



Universidad Nacional Autónoma de México

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ACATLAN"

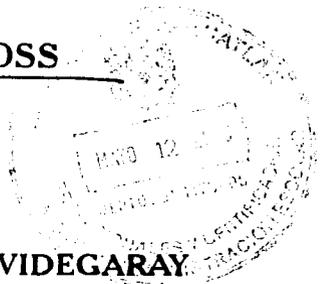
"MODELO DE SIMULACIÓN: SISTEMA DE
DRENAJE- CRECIMIENTO POBLACIONAL"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
LIC. EN MATEMÁTICAS APLICADAS Y COMPUTACIÓN

PRESENTA:
JORGE ALARCÓN COSS

ASESOR:
MARÍA DEL CARMEN GONZÁLEZ VIDEGARAY



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A

MAYO 2003





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Deseo dar las gracias a todos aquellos que dedican parte de su día en nuestra enseñanza y en nuestro proceso de formación y a todos aquellos que comparten su experiencia con nosotros y nos brindan su cálida amistad.

*Al ser supremo,
A mi familia.
A mi madrina Vivian Esquivó,
A mis profesores y amistades,
A mi asesora María del Carmen González*

Muy en especial doy las gracias por su colaboración en la realización de este trabajo

*Al Dr. Michel Rosengaus
Director del Servicio Meteorológico Nacional*

*Al Ing. Raymundo Gabino Noriega
Gerente Técnico de Gerencia Regional de Aguas del Valle de México*

*Al Ingeniero Benito Ulloa
Director de Operación y Construcción de Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento de Tultitlán*

*A Rene Uribe
Director de Agua Potable de Tultepec*

*A Mario Alberto Suárez
Subdirector de Agua Potable de Tultepec*

A las autoridades y al personal del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento de Coacalco

*Al Director C. Sergio Mejía
Al Gerente Operativo Ing. Arturo Sánchez
Al Arq. Dagoberto Mendoza
Al Jefe de Estaciones Ing. Edmundo Vega*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

*Para: Jorge, María, Dasel, y José todo mi amor
Para: Susana, Leoncio y Erick mi eterno recuerdo*

ÍNDICE

Introducción.....	3
Definición del problema y justificación de estudio, delimitación y objetivos del estudio, planteamiento científico del problema, formulación de hipótesis	4
CAPITULO I Nociones preliminares	
I.1 Ayuntamiento de Coacalco de Felipe de Berriozabal.....	6
I.2 Dinámica poblacional.....	12
I.3 Sistema de drenaje.....	16
I.4 Series de tiempo.....	24
CAPITULO II Modelo de simulación: sistema de drenaje - crecimiento poblacional	
II.1 Preliminares. Metodología en la construcción del modelo.....	35
II.2 Conceptualización del modelo.....	36
II.3 Formulación del modelo.....	46
CAPITULO III Simulaciones y validación del modelo	
III.1 Simulaciones.....	60
III.2 Validación.....	86
Conclusiones.....	93
Bibliografía.....	97
Anexo.....	98

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad analizar la interacción existente entre el crecimiento poblacional y el sistema de drenaje, con el fin de simular posibles escenarios a través de un modelo matemático, que sustente la toma de decisiones del área en estudio: el "Ayuntamiento de Coacalco de Felipe de Berriozábal" que se ubica en el Estado de México. Para ello, se analiza el caudal de las áreas tributarias sobre el Canal Cartagena en la Jurisdicción de Coacalco, y además los aforos procedentes de los municipios colindantes: Tultitlán y Tultepec.

El sistema de drenaje del municipio de Coacalco se compone en la actualidad de diez plantas de bombeo o cárcamos, en donde se evacuan las aguas residuales y pluviales de la comunidad, también se compone de cuatro afluentes naturales o barrancas que desalojan sus aguas hacia el Canal Cartagena, el cual atraviesa al municipio en dirección de este a oeste.

Para analizar la interacción existente entre el crecimiento poblacional y el sistema de drenaje y también para efectos de representación del sistema se desarrolla el modelo de simulación en el que se considera cada uno de los cárcamos y los afluentes como subsistemas a las que se denominan áreas tributarias.

El estudio se estructura en tres apartados que a continuación se presentan:

Nociones preliminares comprende las características geográficas, ambientales y socioeconómicas de la región en estudio que inciden en el sistema, así como las variables dinámicas poblacionales que interactúan con el sistema. Se presenta la estructura general del sistema de drenaje del ayuntamiento de Coacalco. Se describe la metodología de series de tiempo, con el fin de analizar la tendencia actual de las precipitaciones pluviales y así pronosticar el aforo pluvial del área en estudio.

Modelo de simulación: Sistema de drenaje – crecimiento poblacional en este apartado se identifican y analizan las variables que interactúan sobre el sistema, se formula el diagrama causal y de Forrester de las variables, se formulan las ecuaciones de las variables. Se representa la estructura del sistema de drenaje a través de un modelo de simulación que se basa en la metodología de Dinámica de Sistemas y el modelo se desarrolla en un entorno gráfico computacional que permite generar simulaciones.

Simulaciones y validación en este capítulo se generan y analizan las simulaciones, así como posibles escenarios que pueden presentarse o acontecer en las áreas tributarias, los periodos en análisis comprenden de enero de 2002 a junio de 2003 para el primer periodo y del año 2002 al 2022 para el segundo. Las simulaciones permiten estimar la tendencia poblacional, los aforos pluviales y residuales, el caudal de agua potable que se requiere para satisfacer la demanda. Se proporcionan los elementos que validan los pronósticos del modelo al compararse con los datos históricos de los aforos y al recabar información de personas expertas en el tema, lo que permite validar el modelo y con ello sustentar la toma de decisiones.

Definición del problema y justificación de estudio

De acuerdo a la tendencia de crecimiento poblacional observada en México y específicamente en Coacalco, se requiere de un estudio que analice los efectos poblacionales sobre el sistema de drenaje a fin de considerar la disponibilidad de los recursos financieros, humanos y materiales que se requieran para sustentar la toma de decisiones, y satisfacer así los requerimientos del sistema de drenaje.

Delimitación y objetivos del estudio

- *Área de estudio:* Áreas tributarias que aforan al Canal Cartagena Coacalco, Tultitlán, Tultepec.
- *Periodo de estudio:* Enero de 2002 a junio de 2003 (a corto plazo)
Año del 2002 al 2022 (a largo plazo)
- *Objetivo general:* Analizar la interacción existente entre el crecimiento poblacional y el sistema de drenaje, con el propósito de simular posibles escenarios a través de un modelo matemático, que sustente la toma de decisiones.
- *Objetivos específicos:*
 - Identificar y analizar las variables que interactúan sobre el sistema de drenaje
 - Proporcionar elementos teóricos que fundamenten el desarrollo del modelo.
 - Suministrar elementos que validen los pronósticos para fundamentar la toma de decisiones.

Planteamiento científico del problema

¿Cómo interactúa el crecimiento de la población y el sistema de drenaje?

Formulación de hipótesis

El crecimiento poblacional interactúa con el sistema de drenaje a través de la relación existente entre el consumo de agua que requiere la población para satisfacer sus necesidades, a lo largo del tiempo y de su remoción al sistema de alcantarillado. Por lo cual, es posible mediante un modelo matemático, establecer las relaciones de causas y efectos que permitan analizar la interacción entre la población y el sistema de drenaje.

CAPITULO I

NOCIONES PRELIMINARES

I.1 Ayuntamiento de Coacalco de Felipe de Berriozábal

I.2 Dinámica poblacional

I.3 Sistema de drenaje

I.4 Series de tiempo

1.1. AYUNTAMIENTO DE COACALCO DE FELIPE DE BERRIOZÁBAL

El presente apartado contempla los aspectos ambientales y socioeconómicos del área en estudio, en donde se centra la investigación, el ayuntamiento de Coacalco.

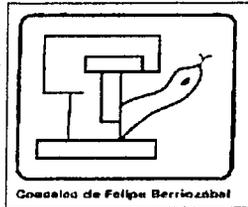
El municipio se funda por decreto del Congreso del Estado de México del 12 de febrero de 1862.

Orígenes de la palabra Coacalco

Las raíces de la palabra¹ son de origen náhuatl:

Coa de *Coatl* serpiente
Cal de *Cali* casa
Co Locativo En

"En la casa de la serpiente"



Localización y extensión

Coacalco es un municipio conurbado a la Ciudad de México, se localiza en la parte norte central del Estado de México, limita al norte con Tultitlán, al sur con Ecatepec y el Distrito Federal, al oriente con Ecatepec y al poniente con Tultitlán.



Mapa de localización del ayuntamiento

¹ La palabra *Coacalco* data del año 1320, y es mencionado en los "Anales de Cuauhtitlán", en alusión que una de las aristas que conduce a la cumbre de la Sierra de Guadalupe tiene forma ondulada y dicha forma semeja una gigantesca serpiente ascendente cuando el sol es rasante por la mañana da la impresión de que la cola de la serpiente está en la parte baja y la cabeza la forman las peñas.

Fuente de información: <http://www.coacalco.com.mx/secc/cultura/index.html> (consultado el día 6 de enero de 2003)

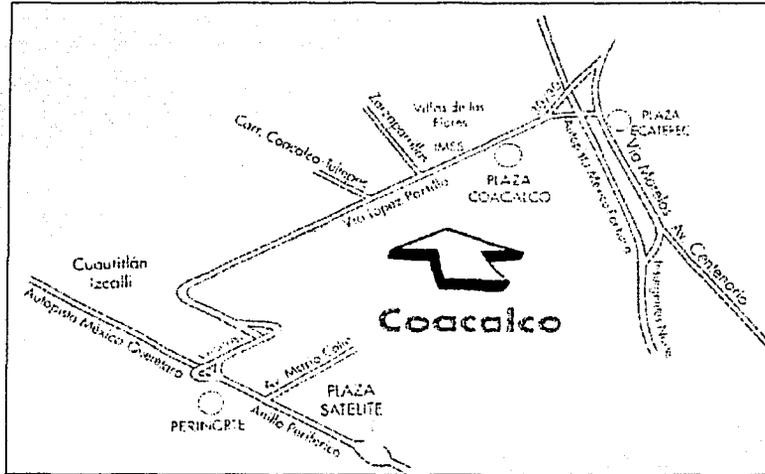
En la siguiente tabla se indican las coordenadas geograficas del ayuntamiento.

Coordenadas extremas de localizacion de Coacalco	Minima	Maxima
Latitud Norte (Con respecto al Ecuador)	19°05'16"	19°39'47"
Longitud Oeste (Con respecto al meridiano de Greenwich)	99°04'18"	99°07'44"

La extensión municipal es de 35.499 Kilómetros cuadrados, que representa el 0.16% de la superficie del Estado de México.

Vías de acceso

El acceso al municipio, se realiza a través de la Vía José López Portillo, como se muestra en el siguiente mapa.



Mapa de acceso al Ayuntamiento de Coacalco de Berriozabal

ASPECTOS AMBIENTALES²

En esta sección se analizan las características físico-geológicas del ayuntamiento y además los eventos naturales que inciden en el sistema de drenaje de Coacalco.

Relieve

El relieve y las características geológicas determinan la forma o manera en la que se drena sobre la superficie terrestre.

² La información de esta sección se obtuvo de las siguientes direcciones electrónicas:
www.edomexico.gob.mx/se/conding.htm (consultado el día 6 de enero de 2003)
www.coacalco.com.mx/secc/cultura/index.html (consultado el día 6 de enero de 2003)



La forma en que se drena puede ser gravitatoria como en las zonas accidentadas (montañosas, sierras), o por elevación como en los valles y/o en zonas relativamente bajas.

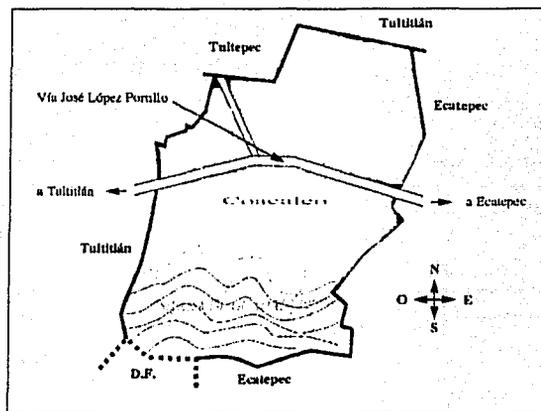
De acuerdo al relieve presente en el ayuntamiento pueden identificarse dos zonas:

- 1) En la zona norte, el relieve es plano con una altura promedio de 2,238 msnm.
- 2) En el sur, el relieve es accidentado, localizándose la Sierra de Guadalupe con una altitud cercana los 3,000 msnm.

Geología

La estructura geológica del valle es sedimentario, constituido esencialmente por aluviones (los aluviones se originaron por el acarreo pluvial de los sedimentos de las partes altas de la Sierra de Guadalupe. lo que formó también algunos lomeríos), de arenisca entremezclada con tobas volcánicas (la toba esta constituido primordialmente de fragmentos de ceniza y rocosos de 4 a 32 mm de diámetro), y el sustrato de la Sierra de Guadalupe, esta formada principalmente por roca de origen volcánico.

Debido al relieve volcánico que presentan los cerros y la sierra en los alrededores de la cuenca del Valle de México (la cuenca comprende la porción norte y este del Estado de México), el drenaje que se desarrolla en este tipo de relieve, se integra por un arreglo paralelo que drena en su totalidad hacia la cuenca.



Mapa geológico de Coacalco

Edafología

Las características del suelo y de las rocas determinan la impermeabilidad del suelo, un factor a considerar en el análisis de las precipitaciones pluviales.

Los tipos de suelo presentes en el ayuntamiento se compone de tres asociaciones edáficas: zolanchak (suelo con alto contenido en sales en algunas partes de su estructura), feozem (capa superficial suave y rica en materia orgánica y nutrientes), y vertisol (suelo duro, arcilloso, masivo, negro, gris y rojizo). En la zona sur sobresale el suelo feozem; en la parte central el vertisol, y al noroeste el zolanchak.

Clima

Los datos meteorológicos³ o climáticos, describen las características físicas de una región, entre ellas la temperatura, las precipitaciones, etc.

El clima del municipio es templado, subhúmedo.

De acuerdo a los datos de las estaciones meteorológicas, se señalan las siguientes características climáticas:

- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| - Temperatura promedio anual: | 14 °C |
| - Temperatura máxima: | 26 °C |
| - Temperatura mínima: | 2 °C |
| - Periodo de estiaje o sequía: | noviembre a abril |
| - Periodo de lluvia | junio a septiembre |

La precipitación promedio anual oscila entre 700 y 799 mm anuales para la totalidad de la superficie del municipio, y de acuerdo a la intensidad de lluvia se clasifican en:

- Eventos con duración de 10 minutos y periodo de retorno de 10 años: 100 - 139 mm/h
- Eventos con duración de 30 minutos y periodo de retorno de 10 años: 60-69 mm/h
- Eventos con duración de 60 minutos y periodo de retorno de 10 años: 30 - 39 mm/h

El 35.16 % de la superficie es vulnerable a inundaciones o con drenaje deficiente.

El interés de estudio de los datos climáticos radica en el análisis de las precipitaciones pluviales ya que inciden directamente sobre el sistema de drenaje, como en el periodo de lluvias en el que se forman algunas escorrentías procedentes de la Sierra de Guadalupe.

Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico comprende las siguientes fases:

- a) Evaporación y transpiración;
- b) Infiltración, absorción y flujo subterráneo,
- c) Flujo superficial.

Hidrología

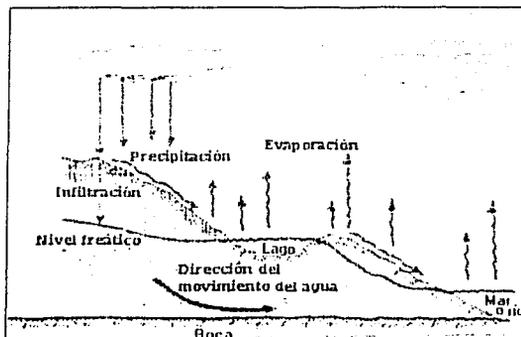
El municipio se localiza dentro de la Región Hidrológica No. 26, denominada cuenca del Valle de México y a su vez dentro de la Cuenca del Río Moctezuma, y por último dentro de la subcuenca del lago de Texcoco y Zumpango.

El ayuntamiento se encuentra drenado por una serie de escurrimientos superficiales que descienden en forma radial principalmente de la sierra de Guadalupe.

³ Los datos meteorológicos de intensidad de lluvia, se obtuvieron de:
<http://www.cdomexico.gob.mx/sgg/dgpc/Sistema%20Estatal%20de%20Riesgos/Atlas%20Estatal/Hidrometeorologicos/IntensidadLluviaA.htm> (consultado el día 6 de enero de 2003)

Los escurrimientos procedentes de la Sierra de Guadalupe son conducidos para descargarse al *Canal de Cartagena*⁴, el cuál atraviesa al municipio de oriente a poniente, con una extensión en el municipio de 5.4 Km.

Para efectos de estudio, se analizan las áreas tributarias que aforan al Canal Cartagena en la Jurisdicción de Coacalco, así como los aforos procedentes de los municipios colindantes de Tultitlán y Tultepec.



Esquema del ciclo hidrológico⁵

SERVICIOS HIDRÁULICOS

El Gobierno del Estado de México, por medio de la Comisión del Agua del Estado de México (*CAEM*) presta los servicios hidráulicos, que son servicios regionales y atienden a varios municipios, mediante la entrega de grandes volúmenes de agua y el desalojo de aguas pluviales y residuales por medio de colectores intermunicipales.

Suministro de agua potable

Es importante analizar la cantidad suministrada de agua a la comunidad, ya que una proporción del vital líquido, se vierte al sistema de drenaje o alcantarillado. El suministro de agua se basa de acuerdo al comportamiento de los mantos acuíferos de la zona, así como de estudios que se realizan.

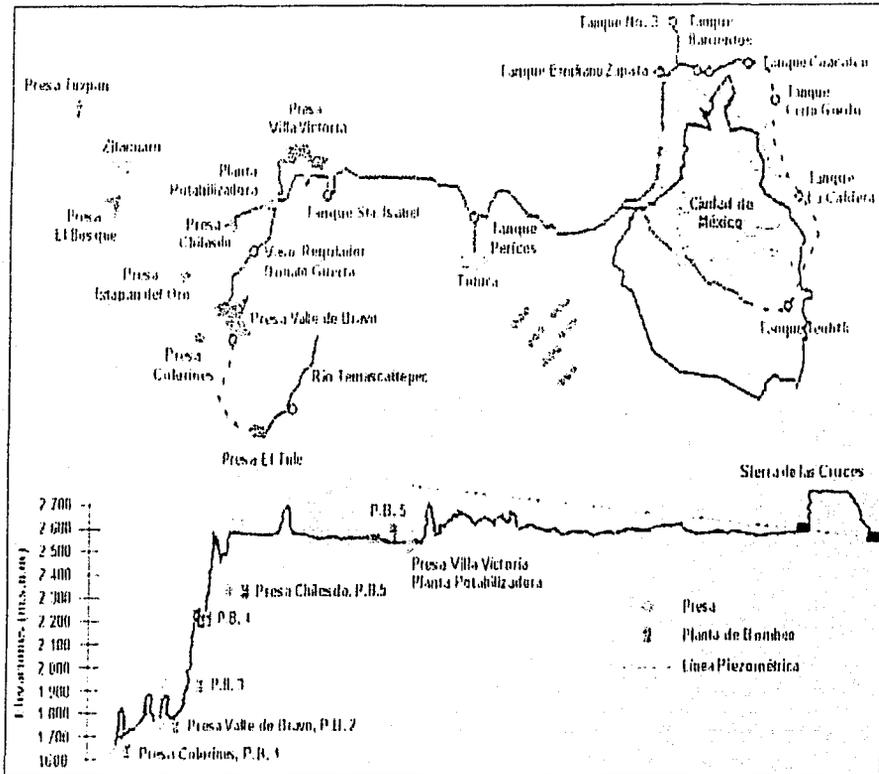
La principal fuente de agua potable, proviene de la extracción de pozos profundos⁶, y se complementa con el Sistema de Cutzamala, el cuál es un conjunto de obras hidráulicas que abastece de agua potable a la ciudad de México, Toluca, y al área conurbada. El sistema inició operaciones en 1976, y en Coacalco a finales de la década de los ochentas.

⁴ El Canal se construyó perpendicularmente al sentido de la dirección de los flujos de las escorrentías superficiales, y en él se vierten las descargas de las aguas residuales y pluviales que se generan en los municipios de Tultitlán, Tultepec, Coacalco y Ecatepec. El canal es un conducto a cielo abierto y embovedado en alguno de sus tramos y que descarga al Gran Canal de Desagüe por su margen izquierda.

⁵ Esquema tomado de <http://www.jmarcano.com/nociones/ciclo1.html> (consultado el día 6 de enero de 2003).

⁶ La extracción a través de este medio es el 92% del total del agua abastecida. Algunas de las captaciones son las siguientes: pozo Bosques, pozo Potrero, pozo Blanco I, pozo Blanco II, pozo Rancho la Palma, pozo Ex Hacienda San Felipe, pozo Mostajos, pozo Lilas.

En el siguiente mapa se presenta la estructura hidráulica del sistema Cutzamala.



Mapa de la infraestructura Hidráulica del Sistema de Cutzamala

La distribución del servicio de agua potable en el ayuntamiento se efectúa a través de una red hidráulica, interconectada por estaciones de rebombeo, cisternas y tanques de almacenamiento.

El siguiente cuadro muestra la extensión de la red de agua potable, la cuál contempla diferentes diámetros de tubería.

AÑO	RED AGUA POTABLE
1996	121.72 Km.
1999	175.30 Km.

Cuadro de extensión de la red de agua potable

Mapa extraído de <http://www.usembassy-mexico.gov/mcoatzu.jpg> (consultado el día 2 de enero de 2003)

Cobertura municipal de servicio

El organismo de operar y administrar la cobertura, es el organismo público descentralizado municipal SAPASAC (Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Coacalco).

Actualmente el 95% de la población cuenta con el servicio de agua potable, y el resto de los habitantes, se les distribuye a través de pipas.

De acuerdo a SAPASAC, la aportación en litros del Sistema Cutzamala es aproximadamente 80 lps diariamente y de los pozos 750 lps, dando un total de 830 lps, y la dotación del líquido por habitante oscila entre 150 y 200 l/h/día.

El uso de agua puede clasificarse en: doméstico, comercial e industrial. En Coacalco existen cerca de 57,000 tomas domiciliarias de agua potable, de las cuales el 92% son para uso doméstico, y el 8% corresponde a uso comercial e industrial. En relación al consumo de agua potable para fines domésticos satisface primero la demanda de evacuación del inodoro (40%), en segundo término la regadera (30%), y después el lavado de ropa (15%), lavado de utensilios (6%), el agua para beber (5%), y otros usos (4%).

I.2 DINÁMICA POBLACIONAL*

El estudio de la dinámica de la población implica el análisis de los procesos fundamentales en el incremento o decremento de la población. Los nacimientos y la inmigración incrementan la población, mientras que los decesos y la emigración la disminuyen.

Los factores sociales y económicos influyen en la composición demográfica.

Aspectos socioeconómicos

Entre 1950 y 1980, la dinámica demográfica de la sociedad mexicana se caracterizó por el descenso de la mortalidad infantil y tasas elevadas de fecundidad lo que tuvo como consecuencia que se incrementará la población, aunado a la inmigración generada por la industrialización y urbanización de la zona metropolitana del Valle de México.

Población

Los datos estadísticos de la población son esenciales en el estudio de la dinámica poblacional y las principales fuentes de obtención de datos poblacionales, lo constituyen los censos y el registro de las estadísticas vitales (nacimientos, defunciones y cambios de estado civil).

En este apartado se analiza la población que afora en el sistema de drenaje, para ello es necesario considerar las descargas procedentes de los municipios de Tultitlán y Tultepec⁹ que vierten sus aguas al Canal de Cartagena, así como la población del ayuntamiento que afora sobre los cárcamos o plantas de bombeo, y de cuatro escorrentías superficiales o barrancas que descargan sus aguas al canal.

* Sección basada en la obra: *"Introducción a la dinámica de población: información demográfica básica"* / Tr. por M. de Torres".

⁹ Véase en el anexo información referente a los ayuntamientos de Tultitlán y Tultepec.

CAPITULO I NOCIONES PRELIMINARES

En los siguientes cuadros¹¹¹ se muestra el número de pobladores que aforan sobre el canal de Cartagena en dirección este a oeste, considerando la jurisdicción de Coacalco.

Aforo exterior al municipio

AFORO	AÑO	NUMERO DE HABITANTES
Municipio de Tultitlán	1990	246 464
	2000	432 411
Municipio de Tultepec	1990	47 323
	2000	93 277

Aforo interior del municipio

AFORO	NUMERO DE HABITANTES
Cárcamo Rancho la Palma	19 366
Cárcamo Bosques del Valle	54 113
Cárcamo Ex hacienda San Felipe	10 909
Cárcamo Laurel	5 500
Barranca la Garita	3 451
Barranca Ejidal	13 352
Barranca Allende	3 730
Cárcamo Villa	90 755
Cárcamo San José	25 256
Cárcamo Rinconada San Felipe	20 849
Barranca los Actuales	127 623
Cárcamo San Rafael	60 167
Cárcamo Unidad Morelos	12 279
Cárcamo Potrero Laguna	30 161

El análisis de la tendencia poblacional permite determinar el efecto que tendrá la población sobre el sistema de drenaje.

Pronóstico de la tendencia poblacional

Los cambios en el tamaño de la población puede determinarse a partir de la diferencia entre el número absoluto de personas existentes entre dos fechas distintas, y a través de esa cifra calcular la tasa anual de crecimiento del periodo correspondiente; y otra forma es mediante los registros de cambios individuales a medida que ocurren, basándose en las estadísticas vitales (nacimientos, defunciones y migración).

