en el año 2007 rebasaron el límite de  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  establecido por la OMS (Truque, 2006) y en la microcuenca **M** en el año 2006. En relación a la concentración promedio de SDT, ésta fue igual o mayor al límite de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , establecido por los criterios ecológicos CE-CCA-001/89 (SEMARNAT, 1989) y por la OMS (Truque, 2006), en diferentes años. Es decir, en las microcuencas **B** alcanzó este límite en el año 2012, en la microcuenca **E** fue mayor en 2012, en las microcuencas **H**, **I**, **J** fueron mayores a partir de 2007 hasta 2013, en las microcuencas **K** y **L** fueron mayores al límite durante los cuatro años considerados y en la microcuenca **M**, a diferencia de los ST, los SDT aumentaron de 2006 a 2013, rebasando el límite de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  a partir de 2012. Referente a los SST y considerando el límite de  $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  establecido en los criterios ecológicos CE-CCA-001/89 (SEMARNAT, 1989), en la microcuenca **A** el año en que el promedio rebasó este valor fue el 2007, en la microcuenca **C** este límite fue rebasado en los años 2012 y 2013, en las microcuencas **G**, **H** y **J** en los años 2007, 2012 y 2013, y en las microcuencas **B**, **D**, **E**, **F**, **I**, **K**, **L**, y **M**, pero definitivamente en estas tres últimas las concentraciones promedios fueron muy

superiores al límite en los cuatro años considerados. Entonces, el límite de la concentración máxima permitida por la normatividad para ST fue rebasada en la parte sur del río en el año 2007, mientras que considerando los SST el río tuvo concentraciones promedio mayores a límite máximo permitido desde la microcuenca **C** hasta la **M** en los años 2007, 2012 y 2013.

### **8.3. Distribución de la concentración de sólidos**

Las gráficas de las distribuciones de frecuencia de ocurrencia de la concentración de los cinco tipos de sólidos, considerados en este trabajo, mostraron que tuvieron una distribución log-normal (así se denota, aunque no son base 10 sino base e), los cuales mediante transformación logarítmica se ajustaron a una distribución normal como lo mostró el estadístico W de Shapiro-Wilk. De cualquier modo, la distribución de las frecuencias de ocurrencia de las concentraciones de sólidos se ubicaron en la familia de las distribuciones de tipo normal (Schuenemeyer y Drew, 2011).

Este tipo de gráficas de distribuciones de frecuencia aportaron información más detallada sobre las concentraciones de los sólidos. Por ejemplo, para ST, este análisis arrojó que 90% de los datos tuvieron una concentración menor de  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , el cual es límite establecido por la OMS (Truque, 2006); para SDT se obtuvo que 55.8% de las concentraciones fueron menores al límite de  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  establecido por los criterios ecológicos CE-CCA-001/89 (SEMARNAT, 1989) y por la OMS (Truque, 2006); y para SST 33.3% de los datos fueron menores al límite de  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  establecido en la NOM-001-ECO-1996 (SEMARNAT, 2003a) y 58.3% menores cuyo límite es de  $70\text{-}85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de la EPA.

### **8.4. Concentración de sólidos en épocas de lluvia y de sequía**

Las lluvias afectaron de manera no homogénea la concentración de los cinco tipos de sólidos en las microcuencas. Martínez (2006), Rodríguez *et al.* (2007) y Mancilla *et al.* (2009), mencionaron que las lluvias aumentan los sólidos de tipo mineral (SFT) por el arrastre del suelo y los SST por la energía del escurrimiento, y por otro lado disminuyen los sólidos (SVT y SDT) ahí presentes por dilución. Con base en lo anterior, se esperaba que en la época de lluvias las concentraciones de

