

## 1. ZONA DE ESTUDIO: CUENCAS DE LOS RÍOS SAN FRANCISCO Y SANTO DOMINGO

Para mejorar la gestión de los recursos hídricos, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha dividido al país en trece Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA); cada una de las cuales es una agrupación de cuencas, cuyo límite coincide con la división municipal, con el fin de facilitar la integración de la información socioeconómica.

Cabe destacar que en las Regiones Hidrológico-Administrativas XIII Aguas del Valle de México, I Río Bravo, VIII Lerma- Santiago-Pacífico y IV Balsas, se concentra la mayor parte de la actividad económica del país, con dos terceras partes del Producto Interno Bruto nacional (CONAGUA, 2008).

Las trece RHA en las que se divide el país, a su vez agrupan 37 Regiones Hidrológicas (RH). La RHA XIII forma parte de la Región Hidrológica 26, Pánuco (RH-26). La zona de estudio se ubica en el Estado de México, al oriente de la Ciudad de México, en el sureste de la RHA XIII Aguas del Valle de México (fig.1.1).



Figura 1.1. Regiones hidrológicas y ubicación de la zona de estudio

Originalmente, la cuenca del Valle de México era una cuenca endorreica, hasta que, mediante obras de ingeniería, la cuenca fue drenada por el Tajo de Nochistongo y el Gran Canal de Desagüe, cuyas salidas se ubican en el noreste de la cuenca.

Al oriente del estado de México se localiza el río de La Compañía, el cual drena los escurrimientos provenientes de la Sierra Nevada y del Volcán Iztaccíhuatl. El río de La Compañía desemboca en el Dren General del Valle, el cual a su vez vierte en el Gran Canal de Desagüe.

Al río de La Compañía llegan, adicionales a los escurrimientos provenientes del Iztaccíhuatl y la sierra circundante, los escurrimientos generados en los municipios conurbados del oriente de la Ciudad de México, entre los cuales se encuentran los municipios de Chalco e Ixtapaluca.

El río de La Compañía inicia su curso en la confluencia de los ríos San Rafael y San Francisco, aproximadamente 3 km al sur de la localidad de Ixtapaluca.

El río San Rafael, denominado Miraflores en su tramo inicial, se forma por los numerosos arroyos y ríos que bajan del lado noroeste del volcán Iztaccíhuatl.

Los tributarios del río San Francisco se forman en la Sierra Nevada, en las laderas de los cerros Yeloxóchitl, Telapón y Los Potreros. Los afluentes más importantes son los ríos La Cruz, Las Jícaras y Zoquiapan.

Aproximadamente 1.3 km aguas arriba de la confluencia de los ríos San Francisco y San Rafael, se une a éste último su principal afluente, el Río Santo Domingo, el cual baja del Cerro Los Potreros y a su vez tiene como principal tributario al río Xaltocan.

Las cuencas tributarias de los ríos San Rafael, San Francisco y Santo Domingo, constituyen las cuencas que aportan mayor volumen de escurrimiento al río de La Compañía. Actualmente, estas tres cuencas son controladas por medio de la Laguna de Regulación La Gasera, ubicada en la confluencia de los ríos San Francisco y San Rafael con el río de La Compañía, aguas arriba de la cabecera municipal de Chalco.

La rápida urbanización de la zona y la disminución de la capacidad hidráulica del río de La Compañía han aumentado la vulnerabilidad a inundaciones de las localidades cercanas a él. Por lo anterior, en 2007 se iniciaron las obras para entubarlo; sin embargo, la construcción de la Laguna La Gasera y el entubamiento del río, no constituyen medidas suficientes para el control de las inundaciones que año con año se sufren en ésta zona. Ante esta situación se requiere regular los principales afluentes del río de La Compañía, es decir, los ríos San Francisco y Santo Domingo, para lo cual es necesario conocer el comportamiento de sus cuencas.

## 1.1. Descripción de las cuencas de los ríos San Francisco y Santo Domingo

### 1.1.1. Cuenca del río San Francisco

La cuenca del río San Francisco se ubica en el municipio de Ixtapaluca, al norte del municipio de Chalco, entre las coordenadas 19° 17' 25" y 19° 23' 25" Norte y entre 98° 43' 10" y 98° 54' 5" Oeste.

De forma prácticamente rectangular (ver fig.1.2), la cuenca se alarga en dirección este-oeste y se estrecha hacia su extremo oriente, el cual va del Cerro Yeloxóchitl al Cerro Telapón. Aproximadamente, su longitud de este a oeste es de 18 km, y en dirección norte-sur de 8 km, comprendiendo un área de 131.42 km<sup>2</sup>.

Las principales poblaciones ubicadas dentro de la cuenca del río San Francisco son: Ixtapaluca, San Francisco Acuautla y General Manuel Ávila Camacho.

El río San Francisco se alimenta de diversos arroyos y corrientes, siendo las que aportan mayor caudal: La Cruz, Texcahuey, Las Jícaras, el Olivar y Zoquiapan.

### 1.1.2. Cuenca del río San Rafael

Al sur de la cuenca del río San Francisco, se ubica la cuenca del río San Rafael (ver fig. 1.2), cuyo límite, en el oriente, casi coincide con la carretera México-Puebla. Ocupa principalmente los municipios de Chalco y Tlalmanalco, y parte de Ixtapaluca y Cocotitlán. Sus coordenadas son: al sur 19° 10' 30" N y al norte 19° 17' 25" N; al oriente 98° 38' 20" O y al poniente 98° 53' 20" O.

En su extremo noreste se encuentra el Cerro Telapón, en el sureste el Cerro La Trampa y en el noroeste la Laguna La Gasera, formado un romboide con diagonales de dirección noreste-suroeste y noroeste-sureste de aproximadamente 25 km, posee un área de 293.50 km<sup>2</sup>.

En la cuenca San Rafael se localizan las localidades de San Marcos Huixoco, San Lucas Amalinalco, San Gregorio Cuatzingo, San Martín Cuatlapan, Santa María Huexoculco, Miraflores, Tlalmanalco de Velázquez, Pueblo Nuevo y San Rafael.

### 1.1.3. Cuenca del río Santo Domingo

El afluente del río San Rafael de mayor importancia es el río Santo Domingo, que desemboca en él, aproximadamente, 1.3 km aguas arriba de la confluencia de los ríos San Francisco y San Rafael.

La cuenca del río Santo Domingo se ubica en el norte de la cuenca del río San Rafael (ver fig. 1.2), entre las coordenadas 19° 16' 35" y 19° 21' 5" y Norte y entre 98° 43' 20" y 98° 52' 40" Oeste, abarcando un área de 33.42 km<sup>2</sup>. La mayor parte de su superficie se encuentra en el municipio de Ixtapaluca y una pequeña área en el municipio de Chalco

Por su comportamiento hidrológico, similar al de la cuenca del río San Francisco, en este trabajo la subcuenca del río Santo Domingo se analizará de forma independiente a la cuenca del río San Rafael.