Para el primer procedimiento puede emplearse los siguientes métodos:

Crecimiento geométrico
Crecimiento exponencial

Ambos métodos suponen que la población crece a una tasa constante.

¹¹¹ Los datos de Tultitlán y Tultepec se obtuvieron del *Sistema Municipal de Base de Datos del INEGI*, en la siguiente dirección: <http://www.inegi.gob.mx/basededatos/espanol/simbad.html> (consultado el día 2 enero de 2003), y los datos de Coacalco del *Plan de Desarrollo municipal Coacalco 2000 – 2003*.

Crecimiento geométrico

$$N_t = N_0(1+r)^t$$

Donde N_0 es la población actual, N_t es la población esperada. t es el tiempo entre años de N_t y N_0 , y r es la tasa de crecimiento anual.

La tasa de crecimiento es:

$$r = \left(\frac{N_t}{N_0} \right)^{\frac{1}{t}} - 1$$

En este caso N_t es la población al final de un periodo (último censo o registro), y N_0 es la población al principio del periodo (penúltimo censo)

Crecimiento exponencial

$$N_t = N_0 e^{rt}$$

N_0 es la población actual, N_t es la población esperada, t es el tiempo entre años de N_t y N_0 , y r es la tasa de crecimiento instantánea, la cuál es:

$$r = \frac{\text{Log} \left[\frac{N_t}{N_0} \right]}{t (\log e)}$$

Donde N_t es la población al final del periodo, N_0 es la población al principio del periodo, t es el tiempo entre años, y $\text{Log } e$ es igual a 0.434294.

De las expresiones anteriores se obtiene que la tasa de crecimiento correspondiente a los municipios de Tultitlán y Tultepec, y que se recopilan en el siguiente cuadro.

MUNICIPIO	TASA DE CRECIMIENTO
Tultitlán	7.01%
Tultepec	7.07%

Cuadro de Tasa de Crecimiento Poblacional

La diferencia conceptual entre los dos métodos es que en el crecimiento geométrico, el tiempo se toma como una variable discreta, y en el crecimiento exponencial se considera como una variable continua.

Para el segundo procedimiento puede utilizarse la *Ecuación Fundamental de la Población*.

Ecuación fundamental de la población

La ecuación implica el análisis de los nacimientos, defunciones, y la migración de la población en estudio, en este caso la población que afora en el municipio.



La ecuación puede escribirse como:

$$\text{Población Final} = \text{Población Inicial} + \text{Nacimientos} - \text{Defunciones} + \text{Inmigración} - \text{Emigración}$$

$$\text{Población Final} = \text{Población Inicial} + \text{Crecimiento Natural} + \text{Migración Neta}$$

En donde: Crecimiento natural = Nacimientos - Defunciones

Migración Neta = Inmigración - Emigración

$$\text{Crecimiento de la Población} = \text{Nacimientos} - \text{Defunciones} + \text{Migración Neta}$$

Si se denomina $P(t)$ a la población al principio del año t , $N(t)$ a los nacimientos, $D(t)$ a las defunciones, $E(t)$ a las emigraciones, y por último $I(t)$ a las inmigraciones, que se registraron en ese año, entonces la ecuación puede expresarse así:

$$P(t+1) - P(t) = \Delta P(t) = N(t) - D(t) + I(t) - E(t)$$

Finalmente si se denota $PM(t)$ a la población media como el promedio de la población final y la población inicial, entonces puede formularse como:

$$PM(t) = \frac{[P(t+1)+P(t)]}{2}$$

Las tasas de la población permiten comparar el comportamiento de una población, y a continuación se describen:

Tasa bruta de natalidad. Es la cantidad anual de nacidos vivos por cada mil habitantes, y se expresa así:

$$TBN(t) = b(t) = N(t)/PM(t)$$

Tasa bruta de mortalidad. Cantidad anual de fallecimientos por cada mil habitantes.

$$TBM(t) = d(t) = D(t)/PM(t)$$

Tasa bruta de inmigración. Cantidad anual de inmigrantes por cada mil habitantes.

$$TBI(t) = I(t)/PM(t)$$

Tasa de bruta de emigración. Cantidad anual de emigrantes por cada mil habitantes.

$$TBE(t) = E(t)/PM(t)$$

Tasa de crecimiento natural ó vegetativo. Es la diferencia entre la tasa bruta de natalidad y de mortalidad, e indica la tasa anual de cambios demográficos por causas naturales: nacimientos y muertes, y se denota así:

$$r(t) = b(t) - d(t)$$

Tasa bruta de migración neta. Es la diferencia entre la tasa de inmigración y la tasa emigración.

$$TBMN(t) = TBI(t) - TBE(t)$$

Tasa anual de crecimiento. Es la suma de la tasa de crecimiento natural y la tasa bruta de migración neta, e indica el ritmo anual de crecimiento de la población.

$$r(t) + \text{TBMN}(t)$$

En la siguiente tabla se muestra la tasa de natalidad, mortandad y emigración del ayuntamiento.

TASA	PORCENTAJE
Natalidad	2.104%
Mortalidad	0.298%
Migración	3.434%

Cuadro de tasa poblacional

La población utiliza el agua para diversos fines, y después de utilizarla, es necesario su remoción a través de los sistemas de drenado, así como el agua procedente de lluvias. La descarga de aguas residuales y pluviales del ayuntamiento se efectúa a través de una red o sistema de drenaje y a través de cuatro barrancas.

1.3 SISTEMA DE DRENAJE¹¹

En esta sección se presenta la estructura general del sistema de drenaje del ayuntamiento constituido principalmente por el Canal Cartagena que atraviesa al municipio en dirección este - oeste, el canal recibe los afluentes de cuatro barrancas (escorrentías naturales), así como de cárcamos o plantas de bombeo que descargan al canal. Uno de los principales problemas que se presentan en el sistema del ayuntamiento son encharcamientos que inciden principalmente en la temporada de lluvias.

Definición de sistema de drenaje o alcantarillado

Es el conjunto de obras e instalaciones destinadas a propiciar la recogida, evacuación, acondicionamiento y disposición final de las aguas residuales de una comunidad.

Clasificación de sistemas de alcantarillado

Los sistemas pueden clasificarse en:

Sistema combinado. Las aguas residuales se colectan junto con las aguas pluviales.

Sistema separado. Se colectan por separado las aguas residuales y las aguas pluviales. El sistema comprende: drenaje sanitario y pluvial.

Sistema semicombinado. Sólo admiten una proporción de las aguas pluviales provenientes de los domicilios.

¹¹ Sección basada en los libros: "*Manual de hidráulica*", Azevedo, (Harla, sexta edición, México, 1976). "*Redes de alcantarillado y bombeo de aguas residuales*", Mccalf y Eddy, (Labor, México, 1985). "*Alcantarillado y tratamiento de aguas residuales*", Babbitt y Baumann, (CECSA, México, 1977).

Clasificación de las aguas residuales

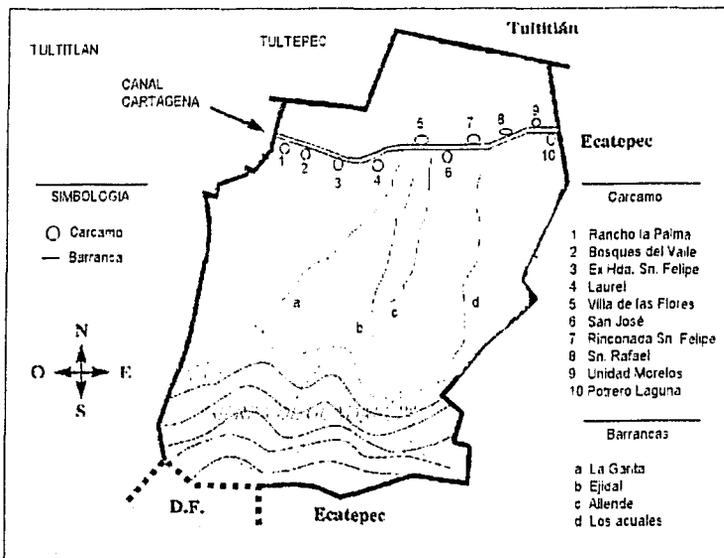
Las aguas residuales pueden clasificarse en:

Agua residual doméstica. Son las aguas procedentes de casas habitación, comercios, edificios, etc. Compuesto principalmente por materia fecal y desechos líquidos.

Agua residual industrial. Son los desechos o afluentes de operaciones industriales.

Características nocivas de las aguas residuales

- Aspecto turbio.
- Emanación de olores desagradables, tóxicos.
- Microorganismos nocivos (ántrax).



Mapa de localización de las plantas de bombeo y barrancas

Análisis del flujo de aguas residuales

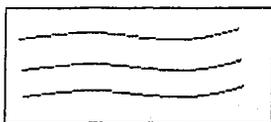
El análisis de flujo, tanto en tuberías (conductos cerrados) como en canales abiertos, se basa en la aplicación de las ecuaciones básicas de la mecánica de los fluidos: *Ecuación de la continuidad*. Expresa la conservación de la masa de fluido a través de las distintas secciones de un conducto de corriente. *Ecuación de la energía*. Es la energía mecánica transferida al fluido o desde el mismo fluido. *Ecuación de la cantidad de movimiento*. Indica la variación en el tiempo de la cantidad de movimiento a lo largo de un tubo de corriente.

El flujo de aguas residuales se caracteriza por ser inestable, frecuentemente no es uniforme, y transporta cargas sustanciales de materiales flotantes, suspendidos y solubles.

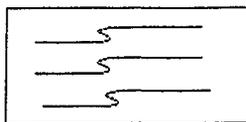
El movimiento de un líquido a lo largo de una conducción permite distinguir dos tipos de movimiento:

a) *Régimen laminar*. Las trayectorias de las partículas en movimiento son definidas y no se entrecruzan. El régimen se presenta generalmente cuando una alcantarilla fluye parcialmente llena o como en un canal.

b) *Régimen turbulento*. Las trayectorias de las partículas en movimiento son desordenadas. El régimen se genera cuando una alcantarilla fluye llena o a presión. A medida que el flujo circula a lo largo del conducto, las partículas más próximas a las paredes del conducto se retardan, mientras que las más cercanas al centro adquieren un movimiento acelerado.



Flujo laminar



Flujo turbulento

El análisis de flujo en conductos cerrados implica el estudio de cuatro elementos hidráulicos: el diámetro D , la pérdida de carga unitaria S_f (es la pérdida de energía por metro lineal de tubería que experimentan los líquidos que fluyen en los conductos, para vencer los efectos del rozamiento en flujos turbulentos, así como la originada por piezas especiales, tales como curvas, piezas de derivación, piezas de reducción o aumento de diámetro), la velocidad V y el caudal Q .

El presente trabajo se enfoca esencialmente al estudio del caudal, el cual es el volumen de líquido que atraviesa en una sección en la unidad de tiempo.

Ecuación de flujo. Cálculo de caudal de una red

El flujo instantáneo en un punto dado, es una composición de aguas captadas en puntos anteriores durante tiempos diferentes.

Caudal aguas arriba del tramo (l/s). Es el caudal proveniente del tramo anterior (en dirección del sentido del flujo).

Contribución del tramo (l/s). Es el producto de caudal de distribución a lo largo de la tubería por los m del tramo del colector.

Caudal aguas abajo del tramo (l/s). Es la resultante de la contribución del tramo más el caudal aguas arriba si es que existe un tramo anterior.

La siguiente expresión es el *coeficiente para el cálculo de la red*:

$$q_m = \frac{n K_1 K_2 q c}{L \ 86 \ 400}$$

- q_m = caudal de distribución a lo largo de la tubería (l/s, por metro de tubería)
- n = número de habitantes
- K_d = coeficiente de variación diaria
- K_h = coeficiente de variación horaria
- q = dotación de agua por capita por día (l/s)
- c = relación consumo - remoción
- L = extensión de la red (m)

Coefficiente de día de mayor consumo o coeficiente de variación diaria: es la relación entre el valor del consumo máximo diario registrado en un año y el consumo promedio diario correspondiente a ese año.

Coefficiente de la hora de mayor demanda o coeficiente de variación horaria: es la relación correspondiente a la hora de mayor demanda con respecto al consumo medio diario de ese año.

Relación consumo - remoción: Se refiere al porcentaje de consumo de agua per cápita que se vierte al drenaje.

Ecuación de flujo en canales abiertos. Cálculo de caudal

La siguiente expresión, es la fórmula de Manning¹² para el cálculo del caudal de canales abiertos.

$$Q = n^{-1} A R^{2/3} S^{1/2}$$

- Donde: Q = caudal (m³/s)
 n = coeficiente de rugosidad
 A = área de canal, m²
 R = radio hidráulico, m
 S = pérdida de carga (talud)

El radio hidráulico es el área de la sección mojada en m² sobre el perímetro de la sección mojada en m.

Características del Canal Cartagena

- Sección trapezoidal (Sección variable entre 4 y 5m)
- Talud 1:1
- Tirante hidráulico 3 m.
- Longitud aproximada 16 Km. (Desde origen hasta descarga al Gran Canal de Desagüe)
- Coeficiente de rugosidad 0.014
- El flujo de agua residual se desplaza en sentido descendente (efecto gravitatorio).

Ecuación de flujo en barrancas. Cálculo de caudal

El flujo en barrancas se ve afectado por irregularidades en el fondo de lecho, bancos de arena, irregularidades en la superficie de las aguas, crecimiento de vegetales.

¹² Ingeniero irlandés que presentó su fórmula hidráulica en 1889.

Para tal efecto puede emplearse la fórmula de Manning, y el valor de n correspondiente es 0.035 para canales de tierra con plantas acuáticas.

BARRANCA	EXTENSION
La Garita	1 575 m
Ejidal	924.3 m
Allende	1 744 m
Los Actuales	3 258 m

Extension de las barrancas

Estimación de aportaciones pluviales. Cálculo de Caudal

Los métodos de estimación de aportaciones pluviales son esenciales en el estudio del caudal procedente de las precipitaciones de Tultitlán y Tultepec, así como la precipitación que afora hacia las plantas de bombeo y hacia las barrancas en Coacalco.

Para el análisis de las precipitaciones en Tultitlán, Tultepec y la precipitación que afora en Coacalco hacia las plantas, se emplea el método racional.

Método racional

El método racional considera el aporte pluvial de una región, así como su naturaleza y el área tributaria.

$$Q = \frac{c i A}{3600}$$

- Donde: Q = caudal, en l/s, en la sección o tramo considerado;
- c = coeficiente de flujo superficial de la cuenca;
- i = intensidad media de la lluvia, en mm por hora;
- A = área de la cuenca que drena en la sección, en m²

El *coeficiente de flujo superficial* es la relación entre el volumen de agua que admite el alcantarillado y la cantidad total del agua que se precipita. De la cantidad total de agua que se precipita sobre una área tributaria sólo una parte se vierte al sistema ya que parte del agua se evapora, es retenida o se filtra en el terreno.

El coeficiente esta dado por: $c = \alpha\beta\gamma$.

En donde α es el coeficiente de dispersión, que considera la desigualdad de distribución de las lluvias; β es conocido como coeficiente de retardo, γ es el coeficiente de impermeabilidad que considera el grado de naturaleza del terreno.

De acuerdo a la naturaleza de la cuenca puede determinarse su correspondiente coeficiente.

CAPITULO I NOCIONES PRELIMINARES

En el siguiente cuadro se determina el área de drenado, así como la naturaleza de la cuenca.

CUENCA	AREA TRIBUTARIA	NATURALEZA DE LA CUENCA	COEFICIENTE C
Municipio de Tultitlan	24 853 000 m ²	Zona moderadamente edificada	0.50 a 0.70
Municipio de Tultepec	3 950 200 m ²	Zona moderadamente edificada	0.50 a 0.70
Cárcamo Rancho la Palma	601 652 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90
Cárcamo Bosques del Valle	1 453 125 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90
Cárcamo Ex hacienda San Felipe	183 750 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90
Cárcamo Laurel	164 062 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90
Cárcamo Villa	740 625 m ²	Zona moderadamente edificada	0.50 a 0.70
Cárcamo San Jose	375 000 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90
Cárcamo Rinconada San Felipe	371 875 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90
Cárcamo San Rafael	2 383 750 m ²	Zona moderadamente edificada	0.50 a 0.70
Cárcamo Unidad Morelos	380 625 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90
Cárcamo Potrero Laguna	712 500 m ²	Zonas densa en edificaciones	0.70 a 0.90

Cuadro de área tributaria y coeficiente de cuenca

Para el estudio de la precipitación que afora hacia las barrancas en Coacalco, se utiliza la fórmula de Burkli-Ziegler.

Fórmula de Burkli-Ziegler:

$$Q = 0.022 \text{ EAP } (S/A)^{1/2}$$

Donde Q = caudal, en m³/s;

E = coeficiente medio de flujo, que depende de la impermeabilidad de la naturaleza del terreno;

A = área drenada, en hectáreas;

P = precipitación media, durante la lluvia más fuerte, en cm/hora;

S = pendiente media del terreno, en m/1000m.

En la siguiente tabla se muestra el área de drenado de las barrancas y su coeficiente.

CUENCA	AREA TRIBUTARIA	NATURALEZA DE TERRENO	COEFICIENTE
Barranca la Garita	393 875 m ²	Zonas suburbanas	0.30 - 0.45
Barranca Ejidal	231 075 m ²	Zonas suburbanas	0.30 - 0.45
Barranca Allende	436 000 m ²	Área densamente construida	0.70 - 0.75
Barranca los Actuales	814 500 m ²	Área densamente construida	0.70 - 0.75

Cuadro de área tributaria y coeficiente de las barrancas

Tiempo de concentración. Es el tiempo que transcurre desde que comienza la lluvia hasta que toda la cuenca comience a tributar en la sección considerada. Este tiempo, generalmente comprende entre 3 y 20 minutos.

Drenaje sanitario

El drenaje sanitario colecta aguas residuales, y otros elementos agregados al sistema (papel, jabón, suciedad, restos de alimentos, basura, sustancias, etc.). El caudal en los drenajes sanitarios varía esencialmente con el consumo de agua.

Principales elementos del sistema

El sistema de alcantarillado de aguas residuales comprende:

Tuberías:

- a) colectores (domiciliarios, secundarios, troncales)
- b) interceptores
- c) emisores
- d) sifones invertidos

Equipo complementario:

- a) pozos de inspección o registro
- b) tanques de lavado

Plantas de bombeo

Estaciones de tratamiento

A continuación se definen los componentes del sistema:

Colector domiciliario es la tubería que conduce las aguas residuales de los edificios, hasta la red de alcantarillas.

Colector de alcantarillas o colector secundario es una tubería de pequeño diámetro que recibe los afluentes de los colectores domiciliarios.

Colector troncal es la tubería principal de mayor diámetro que recibe los efluentes de varios colectores de alcantarillas, conduciéndolos a un interceptor o emisor.

Interceptores son tuberías de mayor tamaño que intercepta el flujo de colectores troncales.

Emisor es el conducto final de un sistema de alcantarillado sanitario, destinado al alejamiento de los efluentes de la red hasta el lugar de descarga, no recibe contribuciones en su transcurso.

Sifones invertidos son tuberías rebajadas, que funcionan bajo presión, destinadas al cruce de canales, obstáculos, etc.

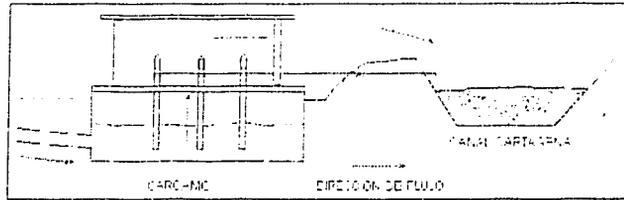
Equipo complementario accesorio es el conjunto de obras e instalaciones complementarias del sistema de alcantarillado. Comprenden pozos de inspección, tanques de lavado, etc.

Pozos de inspección son dispositivos de registro situados en puntos obligatorios o convenientes de las tuberías y obras de alcantarillas.

Tanques de lavado son dispositivos que descargan agua periódicamente para la limpieza de colectores, se localizan en tramos donde no haya posibilidad de mantener la pendiente mínima.

Plantas de bombeo son instalaciones electro-mecánicas y obras civiles que elevan las aguas, evitando de esa forma, la profundidad excesiva de las tuberías y en otros casos posibilitan la entrada a las estaciones de depuración o la descarga final a un cuerpo de agua receptor.

Estaciones de tratamiento el tratamiento de aguas comprende un proceso artificial, mediante el cual, las aguas se someten a este proceso, para aminorar o alterar las propiedades nocivas del agua, con el fin de transformarlos en menos peligrosos u ofensivos. El municipio de Coacalco cuenta con dos estaciones de tratamiento: El Laurel y Rancho la Palma.



Esquema de flujo de agua residual en una planta de bombeo

Drenaje de aguas pluviales

Sistema de drenaje de aguas pluviales: es el conjunto de obras e instalaciones destinadas a dar flujo a las aguas provenientes de las precipitaciones pluviométricas, que fluyen superficialmente en una determinada área. El flujo en alcantarillas pluviales y combinadas sigue el patrón del escurrimiento de la precipitación.

Principales elementos del sistema

Coladeras. Son las aberturas que dispone el sistema para captar las aguas pluviales.

Tuberías de conexión. Conducen las aguas captadas por las coladeras hacia los colectores.

Cajas de paso o de conexión. Permiten la unión de los colectores con los tubos de conexión.

Sistema colector o de galerías. Es el conjunto de tuberías que conducen las aguas pluviales.

Pozos de inspección o registro. Son dispositivos localizados en lugares convenientes del sistema colector, que permiten la inspección y limpieza de las tuberías.

Extensión, diámetro, profundidad y material de la red de alcantarillado de Coacalco

En el siguiente cuadro se presenta la extensión de la red de alcantarillado. La extensión contempla diferentes diámetros de tubería.

AÑO	RED DE ALCANTARILLADO SANITARIO Y PLUVIAL
1996	131.30 Km.
1999	187.50 Km.

Cuadro de extensión de la red de alcantarillado sanitario y pluvial

La red general de los colectores del ayuntamiento comprende diámetros de 15 a 183 centímetros; la profundidad mínima con la que se tienden es a 1.50m para protegerlos contra ruptura por impacto del tráfico y permitir que drenen al accesorio más abajo existente en los predios que drenan.

La red esta constituida por los siguientes materiales: concreto reforzado con junta hermética, cemento, concreto armado, hierro fundido, mampostería de ladrillos, etc. y la cobertura municipal del drenaje es de 95%.

Limpieza del sistema de alcantarillado

La limpieza es una medida de precaución que se aplica a las conducciones que pueden obstruirse e impedir parcial o totalmente el flujo de las aguas residuales y pluviales por las alcantarillas (las obstrucciones se originan principalmente por: objetos grandes, arenisca, grasa u otros materiales, que se introducen en el alcantarillado, así como grasas, cal, cabello y fibras que se adhieren a los ductos y los colectores de menor diámetro son los más susceptibles a obstruirse); para la limpieza del alcantarillado se emplean cepillos, rastrillos; para la eliminación de grasas se utilizan gubias; para extraer raíces se usan cortadores o ganchos. *SAPASAC* cuenta en la actualidad con dos equipos de succión - presión "vactor" que desazolvan la red general de los colectores, y *SAPASAC* en coordinación con la *CNA* llevan a cabo la limpieza y dragado del canal Cartagena y el desazolve de barrancas.

1.4 SERIES DE TIEMPO

En esta sección se analizan las precipitaciones pluviales mensuales, con el fin de pronosticar las precipitaciones a través de la metodología de Box and Jenkins¹³, y a partir de esto, establecer su influencia en el sistema de drenaje del área de estudio.

Una serie de tiempo Y_t se define como un proceso estocástico que representa observaciones cronológicas de un fenómeno. La suposición básica que subyace en el análisis de series de tiempo es que los factores que han ocasionado patrones de actividad en el pasado y en el presente continuarán con una tendencia similar.

El análisis clásico de las series de tiempo considera que una serie se integra por cuatro componentes:

$$Y = f(T, S, C, I) + e_t \quad \text{con } t = 0, 1, 2, \dots, T$$

e_t representa el error aleatorio en el momento t con media cero, varianza s^2 constante y covarianza nula entre errores correspondientes a observaciones diferentes. e_t es también denominado ruido blanco.

- Tendencia (T). Se caracteriza por ser un movimiento regular a lo largo de la serie.
- Estacional (S). Aquellas que aparecen de manera recurrente (menores o iguales a un año)
- Cíclica (C). Son oscilaciones periódicas mayores a un año.
- Irregular (I). Son variaciones irregulares o aleatorias.

Los modelos de series de tiempo se clasifican en dos categorías, el modelo aditivo y el multiplicativo. Los componentes del modelo aditivo son independientes entre sí, y en el multiplicativo los componentes se relacionan entre sí.

¹³ Box and Jenkins en 1970 proponen la metodología de series de tiempo.

El *modelo aditivo* se expresa como:

$$Y_t = T_t + C_t + S_t + I_t + e_t \quad \text{con } t = 1, 2, \dots, T$$

El *modelo multiplicativo* se expresa:

$$Y_t = T_t C_t S_t I_t e_t \quad \text{con } t = 1, 2, \dots, T$$

Modelo Mixto son combinaciones de elementos aditivos y multiplicativos.

Las técnicas estadísticas permiten analizar las características de los datos de una serie de tiempo, tales como efectos estacionales, ciclos, tendencias, variaciones.

Promedio móvil

Es un modelo que expresa a la serie de tiempo, como una suma ponderada y finita de valores aleatorios e_t . Es un proceso de orden q , denotado por $MA(q)$.

La serie Y_t depende linealmente de un número finito q de valores previos de e_t .