SFT y SST fueran mayores que las concentraciones de SVT y SDT durante los años considerados y viceversa, es decir, que en la época de sequía las concentraciones de SVT y SDT fueran mayores que las de SFT y SST, lo anterior ocurrió en la microcuenca **A**, pero esto no ocurrió en las microcuencas de la **B** a la **H** y en la microcuenca **M**. En estas microcuencas no hay una diferenciación gráfica clara de que en la temporada de lluvias los SFT y SST fueran mayores que los SVT y SDT. En las microcuencas de la **I** a la **L** las concentraciones en la temporada de lluvias fueron mayores que las de sequía, principalmente en el año 2007. No obstante, los SFT y los SDT si fueron mayores a los SVT y SST tanto en la época de lluvias como de sequía en todas las microcuencas. Este resultado puede ser debido a la forma de clasificar los datos en época de lluvias o de sequía. La clasificación de los datos en las categorías “lluvia” o “sequía”, se realizó con base en las fechas de inicio y fin de la temporada de huracanes que emite anualmente la CONAGUA, la cual generalmente inicia a mediados de mayo y termina a fines de noviembre, pero durante esta temporada ocurre un fenómeno conocido como canícula o escases de lluvia, lo cual pudo impedir que se detectará el efecto de las lluvias en el aumento de los SFT y SST por un lado y la disminución de los SVT y SDT por otro.

#### **8.5. Diferencias de concentración de sólidos entre factores: microcuencas y Año-Época**

En los apartados anteriores se ha mostrado que las concentraciones promedio de ST, SFT, SDT, SVT y SDT tuvieron diferencias tanto en las microcuencas, años y época de año. El análisis de varianza de tipo factorial, de dos factores, confirmó que estas diferencias son estadísticamente significativas para todos los tipos de sólidos analizados, microcuencas, años y épocas de año. Con base en la discusión realizada anteriormente, se puede decir de manera general para todo el río, que estas diferencias ocurrieron entre las microcuencas que se encuentran en la cabecera de la subcuenca y las que se encuentran en la descarga, entre los años analizados y entre las épocas de lluvia y sequía. Los ST fueron los que estuvieron cerca del valor crítico del estadístico  $F_{\text{tab}, 0.05}$ , para considerarlos que en todo el río su concentración no fue diferente estadísticamente en las

microcuencas. Una explicación de este resultado sería que a lo largo del río varían los otros tipos de sólidos, provocando diferencias significativas entre ellos, pero que al final de cuentas en la suma de ellos se compensan esas diferencias haciendo que los ST no difieran significativamente.

### **8.6 Relación lineal de la concentración de sólidos y la cubierta vegetal**

El resultado mostró que las microcuencas de la subcuenca del Río Zahuapan, a excepción de la microcuenca **A**, poseen una superficie predominantemente cubierta por vegetación de índole agrícola. La microcuenca **F** mostró el caso más extremo donde la vegetación de bosque representó 0.06% en las últimas mediciones reportadas en las series IV y V. De manera general, se puede decir que la vegetación de bosque disminuye de la parte alta del Río Zahuapan hasta su confluencia con el río Atoyac. Temporalmente, de la serie I (1971-1986) a la serie V (2012-2013), hubo incremento de la superficie agrícola y decremento de la superficie boscosa. El caso sobresaliente es la microcuenca **A**, donde la superficie agrícola incrementó 96%, el cambio de vegetación ocurrió de la serie I (1971-1986) a la serie III (2002-2003), de la serie III a la serie V las proporciones de área agrícola con el área de bosque se han mantenido constantes. Hubo casos excepcionales en las microcuencas **F** y **H**, donde el área de bosque aumentó en la serie III un 2% y un 0.30% y de agrícola disminuyó 7% y 0.3% respectivamente, lo que podría indicar que fue debido a una regeneración natural por el bajo porcentaje.

Los valores de los coeficientes de correlación entre los porcentajes de área agrícola de las microcuencas y la concentración de los cinco tipos de sólidos resultaron positivos, exceptuando para SVT del año 2013. Los valores positivos de R concuerdan con lo reportado en la literatura, los cual indica que a medida que aumenta el porcentaje de área agrícola aumentan proporcionalmente las concentraciones de los sólidos. Sin embargo, la prueba de significancia mostró que esta relación fue significativa solamente para los SDT del año 2012, en los demás casos no lo fue. El análisis de correlación entre el porcentaje del área de bosque con los sólidos, arrojó valores de los coeficientes correlación con signo negativo. Es decir, a menor concentración de sólidos mayor porcentaje de área de

bosque en la microcuenca, este resultado es lo que se esperaba y también así se reporta en la literatura. No obstante, esta relación no fue significativa estadísticamente, exceptuando otra vez los SDT del año 2012. La falta de significancia de los valores de R indica que estas pudieron deberse al azar, por lo que sería importante considerar más datos para descartar esta posibilidad.