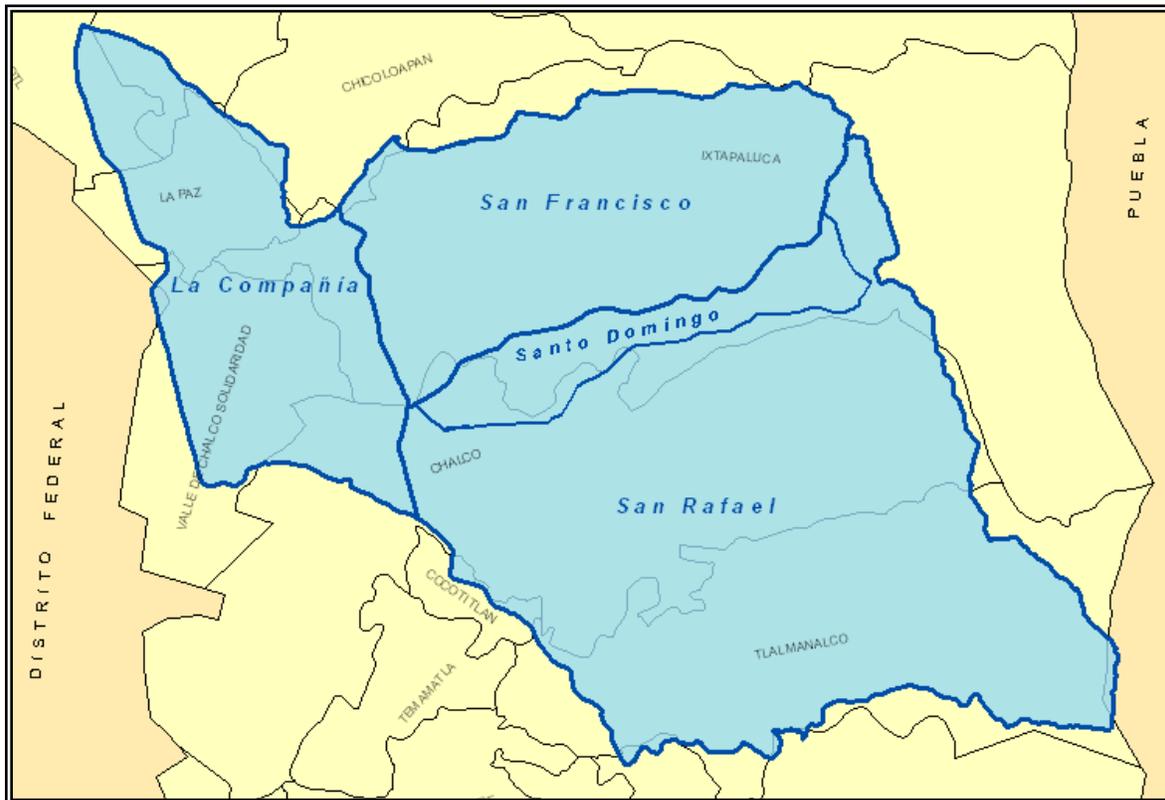


Figura 1.2. Cuencas de los ríos de La Compañía, San Francisco, San Rafael y Santo Domingo

## 1.2. Características generales de la zona de estudio

### 1.2.1. Clima

En México, para el estudio del clima, el INEGI (2001) considera la clasificación de Köppen, modificada por García (1988, en Soto et. al., 2001). La clasificación climatológica de Köppen (1948, en Soto et. al., 2001) emplea datos que por lo general se tienen disponibles, como la temperatura media y la precipitación total. Las modificaciones realizadas por García tuvieron por objeto una mejor definición de los climas existentes en el país.

Las cuencas de los ríos San Francisco, San Rafael y Santo Domingo, por su latitud, se localizan en el área intertropical, por lo que la temperatura debería ser alta; sin embargo, a su vez se ubican en el Eje Neovolcánico, lo que modifica esa condición y contribuye a que prevalezcan temperaturas bajas.

La distancia que hay del mar a la zona de estudio, junto con las sierras aledañas, propicia que los climas sean considerados continentales, pues no tienen influencia marítima. Como consecuencia de lo anterior, el mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano, el ascenso de temperatura después de estos meses es interrumpido por el inicio de la temporada de lluvias. Asimismo, prevalece la precipitación convectiva, es decir, ocasionada por el enfriamiento del aire que asciende debido al calentamiento propiciado por la superficie de la Tierra; efecto que se produce en la estación más calurosa del año, y en las horas más calientes del día (INEGI, 2001).

Las condiciones de temperatura y humedad mencionadas, han dado lugar al clima semifrío en los cerros y serranías del oriente de la zona de estudio, y al clima templado que se presenta en la zona plana del poniente. Variando ligeramente en franjas verticales, de oriente a poniente, de la forma siguiente (*Figura 1.3*):

- Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo,  $Cb'(w2)$ .
- Templado, subhúmedo. Con lluvias de verano con índice P/T mayor de 55,  $C(w2)$ .
- Templado, subhúmedo. Con lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55  $C(w1)$ .
- Templado, subhúmedo. Con lluvias de verano con índice P/T menor a 43.2,  $C(w0)$ .

El índice P/T, conocido como índice de pluviosidad de Lang, es el cociente de la precipitación total anual, en mm, y la temperatura, en grados centígrados; se utiliza como indicador de la humedad de una zona. En la zona de estudio, la precipitación disminuye conforme se desciende de la sierra al valle, de oriente a poniente; esto genera características climatológicas similares en toda la zona, con temperatura media anual entre 5 y 12° C; en enero, mes más frío del año, la temperatura oscila entre 3 y 18° C, mientras que en mayo, mes más cálido del año, es menor a 22° C.

La precipitación en el mes más seco (abril) es menor a 40 mm, mientras que el porcentaje de lluvia invernal es del 5 al 10.2% del total anual, por lo que se tiene un régimen pluviométrico de verano. La precipitación media anual en casi toda el área de estudio es de 800 a 1200 mm, excepto en la zona poniente de la cuenca del río San Francisco y el extremo noroeste de la cuenca del río Santo Domingo, donde disminuye al intervalo de 600 a 800 mm.