La expresión genérica del modelo es:

$$Y_t = e_t + \theta_1 e_{t-1} + \theta_2 e_{t-2} + \dots + \theta_q e_{t-q}$$

El proceso puede escribirse de forma abreviada como:

$$Y_t = \alpha(B)e_t$$

En donde: $\alpha(B) = 1 + \theta_1 B + \theta_2 B^2 + \dots + \theta_q B^q$

Condición de invertibilidad. Indica la correlación entre una variable y su pasado se reduce a medida a que se aleja más en el tiempo desde el momento en que se considera dicha correlación. El polinomio en B tiene q raíces r_1, r_2, \dots, r_q , y cada una de ellas debe satisfacer:

$$|r_i| < 1 \quad \forall i$$

Bajo las condiciones de invertibilidad el proceso $MA(q)$ se puede escribir como un proceso autorregresivo infinito.

Proceso autorregresivo

Es un modelo en el que los valores del proceso pueden explicarse por su valor inmediato anterior (autorregresión), y se expresa como una suma finita y lineal de valores pasados del proceso más un término e_t . Es un proceso de orden p denotado por $AR(p)$, y la expresión general del modelo es:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t$$

El proceso puede escribirse como:

$$\phi(B)Y_t = e_t \quad \text{ó} \quad Y_t = \phi^{-1}(B)e_t$$

En donde $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$

Condición de estacionaridad. El proceso tiene p raíces s_1, s_2, \dots, s_p , que deben satisfacer:

$$s_i > 1, \forall i = 1, 2, \dots, p$$

La serie $\phi(B)$ es finita, garantizándose así su invertibilidad.

Proceso mixto autorregresivo

Es un modelo mixto autorregresivo promedio móvil de orden (p, q) , denotado por $ARMA(p, q)$, y la estructura del modelo es:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \dots - \theta_q e_{t-q}$$

El proceso en forma abreviada es:

$$\phi(B)Y_t = \theta(B)e_t$$

Para un *modelo autorregresivo de medias móviles*: $ARMA(p, q)$: habrá q autocorrelaciones (la autocorrelación permite determinar si los datos son aleatorios o presentan un patrón o comportamiento), en donde sus valores dependen directamente de los q parámetros promedio móvil θ , y de los p parámetros autorregresivos ϕ , también, los p valores proveen los valores iniciales necesarios para la ecuación de diferencia:

$$\phi(B)\rho_k = 0 \quad \text{con } k \geq q-1$$

Satisface la condición de estacionaridad si todas las raíces de la ecuación son $\phi(B) = 0$, y están fuera del círculo unitario. Finalmente las raíces de $\theta(B) = 0$, también deberán encontrarse fuera del círculo unitario, lo cuál satisface la condición de invertibilidad.

De lo anterior se obtiene un *modelo autorregresivo integrado y de medias móviles*: $ARIMA(p, d, q)$.

En donde: p = orden de la parte *AR*
 d = orden de las diferencias
 q = orden de la parte *MA*

p designa el número de desfases de las variables en el modelo *AR*.

q es el número de periodos ponderados para el término de error en el modelo *MA*.

Proceso estacionario autorregresivo

Es un modelo en la que una variable puede ser explicada por los valores estacionales mensuales, trimestrales, etc. correspondiente al mismo periodo del año anterior o años precedentes, designándose como *modelo autorregresivo estacionario*: *SAR*.

Proceso estacionario de medias móviles

Es un modelo en la que una variable puede explicarse por los valores de la serie corregidos por los errores observados en otros periodos estacionales debidamente ponderados, se designa como *modelo estacionario de media móviles: SMA*.

Análisis de la serie de tiempo

La serie de tiempo en estudio lo constituyen las precipitaciones registradas en la estación meteorológica *Km. 27 Gran Canal*, el periodo de análisis comprende desde enero de 1957 a junio de 2002.¹¹

Una serie de tiempo debe presentar un comportamiento estacionario, para ello se analiza si la serie presenta varianza constante, tendencia o media constante, y sin variación estacional.

Estabilización de la varianza

La serie es estacionaria en la varianza si la dispersión es constante durante todo el periodo de tiempo.

Para estabilizar la varianza, puede aplicarse las siguientes transformaciones:

Aplicar el reciproco	$1/Y_t$
Emplear el logaritmo natural	LnY_t
Utilizar la raíz cuadrada	$Y_t^{1/2}$
Hacer combinaciones:	$Y_t^{-1/2}, 1/LnY_t$

Eliminación de la tendencia

La serie es estacionaria en la media si todos sus valores fluctúan en torno a un valor central.

Para eliminar la tendencia se emplean diferencias finitas u ordinarias, de tal forma que las diferencias de orden uno eliminan tendencias lineales; las de orden dos las de tendencias cuadráticas, y así sucesivamente.

Eliminación de la variación estacional

Las diferencias estacionales eliminan la variación.

Análisis de estacionariedad de la serie de tiempo de las precipitaciones pluviales

En la siguiente gráfica se muestra la serie de tiempo en la que puede visualizarse que la tendencia de la serie es constante, la varianza es constante (por lo que no se requiere estabilizar y eliminar la tendencia), y presenta variación estacional cada 12 meses que se acentúa en el periodo de lluvia (meses de junio a septiembre).

¹¹ Véase los registros de las precipitaciones y el mapa de localización de las estaciones en el anexo.

Time Series Plot for Precipitación

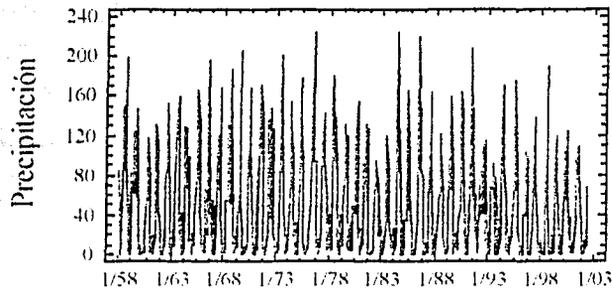


Gráfico de la serie de tiempo (Enero de 1958 a junio de 2002)

De acuerdo al análisis anterior es indispensable aplicar una diferencia estacional con el fin de estacionarizar la serie.

Time Series Plot for adjusted Precipitación

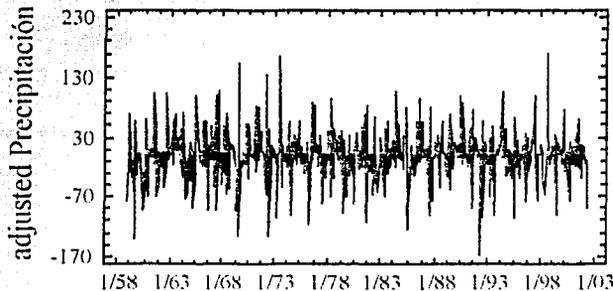
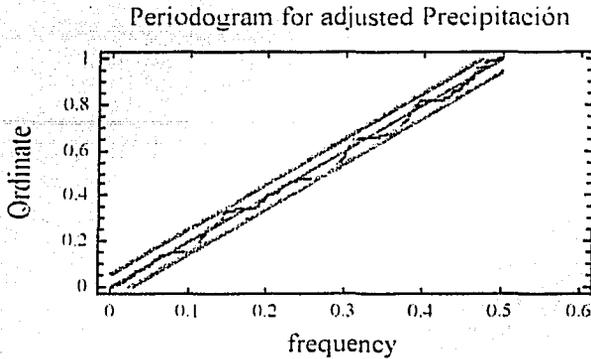


Gráfico de la serie de tiempo con una diferencia estacional

En la gráfica anterior, al aplicarse una diferencia estacional a la serie, ésta no presenta variación estacional.

Un par de técnicas empleadas en detectar si la serie es un proceso estocástico o aleatorio es el periodograma (es un diagrama de los pares de la frecuencia y de la ordenada de un período específico que se utiliza para construir un espectro de la frecuencia e identifica la aleatoriedad y la estacionaridad de la serie de tiempo), y el periodograma integral (crea un diagrama de la suma acumulativa de las ordenadas del periodograma y estandariza las intensidades para interpretarse gráficamente con mayor sencillez).

La siguiente gráfica no presenta variación ya que el periodograma debe estar a lo largo de la línea diagonal entre los intervalos de confianza.



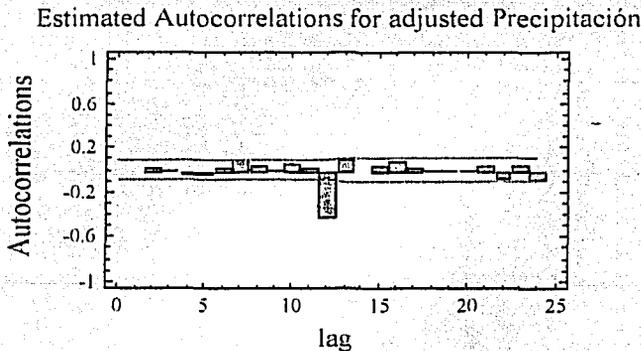
Periodograma integral de la serie de tiempo

Una vez que se analiza la estacionaridad, se procede al análisis de la función de autocorrelación ACF que mide la relación entre Y_t y Y_{t-k} , y de la función de autocorrelación parcial $PACF$ que analiza la contribución de una nueva variable autorregresiva Y_{t-k} que se agrega a un modelo que ya tenía $k-1$ variables autorregresivas.

A través del estudio anterior se identifica un modelo tentativo.

Función de autocorrelación y función de autocorrelación parcial

La siguiente gráfica indica una correlación en el doceavo intervalo, es decir existe una relación cada doce periodos en el tiempo.

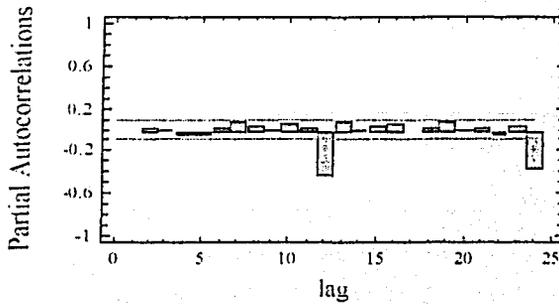


Función de autocorrelación de la serie de tiempo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A continuación se muestra la gráfica de autocorrelación parcial, la cuál indica la contribución de una variable autorregresiva cada 12 periodos.

Estimated Partial Autocorrelations for adjusted Precipitación



Función de autocorrelación parcial de la serie de tiempo

Diagnostico y selección de modelo

Un modelo se examina mediante las siguientes herramientas: estadístico t del estimador, P value del estimador, suma de los cuadrados de los residuales (es la diferencia entre los datos reales y los pronosticados y deben presentar: media constante, varianza constante y no presentar variación estacional); estas herramientas permiten identificar si el modelo propuesto es estacionario.

Un parámetro debe aceptarse en el modelo:

- Si el estadístico t del estimador es: $|t| > 2$
- Si el P value del estimador es: $\text{value} < 0.05$

A partir de los criterios anteriores, el modelo que se selecciona, es un modelo SMA(1) con una diferencia estacionaria. A continuación se edita la salida del sumario que proporciona el programa Statgraphics.

```

Forecast Summary
-----
Seasonal differencing of order: 1
Forecast model selected: ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12
Number of forecasts generated: 12
Number of periods withheld for validation: 0
-----
Statistic      Estimation      Validation
                Period          Period
-----
RMSE           31.2437
VAR            31.8422
MAPE           -0.760764
ME
MFE
-----
ARIMA Model Summary
Parameter      Estimate      Std. Error      t      P-value
-----
SMA(1)         0.965401     0.00534188     180.723     0.000000
    
```

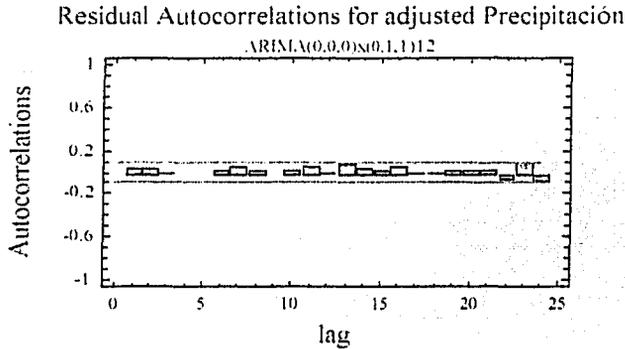
Análisis de sumario SMA(1) con una diferencia estacionaria.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Cualquier problema de falta de estacionaridad en la serie aparece en los residuales, que se expresan de la siguiente forma: $\hat{\epsilon}_t = Y_t - \hat{y}_t$

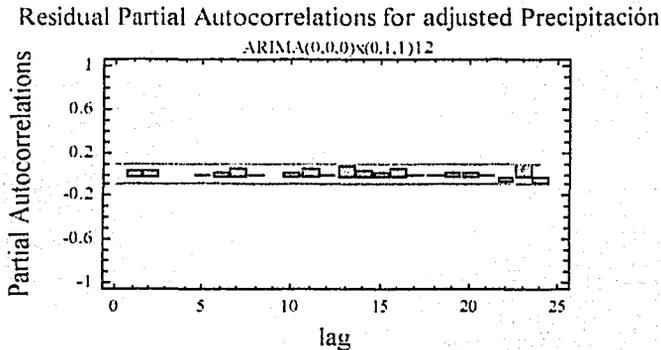
Análisis de los residuales

El *coeficiente de autocorrelación de residuales* mide la correlación entre los residuales en el tiempo t y $t-k$. La *ACF* de los residuales, debe ser un conjunto de valores insignificantes (cerca de cero), ya que los residuales deben ser independientes; gráficamente debe observarse que todos los valores de los residuales deben estar dentro del intervalo de confianza.



Función de autocorrelación residual de la serie de tiempo

La *PACF* de los residuales, también debe ser un conjunto de valores insignificantes, ya que ninguna variable y_{t-k} debe contribuir en ellos; la gráfica debe visualizarse que todos los valores de los residuales se encuentren dentro del intervalo de confianza.



Función de autocorrelación parcial residual de la serie de tiempo

Los dos gráficos anteriores indican que la serie es estacionaria y de acuerdo al análisis de sumario, se concluye que el modelo *SMA(1)* con una variación estacional, es el modelo indicado para el pronóstico de las precipitaciones pluviales mensuales del área en estudio.

Pronósticos

En la siguiente gráfica se muestra los pronósticos del modelo Arima seleccionado, así como su limite superior e inferior, en donde estos oscilan con un 95% de confianza, para el periodo de estudio de enero de 2002 a junio de 2003, los meses que se pronostican son de julio de 2002 a junio de 2003, y los datos meteorológicos están dados en mm mensuales.

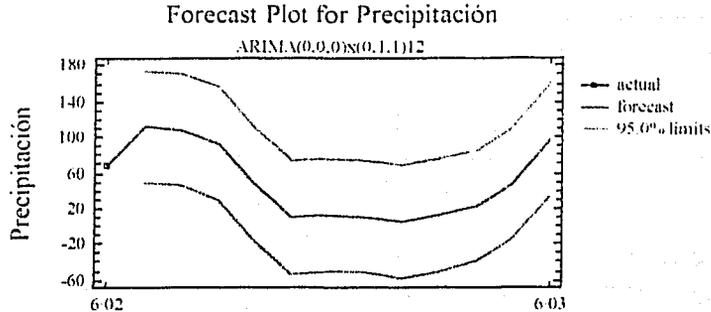


Gráfico de pronósticos de precipitación pluvial mensual de julio 2002 a junio 2003 (milímetros mensuales)

Es importante mencionar que el valor mínimo en donde oscilan los pronósticos de las precipitaciones es cero milímetros mensuales.

Tabla de pronósticos

La siguiente tabla presenta los pronósticos correspondientes a la precipitación pluvial del ayuntamiento de Coacalco en el periodo de julio del 2002 a junio del 2003.

Así por ejemplo: la precipitación esperada en el ayuntamiento de Coacalco para el mes de junio del 2003 es de 97.31 milímetros.

Period	Forecast	Lower 95.0% Limit	Upper 95.0% Limit
7/02	111.591	48.6556	174.527
8/02	108.594	45.6585	171.53
9/02	92.9869	30.0513	155.922
10/02	49.4629	-14.4727	111.398
11/02	9.38446	-53.5511	72.32
12/02	11.9919	-50.9436	74.9275
1/03	10.7729	-52.1627	73.7084
2/03	5.01953	-57.916	67.9551
3/03	11.7094	-51.2262	74.645
4/03	23.2113	-39.7242	86.1469
5/03	47.3302	-15.6053	110.266
6/03	97.317	34.3814	160.253

Tabla de pronósticos de precipitación pluvial mensual



En la siguiente gráfica se muestra los pronósticos del modelo Arima seleccionado, así como su límite superior e inferior, en donde estos oscilan con un 95% de confianza, para el periodo de estudio del año 2002 al 2022, los años que se pronostican son del 2002 al 2022, y los datos meteorológicos están dados en mm mensuales.

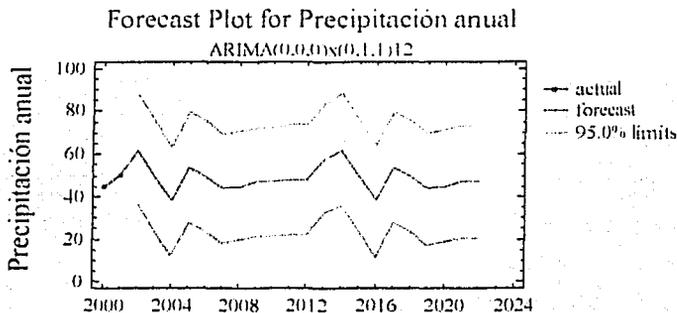


Gráfico de pronósticos de precipitación pluvial anual del 2002 a 2022 (milímetros mensuales)

Tabla de pronósticos

La siguiente tabla presenta los pronósticos correspondientes a la precipitación pluvial del ayuntamiento en el periodo del año 2002 al 2022.

Period	Forecast	Lower 95.0% Limit	Upper 95.0% Limit
2002	61.8905	36.2784	87.5027
2003	49.671	24.0588	75.2831
2004	37.8995	12.2874	63.5116
2005	53.6315	28.0193	79.2436
2006	49.5661	23.9539	75.1782
2007	43.5673	17.9552	69.1794
2008	45.0886	19.4765	70.7007
2009	46.8816	21.2695	72.4937
2010	46.8455	21.2333	72.4576
2011	48.0101	22.398	73.6223
2012	48.0858	22.4736	73.6979
2013	57.8721	32.26	83.4843
2014	61.8905	35.7412	88.0398
2015	49.671	23.5217	75.8203
2016	37.8995	11.7502	64.0488
2017	53.6315	27.4822	79.7808
2018	49.5661	23.4168	75.7154
2019	43.5673	17.418	69.7166
2020	45.0886	18.9393	71.2379
2021	46.8816	20.7323	73.0309
2022	46.8455	20.6962	72.9948

Tabla de pronósticos de precipitación pluvial anual (milímetros mensuales)

CAPITULO II

MODELO DE SIMULACIÓN: SISTEMA DE DRENAJE – CRECIMIENTO POBLACIONAL

II.1 Preliminares. Metodología en la construcción del modelo

II.2 Conceptualización del modelo

Análisis de variables
Diagrama causal del sistema

II.3 Formulación del modelo

Diagrama de Forrester
Formulación de ecuaciones

II.1 PRELIMINARES. METODOLOGÍA EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

En el presente capítulo se describe las fases de construcción del “*Modelo de simulación: sistema de drenaje – crecimiento poblacional*”, el cual se desarrolla bajo el enfoque de dinámica de sistemas¹⁵. La metodología de dinámica de sistemas analiza el comportamiento de los sistemas mediante la construcción de un modelo de simulación informático, en el que se muestran las relaciones entre la estructura del sistema, y su comportamiento.

Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas asocia las distintas variables que se relacionan con sus elementos y que sufren cambios a lo largo del tiempo, que es consecuencia de las interacciones que se producen en ella. Como es el caso de las fluctuaciones del caudal que se deben a interacciones que acontecen a través del tiempo.

Un sistema dinámico está formado por un espacio de estados X y una regla que prescribe como varían estos estados a lo largo del tiempo, expresado de la siguiente forma:

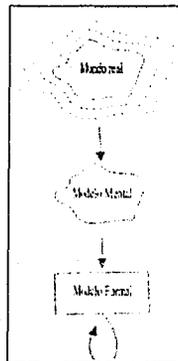
$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

En donde la función f expresa el cambio dx/dt que se produce en el estado $x \in X$.

La dinámica de sistemas suministra un método para transcribir la descripción elemental de un sistema en un sistema dinámico¹⁶.

Proceso de modelado

Para un observador O un objeto M es un modelo de un objeto S (un sistema). El proceso mediante el cual O construye M recibe la denominación de *proceso de modelado*.



Esquema de proceso de modelado

¹⁵ Sección basada en el texto de Javier Aracil “*Dinámica de sistemas*”, (Alianza, España, 1977, 198p)

¹⁶ El concepto de sistema dinámico se origina en la mecánica clásica para describir como se produce la variación de la posición y la velocidad de las partículas materiales en función de las fuerzas que se producen en ellas.

El *lenguaje de modelado* es un medio de expresión que le permite a O realizar M , y proporciona los módulos básicos (conceptos y símbolos) a partir de los cuales se construye el modelo.

De forma general se puede decir que el proceso de desarrollo de un modelo incluye tres fases principales:

Conceptualización
Formulación
*Evaluación*¹⁷

II.2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO

La fase de conceptualización consiste en identificar, describir los distintos elementos que forman el sistema, así como sus interrelaciones, y finalmente representarlos a través de la construcción de diagramas de influencia. El diagrama suministra la descripción de la estructura del sistema y también es conocido como *diagrama causal*.

La descripción de un sistema S se asocia un conjunto de *atributos* o características $\{X_i\}$. El atributo X_i representa una cualidad perceptible de S .

Cuando las variaciones de un determinado atributo X_k afectan las manifestaciones de otro X_j , se producen interacciones en el sistema. Formalmente esta relación puede representarse mediante enunciados de la forma:

$$X_k \rightarrow X_j$$

La expresión anterior se lee: el atributo X_k influye sobre el atributo X_j y se denomina *relaciones de influencia* entre atributos.

Una relación de influencia puede tener un signo positivo o negativo.

X_k influye positivamente sobre X_j , si sucede que un incremento en X_k produce un incremento en X_j , y un decremento en X_k produce un decremento en X_j .

$$X_k \xrightarrow{+} X_j$$

X_k influye negativamente sobre X_j , si un incremento en X_k produce un decremento en X_j , y un decremento en X_k produce un incremento en X_j .

$$X_k \xrightarrow{-} X_j$$

Análisis de variables

En esta sección se analizan las relaciones de influencia (interacciones) entre el crecimiento poblacional y el sistema de drenaje de un área tributaria que afora al canal Cartagena.

¹⁷ La fase de evaluación se analiza implícitamente en el tercer capítulo.

Para el análisis de las interacciones se estructura en dos partes, y que a continuación se presentan:

- Variables dinámicas poblacionales
- Relación existente entre la población, consumo de agua y remoción al sistema de drenaje:
 - a) variaciones de demanda en el consumo de agua
 - b) relaciones de consumo de agua y evacuación de aguas residuales

Variables dinámicas poblacionales

Las variables dinámicas que inciden en el crecimiento poblacional son los nacimientos, las muertes y la migración. De aquí se establecen los siguientes enunciados:

- R_1 : Los nacimientos influyen en el incremento de la población.
- R_2 : La población influye sobre los nacimientos.
- R_3 : Las muertes inciden en el decremento de la población.
- R_4 : La población influye sobre las muertes.
- R_5 : La migración incide en el aumento o decremento de la población.
- R_6 : La población influye sobre la migración.

Las relaciones de influencia correspondientes son:

$$R_1: N \xrightarrow{+} P$$

$$R_2: P \xrightarrow{-} N$$

$$R_3: M \xrightarrow{-} P$$

$$R_4: P \xrightarrow{+} M$$

$$R_5: MI \xrightarrow{+} P$$

$$R_6: P \xrightarrow{+} MI$$

En donde: N son los nacimientos, P es la población, M las muertes, MI es la migración.

De lo anterior puede desprenderse la interacción existente entre la población y el consumo de agua que requiere la población, y se establece así los siguientes enunciados y su correspondiente relación de influencia.

R_7 : La población incide en el incremento o decremento del consumo promedio de agua.

$$P \xrightarrow{-} CM$$

Donde: CM es el consumo promedio o medio de agua per cápita.

R_8 : La población influye en el aumento o decremento del caudal del agua suministrada.

Donde: $C.A.S$ es el caudal del agua suministrada.

$$P \xrightarrow{-} C.A.S$$

R_9 : El aumento o descenso del caudal de agua suministrada influye sobre el consumo promedio.

$$C.A.S \xrightarrow{+} C.M$$

R_{10} : El incremento o decremento del consumo promedio de agua influye sobre el caudal del agua suministrada.

$$C.M \xrightarrow{-} C.A.S$$

La relación existente entre la población, consumo de agua y su evacuación implica el análisis de los siguientes factores:

- *Variaciones de demanda en el consumo de agua.* El consumo de agua y la cantidad de aguas residuales varía de acuerdo a las estaciones del año, las condiciones atmosféricas, los días de la semana y las horas del día; las variaciones de día reflejan la actividad doméstica e industrial de la región. Las fluctuaciones de hora a hora producen un máximo cercano al mediodía y un mínimo en las primeras horas de la mañana.
- *Relaciones de consumo de agua y de evacuación de aguas residuales.* El flujo de agua residual en los drenajes varía con el consumo de agua.

Variaciones de demanda en el consumo de agua

Se establecen los siguientes coeficientes que representan la variación del caudal de consumo:

- a) Coeficiente de día de mayor consumo.
- b) Coeficiente de la hora de mayor demanda.

Coeficiente de día de mayor consumo o coeficiente de variación diaria (K_1): es la relación entre el valor del consumo máximo diario registrado en un año y el consumo medio diario relacionado a este año.