### **8.7. Relación de la concentración de sólidos para 2012 y 2013 con la densidad de población calculada con el censo de 2010**

La estimación de la densidad de población mostró que en la microcuenca **A**, la cual se encuentra en la cabecera de la subcuenca del Río Zahuapan, tuvo la menor densidad de población, después en la microcuenca **B** la densidad de población aumentó porque ahí se encuentra el municipio de Tlaxco. En la microcuenca **C** la densidad disminuyó y a partir de ésta hubo un aumento en cada microcuenca corriente abajo del río, hasta alcanzar una densidad máxima en la microcuenca **J**. Este aumento de la densidad de población se debe a que, en estas microcuencas, se encuentran ciudades y cabeceras municipales como Apizaco, Santa Cruz, Amaxac, Contla, Chiautempan, Tlaxcala, Panotla, Totolac, Zacatelco, entre otros. Comparando la densidad de población entre las microcuencas **A** ( $0.11 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$ ) y **J** ( $1,721.69 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$ ), se puede ver que entre ellas hay una diferencia de densidad de población de cuatro órdenes de magnitud. Por otro lado, la comparación de las densidades de población de las microcuencas con la densidad de población promedio a nivel nacional, arroja que las microcuencas **A** y **C**, se encontraron por abajo del promedio nacional igual a  $57 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$  (INEGI, 2015); por otro lado, la densidad de población de la microcuenca **J** se ubicó entre las mayores densidades de población a nivel estatal, las cuales son el Estado de México con un valor de  $679 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$  y el Distrito Federal con  $5,920 \text{ hab}\cdot\text{km}^2$  (INEGI, 2015).

El resultado del análisis del coeficiente de correlación entre las variables densidad de población y la concentración de sólidos, mostró que entre éstas la relación lineal es positiva, es decir a menor población menor concentración de sólidos en la corriente del río. Se esperaba una relación más evidente entre los SVT y la población, porque el origen de estos sólidos son las descargas de aguas

residuales sin tratar de los centros de población, sin embargo, no fue así porque el valor más alto del estadístico R resultó para la relación entre los SDT de los dos años (2012 y 2013) con la densidad de población. La asociación o relación de SDT del año 2013 y la población fue la única significativa de todas las demás, lo que indica que es robusta y no se debió al azar debido a que  $p < \alpha$ , es decir  $0.039 < 0.05$ .

Finalmente, en este trabajo se propuso la hipótesis “que la concentración de sólidos presentes en la corriente de agua del Río Zahuapan, depende de la precipitación pluvial, la cubierta vegetal y la densidad de población se establece la hipótesis de que existe relación lineal entre estas variables a nivel de microcuenca”, con los resultados obtenidos y la discusión realizada se infiere que con la metodología empleada, no es factible aceptar esta hipótesis en su totalidad. Esto debido a que aunque existe una relación lineal entre estas variables solamente la relación entre los SDT del año 2012 con la vegetación, y los SDT del año 2013 con la población resultaron significativas. Sin embargo, el cumplimiento de los objetivos particulares mostró que en términos generales la subcuenca del Río Zahuapan se puede dividir en dos partes, la norte con menor concentración y la sur con mayor concentración de sólidos.

## 9. CONCLUSIONES

Se observó acumulación de sólidos de la microcuenca **A** a la **I**, y concentraciones constantes de la microcuenca **I** a la **M**. Una concentración constante de ninguna manera indica que no hay entradas de sólidos al río, sino que las entradas son iguales a las salidas de la corriente de agua.