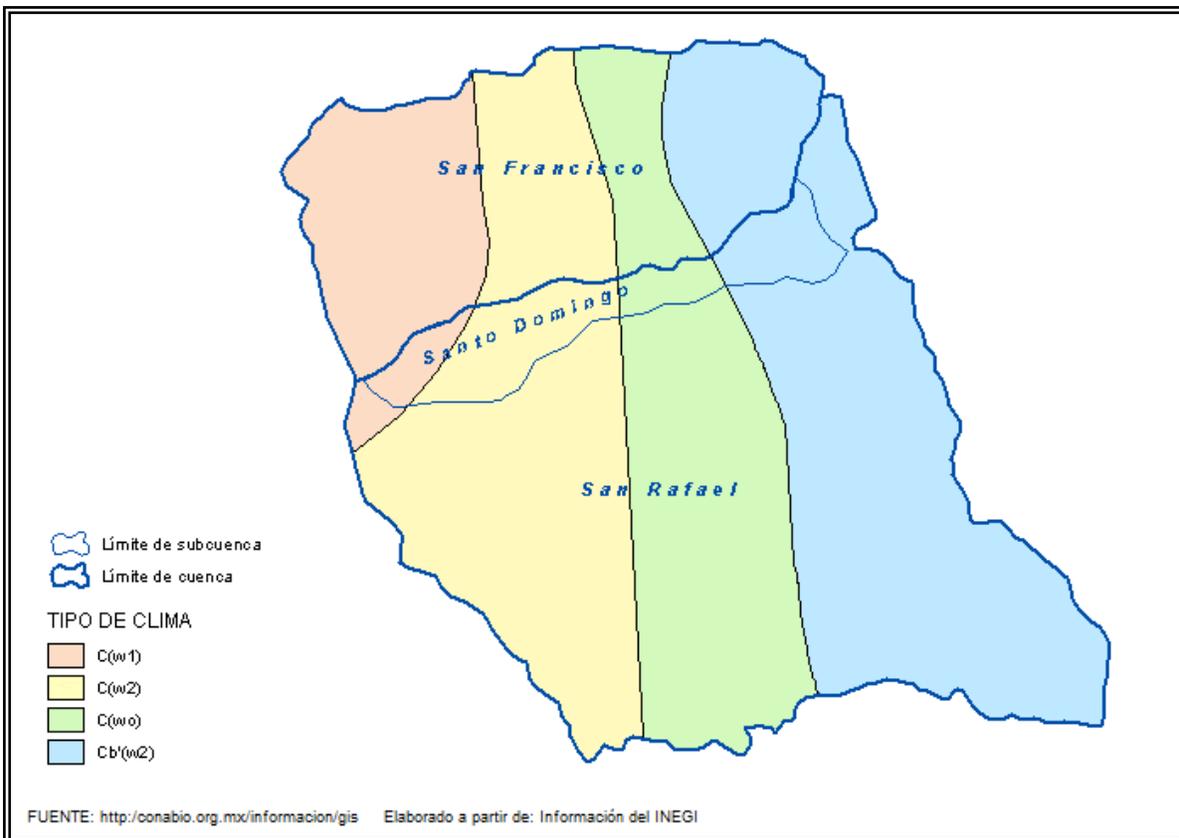


Figura 1.3. Tipos de clima en la zona de estudio

### 1.2.2. Topografía

De acuerdo con el INEGI (2001), el área de estudio se encuentra dentro del Eje Neovolcánico. En el oriente se tiene una zona montañosa conocida como Sierra Nevada la cual baja hacia el poniente, hasta el Valle de Chalco. Situación que reduce la altitud desde los 3800-4000 metros sobre el nivel del mar (msnm), en el extremo oriente, hasta los 2400 msnm, en la planicie ubicada en la zona poniente de la cuenca, como se muestra en la figura 1.4.

La Sierra Nevada, también conocida como Poyauhtécatl, se ubica en el extremo este del estado de México y tiene una orientación norte-sur. Entre sus cumbres más importantes se encuentran el cerro Telapón, que se eleva 4060 msnm, y el conjunto volcánico Iztaccíhuatl, con 5220 m de altitud máxima.

En el límite noreste se ubican los cerros Yeloxóchitl y Telapón; sobre esa cadena montañosa, hacia el sur, están los cerros Papagayo, La Trampa, Tlacachelo y Xacaltepec, entre los cuales se forman numerosas cañadas. En el extremo sureste se levanta el Volcán Iztaccíhuatl, el cual constituye en punto más alto de la cuenca.

Al suroeste se encuentran los cerros Tapetate, Tenayo y La Joya.

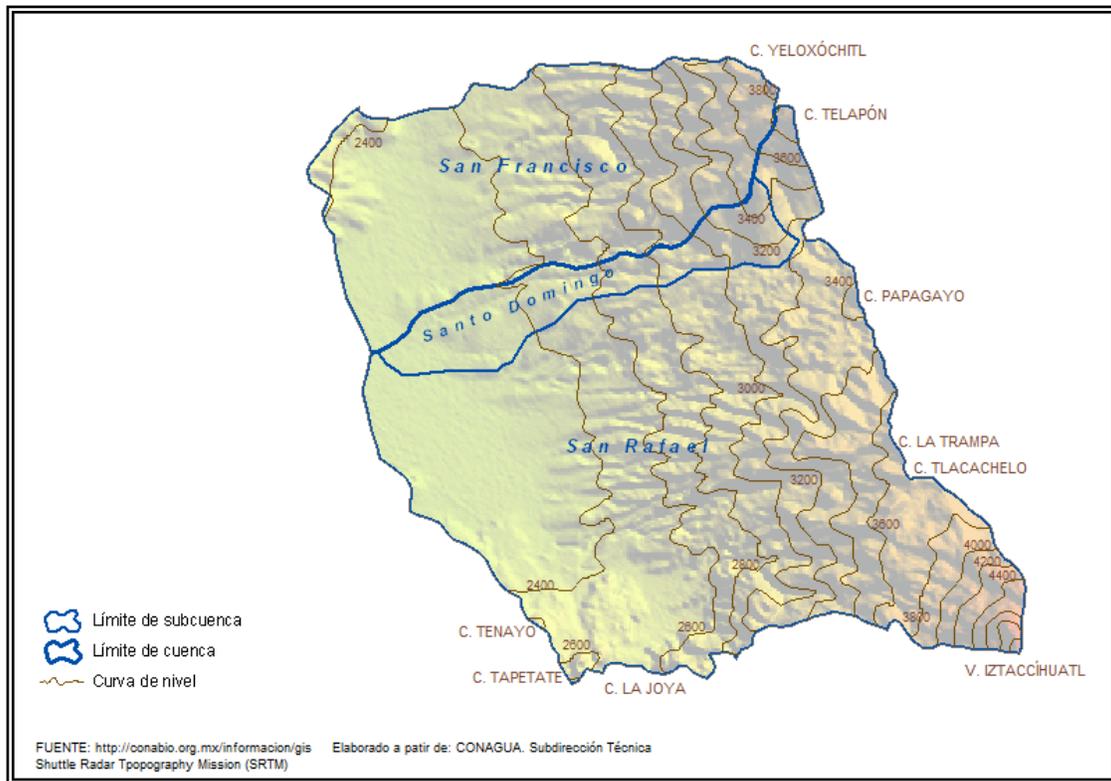


Figura 1.4. Relieve y curvas de nivel en la zona de estudio

1.2.3. Tipo y uso de suelo

El INEGI (2001) establece que, geológicamente, la zona se compone principalmente de rocas ígneas, como lavas, brechas y tobas, principalmente basálticas y andesíticas, cuya permeabilidad es de media a alta (localizada). Al poniente, en la zona de la confluencia de los ríos de La Compañía, Santo Domingo, San Rafael y San Francisco, una pequeña área se compone de gravas, arenas, limos y depósitos aluviales y lacustres, cuya permeabilidad es de media a alta (generalizada).