R_{11} : K_1 influye en el aumento o decremento del caudal del agua suministrada.

$$K_1 \xrightarrow{+} C.A.S$$

Coeficiente de la hora de mayor demanda o coeficiente de variación horaria (K_2): Las variaciones horarias de consumo, corresponden a la hora de mayor demanda.

R_{12} : K_2 incide en el incremento o disminución del caudal del agua suministrada.

$$K_2 \xrightarrow{+} C.A.S$$

Relaciones de consumo de agua y de evacuación de aguas residuales

Se refiere a la proporción de agua que se consume y ésta se vierte al drenaje. Alrededor del 60 a 70% del total del agua abastecida o suministrada se vierte al drenaje.

R_{13} : La relación de consumo del agua suministrada y su evacuación incide en el aumento o decremento del caudal de las aguas residuales.

$$RCAS \xrightarrow{+} CAR$$

Donde: $RCAS$ es la relación del consumo de agua suministrada que se vierte al drenaje.
 CAR es el caudal de las aguas residuales.

Otro factor que incide en el caudal del sistema de drenaje son los escurrimientos de las precipitaciones pluviales.

R_{14} : Las precipitaciones pluviales inciden en el incremento o decremento del caudal de las aguas residuales, como es el caso de un sistema de alcantarillado sanitario.

$$PP \xrightarrow{+} CAR$$

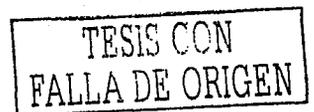
Donde: PP es la aportación de las precipitaciones pluviales.

Existen relaciones de influencia entre las áreas que tributan al Canal Cartagena.

Para efectos de representación de las relaciones, se divide el canal en cuatro tramos dentro de la jurisdicción de Coacalco y en el siguiente cuadro se indica los tramos y las áreas de procedencia del aforo que se vierten al canal. Véase el mapa en el anexo los tramos que se consideran.

TRAMO	AFORO DE PROCEDENCIA
I Canal Cartagena	Tultitlán Tultepec Rancho la Palma Bosques del Valle Ex Hda. San Felipe
II Canal Cartagena	Laurel La Garita
III Canal Cartagena	Ejidal Allende Villa de las Flores San José Rinconada San Felipe Los Acuales
IV Canal Cartagena	San Rafael Unidad Morelos Potrero Laguna

Áreas de procedencia tributaria que aforan al Canal Cartagena (Jurisdicción de Coacalco)



A continuación se muestran las relaciones correspondientes a los afloros de las áreas tributarias en los tramos del Canal Cartagena.

R_{15} : El caudal de agua residual procedente de Tultitlán incide en el caudal del canal Cartagena tramo I.

$$CART \xrightarrow{+} CARCI$$

Donde: $CART$. Es el caudal de aguas residuales procedentes de Tultitlán.
 $CARCI$. Caudal del canal Cartagena en el tramo I.

R_{16} : El caudal de agua residual procedente de Tultepec ($CARTu$) influye en el canal tramo I.

$$CARTu \xrightarrow{+} CARCI$$

R_{17} : El caudal de agua residual que afora en Rancho la Palma ($CARRp$) incide en el tramo I.

$$CARRp \xrightarrow{+} CARCI$$

R_{18} : El caudal residual que procede de Bosques de Valle ($CARBv$) incide en el tramo I.

$$CARBv \xrightarrow{+} CARCI$$

R_{19} : El caudal residual que afora en Ex Hda. San Felipe ($CAREf$) influye en el tramo I.

$$CAREf \xrightarrow{+} CARCI$$

R_{20} : El caudal de agua residual procedente del Laurel ($CARLa$) incide en el canal Cartagena tramo II.

$$CARLa \xrightarrow{+} CARCII$$

R_{21} : El caudal de agua residual que procede de la barranca la Garita ($CARLg$) influye en el tramo II.

$$CARLg \xrightarrow{+} CARCII$$

R_{22} : El caudal de agua residual de la barranca ejidal ($CAREj$) influye en el tramo III.

$$CAREj \xrightarrow{+} CARCIII$$

R_{23} : El caudal de agua residual de la barranca Allende ($CARAI$) influye en el tramo III.

$$CARAI \xrightarrow{+} CARCIII$$

R_{24} : El caudal de agua residual que afora en Villa de las Flores ($CARIj$) incide sobre el tramo III.

$$CARIj \xrightarrow{+} CARCIII$$

R_{25} : El caudal de agua residual que afora en San José ($CARSj$) incide en el tramo III.

$$CARSj \xrightarrow{+} CARCIII$$

R_{26} : El caudal de agua residual procedente de Rinconada San Felipe ($CARSf$) incide sobre el tramo III.

$$CARSf \xrightarrow{+} CARCIII$$

R_{27} : El caudal de agua residual que procede de la barranca los Acuales ($CARAc$) influye sobre el tramo III.

$$CARAc \xrightarrow{+} CARCIII$$

R_{28} : El caudal de agua residual procedente de San Rafael ($CARSr$) incide sobre el canal Cartagena en el tramo IV.

$$CARSr \xrightarrow{+} CARCIV$$

R_{29} : El caudal de agua residual que procede de la Unidad Morelos ($CARUm$) incide sobre el canal en el tramo IV.

$$CARUm \xrightarrow{+} CARCIV$$

R_{30} : El caudal de agua residual que afora en Potrero Laguna ($CARPI$) incide en el tramo IV.

$$CARPI \xrightarrow{+} CARCIV$$

Los tramos del canal Cartagena se relacionan entre si.

R_{31} : El caudal de agua residual en el tramo I influye sobre el nivel del tramo II.

R_{32} : El caudal de agua residual en el tramo II incide en el flujo del tramo III.

R_{33} : El caudal de agua residual en el tramo III influye sobre el flujo del tramo IV.

$$R_{31}: CARCI \xrightarrow{+} CARCII$$

$$R_{32}: CARCII \xrightarrow{+} CARCIII$$

$$R_{33}: CARCIII \xrightarrow{+} CARCIV$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una vez que se establecen los enunciados con su respectiva relación de influencia, se procede a su representación a través de un diagrama de influencias.

Un sistema puede reducirse a un par ordenado (C, R) , en donde C es el conjunto de sus elementos y la relación R establece la vinculación que se produce entre los elementos. El par ordenado puede representarse mediante un *diagrama de influencias*, en donde los nodos o vértices del diagrama constituyen los elementos del sistema, y los arcos o flechas representan las relaciones de influencia entre ellas.

Diagrama de influencias

A continuación se describe el diagrama de influencias correspondiente a la zona tributaria, el cual se estructura en tres partes con el fin de identificar los elementos que interactúan y sus correspondientes relaciones que se representan a través de grafos.

Establecimiento del diagrama de las variables dinámicas poblacionales

Los elementos del sistema poblacional son: nacimientos, muertes y migración, y se establecen las relaciones a través de un conjunto de enunciados:

R_1 : Los nacimientos influyen en el incremento de la población.

R_2 : La población influye sobre los nacimientos.

R_3 : Las muertes inciden en el decremento de la población.

R_4 : La población influye sobre las muertes.

R_5 : La migración influye en el aumento o decremento de la población.

R_6 : La población incide sobre la migración

La vinculación de los elementos se representa en el siguiente diagrama.

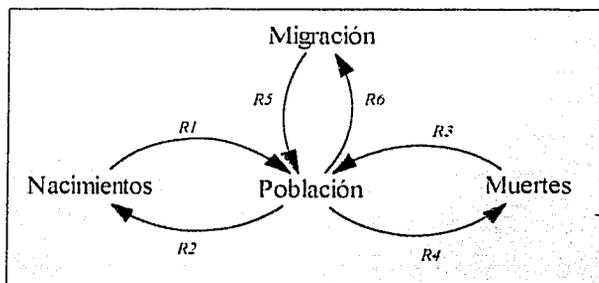


Diagrama de influencias de las variables dinámicas poblacionales

El diagrama anterior es un *bucle de retroalimentación* (conjunto cadenas de influencias circulares cerradas que describen el comportamiento de la estructura) en la que la perturbación de cualquier elemento tiende a reforzarse a lo largo de la cadena, acelerando el crecimiento de la población o el decremento de la población a través del tiempo.

Establecimiento del diagrama de las relaciones existentes entre la población, consumo de agua y remoción al sistema de drenaje

Los elementos son: población, caudal de agua suministrada, consumo promedio, coeficientes de variación horaria y diaria, caudal de agua residual.

El conjunto de enunciados es:

- R^- : La población influye en el aumento o decremento del consumo promedio de agua.
- R^s : La población incide en el incremento o decremento del caudal del agua suministrada.
- R_9 : El incremento o descenso del caudal de agua suministrada influye sobre el consumo promedio.
- R_{10} : El aumento o decremento del consumo promedio de agua influye sobre el caudal del agua suministrada.
- R_{11} : K_1 influye en el aumento o decremento del consumo medio.
- R_{12} : K_2 incide en el incremento o disminución del caudal del agua suministrada.
- R_{13} : La relación de consumo del agua suministrada y su evacuación incide en el aumento o decremento del caudal de las aguas residuales.

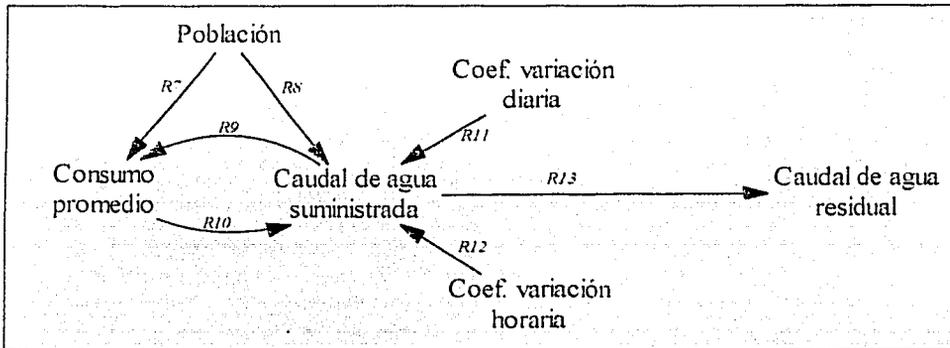


Diagrama de influencias de la relación población, consumo de agua y remoción al sistema de drenaje

Establecimiento del diagrama de influencia precipitación pluvial y aguas residuales.

Los elementos que intervienen son: caudal de agua residual y precipitación pluvial.

La relación entre ambos elementos es:

- R_{14} : Las precipitaciones inciden en el incremento del caudal de las aguas residuales.

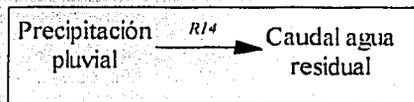


Diagrama de influencia precipitación pluvial y aguas residuales

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Diagrama de influencias de una área tributaria

Ahora se conjuntan los tres diagramas anteriores de influencia, para formar el diagrama correspondiente a una área tributaria, en donde interviene la relación entre la población, consumo de agua y su remoción al sistema de drenaje, y además de las precipitaciones que inciden sobre el caudal del sistema.

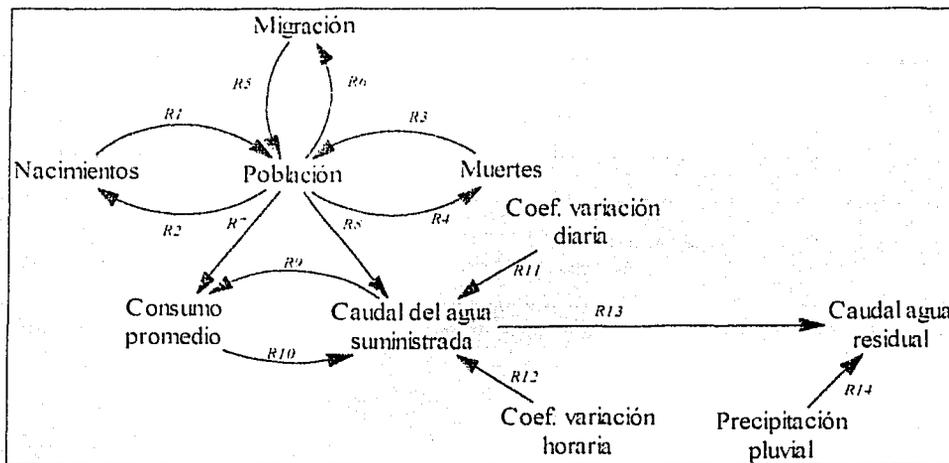


Diagrama de influencias de una área tributaria

En el diagrama anterior se detecta la existencia de variables que presentan variaciones a través del tiempo, y que a continuación se describen:

- Población.* La población de una comunidad presenta variación en su número de habitantes a través del tiempo.
- Caudal del agua suministrada.* El agua que se suministra a una población muestra variaciones en el caudal con respecto al tiempo.
- Caudal de aguas residuales.* El agua que se vierte al drenaje presenta variaciones en el caudal a través del tiempo.

A continuación se establecen las relaciones entre las zonas tributarias que vierten sus aguas residuales al Canal Cartagena.

Establecimiento del diagrama de relaciones de las áreas tributarias que aforan al canal Cartagena

Los elementos que intervienen son:

- Las zonas tributarias.
- Los tramos del canal Cartagena.

Los enunciados son:

- R_{15} : El caudal de agua residual procedente de Tultitlán incide en el caudal del canal Cartagena tramo I.
- R_{16} : El caudal procedente de Tultepec influye en el canal tramo I.
- R_{17} : El caudal que aflora en Rancho la Palma incide en el tramo I.
- R_{18} : El caudal que procede de Bosques de Valle incide en el tramo I.
- R_{19} : El caudal que aflora en Ex Hda. San Felipe influye sobre el tramo I.
- R_{20} : El caudal de agua residual procedente del Laurel incide en el canal Cartagena tramo II
- R_{21} : El caudal que procede de la barranca la Garita influye en el canal tramo II.
- R_{22} : El caudal procedente de la barranca ejidal influye en el tramo III.
- R_{23} : El caudal que procede de la barranca Allende influye en el tramo III.
- R_{24} : El caudal que descarga en Villa de las Flores incide sobre el tramo III.
- R_{25} : El caudal que aflora en San José incide en el tramo III.
- R_{26} : El caudal procedente de Rinconada San Felipe incide en el tramo III.
- R_{27} : El caudal de la barranca los Acuales influye sobre el tramo III.
- R_{28} : El caudal de agua residual procedente de San Rafael incide en el canal tramo IV.
- R_{29} : El caudal de agua residual que procede de la Unidad Morelos incide en el tramo IV.
- R_{30} : El caudal que aflora en Potrero Laguna influye sobre el tramo IV.
- R_{31} : El caudal de agua residual en el tramo I influye sobre el nivel de flujo del tramo II.
- R_{32} : El caudal del tramo II incide sobre el flujo del tramo III.
- R_{33} : El caudal en el tramo III influye en el flujo tramo IV.

En el siguiente diagrama se representan las relaciones entre los tramos del Canal Cartagena y de las áreas tributarias.

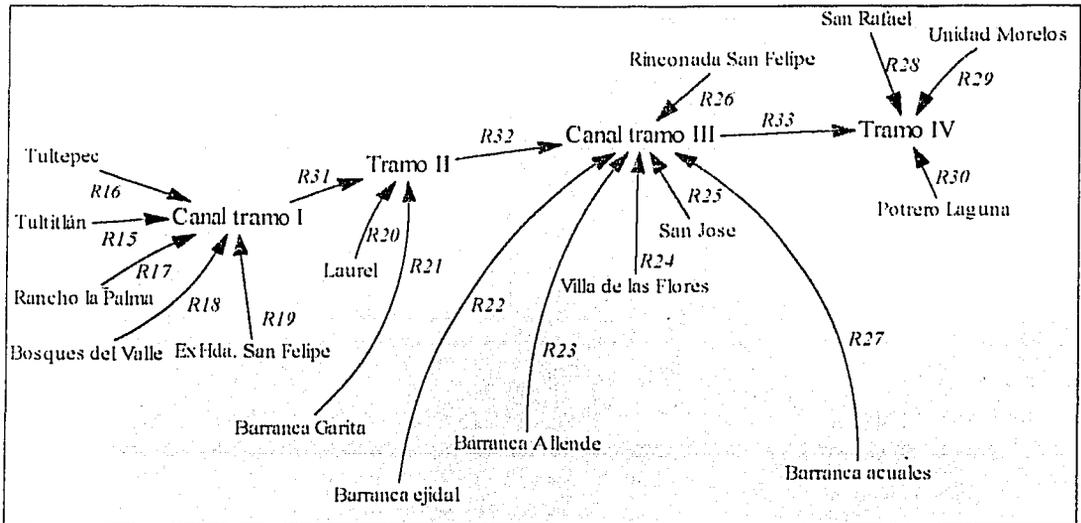


Diagrama de relaciones de las áreas tributarias que afloran al Canal Cartagena

Una vez que se han analizado las variables que inciden en el sistema y se han establecido las relaciones causales, el paso siguiente en el proceso de modelado, es la fase de formulación.

II.3 FORMULACIÓN DEL MODELO

La fase de formulación consiste en el establecimiento del *diagrama de Forrester*¹⁸ o *diagrama de Tasa-Nivel*, a partir del cual se formulan las ecuaciones del modelo. Se procede asignar valores a los parámetros que intervienen en el sistema. La fase concluye cuando se determina la estructura matemática del modelo y se programan en un entorno computacional.

Mediante la conjunción de técnicas informáticas y matemáticas, es posible pasar de la descripción de un cierto sistema, en un lenguaje adecuado, a la generación del comportamiento correspondiente.

En el enfoque de dinámica de sistemas "DS", las ecuaciones del sistema se ilustran mediante diagramas y éstos se procesan a través de un programa de computadora, que permite simular posibles escenarios.

Si se parte de la observación de los distintos elementos que aparecen en un diagrama de influencias, algunas de estas variables presentan variaciones con respecto al tiempo.

Sea la variable flujo que representa la variación con respecto al tiempo del valor del estado x , se tiene que:

FLUJO \longrightarrow ESTADO

La influencia anterior puede expresarse como:

$$\frac{dX}{dt} \longrightarrow X$$

En donde dX/dt denota la variación con respecto al tiempo de la magnitud X . Indica que la variación con respecto al tiempo de X influye en el crecimiento de la propia variable X .

La variable X se denomina *variable de estado* y dX/dt *variable de flujo*.

Estos sistemas se componen de tres variables: estado, flujo, auxiliar. Estas variables pueden combinarse para formar iteraciones de realimentación y que al interconectarse describen el sistema.¹⁹

La estructura de un sistema viene dada por las relaciones de influencia y en cuanto al comportamiento se manifiesta mediante trayectorias o arcos.

¹⁸ La metodología de Forrester (ingeniero de sistemas del Instituto Tecnológico de Massachussets) utiliza tanto instrumentos de matemática aplicada (grafos, sistemas dinámicos) como instrumentos informáticos y fue desarrollada en la década de los cincuentas.

¹⁹ Helweg. "*Recursos hidráulicos, planeación y administración*". (Limusa, México, 1992)

Diagramas de Forrester

Estado. Representa magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el transcurso del tiempo e integra los resultados de la acción del sistema. gráficamente se representan mediante rectángulos y también se conocen como variables de nivel o acumulación, stocks.

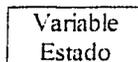
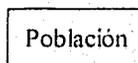


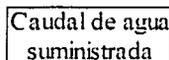
Diagrama de una variable estado

En el modelo se establecen los siguientes estados:

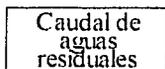
Población. Indica el número de habitantes en una comunidad a través del tiempo.



Caudal de agua suministrada. Representa el caudal de agua a través del tiempo que se requiere para satisfacer la demanda poblacional.



Caudal de aguas residuales. Indica el caudal a través del tiempo de una área tributaria que afora al Canal Cartagena mediante una planta de bombeo o escorrentía natural.



Flujo. Determinan las variaciones en el estado del sistema. Las variables de flujo caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuáles quedan acumuladas en los correspondientes estados. Los flujos se representan a través de un símil hidrodinámico y estas variables se conocen también como flows, tasa.

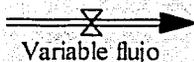
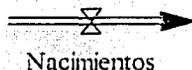


Diagrama de una variable flujo

El bloque representativo de un flujo admite, como señal de entrada, la información proveniente de los estados, o de las variables auxiliares del sistema y suministra como salida el flujo que alimenta a un estado.

En el modelo se establecen las siguientes variables:

Nacimientos. Determina la variación de los nacimientos que inciden sobre la población en su incremento.



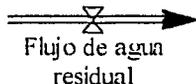
Muertes. Representa la variación de las muertes que influyen en el decremento de la población.



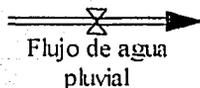
Migración. Indica la variación en la migración que incide sobre el número de habitantes.



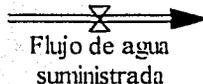
Flujo de aguas residuales. Representa la variabilidad de aguas residuales en una área tributaria.



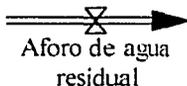
Flujo de agua pluvial. Determina la variación del agua proveniente de la lluvia en una área tributaria y que es vertida al caudal de aguas residuales.



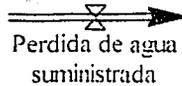
Flujo de agua suministrada. Indica la variabilidad de agua potable que se distribuye a la población de una área tributaria.



Aforo de agua residual. Es la variación de descarga de agua residual al Canal Cartagena de una área tributaria.



Perdida de agua suministrada. Representa la variabilidad de agua suministrada que no se vierte al sistema de drenaje o alcantarillado.



A las variables de flujo se asocian ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. Las ecuaciones asociadas a una variable de flujo reciben la denominación de *ecuaciones de flujo o funciones de decisión*.

Variable auxiliar. Representa pasos o etapas en los que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los estados y unen los estados o canales de información y se representa a través de un círculo.



Representación de una variable auxiliar

El modelo emplea las siguientes variables auxiliares:

Precipitación pluvial. Señala la aportación pluvial de una área tributaria que se vierte al sistema de drenaje.



Consumo promedio. Indica la cantidad de agua suministrada que se requiere para satisfacer la demanda poblacional por habitante al día.



Aforo de aguas residuales en el Canal Cartagena. Indica el aforo en un tramo del canal, en el cual se vierten las aguas residuales procedentes de las áreas tributarias. En el modelo se establecen cinco tramos.

Constante. Es un elemento del modelo que no cambia de valor. Permanece con el mismo valor asignado a través del paso de tiempo.

Constante

Representación de una constante

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En alusión al modelo se establecen las siguientes constantes:

- Tasa de nacimiento, tasa de muertes, tasa de migración.
- Consumo promedio de agua suministrada
- Coefficiente de variación horaria y diaria, relación consumo/evacuación.

Otros diagramas representativos de Forrester son: canal de material, nube y retraso.

Canal o enlace de material. Representa una transmisión de una magnitud física que se conserva. Se representa a través de una flecha.



Representación del canal de material

Las variables de estado y de flujo pueden unirse entre sí por medio de canales.

El canal de material en el modelo representa la relación entre los elementos que componen el sistema. En referencia a la población indica el número de individuos que se transfieren de un nodo a otro, a excepción en los puntos en donde se localice un sumidero. En relación al flujo de agua residual indica la transferencia del liquido de un punto a otro.

Nube. Representa una fuente o un pozo: puede interpretarse como un nivel que no tiene interés y es prácticamente inagotable.



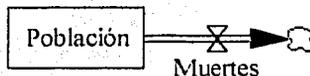
Diagrama de una nube

Una variable estado puede incrementarse, también mediante una fuente exterior al sistema. En este caso, si la fuente se considera infinita o inagotable, se representa en los gráficos por medio de una nube, como en el siguiente diagrama, en la que la variable nacimiento indica que es una fuente prácticamente inagotable en el sentido que en la población se registran nacimientos.



Representación de una fuente

Una variable estado a la vez puede decrementarse sobre un pozo o sumidero exterior al sistema. En este caso si se supone que la capacidad del pozo es infinita, se representa mediante una nube, como se muestra en el diagrama siguiente, en donde la variable muertes indica que es un pozo, ya que las muertes disminuyen la población, y en otro sentido señala que en la población invariablemente se registran muertes.



Representación de un sumidero

El proceso de elaboración de un modelo, bajo el enfoque de sistema dinámico se basa en principios.

Principios de DS²⁰

Frontera cerrada. Un sistema de retroalimentación es un sistema cerrado. El comportamiento dinámico se origina dentro de su estructura interna.

Las decisiones deberán tomarse siempre dentro de las iteraciones de retroalimentación. La decisión controla la acción que altera los niveles del sistema.

La iteración de retroalimentación - elemento estructural de los sistemas. El comportamiento dinámico se genera por la retroalimentación.

Los niveles y las tasas como una estructura de la iteración. La iteración de retroalimentación se compone de dos variables: los niveles (estados) y las tasas (acciones)

Los niveles son integraciones. Los niveles integran (o acumulan) los resultados de la acción en un sistema.

Los niveles sólo son cambiados por la tasa. Una variable de nivel se calcula por el cambio, causado por las variables de tasa, que altera el valor previo del nivel

Niveles y tasas no diferenciadas por unidades de medida. Las unidades de medida de una variable no distinguen entre un nivel y una tasa.

Las tasas no mensurables instantáneamente. Ninguna tasa puede, en principio, controlar a otra tasa sin una variable de nivel interventora.

Las tasas dependen sólo de los niveles y de las constantes. Ninguna variable de tasa depende directamente de cualquier otra variable de tasa.

Las variables de nivel y las variables de tasa deberán alternarse.

Los niveles describen totalmente la condición de sistema.

El tiempo delta del intervalo de solución se hallará en todas las ecuaciones de nivel, y no en otras.

Igualdad dimensional: Todo término en cualquier ecuación, deberá medirse con las mismas dimensiones.

Sólo habrá variables auxiliares en los enlaces de material o información.

Los enlaces de material conectan los niveles con las tasas. Los enlaces son las únicas entradas para las ecuaciones de tasa.