El Río Zahuapan cumple cabalmente con la normatividad respecto a los ST, pero esto no ocurre a partir de la microcuenca **F** a la **M** para los límites de SDT y SST.

Las frecuencias de ocurrencia de la concentración de los sólidos estudiados se ajustaron mejor a la distribución de tipo lognormal (base e) como lo indicó el estadístico W de Shapiro-Wilk.

No se observó el efecto que se esperaba de las lluvias sobre la concentración de sólidos, es decir que SFT y SST fueran mayores que SVT y SDT en la época de lluvias, no obstante tanto en la época de lluvias y sequía esto ocurrió así. Éste resultado pudo deberse a la forma de clasificar los datos en las categorías “lluvia” y “sequía”.

Las concentraciones de los cinco tipos de sólidos tuvieron diferencias significativas en las microcuencas, años y época de lluvia y secas. De manera general se puede decir que la parte norte del río difiere significativamente de la parte sur. Las concentraciones de ST fueron las que se aproximaron al valor crítico de  $F_{\text{tab},0.05}$ , para ser consideradas con diferencias no significativas.

Los valores del coeficiente de correlación entre las concentraciones de sólidos y los porcentajes de las áreas agrícolas resultaron positivos y negativos para la relación entre las concentraciones y las áreas de bosque. Sin embargo, estos valores de R no fueron significativos estadísticamente, exceptuando los SDT del año 2012.

El valor del coeficiente de correlación entre la concentración de los sólidos y la densidad de población de las microcuencas resultó positivo. La relación entre los SDT del año 2013 y la densidad de población fue la que resultó significativa.

## 10. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Amado, J., Rubiños-Panta, E., Gavi-Reyes, F., Alarcón-Cabañero, J., Hernández-Acosta, E., Ramírez-Ayala, C., Mejía-Saenz, E., Pedrero-Salcedo, F., Nicolas-Nicolas, E. y Salazar-Sosa, E. 2006. Índice de calidad del agua en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México: Diagnóstico y Predicción. *Rev. Phytón (B. Aires)* v.75 *versión On-line* ISSN 1851-5657.
- Campos-Ortega, H., Días-Muñoz, G. y Campos-Ortega, C. 2007. Aportes sedimentarios de los ríos Lluta y San José en la zona costera de la Rada de Arica, Chile. *Rev. IDESIA* 25 (2):37-48.
- CEAT (Comisión Estatal de Agua de Tlaxcala). 2013. Informe electrónico de sólidos solicitado al INFOMEX, el 13 de agosto de 2013.
- CONAGUA (Comisión Nacional de Agua). 2013. Informe electrónico de parámetros fisicoquímicos solicitado al INFOMEX, el 26 de marzo de 2014.
- Daubenmire, R. F. 1982. *Ecología Vegetal. Tratado de Autoecología de Plantas*. Ed. Limusa. México.
- Espinoza, C. y Villalta, R. 2004. Estudio sobre la contaminación de la cuenca de los ríos Virilla y Grande de Tárcoles (Cuenca 24). Primera Etapa del Plan de Manejo Integral del recurso hídrico: la estrategia nacional para la GIRTH en Costa Rica. Recuperado el 22 de octubre de 2013, de <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=958165>.
- EPA. 2013. Introducción a la ley del agua limpia. Publicación de Mayo: Recuperado el 20 de noviembre de 2014, de [http://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion\\_a\\_la\\_Ley\\_de\\_Aqua\\_Limpia.pdf](http://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion_a_la_Ley_de_Aqua_Limpia.pdf).
- Fuchs, S., Haritopoulou T., Schafer, M., and Wilhelmi, M., 1997. Heavy metals in freshwater ecosystems introduced by urban rainwater runoff — Monitoring of suspended solids, river sediments and biofilms Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (TH), Am Fasanengarten, Germany *Water Science and Technology-Water SCI Technol.* 36:277-282.
- GAIA (Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental) y GIGA (Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental). 2002. Caracterización cualitativa y cuantitativa de la calidad y la cantidad del recurso hídrico superficial en la Cuenca del río San Juan. Posgrado de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional, sede Medellín, Colombia. p. 72.
- Galindo, J., Vázquez-Castán, L., Cruz-Lucas, M., López Ortega, M. y San Martín del Ángel, P. 2005. Contaminación del Río Cazones, Veracruz, México durante el periodo octubre 2004-junio 2005. *Rev. UDO Agrícola* 5 (1):74-80.
- Gutiérrez, V. J. M. 1989. *Enciclopedia Escolar*. Tomo I. Coord. Ed. CNIE. SEP.
- Hart, H. 2006. Effect of Land Use on Total Suspended Solids and Turbidity in the Little River Watershed, Blount County, Tennessee. Thesis the Master of Science Degree. University of Tennessee.