En la cuenca se presentan diferentes suelos, determinados en gran parte por el relieve y la altitud. De esta forma, al noreste, en la Sierra Nevada, se encuentran diferentes tipos de cambisoles (éutrico y húmico); al sureste, en las laderas del volcán Iztaccíhuatl, regosol dístico; y en el oriente, en las planicies, se presentan feozem háplico, fluvisol éutrico y regosol éutrico, respectivamente, de norte a sur (figura 1.5).

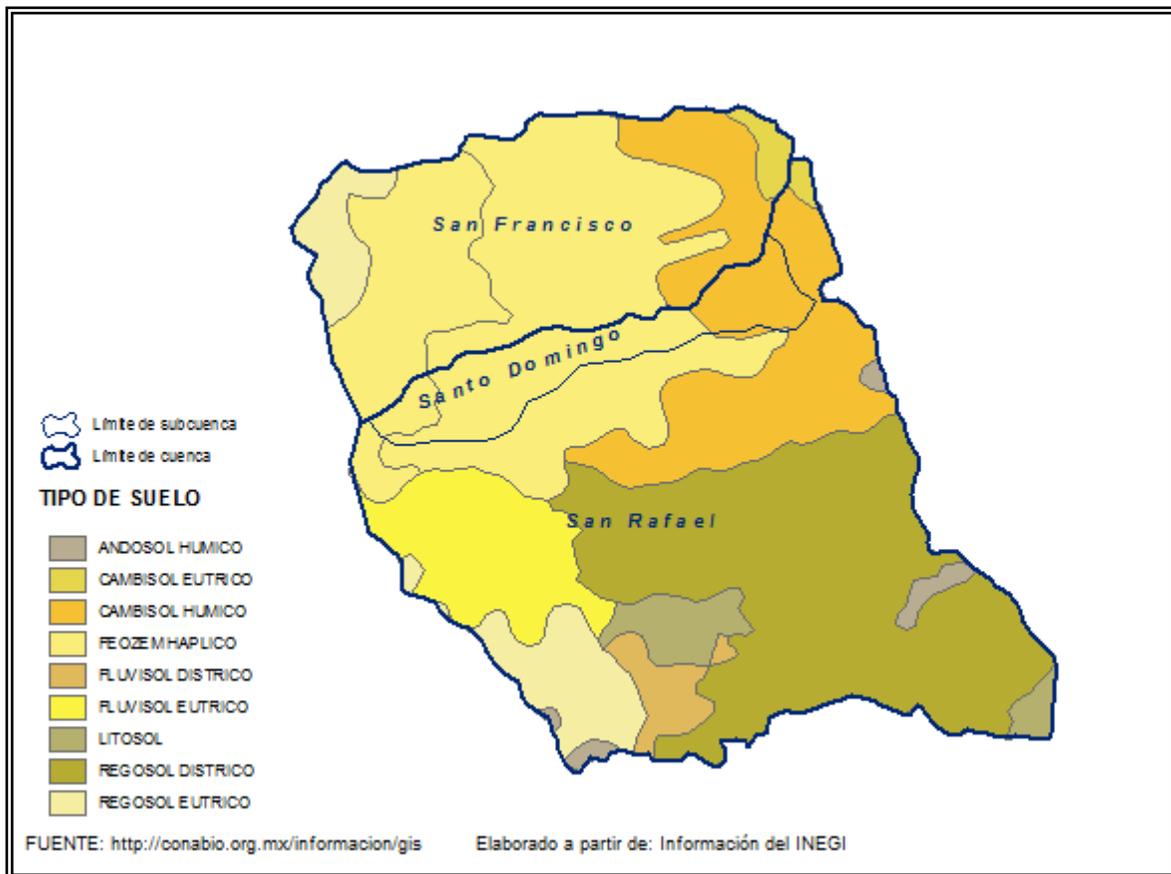


Figura 1.5. Tipo de suelo de la zona de estudio

Los cambisoles son suelos jóvenes y poco desarrollados, su formación se debe al clima, pues son característicos de zonas de transición. El cambisol eútrico, puede tener un gran contenido de nutrientes, por lo que su fertilidad para uso agrícola va de moderada a alta, a diferencia del cambisol húmico, que generalmente es ácido y pobre en nutrientes. Los regosoles suelen ser suelos poco desarrollados cuya formación depende de la litología, pues se derivan de la roca que les subyace. El regosol dístrico es ácido e infértil para uso agrícola, mientras que el regosol étrico posee una fertilidad moderada. Los feozems se caracterizan por ser ricos en materia orgánica y, por lo tanto, en nutrientes. Se forman principalmente por el intemperismo de las rocas ígneas extrusivas. El feozem háplico es muy fértil para uso agrícola. La formación de los fluvisoles se debe al acarreo de materiales por los escurrimientos que bajan desde las partes altas de las sierras, por lo que suelen estar constituidos por capas alternadas de arena, arcilla y grava. El fluvisol étrico es fértil para uso agrícola.

En las cercanías a la cima del Iztaccíhuatl se tienen praderas de alta montaña, seguidas por bosques de pino, los cuales ocupan toda la zona montañosa, convirtiéndose en bosques de encino conforme se desciende hacia la planicie. También existe una franja de bosque de oyamel, al sur de la cuenca del río Santo Domingo, entre los bosques de pino y de encino. En la planicie predomina la agricultura de temporal; sólo al poniente, en la confluencia de los ríos, se tiene una zona de agricultura de riego.

### **1.3. Hidrología superficial**

En esta sección, se presentan los conceptos básicos de hidrología que serán utilizados en el desarrollo del presente trabajo, correspondientes a la definición y obtención de las principales características fisiográficas de una cuenca hidrológica, las cuales son: área de la cuenca, longitud y pendiente del cauce principal.

A continuación se presentan las características fisiográficas de las cuencas de los ríos San Francisco y Santo Domingo, así como sus diferencias con la cuenca del río San Rafael.

### 1.3.1. Conceptos básicos de hidrología superficial

En el estudio de la hidrología de una región, se tiene como unidad básica a la *cuenca hidrológica*<sup>1</sup>, dado que sus características físicas influyen significativamente en su respuesta hidrológica a la precipitación, es decir, en el escurrimiento. Tales características se clasifican en dos tipos: aquellas que afectan el volumen de escurrimiento y aquellas que afectan la velocidad de respuesta de la cuenca.