La información como el tejido de conexión de los sistemas. Sólo los enlaces de información pueden conectar entre los subsistemas conservativos.

²⁰ Helweg, "*Recursos hidráulicos, planeación y administración*". (Limusa, México, 1992)

Ahora se desarrolla el diagrama de Forrester del modelo de simulación, el cual se estructura en tres diagramas.

Construcción del diagrama de Forrester. Área tributaria

En esta sección, se estructura el diagrama correspondiente a una área tributaria. Se enumeran las variables poblacionales que interactúan entre sí y se representan en el siguiente diagrama.

Variables constantes: Tasa de nacimientos, tasa de muertes y tasa de migración

Variables estado: Población

Variables flujo: Nacimientos, muertes y migración

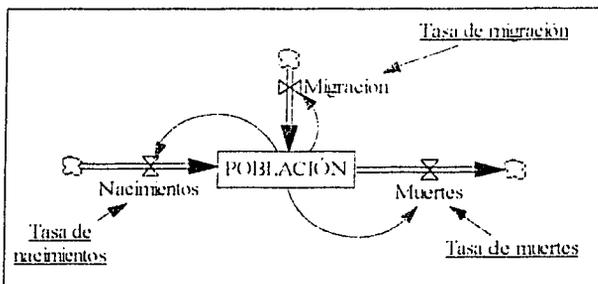


Diagrama de Forrester poblacional

Se representan en el siguiente diagrama las variables que interactúan con el sistema de drenaje.

Constantes: Coeficiente variación horaria y diaria, relación consumo/evacuación, consumo promedio de agua suministrada.

Estados: Caudal de agua suministrado y caudal de aguas residuales.

Flujos: Pérdida de agua suministrada, flujo de agua suministrada, flujo de agua residual, flujo de agua pluvial, aforo de agua residual.

Auxiliares: Precipitación pluvial y consumo promedio.

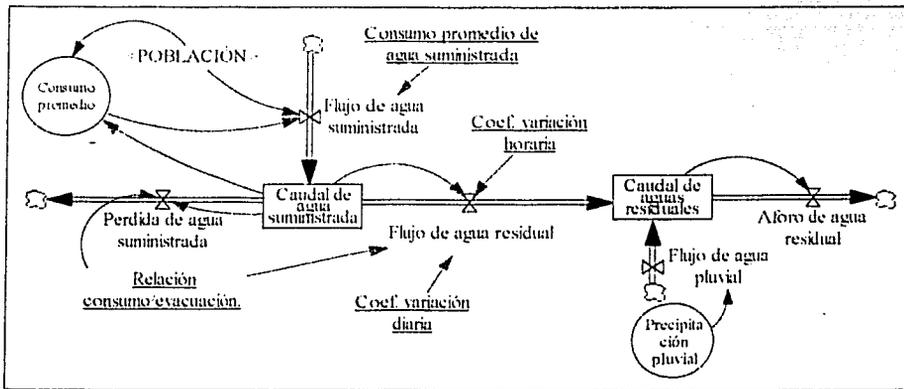


Diagrama de Forrester de relación existente entre población, consumo de agua y remoción al sistema de drenaje de una área tributaria

Construcción del diagrama Forrester. Áreas tributarias que aforan al Canal Cartagena.

Las variables que intervienen se enumeran en el siguiente cuadro.

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	REPRESENTA
CART	Estado	Caudal de agua residual de Tultitlán
CARTu	Estado	Caudal de agua residual de Tultepec
CARRp	Estado	Caudal de agua residual de Rancho la Palma
CARBy	Estado	Caudal de agua residual de Bosques del Valle
CAREf	Estado	Caudal de agua residual de Ex Hda. Felipe
CARLa	Estado	Caudal de agua residual de Laurel
CARLg	Estado	Caudal de agua residual de la barranca la Garita
CAREj	Estado	Caudal de agua residual de Ejidal
CARAl	Estado	Caudal de agua residual de la barranca Allende
CARVf	Estado	Caudal de agua residual de Villa de las Flores
CARSj	Estado	Caudal de agua residual de San José
CARSf	Estado	Caudal de agua residual de Rinconada San Felipe
CARAc	Estado	Caudal de agua residual de la barranca los Acuiles
CARSr	Estado	Caudal de agua residual de San Rafael
CARUm	Estado	Caudal de agua residual de la Unidad Morelos
CARPI	Estado	Caudal de agua residual de Potrero Laguna
ARCI	Auxiliar	Aforo de agua residual de canal Cartagena tramo I
ARCII	Auxiliar	Aforo de agua residual de canal Cartagena tramo II
ARCIII	Auxiliar	Aforo de agua residual de canal Cartagena tramo III
ARCIV	Auxiliar	Aforo de agua residual de canal Cartagena tramo IV

Ahora se establece el diagrama correspondiente a las áreas tributarias que aforan al canal Cartagena considerando la Jurisdicción de Coacalco.

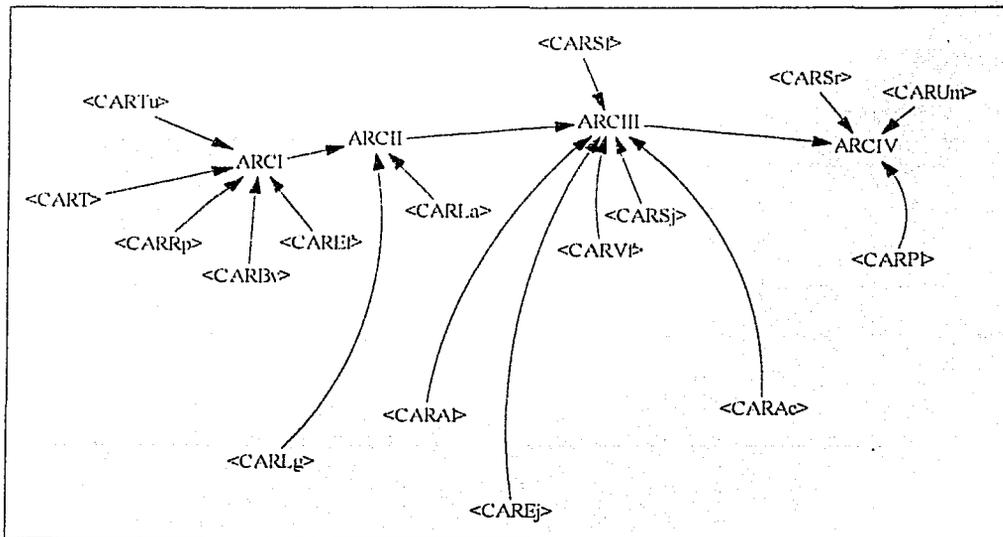


Diagrama de Forrester de las áreas tributarias que aforan al Canal Cartagena

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Formulación de ecuaciones

En esta sección se formulan matemáticamente los elementos que componen el sistema.

El objetivo de la metodología de Forrester es asociar un sistema dinámico a un sistema que se describe mediante un grafo. Para ello se establece la relación entre el *flujo F* y el *estado x*.



Los elementos básicos de la formulación del diagrama anterior son:

- El estado x
- El flujo F

En el diagrama F determina la variación del estado x . Se establece matemáticamente la relación entre el *flujo F* y el *estado x* y se expresa así:

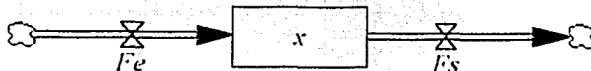
$$\frac{dx}{dt} = F$$

En donde: dx/dt denota la variación con respecto del tiempo x , y la variable x representa la acumulación de la variación (variable estado).

De la expresión anterior se obtiene el *estado x*:

$$x(t) = x(0) + \int_0^t F dt$$

A cada estado x se le puede asociar un flujo de entrada F_e y uno de salida F_s , como en el siguiente diagrama.



Los elementos del diagrama son: el estado x y los flujos F_e y F_s , de tal forma que la siguiente ecuación representa su evolución:

$$\frac{dx}{dt} = F_e - F_s$$

es decir,

$$x(t) = x(0) + \int_0^t (F_e - F_s) dt$$

Los valores actuales de la variable *nivel* resultan de la diferencia acumulada entre los flujos de entrada y de salida.

El diagrama de bloque permite sintetizar las relaciones entre las entradas y salidas de un proceso. Ahora se establecen las ecuaciones correspondientes al diagrama de Forrester poblacional.

Ecuaciones del diagrama Forrester poblacional

Los elementos del subsistema poblacional son:

El estado: *población (p)*

Los flujos: *nacimientos (N), muertes (M), y migración (Mi)*

Las constantes: *tasa de nacimiento (Tn), tasa de migración (Tmi), tasa de muertes (Tm)*

La ecuación diferencial correspondiente es: $\frac{dp}{dt} = N + Mi - M$

El estado *p* es:

$$p(t) = p(0) + \int_0^t (N + Mi - M) dt$$

Donde: $N = p * Tn$

$Mi = p * Tmi$

$M = p * Tm$

Ecuaciones del diagrama de Forrester Diagrama de Forrester de una área tributaria

Se establecen las ecuaciones que vinculan la relación existente entre la población y el sistema de drenaje de una tributaria.

Los elementos que interactúan son:

Los estados: *caudal de agua suministrada (CAS) y caudal de agua residual (CAR)*

Los flujos: *flujo de agua suministrada (FAS), flujo de agua residual (FAR), flujo de agua pluvial (FAP), aforo de agua residual (ACAR) y pérdida de agua suministrada (PAS)*

Las variables auxiliares: *consumo promedio (CP) y precipitación pluvial (pp)*

Las constantes: *coeficiente variación horaria (K₁), coeficiente variación diaria (K₂), relación consumo evacuación (rc) y consumo promedio de agua suministrada (CAP)*

Matemáticamente estas relaciones se expresan en relación al tiempo así:

Caudal de agua suministrada: $\frac{dCAS}{dt} = FAS - FAR - PAS$

El estado *CAS* es:

$$CAS(t) = CAS(0) + \int_0^t (FAS - FAR - PAS) dt$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Donde: $FAS = (p * CAP) / 86\,400$
 $PAS = CAS * (1 - rc)$

Para el cálculo del flujo de agua residual que afora hacia un cárcamo se emplea la siguiente expresión:

$$FAR = CAS * K_1 * K_2 * rc$$

En el cálculo precedente de las barrancas se utiliza la expresión

$$FAR = (CAS * K_1 * K_2 * rc * 0.035^{21})$$

Caudal de agua residual: $\frac{dCAR}{dt} = FAR - FAP - ACAR$

El estado CAR es:

$$CAR(t) = CAR(0) + \int_0^t (FAR + FAP - ACAR) dt$$

Para el cálculo de flujo de agua pluvial que afora a un cárcamo se considera la siguiente expresión:

$$FAP = c * (pp / 2,592,600) * a$$

En donde c es el coeficiente de impermeabilidad, pp es la intensidad de lluvia, a es el área drenada.

Para el cálculo del flujo que proviene de una barranca se establece:

$$FAP = (0.022 * E * a * (pp / 720) * (s/a)^{1.2})$$

En donde E es el coeficiente de medio flujo de la barranca y s es la pendiente de la barranca.

$$ACAR = CAR$$

Ecuaciones del diagrama de Forrester de las áreas tributarias que aforan al Canal Cartagena

Ahora se indica el conjunto de ecuaciones correspondientes al diagrama de Forrester de las áreas que aforan al canal, sin antes considerar los elementos que interactúan.

- Las variables auxiliares son: *ARCI* (Aforo de agua residual del Canal Cartagena tramo I)
ARCII (Aforo de agua residual del Canal Cartagena tramo II)
ARCIII (Aforo de agua residual del Canal Cartagena tramo III)
ARCIV (Aforo de agua residual del Canal Cartagena tramo IV)

²¹ coeficiente de Manning para el flujo de agua en barrancas con plantas acuáticas.

Las ecuaciones son:

$$1) \text{ ARCI} = (\text{CART} + \text{CARTu} + \text{CARRp} + \text{CARBv} + \text{CAREf}) * 0.014^{22}$$

Donde:

CART = Caudal de agua residual procedente de Tultitlán

CARTu = Caudal de agua residual que proviene de Tultepec

CARRp = Caudal de agua residual que afora en el cárcamo Rancho la Palma

CARBv = Caudal que afora desde el cárcamo Bosques del Valle

CAREf = Caudal que afora en Ex Hda. San Felipe

$$2) \text{ ARCII} = \text{ARCI} + (\text{CARLa} + \text{CARLg}) * 0.014$$

CARLa = Caudal de agua residual que afora en Laurel.

CARLg = Caudal de agua residual procedente de la Barranca La Garita

$$3) \text{ ARCIII} = \text{ARCII} + (\text{CARAI} + \text{CAREj} + \text{CARVf} + \text{CARSj} + \text{CARSF} + \text{CARAc}) * 0.014$$

CAREj = Caudal de agua residual procedente de la barranca Allende

CARAI = Caudal de agua residual procedente de la barranca Ejidal

CARVf = Caudal de agua residual que afora en el cárcamo Villa de las Flores

CARSj = Caudal de agua residual que afora en San José

CARSF = Caudal de agua residual que afora en Rinconada San Felipe

CARAc = Caudal de agua residual procedente de la barranca los Acuales

$$4) \text{ ARCIV} = \text{ARCIII} + (\text{CARSr} + \text{CARPI} + \text{CARUm}) * 0.014$$

CARSr = Caudal de agua residual que afora en el cárcamo San Rafael

CARUm = Caudal de agua residual que afora en la unidad Morelos

CARPI = Caudal de agua residual que afora en Potrero Laguna

De acuerdo a la metodología de dinámica de sistemas se ha desarrollado las dos primeras etapas del modelado: la construcción del diagrama de influencias y el diagrama de Forrester. El siguiente paso es desarrollar el modelo en el computador.

Programación del modelo en el computador

Una vez que se ha definido las relaciones entre las variables del modelo, éste puede programarse en un computador. Para ello puede emplearse cualquier lenguaje de alto nivel (Como Fortran, Basic o C) o alguno de los entornos informáticos de simulación que utilizan lenguajes específicos para la dinámica de sistemas (como Dynamo, Stella, Powersim o Vensim).

Consideraciones generales del empleo de un lenguaje de alto nivel y un entorno informático

El uso de un lenguaje de alto nivel requiere de la programación de métodos numéricos de integración de ecuaciones diferenciales.

²² Coeficiente de Manning.

Los entornos informáticos implementan algoritmos de integración.

Características de los entornos gráficos

- Flexibilidad en la construcción de modelos, en formato texto y con ayudas gráficas mediante los diagramas de Forrester.
- Versatilidad en el mantenimiento, modificación y actualización del modelo.

La programación de modelos en estos entornos puede realizarse de dos maneras distintas:

- 1) Escribiendo las ecuaciones en un lenguaje determinado.
- 2) Utilizando un entorno gráfico con el que se dibuja el diagrama de influencias o el de Forrester y se escriben después las ecuaciones que definen cada variable.

El modelo de simulación se desarrolla en el entorno gráfico del programa *vensim*²³ tomando en consideración la versatilidad del programa. La programación en Vensim puede realizarse de forma gráfica o escribiendo las ecuaciones

Para programar informaticamente el modelo es necesario proporcionar datos adicionales especificando la relación entre las distintas variables (esta información se denomina *datos del modelo*).

Los datos del modelo pueden clasificarse en tres grupos:

- 1) *Constantes*. Son parámetros que corresponden a variables que no varían con el tiempo.
- 2) *Valores numéricos*. Los valores numéricos definen funciones lineales, en dinámica de sistemas comúnmente se definen las relaciones no lineales mediante tabla de valores que se caracterizan por ser una serie de datos numéricos.
- 3) *Datos dinámicos*. Son las variables *x* que cambian de valor a lo largo del tiempo pero que no son calculados por el modelo.

A continuación se enumeran y se describen los datos del modelo (*información adicional*)

Las *constantes* del modelo son: Tasa de nacimiento, tasa de migración, tasa de muertes, coeficiente de variación horaria y diaria, relación consumo/evacuación, consumo promedio de agua suministrada. Los *valores numéricos* lo constituyen los datos proporcionados por el SMN, aunado a los pronósticos que se obtuvieron a través de la técnica de series de tiempo. Los *datos dinámicos* lo constituyen los datos poblacionales de las áreas tributarias que se obtuvieron a través del Bando de Desarrollo Municipal 2000 -2003.

El presente capítulo comprende las dos primeras fases del desarrollo del modelo de simulación: *Conceptualización y Formulación*. El siguiente capítulo se desarrolla la última fase: *Evaluación o validación del modelo*.

²³ La dirección electrónica de Vensim es: www.vensim.com

CAPITULO III

SIMULACIONES Y VALIDACIÓN DEL MODELO

III.1 Simulaciones

III.2 Validación

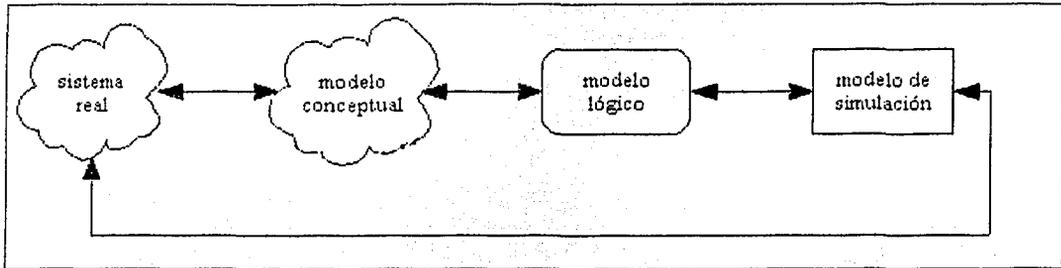
III.1 SIMULACIONES

Introducción

Cuando se construye un modelo de un sistema real, se establece un *modelo conceptual* del sistema que contiene los elementos del sistema real que requieren ser incluidos en el modelo, de esta conceptualización del sistema se forma un *modelo lógico* que contiene las relaciones lógicas entre los elementos del sistema (diagrama de Forrester), así como las variables exógenas que inciden en el sistema, y cuando el modelo lógico se desarrolla en el computador se genera entonces un *modelo de simulación*.

La simulación es una técnica numérica que describe el comportamiento de un sistema en un periodo de tiempo.

El proceso de elaboración de un modelo de simulación es un proceso iterativo con sucesivas refinaciones, véase el siguiente esquema.



Proceso iterativo de un modelo de simulación

De acuerdo a la metodología de Forrester una vez que se ha elaborado el modelo de simulación se procede a simular los posibles escenarios o eventos que pueden acontecer en el sistema en estudio.

El *modelo de simulación: sistema de drenaje – crecimiento poblacional*²⁴ analiza la interacción entre el crecimiento poblacional y el sistema de drenaje, permite estimar el caudal de aguas residuales del sistema de drenaje del municipio de Coacalco con el fin de sustentar la toma de decisiones, así como el caudal procedente de los ayuntamientos de Tultitlán y de Tultepec.

El modelo se estructura en subsistemas (áreas tributarias²⁵) que aforan al canal Cartagena, lo que permite identificar los puntos críticos del sistema, además de estimar los requerimientos poblacionales para satisfacer la demanda del vital líquido y determinar los aforos esperados de las áreas tributarias.

²⁴ El modelo se desarrolla en el entorno gráfico Vensim (versión 4.2a).

²⁵ Obsérvese el mapa de la estructura general del sistema de drenaje en la página 17.

Cada una de las áreas tributarias puede analizarse para su estudio y que enseguida se enumeran:

- Ayuntamiento de Tultitlán
- Ayuntamiento de Tultepec
- Cárcamo Rancho la Palma
- Cárcamo Bosques de Valle.
- Cárcamo Ex Hda. San Felipe
- Cárcamo Laurel
- Barranca la Garita
- Barranca Ejidal
- Barranca Allende
- Cárcamo Villa de las Flores
- Cárcamo San José
- Cárcamo Rinconada San Felipe
- Barranca los Acuales
- Cárcamo San Rafael
- Cárcamo Unidad Morelos
- Cárcamo Potrero Laguna

Para establecer la relación entre las áreas tributarias el Canal de Cartagena se divide en 4 tramos²⁶ en la jurisdicción del municipio de Coacalco. Los tramos reciben el aforo de las áreas tributarias y a continuación se indica los tramos en que aforan las correspondientes áreas.

- Tramo I (Tultitlán, Tultepec, Rancho la Palma, Bosques del Valle y Ex Hda. San Felipe)
- Tramo II (Laurel y la Garita)
- Tramo III (Ejidal, Allende, Villa de las Flores, San José, Rinconada San Felipe y los Acuales)
- Tramo IV (San Rafael, Unidad Morelos y Potrero Laguna)

Las siguientes variables pueden modificarse en el modelo: tasa de nacimientos, tasa de migración, tasa de muertes, consumo promedio de agua suministrada, coeficiente de variación horaria (K_1), coeficiente de variación diaria (K_2), relación consumo/evacuación, lo que permite simular distintos escenarios que pueden acontecer en el sistema de drenaje.

Para el análisis del periodo comprendido de enero de 2002 a junio de 2003 se analizan 10 posibles escenarios.

- *Escenario 1 Área tributaria. Ayuntamiento de Tultitlán (Tendencia actual)*
- *Escenario 2 Área tributaria. Ayuntamiento de Tultepec (Tendencia actual)*
- *Escenario 3 Área tributaria. Bosques del Valle (Tendencia actual)*
- *Escenario 4 Área tributaria. Ex Hacienda San Felipe (Tendencia actual)*
- *Escenario 5 Tramo I Canal Cartagena (Tendencia actual)*
- *Escenario 6 Explosión demográfica*
- *Escenario 7 Decaimiento poblacional*
- *Escenario 8 Periodo lluvioso*
- *Escenario 9 Periodo seco*
- *Escenario 10 Caótico (Decaimiento poblacional y periodo seco)*

²⁶ Véase mapa de los tramos del Canal Cartagena en el anexo.

ESCENARIO I ÁREA TRIBUTARIA. AYUNTAMIENTO DE TULTITLÁN²⁷ (Tendencia actual)

De acuerdo al organismo público descentralizado de Tultitlán *APAST* (Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Tultitlán), los principales puntos de descarga del municipio son: Emisor poniente, Gran Canal y Canal Cartagena²⁸, este último es de interés en el estudio.

Análisis poblacional tributaria al canal Cartagena

- Población²⁹: 432 411 habitantes
- Tasa de mortandad: 0.3% anual
- Tasa de nacimiento: 2.9% anual
- Tasa de migración: 4.5% anual

A continuación se presenta el diagrama de Forrester poblacional, a fin de identificar las variables poblacionales que interactúan entre sí.

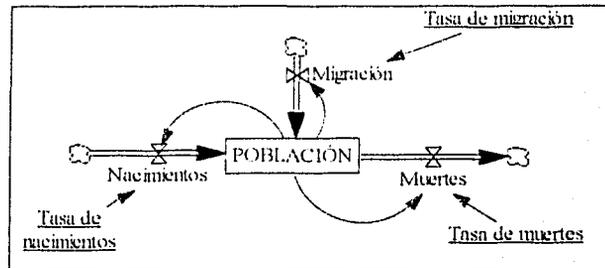


Diagrama de Forrester poblacional tributaria al Canal Cartagena.

Las variables que interactúan son:

- PT Población (variable estado)
- NT Nacimientos (variable flujo)
- MT Muertes (variable flujo)
- MiT Migración (variable flujo)

Las variables simuladas son:

- Tasa de mortandad
- Tasa de nacimiento
- Tasa de migración

²⁷ Véase información referente al ayuntamiento de Tultitlán en el anexo.

²⁸ Aproximadamente 50% de la población de Tultitlán tributa en el Canal Cartagena, 20% afora al emisor poniente y el restante al Gran canal.

²⁹ Población estimada al año 2002.

Se efectúa la simulación con los valores de la tendencia actual del ayuntamiento, y a continuación se muestra la gráfica de la población tributaria que se estima en el periodo comprendido de enero de 2002 a junio de 2003.

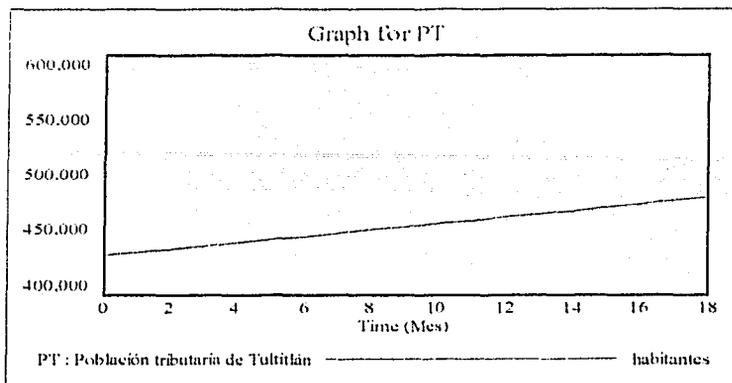


Gráfico de la población tributaria de Tultitlán estimada

En el siguiente cuadro se muestra la población estimada

PERIODO	POBLACIÓN
Ene-02	434 969
Feb-02	437 543
Mar-02	440 132
Abr-02	442 736
May-02	445 355
Jun-02	447 990
Jul-02	450 641
Ago-02	453 307
Sep-02	455 989
Oct-02	458 867
Nov-02	461 401
Dic-02	464 131
Ene-03	466 877
Feb-03	469 640
Mar-03	472 418
Abr-03	475 213
May-03	478 025
Jun-03	480 853

Cuadro de población tributaria estimado de Tultitlán al Canal Cartagena

De acuerdo al cuadro anterior se estima se incremente la población a una razón de 7.5% anual, por lo que se estima que la población se incremente a 45 mil habitantes en el periodo de análisis.

Análisis del área tributaria

A fin de identificar la relación existente entre la población, consumo de agua y su remoción al sistema de drenaje del área tributaria se presenta a continuación el diagrama de Forrester correspondiente al ayuntamiento de Tultitlán.