- INEGI. 1999. Censos Económicos. Enumeración Integral. Parques, ciudades y corredores Industriales de México.
- INEGI. 2009. Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación 1:250 000 Serie III.
- INEGI. 2010a. Metodología para la Generación y Actualización de la Información de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250,000, Serie IV.
- INEGI. 2010b. Tabuladores básicos. XI. Censo de Población y Vivienda. Recuperado el 23 de julio de 2015, de [http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/tabentidad.aspx?c=33710&s=est].
- INEGI. 2014. Mapa digital. Recuperado el 13 de julio de 2015, de http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjE5LjMyODkwLGxvbjotOTguMzY2MDMs ejo5LGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw==.
- INEGI. 2015. Densidad de Población. Recuperado el 25 de agosto de 2015, de http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/densidad.aspx?tema=P.
- Jiménez, R. y Hernández, Ma. 2011. Zahuapan. Río-Región-Contaminación. (Comp.). El Colegio de Tlaxcala. A.C. pp. 44-45.
- Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 07-06-2013.
- Lindsay, J. 2005. *TAS (Terrestrial Analysis System)*. Versión 2.0.9, número de serie 45369ABCDEF1731 (*software*). Manchester, UK: Manchester University.
- López, E. 2008. Plan de Manejo de la Microcuenca del Río Tojgüech. Municipio de Tacaná, Departamento de San Carlos. Guatemala. Recuperado el 12 de marzo de 2014, de https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2009-095.pdf
- Mancilla, G., Valdovinos, C., Azócar M., Henríquez, M. y Figueroa, R. 2009. Aproximación multimétrica a la evaluación de la calidad del agua en cuencas con diferentes niveles de intervención antrópica. *Rev. Interciencia*. 14:857-864.
- MapWindow GIS versión 4.8.8. Recuperado el 7 de febrero de 2015, de http://www.mapwindow.org/apps/wiki/doku.php?id=mapwindow4.
- Martínez, F. J. 2006. Cambios en la cubierta vegetal y recursos hídricos: un análisis de la interceptación en la cuenca del Douro. Congreso Homenaje al Douro/Douro y sus ríos: memoria, cultura y porvenir. Zamora. España. 27 de abril.
- Mecalf & Eddy Inc. 2003. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. McGraw Hill Companies. República de China.
- Mella, S. 2006. Estudio comparativo de normas de calidad de agua potable en distintos países de América. *Rev. Dig. de Ciencias*. Universidad de Belgrano. Buenos Aires Argentina. 6(4).