El volumen de escurrimiento de una cuenca es función del área de la cuenca, la cual se delimita por el *parteaguas*, línea imaginaria que se compone de los puntos de mayor nivel topográfico (Aparicio, 2007; Springall, 1970).

En el caso de las cuencas exorreicas, se denomina *cauce principal* a aquel que interseca al parteaguas en el punto de salida de la cuenca, las otras corrientes formadas en la cuenca son corrientes tributarias, donde a cada una le corresponde un área de aportación, denominada *cuenca tributaria* o *subcuenca*, definida por un parteaguas interior (Aparicio, 2007, Springall, 1970).

Cuando se presenta una lluvia en una cuenca, no toda el agua escurre superficialmente, una parte es interceptada por la vegetación, retenida en depresiones del terreno o se infiltra hasta satisfacer la capacidad del terreno para humedecerse, después de lo cual alimenta los acuíferos (Domínguez, et. al.). Por lo tanto, el tipo y uso de suelo son características que condicionan el volumen de escurrimiento de una cuenca.

Entre las características que condicionan la velocidad de respuesta de la cuenca resalta el arreglo de sus corrientes naturales, pues determina la eficiencia del sistema de drenaje. Este arreglo está relacionado con la *longitud de los cauces tributarios*. En zonas de topografía accidentada, lo más probable es que existan muchos tributarios pequeños. En zonas poco accidentadas y de suelos permeables, los tributarios se presentan en menor cantidad, pero con mayor longitud. Al medir la longitud de una corriente, se mide sobre segmentos lineales trazados sobre sus trayectorias, sin considerar los meandros (Springall, 1970).

---

<sup>1</sup> Una cuenca superficial es una zona de la superficie terrestre que, si fuera impermeable, drenaría el agua de lluvia que recibe por el sistema de corrientes hacia un sólo punto de salida (Aparicio, 2007).

De esta manera, la topografía de la cuenca se haya íntimamente relacionada con la red de drenaje. Su relevancia en el estudio de una cuenca aumenta si ésta es pequeña, pues afecta al escurrimiento de forma más notoria que en las cuencas grandes.

Para representar fácilmente las características de la topografía, mediante un número, se utiliza la *pendiente del cauce principal*, para la cual se grafican las elevaciones respecto a las distancias horizontales, medidas sobre el cauce. Por lo general, al representar un cauce de esta manera, se obtiene una gráfica cóncava hacia arriba, como se muestra en la figura 1.6 (Linsley, 1988; Springall, 1970).

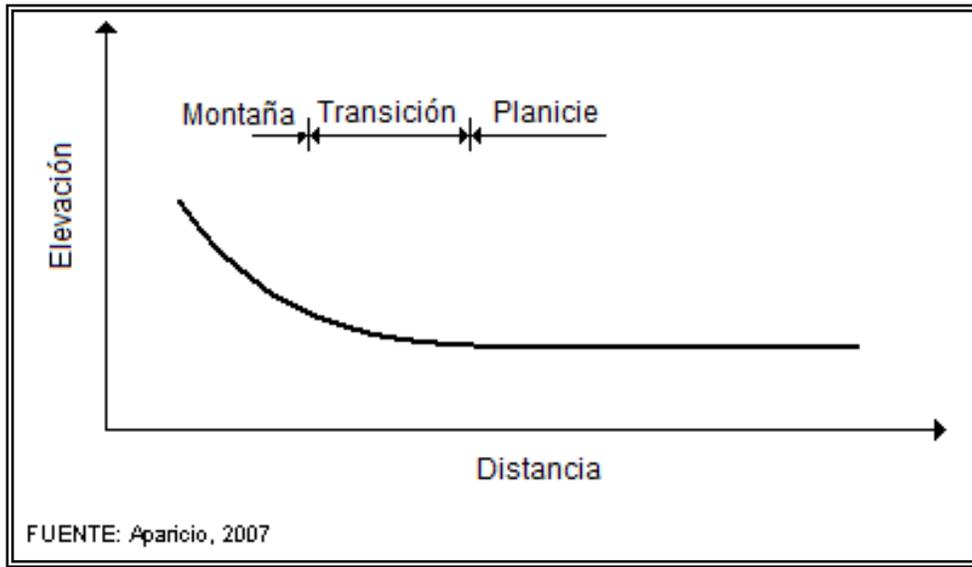


Figura 1.6. Gráfica usual de la pendiente de un cauce natural

Aparicio (2007) y Springall indican que la pendiente de un tramo del cauce, puede calcularse simplemente como la diferencia entre las elevaciones de los extremos de dicho tramo, dividida por su longitud horizontal:

$$S = \frac{H}{L} \quad (\text{ec. 1.1})$$

Donde:

S, pendiente del tramo del cauce

H, diferencia entre las elevaciones de los extremos del tramo

L, longitud horizontal del tramo

No obstante, entre mayor sea la longitud del tramo considerado, menor será la precisión obtenida de la expresión anterior, pues no considera los cambios de pendiente que se presentan en los tramos intermedios.

Un método más próximo a la realidad, es el empleo de la ecuación de Taylor y Schwarz (1952), la cual considera al cauce como un conjunto de canales de pendiente uniforme, donde el tiempo de recorrido del flujo es igual al del cauce principal. La ecuación propuesta por Taylor y Schwarz es:

$$S = \left[ \frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (\text{ec. 1.2})$$

Donde:

$S$ , pendiente media del tramo en estudio

$m$ , número de segmentos iguales en los que se divide el tramo en estudio para la determinación de su pendiente

$S_1, S_2, \dots, S_m$  pendiente de cada segmento que compone el tramo en estudio

### 1.3.2. Características fisiográficas de la cuenca del río San Francisco

La cuenca del río San Francisco abarca un área de 131.42 km<sup>2</sup>. Su cauce principal tiene una longitud de 22.80 km y una pendiente de 0.02234.

A través de su cauce, que corre en dirección noreste-suroeste, desembocan en el río San Francisco diversas corrientes tributarias, entre las que destacan, de norte a sur, los arroyos La Cruz, Texcahuey, Las Jícaras, El Olivar y Zoquiapan. En cada una de estas corrientes se planea construir una presa de regulación, por lo que en la tabla 1.1 se muestran las principales características fisiográficas de estas subcuencas, las cuales se ilustran en la figura 1.7.

Tabla 1.1. Características fisiográficas de las subcuencas del río San Francisco.

SUBCUENCA	AREA	PENDIENTE	LONGITUD
	( km <sup>2</sup> )		( km )
La Cruz	17.3	0.07875	13.95
Texcahuey	21.53	0.06799	8.54
Las Jícaras	11.78	0.07043	12.49
El Olivar	6.05	0.08047	7.00
Zoquiapan	19.68	0.07930	13.19

### 1.3.3. Características fisiográficas de la cuenca del río Santo Domingo

El río Santo Domingo posee una cuenca tributaria de 33.42 km<sup>2</sup>. El cauce principal recorre 18.75 km, con una pendiente de 0.05435.