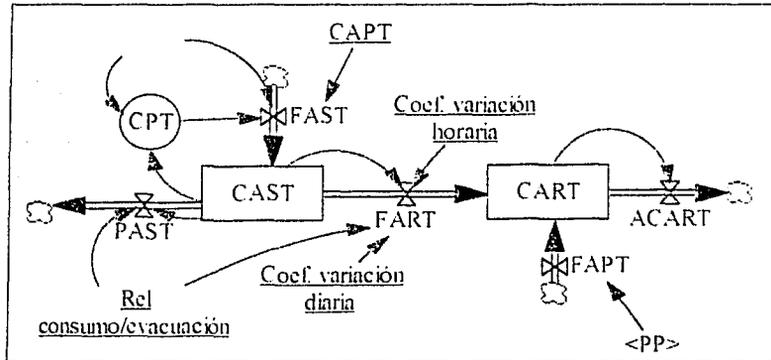


Diagrama de Forrester. Área tributaria de Tultitlán al Canal Cartagena

Las variables del diagrama son:

- PT población tributaria (variable estado)
- CPT consumo promedio de agua (variable auxiliar)
- CAPT consumo de agua promedio suministrada (variable constante)
- PAST pérdida de agua suministrada (variable flujo)
- FART flujo de agua residual (variable flujo)
- FAPT flujo de agua pluvial (variable flujo)
- PP precipitación pluvial (variable auxiliar)
- CAST caudal de agua suministrada de (variable estado)
- CART caudal de agua residual (variable estado)
- ACART aforo de agua residual (variable flujo)

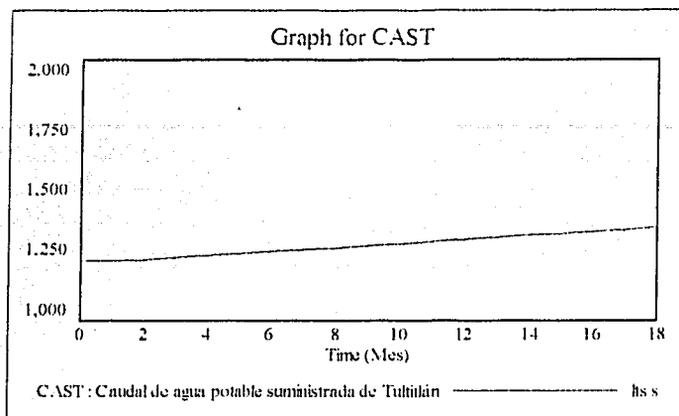
Las variables simuladas son:

- Consumo de agua promedio suministrada con valor de 150 lphd³⁰
- Coeficiente de variación horaria con valor de uno
- Coeficiente de variación diaria con valor de uno.
- Relación consumo/evacuación con valor de 0.75.

El *modelo de simulación* permite estimar el caudal del suministro de agua potable que se requiere para satisfacer la demanda poblacional de las áreas tributarias, en este caso se analiza el ayuntamiento de Tultitlán.

³⁰ Dato proporcionado por APAST.

La siguiente gráfica con su respectivo cuadro muestra la cantidad de agua en lts/s indispensable para el periodo comprendido de enero de 2002 a junio de 2003.



Gráfica estimativa del caudal de agua potable suministrada de Tultitlán

CAST	Lts/s
Enc-02	1226.17
Feb-02	1233.42
Mar-02	1240.72
Abr-02	1248.06
May-02	1255.44
Jun-02	1262.87
Jul-02	1270.34
Ago-02	1277.86
Sep-02	1285.42
Oct-02	1293.03
Nov-02	1300.68
Dic-02	1308.37
Enc-03	1316.11
Feb-03	1323.9
Mar-03	1331.73
Abr-03	1339.61
May-03	1347.54
Jun-03	1355.51

Cuadro del caudal de agua potable suministrado de Tultitlán

De acuerdo al cuadro se estima que la captación del suministro de agua para satisfacer la demanda del área en estudio, debe incrementarse aproximadamente 130 lts/s para el periodo de enero de 2002 a junio de 2003, es decir a razón de 7.5% anual.

ESCENARIO 2 ÁREA TRIBUTARIA. AYUNTAMIENTO DE TULTEPEC³¹ (Tendencia actual)

De acuerdo a la Dirección General de Agua Potable de Tultitlán, los puntos de descarga u aforo hacia el Canal Cartagena es a través de tres cárcamos: Unidad CTM, Arcos y Real de Tultepec.

Análisis poblacional tributaria

- Población³²: 54 413 habitantes
- Tasa de mortandad: 0.3% anual
- Tasa de nacimiento: 2.9% anual
- Tasa de migración: 4.4% anual

Las variables simuladas son: Tasa de mortandad, tasa de nacimiento y tasa de migración.

El *modelo* permite analizar el comportamiento poblacional a través de la ecuación fundamental de la población descrita en el Capítulo I. El siguiente gráfico indica las estimaciones de las variables poblacionales:

- PTu Población tributaria
- MiTu Migración
- MTu Muertes
- NTu Nacimientos

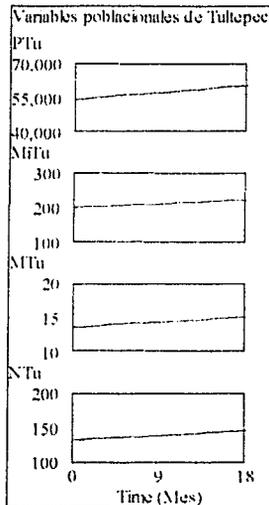


Gráfico de las variables poblacionales del área tributaria del Ayuntamiento de Tultepec (Personas)

³¹ Véase información referente al ayuntamiento de Tultepec en el anexo.

³² Población estimada al año 2002.

En seguida se presenta el cuadro poblacional estimado del ayuntamiento.

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
PTu (personas)	54730.4	55049.7	55370.8	55693.8	56016.6	56345.4	56674.1	57004.7	57337.2
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
PTu (personas)	57671.6	58008.1	58346.4	58686.8	59029.1	59373.4	59719.6	60068.1	60416.5

Cuadro poblacional del área tributaria de Tultepec

El cuadro anterior indica un incremento de la población cercana a los siete mil habitantes.

Análisis del área tributaria

El *modelo* permite estimar el flujo de agua residual³³ y el flujo de agua pluvial de las áreas tributarias, en este caso se analiza el área tributaria de Tultepec³⁴.

El siguiente gráfico indica la tendencia del flujo de agua residual.

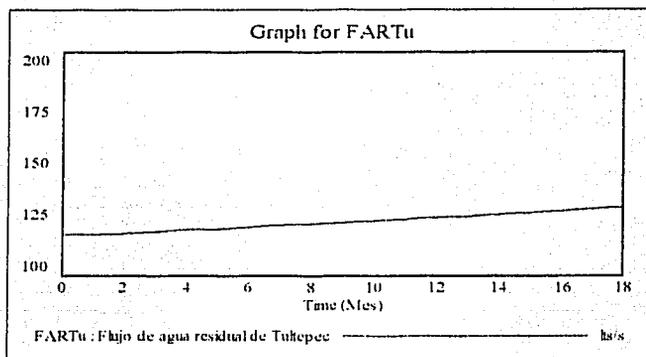


Gráfico del flujo de agua residual del Ayuntamiento de Tultepec.

Ahora se presenta el cuadro correspondiente al flujo de agua residual.

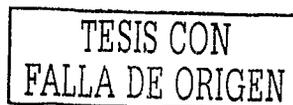
Time (Mes)	Ene 02	Feb-02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
FARTu (lts/s)	118.084	118.773	119.465	120.162	120.863	121.568	122.277	122.991	123.708
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
FARTu (lts/s)	124.43	125.155	125.886	126.62	127.358	128.101	128.849	129.6	130.356

Cuadro del flujo de agua residual del Ayuntamiento de Tultepec.

De acuerdo al cuadro se estima un incremento de 8 lps en comparación del mes de enero de 2003 con respecto a enero de 2002, una de las razones de tal incremento es debido a la actual tasa de migración de 4.4% anual.

³³ El aforo esta dado en lps y el periodo en análisis es enero de 2002 a junio de 2003.

³⁴ El consumo promedio de agua es de 250 lphd



CAPITULO III SIMULACIONES Y VALIDACIÓN DEL MODELO

A continuación se muestra el gráfico del flujo de agua pluvial y su correspondiente cuadro, en donde puede observarse la variabilidad con respecto al tiempo.

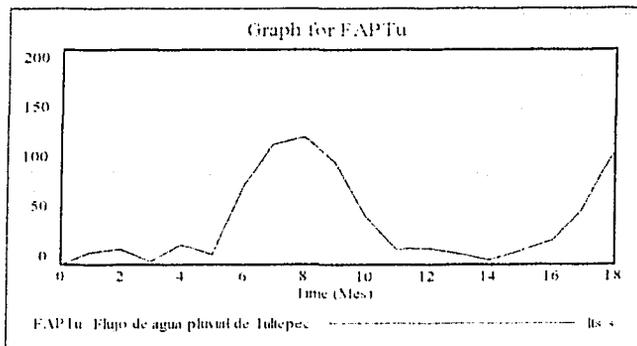


Gráfico del flujo de agua pluvial del área tributaria del Ayuntamiento de Tultepec

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
FAPTU (lts/s)	11.3816	13.9586	3.22121	18.4682	9.66362	73.1214	110.982	118.344	94.6835
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
FAPTU (lts/s)	46.0955	14.3881	15.0108	10.2849	4.85328	12.8311	22.3552	49.5744	104.152

Cuadro del flujo de agua pluvial del área tributaria del Ayuntamiento de Tultepec

La variable denominada *caudal de aguas residuales* integra ambos flujos (residual y pluvial) con el fin de obtener el acumulado total que afora al Canal Cartagena.

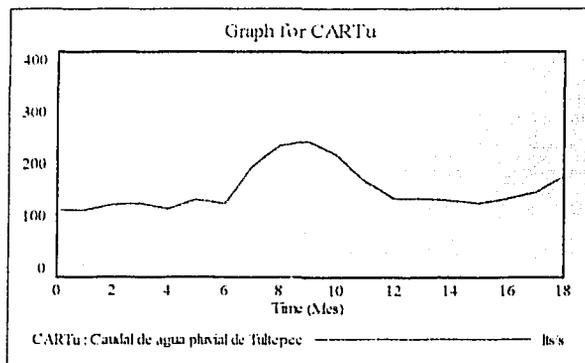


Gráfico del caudal de agua residual del Ayuntamiento de Tultepec

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
CARTU (lts/s)	129.465	132.731	122.687	138.631	130.527	194.69	233.26	241.335	218.392
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
CARTU (lts/s)	170.525	139.544	140.856	136.885	132.212	140.932	151.204	179.175	234.508

Cuadro del caudal de agua residual del Ayuntamiento de Tultepec

ESCENARIO 3 ÁREA TRIBUTARIA, BOSQUES DEL VALLE (Tendencia actual³⁵)

Análisis poblacional tributaria

- Población³⁶: 54 113 habitantes
- Tasa de mortandad: 0.3% anual
- Tasa de nacimiento: 2.1% anual
- Tasa de migración: 0.4% anual

Las variables simuladas son:

- Tasa de mortandad
- Tasa de nacimiento
- Tasa de migración

En el siguiente gráfico se muestra las estimaciones de las variables poblacionales e indica el número de personas o habitantes para el periodo en análisis.

- PBv Población tributaria
- MBv Muertes
- MiBv Migración
- NBv Nacimientos

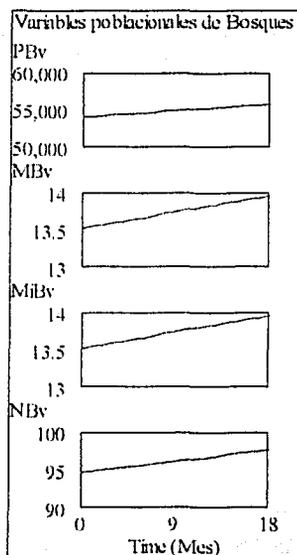


Gráfico de las variables poblacionales del área tributaria de Bosques del Valle (Habitantes)

³⁵ Periodo de estudio enero de 2002 a junio de 2003.

³⁶ Población estimada a principio del año 2002. Plan de Desarrollo Municipal 2000 – 2003.

CAPITULO III SIMULACIONES Y VALIDACIÓN DEL MODELO

El siguiente cuadro muestra la población estimada del área tributaria de Bosques del Valle.

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
PBv (Habitantes)	54207.7	54302.6	54397.6	54492.8	54588.2	54683.7	54779.4	54875.2	54971.3
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
PBv (Habitantes)	55067.5	55163.8	55260.4	55357.1	55454	55551	55648.2	55745.6	55843.1

Cuadro de población tributaria estimado de Bosques del Valle

De acuerdo al anterior cuadro la población en estudio se incrementará a más de mil habitantes, a una razón de 2.2% anual.

Análisis del área tributaria

El *modelo* analiza la interacción entre el crecimiento poblacional y el sistema de drenaje como lo establece el siguiente conjunto de enunciados que se indican en el capítulo II:

- La población influye en el aumento o decremento del consumo promedio de agua.
- La población incide en el incremento o decremento del caudal del agua suministrada.
- La relación de consumo del agua suministrada y su evacuación incide en aumento o decremento del caudal de las aguas residuales.

Las variables que simulan para el análisis son:

- Consumo de agua promedio con valor de 150 lphd
- Coeficiente de variación horaria con valor de uno
- Coeficiente de variación diaria con valor de uno.
- Relación consumo/evacuación con valor de 0.75.

Si se analiza la variable auxiliar *consumo promedio de agua* CPBv, puede observarse que si se suministra el mismo volumen de agua y la tendencia poblacional actual es creciente, entonces el consumo promedio de agua per cápita disminuye proporcionalmente como se muestra en el siguiente cuadro.

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
CPBv (lts/s)	149.738	149.476	149.215	148.955	148.694	148.435	148.175	147.916	147.658
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
CPBv (lts/s)	147.4	147.143	146.886	146.629	146.373	146.117	145.862	145.607	145.353

Cuadro estimado de consumo promedio de agua del área tributaria de Bosques de Valle (lts/s)

El cuadro anterior indica que el consumo per capita de agua se decrementa aproximadamente cuatro lphd en el periodo en estudio.



ESCENARIO 4 ÁREA TRIBUTARIA, EX HACIENDA SAN FELIPE (Tendencia actual³⁷)

Análisis poblacional tributaria

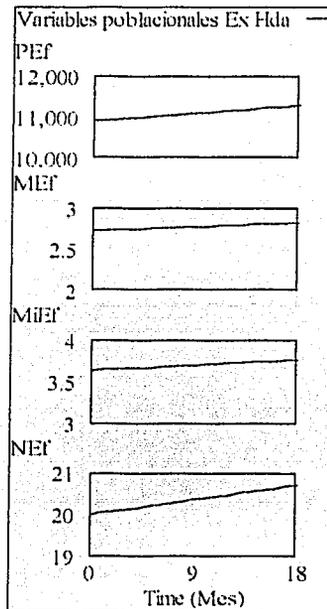
- Población³⁸: 10 909 habitantes
- Tasa de mortandad: 0.3% anual
- Tasa de nacimiento: 2.2% anual
- Tasa de migración: 0.3% anual

Las variables simuladas son:

- Tasa de mortandad
- Tasa de nacimiento
- Tasa de migración

En el siguiente gráfico se muestra las estimaciones de las variables poblacionales:

- PEF Población tributaria
- MEF Muertes
- MiEF Migración
- NEF Nacimientos



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfico de las variables poblacionales del área tributaria de Ex Hda. San Felipe (Habitantes)

³⁷ Periodo de estudio enero de 2002 a junio de 2003.

³⁸ Población estimada a principio del año 2002. Plan de Desarrollo Municipal 2000 - 2003

Análisis de área tributaria

El *modelo* permite estimar el flujo de aguas residuales de las áreas tributarias en este caso la procedente de Ex Hda. San Felipe.

El siguiente gráfico y cuadro indican las estimaciones del flujo de agua residual en lts/s correspondientes al periodo en análisis.

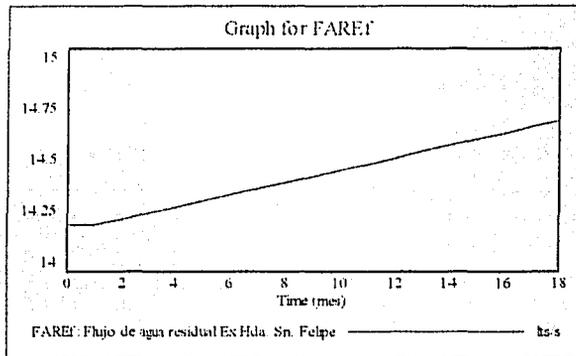


Gráfico de flujo de agua residual del área tributaria de Ex Hda. San Felipe (lts/s)

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
FAREF (lts/s)	14.2044	14.2317	14.2589	14.2863	14.3136	14.3411	14.3686	14.3961	14.4237
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
FAREF (lts/s)	14.4513	14.479	14.5068	14.5346	14.5625	14.5904	14.6183	14.6463	14.6744

Cuadro de flujo de aguas residuales del área tributaria de Ex Hda. San Felipe (lts/s).

De acuerdo al cuadro se estima un incremento al finalizar el periodo en estudio de medio litro por segundo, es decir a una razón de 2.32% anual.

Un factor importante a considerar que incide en el caudal del sistema de drenaje como se analiza en el capítulo I Y II son las precipitaciones pluviales que incrementan el caudal principalmente en el periodo de lluvia y disminuye su aportación en los periodos secos.

Para establecer las estimaciones de las precipitaciones se emplea la metodología de Box and Jenkins, descrita en el capítulo I, y éstas se incorporan al modelo para efectuar los cálculos del caudal procedente de la lluvia aunado a los datos proporcionados por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional).

El siguiente gráfico muestra la variación de la precipitación pluvial³⁹ en el periodo comprendido, y el cuadro correspondiente puede consultarse en el capítulo I en la sección: serie de tiempo. Es importante mencionar que la variable *precipitación pluvial PP* puede simularse.

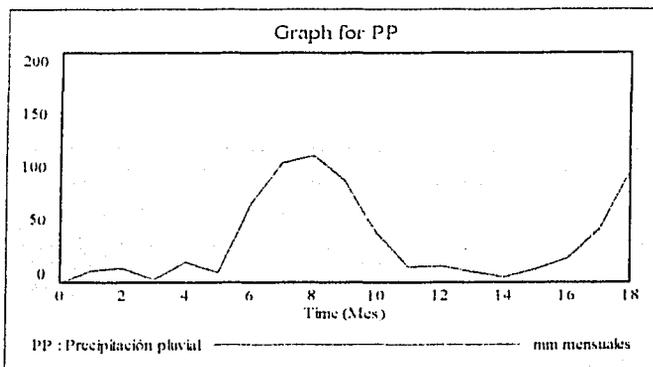


Gráfico de las precipitaciones pluviales

A continuación se muestra el flujo de aguas pluviales del área tributaria en estudio, puede observarse que se incrementa en los meses de junio a septiembre y se decrementa en los meses de noviembre a febrero. El valor de las estimaciones está dado en lps.

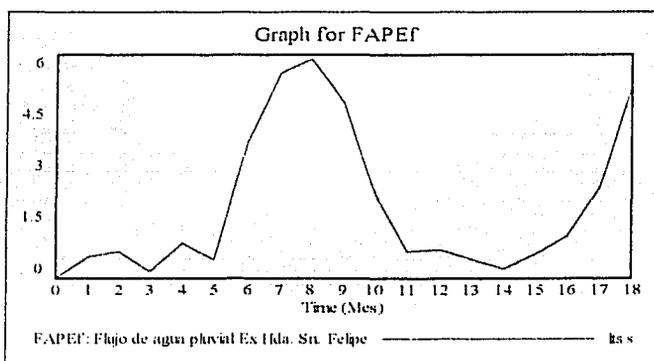


Gráfico del flujo de agua pluvial del área tributaria de Ex Hda. San Felipe

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
FAPEF (lts/s)	0.563585	0.691189	0.159505	0.914497	0.478516	3.62077	5.49554	5.86006	4.68846
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
FAPEF (lts/s)	2.28252	0.712457	0.743294	0.50829	0.240321	0.635362	1.10697	2.45479	5.15734

Cuadro de flujo de agua pluvial del área tributaria de Ex Hda. San Felipe

³⁹ La precipitación pluvial esta dada en mm mensuales. Los primeros seis datos meteorológicos son datos proporcionados por el SMN y los 12 datos restantes son pronósticos que se obtienen al aplicar la metodología de series de tiempo.

ESCENARIO 5 TRAMO I CANAL CARTAGENA (Tendencia actual)

En el presente escenario se analiza la relación entre las áreas tributarias que se vinculan entre sí al aforar al Canal Cartagena, lo cual deriva en el incremento del caudal de las aguas residuales.

El modelo analiza simultáneamente los afloros esperados de las áreas tributarias en el tramo I, afloran las siguientes áreas:

- Tultitlán *CART*
- Tultepec *CARTu*
- Rancho la Palma *CARRp*
- Bosques del Valle *CARBv*
- Ex Hda. San Felipe *CAREf*

En el siguiente gráfico la variable *ARCI* indica el aforo de de agua residual en el tramo I del Canal Cartagena y las unidades de las variables están dadas en lps. El periodo en estudio es enero de 2002 a junio de 2003.

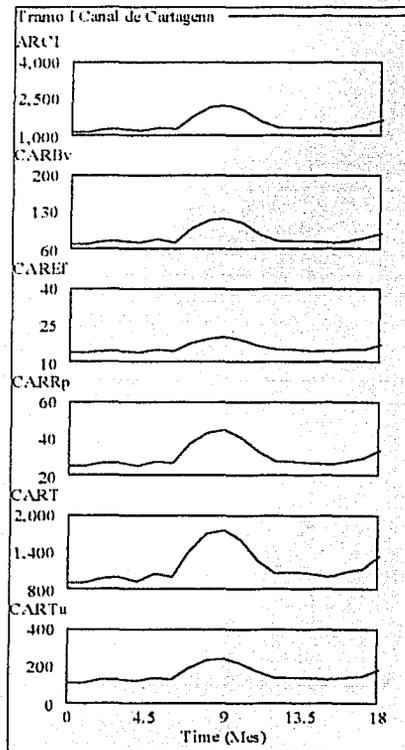


Gráfico del flujo de aguas residuales de las áreas tributarias en el tramo I de canal Cartagena (lps)

ESCENARIO 6 (Explosión demográfica)

En el presente escenario se analiza el efecto de la explosión demográfica sobre el consumo promedio de agua, para ello se compara la tendencia poblacional actual con un posible escenario que puede acontecer como es la explosión demográfica bajo el siguiente supuesto:

- El incremento de la población influye en el decremento del consumo promedio de agua por habitante al día.

Para efectos de análisis se estudia el área tributaria de San José y se simulan las variables de acuerdo a la tendencia poblacional actual y a los posibles valores poblacionales que pueden presentarse, para ello véase el siguiente cuadro, tomando en cuenta que la población tributaria es de 25 256 habitantes⁴⁰.

VARIABLES:	TENDENCIA ACTUAL	EXPLOSIÓN DEMOGRÁFICA
Tasa de mortandad	0.3 %	0.3 %
Tasa de nacimiento	1.5 %	2.5 %
Tasa de migración	0.4 %	2.6 %

Cuadro de variables y valores de la tendencia actual y explosión demográfica

Se efectúa la comparación entre la tendencia actual y la explosión demográfica, y la variable en estudio es "CPSJ" que representa la estimación del consumo promedio de agua por habitante al día en litros. Puede observarse en la siguiente gráfica que al incrementarse la población disminuye la disponibilidad de agua para su consumo.

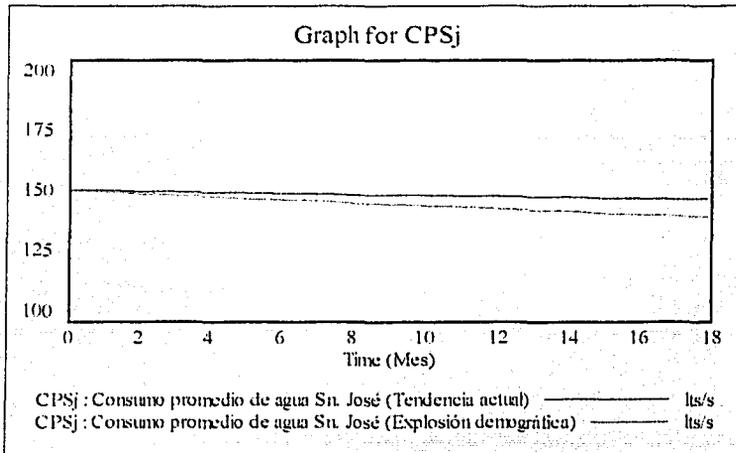


Gráfico comparativo consumo promedio de agua: tendencia actual vs. explosión demográfica del área tributaria de San José

⁴⁰ Población estimada a principio del año 2002. Plan de Desarrollo Municipal 2000 – 2003.

ESCENARIO 7 (Decaimiento poblacional)

En el presente escenario se analiza el efecto del decaimiento poblacional sobre el caudal de aguas residuales, para ello se compara la tendencia poblacional actual con un posible escenario que puede suceder la disminución de la población bajo el siguiente supuesto:

- El decremento de la población influye en el decremento del caudal de agua suministrada, y al disminuir el caudal de agua suministrada incide a su vez en el decremento del caudal de aguas residuales.

Se analiza el área tributaria de la Unidad Morelos con una población tributaria de 12 279 habitantes⁴¹, a continuación se muestra un cuadro con las variables a simular y sus respectivos valores. El periodo en análisis es enero 2002 a junio 2003.