- Muñoz-Nava, H., Suárez-Sánchez, J., Vera-Reyes, A., Orozco-Flores, S., Batlle-Sales, J., Ortiz-Zamora, A. y Mendiola-Argüelles, J. 2012. Demanda bioquímica de oxígeno y población en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Rev. Int. de Contam. Ambie.* 28:27-38.
- Muñoz-Nava, H., Suárez-Sánchez, J., Vera-Reyes, A., Baumann J., Carreón-Coca, M. F., y Montealegre-Muñoz, R. G. 2013. Relación entre el Nitrógeno y las microcuencas del Río Zahuapan, México. *Rev. Tecnología y Ciencias del Agua.* IV. (4):47-61.
- Olguín-Eugenia, J., González-Portela, R., Sánchez-Galván, G., Zamora-Castro, J. y Owen. T. 2010. Contaminación de ríos urbanos; El caso de la subcuenca del río sordo en Xalapa, Veracruz, México. *Rev. Latinoam Biotecnol Amb Algal.* 1(2):178-190.
- Osorio, J. C., López-Rendón, J.E. y Hermelin, M. 2003. Balance geoquímico para la cuenca alta del río Medellín, Cordillera Central (Antioquia, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 27(102):71-84.
- Oswald, S. Ú. 2003. El recurso Agua en el alto Balsas. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Méx.
- Pasquini, A., Lecomte, K. y Depetris, P. 2004. Geoquímica de ríos de montaña en las Sierras Pampeanas: II. El río Los Reartes, sierra de Comenchingones, provincia de Córdoba. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 59(1).
- Plan Municipal de Desarrollo 2011-2013. H. Ayuntamiento de Tlaxcala. 2011.
- Rivera, N. R., Encina, F., Muñoz-Pedreras, A. y Mejias, P. 2004. La Calidad de las Aguas en los Ríos Cautín e Imperial, IX Región-Chile. *Rev. Información Tecnológica.* 15(5):89-101.
- Rodríguez, M. L., Taboada, M. M. y Taboada, M. T. 2007. Concentración de sólidos en suspensión durante eventos hidrológicos individuales. *Rev. de Xeografía, Territorio e Medio Universidad de A. Coruña.* 7:95-105.
- Rubiños-Panta, E., Amado-Álvarez, J., Ramírez-Ayala, C., Hernández-Acosta, E., Gavi-Reyes, F., Mejía-Saenz, E. y Salazar-Sosa, E. 2006. Contaminación del agua en el río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Colegio de Postgraduados Montecillos Edo. de Méx. y Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Santiago-Fragoso, S. y Sandoval-Enrique, J. 2001. Coleópteros Acuáticos y su Relación con la Dinámica fisicoquímica del Río Cuautla (Tramo Tetelcingo-Anenecuilco) Morelos México. *Rev. Hidrobiológica.* 11(1):19-29.
- Schuenemeyer, J.H. y Drew, L.J. 2011. *Statistics for earth and environmental scientists.* Hoboken, NJ, USA. John Wiley and Sons. pp. 407.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1989. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 02-12-1989.
- SEMARNAT. 2001. NMX-AA-034 SCFI-2001. Análisis de agua –determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 01-08-2001.

- SEMARNAT. 2003a. Norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 06-01-1997.
- SEMARNAT. 2003b. Norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 21-09-1998.
- SEMARNAT. 2013. Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México, D.F.: Cuadernos de divulgación ambiental.
- Silva-Gómez, S., Muñoz-Orozco, A., De la Isla de Bauer, M. e Infante-Gil, S. 2002. Contaminación Ambiental en la Región de Atlixco:1. Rev. Agua Terra Latinoamericana, 20 (3):243-251.
- Soledad, B. 2009. Contaminación del agua. Riesgo, ecológico, económico y social. Recuperado el 5 de octubre de 2013, de <http://www.mailxmail.com/cursos-contaminacion-agua-riesgo-ecologico-economico-social>.
- Snoeyink, V. y Jenkins, D. 1999. Química del agua. Ed. Limusa S.A. de C.V. México, D.F.
- Spiro, T. y Stigliani, W. 2004. Química ambiental. 2da. Edición. Ed. Pearson, S.A. España.
- Statsoft, Inc. 2007. Statistica (data analysis software system), version 8.0.
- Truque, P. 2006. Armonización de los estándares de agua potable en las Américas. Recuperado el 27 de noviembre de 2013, de <https://www.oas.org/DSD/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>.
- Velázquez, M., Israde, I. y Mendoza, M. 2007. Uso de diatomeas para la evaluación de la calidad del agua del río Turbio, afluente del río Lerma, México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. UNAM. Instituto de Geografía.
- Woitke, P., Wellmitz, J., Helm D., Kube, P., Lepom, P. and Litheraty, P. 2003. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube. Rev. Chemosphere 51(8):633-642.