En la cañada La Pistola, corriendo de forma casi paralela al sur del cauce principal, se forma su principal tributario, el arroyo Xaltocan que desemboca en el río Santo Domingo, 350 m antes de la confluencia entre éste y el río San Rafael.

Tanto en el arroyo Xaltocan como en el cauce del río Santo Domingo, aguas arriba de la confluencia entre ambos, se planea construir una presa de regulación. Las características fisiográficas de las cuencas de aportación de ambas cuencas se muestran en la tabla 1.2.

En la figura 1.7 se muestra la localización de las presas y su cuenca de aportación.

Tabla 1.2. Características fisiográficas de las subcuencas del río Santo Domingo.

SUBCUENCA	AREA	PENDIENTE	LONGITUD
	( km <sup>2</sup> )		( km )
Santo Domingo	18.00	0.06079	15.53
A. Xaltocan	6.28	0.05012	6.01

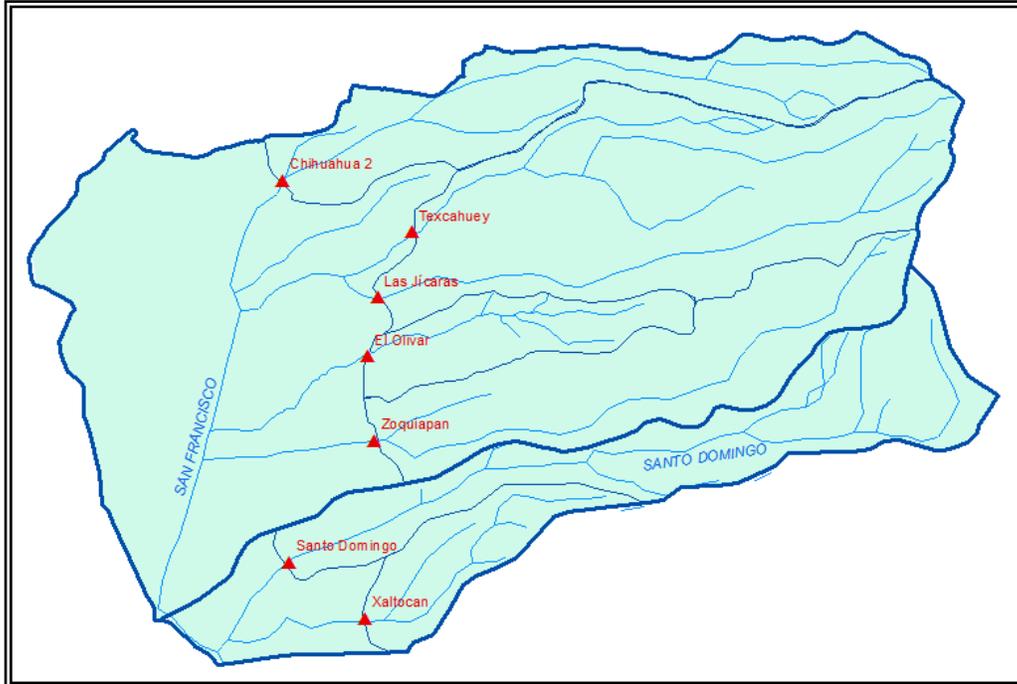


Figura 1.7. Localización de las presas que se planea construir

#### 1.3.4. Diferencias y similitudes entre las cuencas pertenecientes a la zona de estudio

En el estudio elaborado por Domínguez, et. al. (2000), se observó que el comportamiento de la cuenca del río San Rafael es por completo distinto al de la subcuenca Santo Domingo, pues el primero no presenta picos importantes en sus hidrogramas, mientras que el segundo sí. En otras palabras, la respuesta a la precipitación de la cuenca del río Santo Domingo es muy distinta a la del río San Rafael, se asemeja más a la de la cuenca del río San Francisco. Lo anterior hace necesario el análisis de la subcuenca Santo Domingo independiente al de la cuenca del río San Rafael.

La similitud entre la cuenca del San Francisco y la del Santo Domingo se debe a diversos factores determinados por su ubicación. La cercanía del río Santo Domingo a la cuenca del San Francisco, ha hecho parecidas algunas de sus características físicas, como la topografía (ver Figura 1.4) y el tipo de suelo (ver figura 1.5), cuya influencia es mayor entre menor sea el área de la cuenca. Siendo la subcuenca del río Santo Domingo, la menor de las subcuencas que aportan al río San Rafael, con un área apenas mayor a 30 km<sup>2</sup>, se explica que su comportamiento se parezca más al de la cuenca del río San Francisco que al de la cuenca del río San Rafael.

#### 1.4. Problemática de la zona de estudio

Con base en el breve análisis de la problemática urbana que afecta a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) –en especial, en los municipios donde se encuentran las cuencas en estudio– y de la relación entre esta problemática y las inundaciones ocurridas en los municipios aledaños al río de La Compañía, se expone el motivo de la realización del presente trabajo, los objetivos que se desean alcanzar y el planteamiento de la hipótesis y la metodología a desarrollar.

##### 1.4.1. Zona Metropolitana del Valle de México

Como todas las grandes metrópolis, la Ciudad de México enfrenta una grave problemática urbana que se complica día a día. La sobrepoblación, los hundimientos del suelo, la escasez de agua potable, la infraestructura insuficiente y el deterioro ecológico, son los principales problemas que afectan a la ciudad. Sin embargo, ésta continúa expandiéndose hacia los estados de México e Hidalgo, cuyos municipios se integran paulatinamente a la ZMVM.

La evidencia reciente muestra que la expansión metropolitana está adquiriendo una forma diferente a la que se presentó hasta la década de los 60's. El comportamiento demográfico de la ZMVM en las últimas décadas se ha caracterizado por una caída en el crecimiento urbano de la ciudad central y por un fuerte incremento periférico (Aguilar, 2002). Algunos municipios metropolitanos tienen una tasa de crecimiento mayor a cinco veces la tasa de crecimiento promedio de toda la mega-ciudad, como es el caso de Chimalhuacán, Ixtapaluca y La Paz.

Hasta el 2000, año en el que se levantó el último Censo general de población y vivienda, la ZMVM contaba con 18' 396, 677 habitantes, de los cuales 8' 605, 239 vivían dentro de los límites del Distrito Federal y 9' 791, 438 en los municipios conurbados; 58 del estado de México y uno del estado de Hidalgo. De estos 58, los municipios de Nezahualcóyotl, La Paz, Chimalhuacán, Valle de Chalco Solidaridad, Ixtapaluca, Chalco y Tlalmanalco, contaban con una población de 2' 810, 948 habitantes, es decir, poco más de la cuarta parte de la población total de los municipios conurbados (INEGI, 2000). En estos últimos municipios se ubican las cuencas de los ríos de La Compañía, San Francisco y Santo Domingo.