VARIABLE	TENDENCIA ACTUAL	DECAIMIENTO POBLACIONAL
Tasa de mortandad	0.3%	0.40%
Tasa de nacimiento	2.1%	0.10%
Tasa de migración	0.2%	0.10%

Cuadro de variables y valores de la tendencia actual y decaimiento poblacional

Se efectúa la simulación de las variables y se compara en el siguiente gráfico la tendencia actual y el decaimiento poblacional, en donde la variable "CASUM" indica la estimación correspondiente al caudal de aguas residuales del área tributaria en litros por segundo. Puede observarse en la gráfica un descenso paulatino en el caudal de aguas residuales al disminuir la población tributaria.

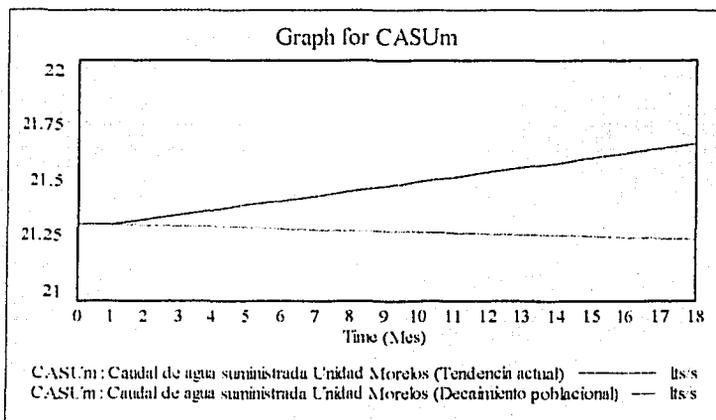


Gráfico comparativo caudal de aguas residuales: tendencia actual vs. decaimiento poblacional del área tributaria de Unidad Morelos

⁴¹ Población estimada a principio del año 2002. Plan de Desarrollo Municipal 2000 – 2003.

ESCENARIO 8 (Periodo lluvioso)

En el presente escenario se analiza el efecto de las precipitaciones pluviales sobre el sistema de drenaje, para ello se compara la tendencia meteorológica actual con un posible escenario que puede presentarse en un periodo lluvioso. Para el análisis se incorporan al *modelo de simulación* los máximos históricos mensuales de los últimos diez años (1991 - 2001) y el área tributaria en estudio es San Rafael. En la siguiente tabla se recopilan los datos pluviales.

MES	AÑO	TENDENCIA METEOROLÓGICA ACTUAL ⁴² (mm mensuales)	PERIODO LLUVIOSO ⁴³ (mm mensuales)
Enero	2002	10.6	30
Febrero		13	21.4
Marzo		3	40.9
Abril		17.2	58
Mayo		9	120.7
Junio		68.1	186.4
Julio		103.4	215.2
Agosto		110.2	219.4
Septiembre		88.18	198.4
Octubre		42.93	83.4
Noviembre		13.4	40.8
Diciembre		13.98	23.3
Enero	2003	9.56	30
Febrero		4.52	21.4
Marzo		11.95	40.9
Abril		20.82	58
Mayo		46.17	120.7
Junio		97	186.4

Cuadro de precipitaciones pluviales: tendencia meteorológica actual y periodo lluvioso

Se analiza la variable "FAPSR" que indica la variación del flujo de agua pluvial en lps que procede de la precipitación pluvial, se muestra la gráfica y cuadro correspondiente.

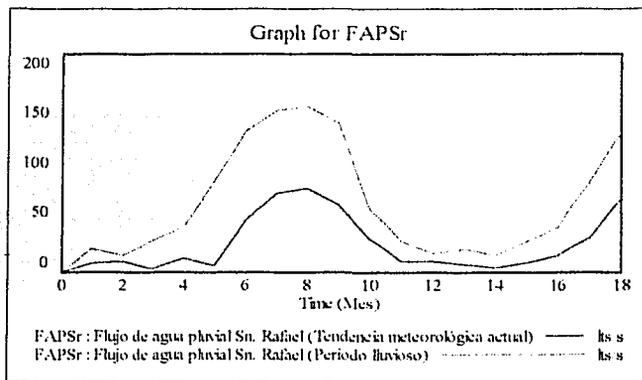


Gráfico comparativo flujo de agua pluvial: tendencia meteorológica actual vs. periodo de lluvia del área tributaria de San Rafael

⁴² De enero a junio de 2002 son datos proporcionados por el SMN y de julio de 2002 a junio de 2003 son pronósticos obtenidos a través de la metodología de Box and Jenkins

⁴³ Máximos históricos mensuales.

CAPITULO III SIMULACIONES Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
FAPSr Tendencia meteorológica actual (lts/s)	7.31	8.97	2.07	11.86	6.21	48.97	71.29	76.02	20.82
FAPSr Periodo lluvioso (lts/s)	20.69	14.76	25.21	40.01	83.25	129.57	148.43	151.33	136.85
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
FAPSr Tendencia meteorológica actual (lts/s)	29.61	9.24	9.64	6.59	3.12	8.24	14.36	31.55	66.91
FAPSr Periodo lluvioso (lts/s)	57.52	28.14	16.07	20.69	14.76	26.21	40.01	83.25	129.57

Cuadro comparativo flujo de agua pluvial: tendencia meteorológica actual vs. periodo de lluvia del área tributaria de San Rafael

De acuerdo al cuadro comparativo el aporte máximo acontece principalmente entre los meses de junio a octubre para ambos escenarios (periodo lluvioso y tendencia meteorológica actual).

Ahora se conjunta el agua residual y pluvial del área en estudio, para ello se analiza la variable CARSr que indica el caudal de aforo del área tributaria en lps. La gráfica que se muestra enseguida señala que el aforo estimado entre los meses de julio a octubre es superior a los 200 lps en el caso que se presentará un periodo lluvioso, y de continuar con la tendencia actual la precipitación esperada supera los 100 lps.

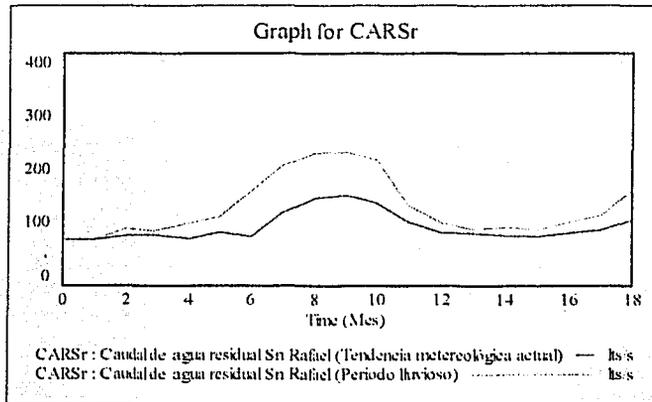


Gráfico comparativo del aforo tributario de san Rafael: tendencia meteorológica actual vs. periodo de lluvia

Los datos obtenidos del aforo tributario a través de la simulación se recopilan en la siguiente tabla.

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
CARSr Tendencia meteorológica actual (lts/s)	75.87	85.65	87.47	80.74	90.70	85.21	126.13	150.62	155.51
CARSr Periodo lluvioso (lts/s)	78.32	99.03	93.27	106.88	118.84	162.25	207.73	227.76	230.82
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
CARSr Tendencia meteorológica actual (lts/s)	140.5	109.4	89.2	89.8	66.9	83.6	88.9	95.2	112.8
CARSr Periodo lluvioso (lts/s)	216.5	137.3	108.1	96.2	101.0	95.3	108.9	120.8	164.2

Cuadro comparativo del aforo tributario de San Rafael: tendencia meteorológica actual vs. periodo de lluvia

ESCENARIO 9 (Periodo seco)

En el presente escenario se analiza el efecto de las precipitaciones pluviales sobre el sistema de drenaje, para ello se compara la tendencia meteorológica actual con un posible escenario que puede acontecer un periodo seco. Para el análisis se incorporan al *modelo* los mínimos históricos mensuales de los últimos diez años (1991 -2001) y el área tributaria en análisis es Rinconada San Felipe. En la siguiente tabla se recopilan los datos meteorológicos en milímetros mensuales.

MES	AÑO	TENDENCIA METEOROLOGICA ACTUAL ¹⁴ (mm mensuales)	PERIODO SECO ¹⁵ (mm mensuales)
Enero	2002	10.6	0.1
Febrero		13	1.1
Marzo		3	0.1
Abril		17.2	0.4
Mayo		9	8.3
Junio		68.1	10.7
Julio		103.4	7.3
Agosto		110.2	39.9
Septiembre		88.18	49.2
Octubre		42.93	9.9
Noviembre		13.4	0.1
Diciembre		13.98	0.2
Enero	2003	9.56	0.1
Febrero		4.52	1.1
Marzo		11.95	0.1
Abril		20.82	0.4
Mayo		46.17	23.3
Junio		97	10.7

Cuadro de precipitaciones pluviales: tendencia meteorológica actual y periodo seco

Se analiza la variable "FAPSF" que indica la variación del flujo de agua pluvial en lps del área tributaria en estudio, y a continuación se muestra la gráfica y cuadro correspondiente.

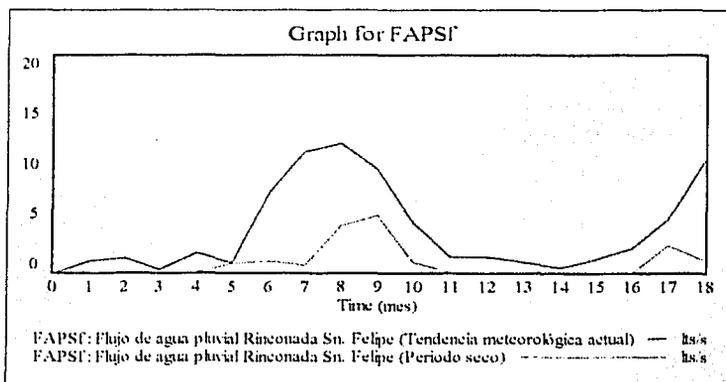


Gráfico comparativo flujo de agua pluvial: tendencia meteorológica actual vs. periodo seco del área tributaria de Rinconada san Felipe

¹⁴ De enero a junio de 2002 son datos proporcionados por el SMN y de julio de 2002 a junio de 2003 son pronósticos obtenidos a través de la metodología de Box and Jenkins.

¹⁵ Máximos históricos mensuales.

CAPITULO III SIMULACIONES Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
FAPSI Tendencia meteorológica actual (lts/s)	1.11	1.14	0.32	1.65	1.17	7.33	11.12	11.86	9.49
FAPSI Periodo seco (lts/s)	0.01	0.01	0.12	0.01	1.14	1.21	1.15	4.29	5.29
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
FAPSI Tendencia meteorológica actual (lts/s)	4.62	1.44	1.50	1.03	0.49	1.29	2.24	4.97	11.03
FAPSI Periodo seco (lts/s)	1.07	0.01	0.02	0.01	0.12	0.01	0.04	2.51	2.15

Cuadro comparativo flujo de agua pluvial: tendencia meteorológica actual vs. periodo de lluvia del área tributaria de Rinconada San Felipe

Puede observarse que de acuerdo al cuadro comparativo que el aporte en el periodo seco disminuye en comparación a la tendencia actual.

Ahora se conjunta el agua residual y pluvial del área en estudio, y se analiza la variable CARSÍ que indica el caudal de aforo del área tributaria en lps. La gráfica que se muestra enseguida señala que el aforo estimado entre los meses de julio a octubre es inferior a los 35 lps en el caso que se presentará un periodo seco, y de continuar con la tendencia actual la precipitación esperada para esos meses supera los 35 lps.

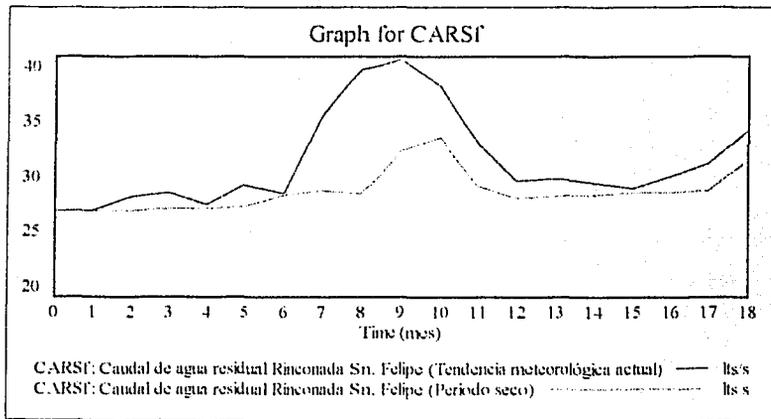


Gráfico comparativo del aforo tributario de Rinconada San Felipe: tendencia meteorológica actual vs. periodo seco

Los datos obtenidos del aforo tributario se recopilan en la siguiente tabla.

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
CARSÍ Tendencia meteorológica actual (lts/s)	26.19	28.29	28.65	27.69	29.33	28.55	35.02	38.93	39.77
CARSÍ Periodo seco (lts/s)	25.09	27.16	27.37	27.38	27.52	30.09	28.85	28.59	32.21
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
CARSÍ Tendencia meteorológica actual (lts/s)	37.52	32.76	29.69	29.87	29.51	29.08	29.99	31.06	33.91
CARSÍ Periodo seco (lts/s)	33.32	29.21	28.26	28.39	28.49	28.71	28.72	28.87	31.44

Cuadro comparativo del aforo tributario de Rinconada San Felipe: tendencia meteorológica actual vs. periodo seco



Escenario 10 Caótico (Decaimiento poblacional, periodo seco)

En el presente escenario se analiza el efecto de la disminución poblacional y la disminución en la precipitación pluvial sobre el sistema de drenaje. para ello se compara la tendencia poblacional y meteorológica actual con un posible escenario que puede presentarse que el crecimiento poblacional disminuya y se presente un periodo seco. Para el análisis se incorporan al *modelo* los minimos históricos mensuales de los últimos diez años (1991 -2001) y el área tributaria que se analiza es Villa de las Flores.

En la siguiente tabla se recopilan los datos poblacionales en términos de porcentaje anual, y la tabla meteorológica puede consultarse en la página 79

TASA	TENDENCIA ACTUAL	DECAIMIENTO POBLACIONAL
Mortandad	0.30%	0.35%
Nacimiento	1.30%	0.10%
Migración	0.40%	0.50%

Cuadro de tasa poblacional tendencia actual y decaimiento poblacional.

Se analiza la variable "FARVF" que indica la variación de flujo de agua residual en lps del área tributaria en estudio, con el fin de analizar el efecto sobre el sistema de drenaje al disminuir el número de pobladores que tributan en comparación con la tendencia poblacional, y a continuación se muestra la gráfica en donde puede observarse que el aforo esperado del decaimiento poblacional oscilará entre los 117 y 118 lps y de continuar con la tendencia actual se estima un incremento de 5 lps al final de periodo en estudio¹⁶.

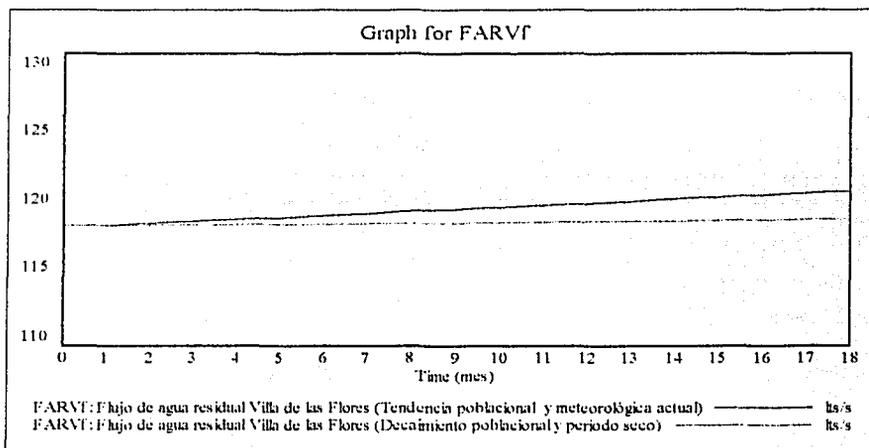


Gráfico comparativo del flujo de agua residual de Villa de las Flores: Tendencia poblacional y meteorológica actual vs. Decaimiento poblacional y periodo seco

¹⁶ El periodo en análisis es enero de 2002 a junio de 2003.

Se analiza la variable "FAPVF" que indica la variación del flujo de agua pluvial en lps del área tributaria en estudio, con el fin de analizar el efecto de la disminución de la precipitación pluvial sobre el sistema de drenaje, y a continuación se muestra la gráfica en donde se observa que de presentarse un periodo seco, el aforo estimado no superaría los 10 lps y de continuar con la tendencia actual supera los 20 lps en los meses de julio y agosto.

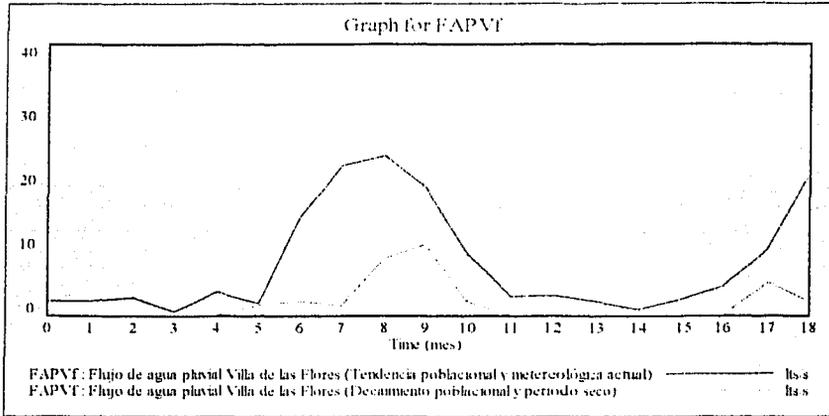


Gráfico comparativo del flujo de agua pluvial de Villa de las Flores: Tendencia poblacional y meteorológica actual vs. Decaimiento poblacional y periodo seco

Ahora se conjunta el agua residual y pluvial del área en estudio, y se analiza la variable CARVF que indica el caudal de aforo del área tributaria en lps. La gráfica que se muestra enseguida señala que el aforo estimado de presentarse un periodo de escasez de precipitación pluvial no superaría los 130 lps en el caso que también disminuyera la tasa poblacional, y de continuar con la tendencia poblacional y meteorológica actual la precipitación esperada supera los 125 lps entre los meses de julio y noviembre.

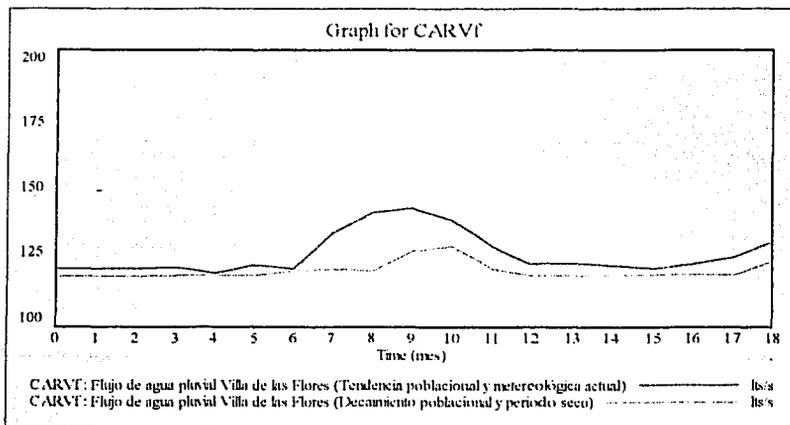


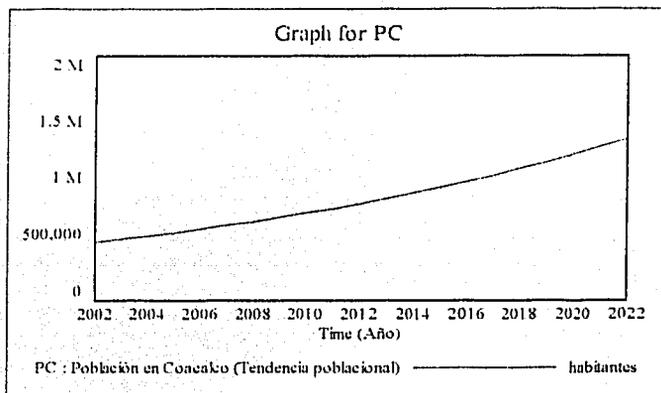
Gráfico comparativo del aforo tributario de Villa de las Flores: Tendencia poblacional y meteorológica actual vs. Decaimiento poblacional y periodo seco

Ahora se analiza el periodo que comprende del año 2002 al 2022.

Para efectos de simulación se estudia al municipio de Coacalco, se analiza la población, el caudal de agua suministrada, y el aforo hacia el canal Cartagena.

Población tributaria

- Población⁴⁷: 477 515 habitantes
- Tasa de nacimiento: 2.1% anual
- Tasa de mortandad: 0.3% anual
- Tasa de migración: 3.4% anual



Gráfica poblacional del Ayuntamiento de Coacalco (2002- 2022)

Año	Población
2002	477.515
2003	502.342
2004	528.463
2005	555.943
2006	584.853
2007	615.265
2008	647.259
2009	680.916
2010	716.324
2011	753.573
2012	792.758
2013	833.982
2014	877.349
2015	922.971
2016	970.965
2017	1,021,460
2018	1,074,570
2019	1,130,450
2020	1,189,230
2021	1,251,070
2022	1,316,130

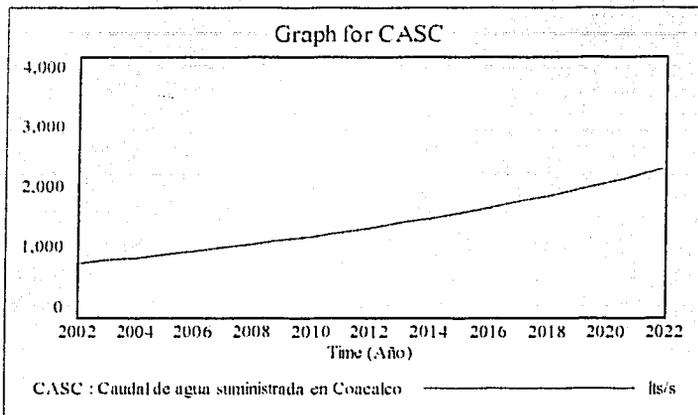
Cuadro poblacional del Ayuntamiento de Coacalco (2002-2022)

⁴⁷ Población estimada al año 2002. Plan de Desarrollo Municipal 2000 – 2003.



Caudal de agua suministrada

Se estima el caudal de agua potable que deberá suministrarse en el ayuntamiento, tomando en consideración la tendencia poblacional actual. Se presenta la gráfica y cuadro correspondiente de las simulaciones.



Gráfica del caudal de agua suministrada en lps (2002-2022)

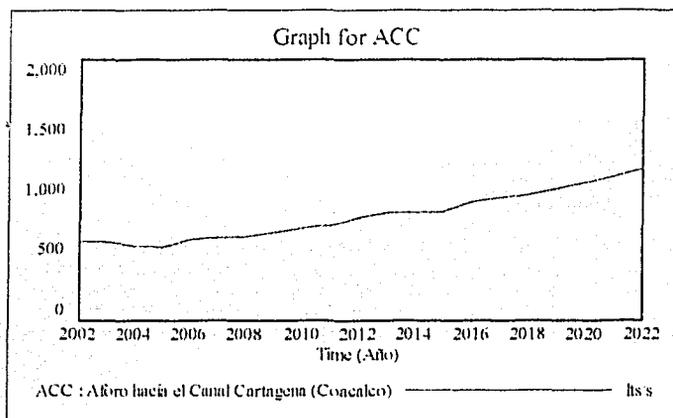
Año	Caudal de agua suministrada (lts/s)
2002	829.012
2003	872.121
2004	917.471
2005	965.18
2006	1015.37
2007	1068.17
2008	1123.71
2009	1182.15
2010	1243.62
2011	1308.29
2012	1376.32
2013	1447.88
2014	1523.17
2015	1602.38
2016	1685.7
2017	1773.36
2018	1865.58
2019	1962.58
2020	2064.64
2021	2172
2022	2284.94

Gráfica del caudal de agua suministrada en lps (2002-2022)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aforo hacia el Canal Cartagena

Para efectuar la simulación se incorpora al modelo el pronóstico de las precipitaciones pluviales¹⁸ para el periodo del año de 2002 al 2023. Se estima el aforo que tributará hacia el Canal Cartagena, tomando en consideración la tendencia poblacional actual. Se presenta la gráfica y cuadro correspondiente de las simulaciones.



Gráfica del aforo estimado hacia el Canal Cartagena en lps (2002-2022)

Año	Aforo hacia el Canal Cartagena (lts/s)
2002	591.356
2003	563.172
2004	560.569
2005	551.691
2006	613.871
2007	626.747
2008	635.884
2009	665.414
2010	696.871
2011	728.369
2012	783.151
2013	824.761
2014	826.647
2015	831.391
2016	907.956
2017	936.029
2018	961.412
2019	1007.53
2020	1056.81
2021	1103.74
2022	1156.36

Cuadro del aforo estimado hacia el Canal Cartagena en lps (2002-2022)

¹⁸ Véase el cuadro y la gráfica de los pronósticos en la página 33.

III.2 VALIDACIÓN

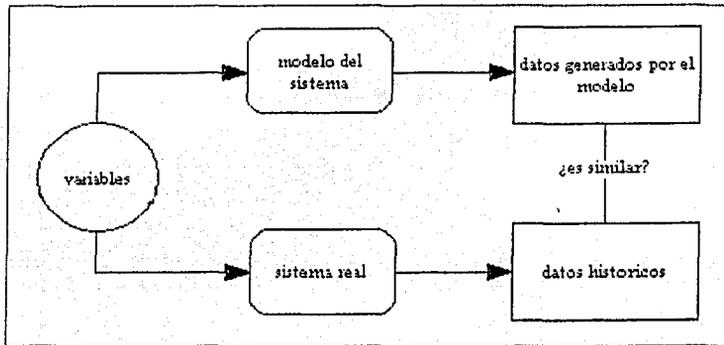
La validación es el proceso de determinar si la conceptualización del modelo es similar a la representación del sistema real.