El crecimiento presentado en las cuencas en estudio se debió a que en el periodo 1970-1990, se registraron las tasas más altas de crecimiento de la ZMVM, particularmente en la frontera de la zona construida y en una amplia franja hacia el noreste; sobre todo a lo largo de las principales carreteras hacia Puebla y Pachuca. (Aguilar, 2002). En otras palabras, la expansión de la ciudad se ha dado hacia el norte y el oriente de ésta, debido a que las condiciones han sido más propicias en estas zonas, pues el relieve es más regular y en ellas se ha asentado la mayor parte de la industria.

Para comprender mejor la problemática de la zona de estudio, la figura 1.8 muestra una imagen de la zona de estudio, donde se puede observar el área urbanizada, que abarca casi toda la superficie de la cuenca del Río de la Compañía, así como las partes bajas de las cuencas San Francisco y Santo Domingo.

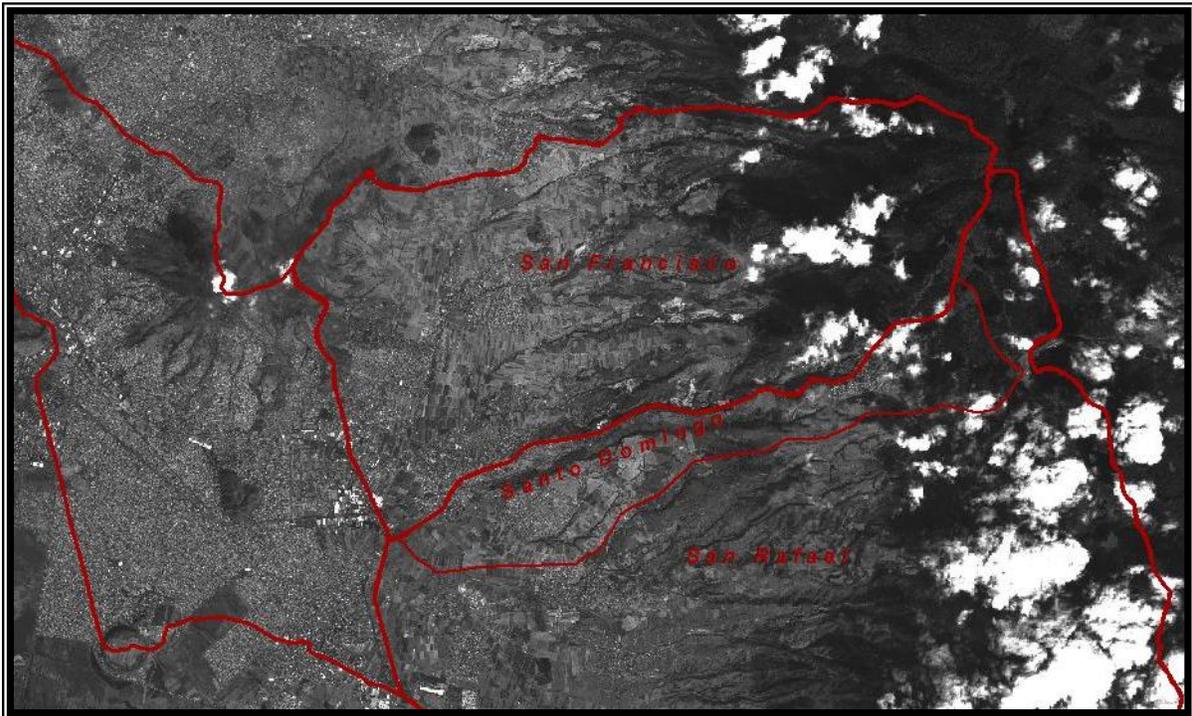


Figura 1.8. Imagen satelital de la zona de estudio

El crecimiento de Chalco –especializado en la producción de forrajes y productos lácteos hasta la década de los ‘70– tras la crisis agropecuaria, dio paso a la creación de asentamientos irregulares, por la cercanía al Distrito Federal y por el bajo costo del suelo. Esto convirtió al municipio en un polo de atracción de migrantes de escasos recursos procedentes de todo el país, no sólo del Distrito Federal. De una población de 22, 056

habitantes en 1950, con una tasa de crecimiento constante, el crecimiento poblacional se aceleró notablemente para 1980, presentando una tasa de crecimiento del 6.35% y una población de 78, 393 habitantes. Incremento que se triplicó para la década de los 90's. En 1994, se separó parte del municipio para formar el municipio Valle de Chalco Solidaridad, lo que modificó la estructura de crecimiento y distribución de la población en el municipio de Chalco, aunque sin interrumpir la corriente migratoria que había comenzado desde los años '70 (Cruz, 2007).

Otro ejemplo de la acelerada dinámica de crecimiento poblacional que ha experimentado el oriente de la ZMVM, es la del municipio de Ixtapaluca, derivada de la cantidad de conjuntos de vivienda construidos entre 1992 y 2002. Este crecimiento es atribuible, en parte, a las ventajas de localización que presentaba el municipio en términos de suelo urbanizable, así como de las áreas de suelo privadas que poseía, lo cual genera el crecimiento de asentamientos humanos irregulares, muchos de ellos ubicados en los límites de algunas de las unidades habitacionales. Por lo anterior, Ixtapaluca duplicó su tasa de crecimiento al pasar de 5.62% a 11.6%, durante el periodo 1990-2000 (Maya y Cervantes, 2005).

Procesos similares a los ocurridos en los municipios de Chalco e Ixtapaluca se presentaron en los municipios aledaños, originando en tan sólo tres décadas zonas urbanas altamente pobladas, donde el cambio de uso de suelo fue dramático, abarcando grandes extensiones y, en consecuencia, la transformación del comportamiento hidrológico de las cuencas de los ríos San Francisco y Santo Domingo también fue severa.

#### *1.4.2. Inundaciones*

En el transcurso de la historia, el desarrollo de los asentamientos humanos ha estado ligado siempre a la disponibilidad de agua, pues es un recurso indispensable para prácticamente todas las actividades humanas. Sin embargo, la falta de éste recurso es tan perjudicial como su exceso.

A nivel mundial, ningún otro desastre ha aumentado más que las inundaciones. De acuerdo con datos de la Cruz Roja Internacional, durante el periodo 1914-2004, participó en la atención de más eventos vinculados a inundaciones que a cualquier otro tipo de desastre (Salas y Jiménez, 2004).

No obstante, las inundaciones siempre se han presentado, formando parte de la naturaleza del medio ambiente, dado que cada río poseía una planicie de inundación, la cual invadía en cada temporada de lluvias.

Diversos factores han cambiado la percepción de la población hacia las inundaciones, a la vez que han aumentado el riesgo por inundación a la que ésta se encuentra expuesta. Entre los factores se encuentra el hecho de que la gente solía adaptarse al medio en el que vivía, estableciéndose cerca de los ríos y otros cuerpos de agua para aprovechar el recurso, pero procurando hacerlo en un lugar seguro, que no fuera invadido por el agua. En la actualidad, debido al desarrollo económico que suele estar aunado a las zonas aledañas a los ríos, la gente se establece en zonas de alta vulnerabilidad, esperando que después de su instalación, se generen las obras de infraestructura necesaria para salvaguardar su seguridad.

La urbanización y aumento de la población en las zonas propensas a peligros, además de aumentar su exposición a ellos, origina un incremento en el uso del agua, la cual posteriormente debe ser desalojada en forma adecuada para evitar catástrofes. El problema es que frecuentemente el drenaje pluvial acaba funcionando como drenaje sanitario, por lo que es probable que en la temporada de lluvias el drenaje no tenga la capacidad requerida para desalojar tanto aguas pluviales como residuales.

Otro factor que contribuye al agravamiento de los efectos de las inundaciones, radica en la gestión de los recursos hídricos, la cual suele ligarse con frecuencia a la división política de una región y no al límite natural de las cuencas hidrológicas, disminuyendo la eficiencia en el manejo y administración del agua.

Una parte de la zona de estudio se encuentra en un área que pertenecía al sistema lacustre del Valle de México, pues se encuentra en donde se ubicaba el lago de Chalco. Esta zona corresponde a una planicie que se inundaba de forma natural al recibir una fracción del agua de deshielo del Volcán Iztaccíhuatl y los escurrimientos de la cuenca aportadora. En la actualidad, aunque los lagos han sido desecados, la zona sufre frecuentes inundaciones, pues el agua reconoce su planicie de inundación.

Por otro lado, en la confluencia de los ríos San Francisco y San Rafael, donde inicia el cauce del río de La Compañía, diversos factores han contribuido a que la capacidad del río de La Compañía sea insuficiente para drenar adecuadamente el caudal que recibe, entre estos factores se encuentran:

- Hundimiento de la Ciudad de México el cual modifica las pendientes de los elementos del Sistema de Drenaje, disminuyendo la capacidad de desalojo de agua.
- Movimientos de terreno, debidos al hundimiento del suelo, lo que generó agrietamientos y deformaciones en los bordos y en el fondo del río de La Compañía (Periodismo de ciencia y tecnología, 2000).
- Mantenimiento inadecuado del río de La Compañía, que tiene como consecuencia la presencia de azolves que disminuyen su capacidad hidráulica.
- Urbanización de las cuencas de los tributarios del río de La Compañía, lo que provoca un incremento del escurrimiento superficial asociado al uso de suelo, siendo mayor el escurrimiento en áreas urbanas y agrícolas.

Por las razones arriba expuestas, las inundaciones son un desastre común en los municipios aledaños al río de La Compañía (Nezahualcóyotl, Chalco, Ixtapaluca y Valle de Chalco), debido al desbordamiento del río ante avenidas extremas. Situación que se ha presentado en numerosas ocasiones provocando, incluso, que fallen en algunos tramos los bordos y el tablaestacado.

Tal es el caso de la inundación ocurrida en mayo de 2000, cuando las intensas lluvias generaron una avenida extraordinaria de  $42 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que se rebasó la capacidad de conducción del cauce y falló el bordo de la margen izquierda, inundando 80 hectáreas de la zona urbana de los municipios Valle de Chalco Solidaridad e Ixtapaluca (Periodismo de ciencia y tecnología, 2002).

#### *1.4.3. Motivo de la realización del presente trabajo*

Una de las prioridades en la planificación del desarrollo de una región, es disminuir el riesgo por inundación al que la población se encuentra expuesta, como parte de los objetivos generales de reducir la pobreza y mejorar la calidad de vida de los habitantes. Salas y Jiménez (2004), mencionan que en el caso de avenidas extraordinarias resulta difícil atenuar los gastos máximos y sólo se logra mediante la construcción de presas reguladoras.

La regulación de los escurrimientos permite disminuir los gastos máximos y aumentar los gastos mínimos en los ríos.

A pesar de las medidas ya tomadas para el control de las avenidas en el río de La Compañía, así como para evitar el desbordamiento del mismo, por la problemática descrita en las secciones anteriores, es necesario realizar obras de regulación adicionales. Por lo cual se ha considerado, como ya se mencionó con anterioridad, la construcción de 5 presas reguladoras en el cauce del río San Francisco y sus afluentes, y otras 2 presas reguladoras en el cauce del río Santo Domingo, con el fin de disminuir los gastos máximos que se puedan presentar en un futuro en el río de La Compañía.

La construcción de infraestructura de recursos hídricos requiere una evaluación de la variabilidad hidrológica presente y una proyección confiable de la misma (CONAGUA, 2006). Para ello, previo al diseño de una presa se requieren estudios hidrológicos para determinar las tormentas de diseño de la cuenca aportadora. Asimismo, es necesaria una estimación del escurrimiento que recibirá, considerando los principales factores que lo afectan.

El presente trabajo tiene como finalidad la determinación de las tormentas y las avenidas de diseño para las presas que se tiene pensado construir en las cuencas San Francisco y Santo Domingo.

#### 1.4.4. *Objetivos*

*Objetivo general.* Determinar las tormentas y las avenidas de diseño para las presas que se tiene pensado construir en las cuencas de los ríos San Francisco y Santo Domingo, como parte de los estudios hidrológicos previos al diseño de obras de regulación para ambos ríos.

#### *Objetivos específicos:*

- Describir las características generales y fisiográficas de las cuencas de los ríos San Francisco y Santo Domingo.
- Analizar la información de precipitación recopilada por las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en la periferia de las cuencas.
- Analizar los gastos medidos por estaciones hidrométricas ubicadas en los cauces de los ríos San Francisco y Santo Domingo, y en cuencas cercanas de comportamiento hidrológico similar.

- Estimar los coeficientes de escurrimiento de ambas cuencas.
- Definir una metodología para la determinación de las tormentas y avenidas de diseño de las cuencas San Francisco y Santo Domingo.
- Revisar los factores de ajuste por periodo de retorno, de acuerdo con la información actualizada de las estaciones climatológicas.
- Calcular los caudales máximos asociados a distintos periodos de retorno para las cuencas de los ríos San Francisco y Santo Domingo.

#### 1.4.5. Hipótesis

La determinación de las tormentas y avenidas de diseño, como cualquier estudio hidrológico, requiere de la mayor cantidad de información posible, la cual debe ser además confiable y actualizada, y en función de ella se determinará la metodología a seguir.

El presente trabajo emplea datos determinados en estudios anteriores; sin embargo, al realizar el análisis de las características fisiográficas de las cuencas de los ríos San Francisco y Santo Domingo, y de las lluvias ocurridas en ellas, incluyendo los datos registrados en fechas posteriores a los estudios realizados, se obtendrá una mejor estimación del escurrimiento.