Los métodos más usuales para la validación de un modelo de simulación son:

- Comparación de los resultados con el sistema real
- Consulta a personas expertas en el tema.

Comparación de los resultados con el sistema real

Un test empleado para la validación del modelo es el *test directo de estructura empírico*, el cuál determina la validez⁴⁹ a través de la comparación directa del modelo con información cuantitativa del sistema.



Proceso de validación de un modelo de simulación

Una forma común de validar modelos de simulación es a través de una *hipótesis estadística* en la que se analiza dos decisiones incorrectas importantes implicadas en la prueba de validez de un modelo⁵⁰ de simulación bajo un marco experimental y para una gama aceptable de la exactitud:

- 1) Rechazar la validez del modelo cuando es realmente válida.
- 2) Aceptar la validez del modelo cuando es realmente inválida.

Para efectos de validación se comparan los valores generados por el modelo (caudal de aguas residuales) con los datos históricos. Para ello se consideran las siguientes áreas tributarias:

- Tultitlán
- Tultepec

⁴⁹ La recolección y análisis de los datos es un paso esencial en el desarrollo y validación de un modelo de simulación.

⁵⁰ Cuando se valida un modelo se establece que el modelo es una representación creíble del sistema real.

Validación del área tributaria del Ayuntamiento de Tultitlán

Se efectúa la simulación del área tributaria tomando en consideración la tendencia poblacional actual contemplada en el escenario I y el consumo promedio de agua es de 245 lphd

Se analiza la variable ACART que indica el caudal de agua residual en lps procedente de Tultitlán y que afora al Canal de Cartagena. A continuación se presenta el gráfico y cuadro correspondiente del periodo en estudio⁵¹.

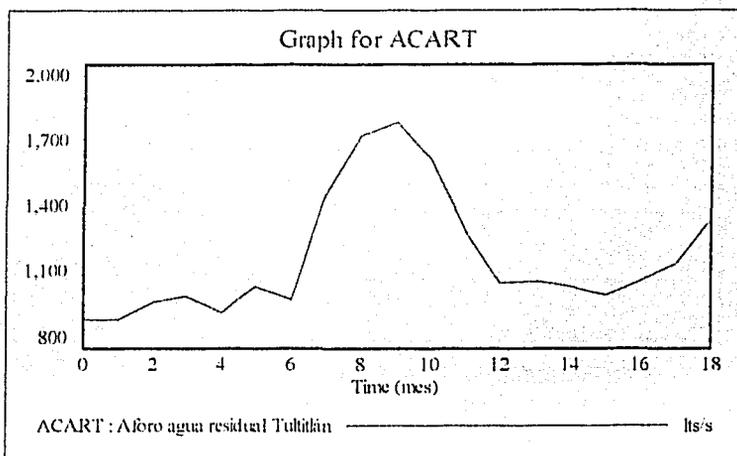


Gráfico del aforo tributario del Ayuntamiento de Tultitlán al Canal de Cartagena

Time (Mes)	Ene 02	Feb 02	Mar 02	Abr 02	May 02	Jun 02	Jul 02	Ago 02	Sep 02
ACART (lps/s)	919.624	995.851	1018.55	952.112	1059.73	1006.3	1436.88	1696.05	1750.99
Time (Mes)	Oct 02	Nov 02	Dic 02	Ene 03	Feb 03	Mar 03	Abr 03	May 03	Jun 03
ACART (lps/s)	1598.2	1278.49	1071.87	1081.81	1055.83	1025.43	1084.74	1154.43	1342.67

Cuadro del aforo tributario del Ayuntamiento de Tultitlán al Canal de Cartagena

De acuerdo al volumen de aguas residuales vertidas a cuerpos receptores por cuerpo y municipio del INEGI, el ayuntamiento de Tultitlán afora al Canal de Cartagena 39.10 millones de metros cúbicos por año, es decir aproximadamente 1 239.85 lps.

Si se obtiene el promedio comprendido entre enero y diciembre del 2002 del cuadro anterior, entices el aforo estimado correspondiente es 1232.05 lps, por lo que el margen de error es inferior al uno por ciento.

⁵¹ El periodo en análisis es enero de 2002 a junio de 2003.

Validación del área tributaria del Ayuntamiento de Tultepec

Se analiza la variable CARTu que indica el flujo de agua residual en lps procedente de Tultepec que afora al Canal de Cartagena.

En el escenario 2 se efectúa la simulación correspondiente al área tributaria de Tultepec, en donde la gráfica y cuadro de la variable en estudio puede ser consultada en la página 68.

De acuerdo al *volumen de aguas residuales vertidas a cuerpos receptores por cuerpo y municipio* del INEGI, el ayuntamiento de Tultepec afora al Canal de Cartagena 5.60 millones de metros cúbicos por año, es decir aproximadamente 177 lps.

Si se obtiene el promedio comprendido entre enero y diciembre del 2002 del cuadro del caudal de agua residual del área tributaria en análisis, el aforo estimado es de 164.16 lps, el margen de error del promedio es inferior al 8%.

En el siguiente cuadro se recopilan los datos generados por el modelo contra los datos históricos.

ÁREA TRIBUTARIA	DATOS GENERADOS POR EL MODELO CAUDAL DE AGUA RESIDUAL	DATOS HISTÓRICOS CAUDAL DE AGUA RESIDUAL	MARGEN DE ERROR
TULTITLÁN	1 232.05 lps	1 239.85 lps	0.630 %
TULTEPEC	177 lps	164.16 lps	7.250 %

Cuadro comparativo de aforo residual: Datos generados por el modelo vs. Datos históricos

De acuerdo a los valores de margen de error que se obtienen y que al compararse los datos históricos del caudal de agua residual contra los datos generados por el modelo y que sean ambos datos casi similares, entonces puede considerarse la validez del modelo.

En la siguiente sección se emplea el método⁵² de consulta a personas expertas en el tema.

⁵² Existen otros métodos para la validar los modelos, uno de ellos es el *método de conducta en casos extremos* que consiste en simular condiciones extremas y que la simulación siguiera el comportamiento esperado. Otro criterio frecuentemente utilizado para analizar la validez de un modelo es la habilidad del modelo para recrear el pasado, el presente y los posibles eventos o escenarios que pudieran acontecer en el sistema real.

Consulta a personas expertas en el tema

A continuación se recopilan los datos de los afloros obtenidos a través de la simulación de las áreas tributarias para ser analizadas por parte del Organismo Público Descentralizado Municipal del Sistema de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Coacalco S.A.P.A.S.A.C., para ello el grupo de expertos revisa y estudia la validez de las fluctuaciones del caudal.

Para el análisis del aforo se procede estudiar cada uno de los tramos del Canal Cartagena.

Tramo I Canal Cartagena

El gráfico del caudal "Tramo I Canal Cartagena" *ARCI* puede consultarse en la página 74, enseguida se muestra el cuadro correspondiente al aforo estimado del periodo en estudio y las áreas tributarias son:

- Tultepec *CARTu*
- Tultitlán *CART*
- Rancho la Palma *CARRp*
- Bosques del Valle *CARBv*
- Ex Hda. Sn. Felipe *CAREf*

Tiempo (mes)	CARTu (lts/s)	CART (lts/s)	CARRp (lts/s)	CARBv (lts/s)	CAREf (lts/s)	ARCI (lts/s)
Ene-02	118 084	919.624	25.2161	70.4596	14.2044	1147.59
Feb-02	129.465	995.851	27.0612	74.9166	14.768	1242.06
Mar-02	132.731	1018.55	27.5231	76.049	14.9226	1269.78
Abr-02	122.687	952.112	25.8267	71.9679	14.4184	1187.01
May-02	138.631	1059.73	28.3427	78.0622	15.2008	1319.97
Jun-02	130.527	1006.3	26.9597	74.7383	14.7922	1253.32
Jul-02	194.69	1436.88	37.2913	99.7121	17.9618	1786.53
Ago-02	233.26	1696.05	43.4734	114.562	19.8641	2107.31
Sep-02	241.335	1750.99	44.7114	117.67	20.2562	2174.97
Oct-02	218.392	1598.2	40.9205	108.529	19.1122	1985.15
Nov-02	170.525	1278.49	33.0886	89.6278	16.7339	1588.47
Dic-02	139.544	1071.87	27.9934	77.3367	15.1915	1331.93
Ene-03	140.896	1081.81	28.1392	77.706	15.2501	1343.8
Feb-03	136.885	1055.83	27.4149	75.9733	15.0429	1311.15
Mar-03	132.212	1025.43	26.5826	73.98	14.8028	1273.01
Abr-03	140.932	1084.74	27.9211	77.2302	15.2257	1346.04
May-03	151.204	1154.43	29.5102	81.0861	15.7253	1431.96
Jun-03	179.175	1342.67	33.968	91.8715	17.1011	1664.79

Cuadro del aforo tributario en el tramo I Canal Cartagena

El Jefe de estaciones de SAPASAC analiza el cuadro de aforo tributario en el tramo I Canal Cartagena, efectúa los cálculos correspondientes a fin de verificar la validez de los datos, e indica que los valores se encuentran dentro del margen de tolerancia del 15%.

Tramo II Canal Cartagena

Se muestra a continuación el gráfico y cuadro correspondiente al tramo II del canal, a fin de verificar la validez de los datos. El periodo en análisis es enero de 2002 a junio de 2003, y las áreas tributarias que aforan al tramo son: La Garita *CARLa*, El Laurel *CARLa*.

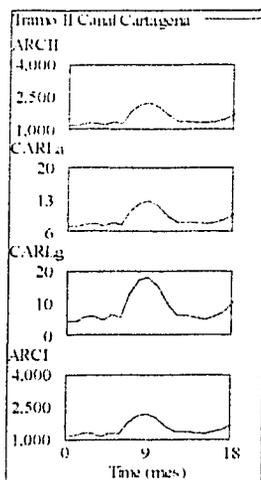


Gráfico del flujo de aguas residuales de las áreas tributarias en el tramo I de canal Cartagena (lts/s)

Time (mes)	CARLg (lts/s)	CARLa (lts/s)	ARCI (lts/s)	ARCIi (lts/s)
Ene-02	4 49349	7 16146	1147 59	1159 24
Feb-02	5 7871	7 66466	1242 06	1255 51
Mar-02	6 09946	7 80963	1269 78	1283 69
Abr-02	4 89863	7 36607	1187 01	1199 28
May-02	6 65122	8 07148	1319 97	1334 69
Jun-02	5 67023	7 71365	1253 32	1266 7
Jul-02	12 9025	10 5508	1786 53	1809 99
Ago-02	17 2256	12 2564	2107 31	2136 8
Sep-02	18 0623	12 6137	2174 97	2205 66
Oct-02	15 4132	11 5997	1985 15	2012 17
Nov-02	9 91092	9 48361	1588 47	1607 66
Dic-02	6 32736	8 11403	1331 93	1346 38
Ene-03	6 41848	8 17397	1343 8	1358 4
Feb-03	5 89949	7 99669	1311 15	1325 05
Mar-03	5 30492	7 79011	1273 01	1286 1
Abr-03	6 23226	8 17566	1346 04	1360 45
May-03	7 33543	8 6297	1431 96	1447 92
Jun-03	10 4499	9 86623	1664 79	1685 11

Cuadro del aforo tributario en el tramo II Canal Cartagena

El experto indica que los datos del cuadro se encuentran dentro del margen de tolerancia.

CAPITULO III SIMULACIONES Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Tramo III Canal Cartagena

Se presenta el cuadro correspondiente al tramo III del canal. El periodo en estudio es enero de 2002 a junio de 2003.

Las áreas tributarias que aforan al tramo son:

- Ejidal *CAREj*
- Allende *CARAI*
- Villa de las Flores *CARVf*
- San José *CARSj*
- Rinconada San Felipe *CARSf*
- Los Acuales *CARAc*

Time (mes)	CAREj (lts/s)	CARAI (lts/s)	CARVf (lts/s)	CARSj (lts/s)	CARSf (lts/s)	CARAc (lts/s)	ARCII (lts/s)	ARCIII (lts/s)
Ene-02	0 0402	0 0112	118 1710	32 8854	27 1471	0 3843	1159 24	1337 88
Feb-02	1 1781	0 8777	120 1350	34 0356	28 2877	2 1127	1255 51	1442 14
Mar-02	1 4516	1 0783	121 0920	34 2960	28 6636	2 6558	1283 69	1472 92
Abr-02	0 4236	0 2736	119 7530	33 2109	27 7057	1 4603	1199 28	1382 10
May-02	1 9207	1 4268	122 9020	34 7517	29 3523	3 5150	1334 69	1528 56
Jun-02	1 0736	0 7657	121 9000	33 8620	28 5891	2 4950	1266 70	1455 39
Jul-02	7 2576	5 5521	133 3770	40 2747	35 0681	10 6014	1809 99	2042 12
Ago-02	10 9485	8 4081	140 4360	44 1008	38 9825	15 4507	2136 80	2395 12
Sep-02	11 6696	8 9644	142 2320	44 8447	39 8410	16 4263	2205 66	2469 64
Oct-02	9 3703	7 1816	138 6760	42 4537	37 5911	13 4652	2012 17	2260 90
Nov-02	4 6440	3 5193	130 8180	37 5436	32 8437	7 3413	1607 86	1824 57
Dic-02	1 5602	1 1294	125 8760	34 3394	29 7885	3 3493	1346 38	1542 42
Ene-03	1 6228	1 1769	126 5180	34 4023	29 9737	3 4465	1358 40	1555 54
Feb-03	1 1625	0 8195	126 2360	33 9227	29 6215	2 8612	1325 05	1519 67
Mar-03	0 6372	0 4119	125 8410	33 3759	29 2031	2 1894	1286 10	1477 76
Abr-03	1 4149	1 0138	127 7600	34 1821	30 1270	3 2112	1360 45	1558 16
May-03	2 3430	1 7321	129 9480	35 1445	31 2064	4 4275	1447 92	1652 72
Jun-03	4 9933	3 7845	135 1940	37 8952	34 0596	7 8832	1685 11	1908 91

Cuadro del aforo tributario en el tramo III Canal Cartagena

El Jefe de estaciones de SAPASAC analiza las estimaciones del modelo y señala que los valores del modelo del año 2002 se encuentran dentro del margen de tolerancia, y así mismo indica a pregunta expresa que los datos del modelo siguen el comportamiento que se espera, acentuándose el aforo en el periodo de lluvias. Posteriormente indica que para el periodo comprendido entre enero de 2003 a junio de 2003, el aforo del tramo debe incrementarse 15%, debido a la construcción de nuevos fraccionamientos: "Los Héroes Coacalco y Hacienda Coacalco".

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tramo IV Canal Cartagena

Finalmente se presenta el cuadro correspondiente al tramo IV del canal para el análisis por parte de la persona experta. El periodo en análisis es enero de 2002 a junio de 2003.

Las áreas tributarias que aforan al tramo son:

- San Rafael *CARSr*
- Unidad Morelos *CARUm*
- Potrero Laguna *CARPl*

Time (mes)	CARSr (lts/s)	CARUm (lts/s)	CARPl (lts/s)	ARCIII (lts/s)	ARCIV (lts/s)
Ene-02	78 3424	15 9883	39 2721	1337.88	1471.48
Feb-02	85 6537	17 1557	41 4575	1442.14	1586.41
Mar-02	87 4723	17 4893	42 1224	1472.92	1620.01
Abr-02	80 7384	16 4576	40 2317	1382.1	1519.53
May-02	90 6967	18 0913	43 3309	1528.56	1680.68
Jun-02	85 205	17 2584	41 8128	1455.39	1599.67
Jul-02	126 133	23 8379	54 1701	2042.12	2246.26
Ago-02	150 619	27 7921	61 6136	2395.12	2635.15
Sep-02	155 513	28 6183	63 2017	2469.64	2716.97
Oct-02	140 48	26 2628	58 8341	2260.9	2486.48
Nov-02	109 434	21 3508	49 6811	1824.57	2005.04
Dic-02	89 2325	18 1706	43 7701	1542.42	1693.59
Ene-03	89 7992	18 3068	44 0673	1555.54	1707.71
Feb-03	86 9175	17 8927	43 3346	1519.67	1667.81
Mar-03	83 6085	17 4105	42 4748	1477.76	1621.25
Abr-03	88 901	18 3021	44 1866	1558.16	1709.55
May-03	95 1871	19 3526	46 196	1652.72	1813.46
Jun-03	112 84	22 2185	51 6038	1908.91	2095.58

Cuadro del aforo tributario en el tramo III Canal Cartagena

El Jefe de estaciones estudia los pronósticos del modelo y señala que los valores del modelo para el año 2002 siguieron el comportamiento de ese periodo de tiempo para las áreas tributarias en estudio.



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- 1) El crecimiento poblacional interactúa con el sistema de drenaje a través de la relación existente entre el consumo de agua que requiere la población para satisfacer sus necesidades y de su remoción al sistema de alcantarillado, y a su vez el crecimiento poblacional se interrelaciona con las variables dinámicas poblacionales: los *nacimientos* incrementan la población, las *mueres* la disminuyen, y la *migración* la incrementa o disminuye, por lo tanto la población incide en el aumento o decremento del consumo promedio de agua por habitante al día y a su vez influye en el incremento o disminución del aforo respectivamente.
- 2) El área en estudio se encuentra drenada por una serie de escurrimientos superficiales que inciden en el incremento del caudal principalmente en el periodo de lluvias.
- 3) De continuar con la tendencia poblacional actual del ayuntamiento de Coacalco, se estima que la población se incrementará a más de 800 mil habitantes en el periodo comprendido del año 2002 al 2022, se espera que se incremente la población 40 mil habitantes anualmente, de seguir esta tendencia el municipio requerirá incrementar anualmente la captación de agua potable a 70 lps para satisfacer así el consumo de agua. Se prevé que el aforo del ayuntamiento hacia el Canal Cartagena se incremente en promedio 28 lps cada año, con una desviación estándar de 27 lps, la desviación indica que el aforo oscilará entre los cero lps para los años en que se presente menor precipitación pluvial y que se incremente el caudal a los 56 lps para los años en que se incremente la precipitación.
- 4) De seguir con la tendencia poblacional de Tultitlán, se calcula que la población que afora hacia el Canal de Cartagena se incremente a 45 mil personas para el periodo de enero de 2002 a junio de 2003. Para satisfacer la demanda de agua el ayuntamiento requiere incrementar mensualmente la captación en promedio 7 lps. Para el periodo de estudio el aforo que se estima es de 1196 lps con una desviación estándar de 261 lps, por lo que el caudal oscilará entre los 1457 lps para los meses lluviosos y los 934 lps para los meses secos.
- 5) Si la tendencia poblacional de Tultepec continua así, se pronostica que la población tributaria hacia el Canal Cartagena se incrementará a 7 mil habitantes para el periodo de enero de 2002 a junio de 2003. La cantidad de agua potable que deberá abastecerse es un lps adicional cada mes. Para el periodo en análisis se estima que el aforo hacia el canal Cartagena sea de 158 lps en promedio con una desviación de 38 lps, por lo que oscilaría entre los 197 lps y los 128 lps.
- 6) El *modelo de simulación: sistema de drenaje – crecimiento poblacional* permite establecer relaciones de causa y efectos entre el crecimiento poblacional y el sistema de drenaje, lo que permite simular posibles escenarios que pueden presentarse en el área de estudio, y al efectuarse la validación del modelo se infiere que las estimaciones que se obtienen a través de las simulaciones son confiables, y por ende sustentar la toma de decisiones a fin de considerar la disponibilidad de los recursos financieros, humanos, materiales que se requieren para satisfacer así los requerimientos del sistema de drenaje.

Con base en la investigación realizada se sugiere a las instancias correspondientes:

Ciudadanía

- Concientizarse de la vital importancia de conservar y hacer un uso racional del agua.
- No tirar basura en las vías públicas para evitar encharcamientos e inundaciones por la obstrucción de las coladeras.
- Efectuar los pagos en tiempo y en forma, a fin de recabar los recursos financieros para la administración del sistema de agua potable y de drenaje.

SAPASAC

- Intensificar el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos electrónicos y mecánicos de las plantas de bombeo, principalmente en el periodo de lluvias, así como la reparación oportuna de los ductos de agua potables para evitar fugas.
- Identificar los principales puntos de encharcamientos para realizar periódicamente el desazolve de las líneas de drenaje

Gobierno municipal y estatal

- Llevar a cabo campañas de reforestación y preservar las áreas ecológicas con el fin de recargar los mantos acuíferos.
- Invertir en plantas tratadoras de agua para su reuso.
- Inversión en cestos de basura en los principales puntos de tránsito de personas.
- Continuar con el dragado y limpieza del Canal Cartagena, y de las barrancas.

Gobierno federal

- Intensificar las campañas de planificación familiar con el objetivo de desacelerar el incremento poblacional.
- Legislación de leyes que contemplen una penalidad más severa a las personas o empresas que den un mal uso del agua y aquellas que se conecten clandestinamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE ANALÍTICO

A

ACF, Función de Autocorrelación. 29, 31.
APAST, Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Tultitlán, 62, 64.
AR, Proceso Autorregresivo. 25-26.
ARMA, Modelo Autorregresivo de Medias Móviles, 26.
ARIMA, Modelo Autorregresivo Integrado y de Medias Móviles, 26, 32-33.

C

Canal Cartagena. 3-4, 10, 16, 19, 24, 36, 39-41, 44-45, 47-49, 53, 56, 60, 62-64, 66, 68, 74, 83, 85, 89-92, 103.
Cárcamo, 13, 20, 56-57, 61.
CNA, Comisión Nacional de Agua, 24.
Coacalco, 3-4, 6-8, 10, 12-13, 20-21, 23, 32, 39, 53, 60-61, 83, 89, 91, 94, 96, 99, 103-104.

D

Dinámica de sistemas, 35, 46, 57-58.
Dinámica poblacional, 12-15.
Drenaje, 7-10, 12-13, 16, 19, 21, 23-24, 35-39, 43-44, 49, 52, 55, 60-61, 64, 70, 77, 79, 82, 87.

M

MA, Promedio Móvil, 25-26.
Modelo, de series de tiempo, 25-27, 29-33.
Modelo, de simulación, 3, 4, 35-58, 60, 64, 77, 86, 89.
Modelo, validación del, 57, 86-92.

P

PACF, Función de Autocorrelación Parcial, 29, 31.
Planta de bombeo, 20, 23, 47.

S

SAPASAC, Sistema de Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento de Coacalco, 12, 20, 24, 89, 91, 95, 104.
SAR, Modelo Autorregresivo Estacionario, 26.
Series de tiempo, 20, 24-33, 58, 73.
Simulaciones, 60-85.
SMA, Modelo Estacionario de Medias Móviles, 20, 27, 30-31.
SMN, Servicio Meteorológico Nacional, 58, 72-73, 77, 79, 104.

T

Tultitlán, 3-4, 6, 10, 12-14, 20, 21, 39-40, 45, 57, 60-66, 74, 86-88, 94.
Tultepec, 10, 12-14, 20, 39-40, 45, 53, 57, 60-61, 66-68, 74, 86, 88-89, 94, 99-100, 102-104.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo Quezada. "EL ALMANAQUE MEXICANO" GRIJALBO, México 2000.
- Azevedo Netto. "MANUAL DE HIDRÁULICA". HARLA. 1976. 578 P.
- Babbit y Baumann. "ALCANTARILLADO Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES". CECSA. México 1977. 881 p.
- Carmona Pérez. "EL AGUA ". ESCALA, 2ª edición. Colombia, 1988, 195 p.
- Fair, "ABASTECIMIENTO DE AGUAS Y REMOCIÓN DE AGUAS RESIDUALES". LIMUSA, México, 1976
- Ferrero José. "MANUAL DE HIDRÁULICA". ALHAMBRA, 1967. 210 P.
- Harvey. "TIME SERIES MODEL". PHILLIP ALLAN PUBLISHERS. ENGLAND, 1981.
- Hillier and Lieberman "INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES". MC GRAW HILL. 6a edición. México 1997, 998 p.
- Hoover and Perry. "SIMULATION A PROBLEM - SOLVING APPROACH". ADDISON WESLEY, USA, 1990.
- King Horace Williams. "MANUAL DE HIDRÁULICA PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE HIDRÁULICA". UTEHA, 4a edición en inglés, México, 1962, 536 p.
- Manual en línea de vensim
- Meadows et al. "MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO". EL PAÍS AGUILAR. 2a edición. 1993. 355p.
- Metcalf and Eddy. "INGENIERÍA SANITARIA REDES DE ALCANTARILLADO Y BOMBEO DE AGUAS RESIDUALES". LABOR. España, 1981, 446 p.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO

Información general del ayuntamiento de Tultitlán

Información general del ayuntamiento de Tultepec

Datos Meteorológicos

Mapa de localización de las estaciones meteorológicas

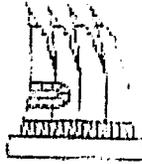
Mapa de los tramos de Canal de Cartagena

Directorio de Instituciones

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INFORMACIÓN GENERAL DEL AYUNTAMIENTO DE TULTITLÁN⁵³

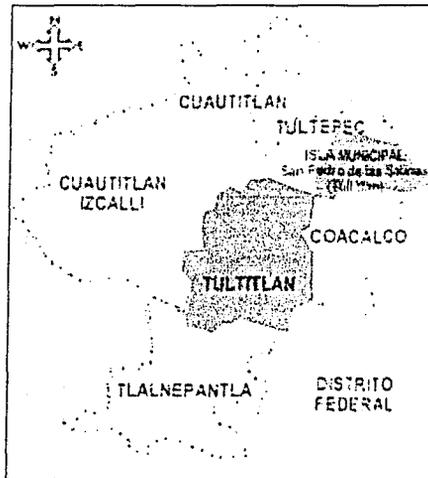
La palabra Tultitlán o Toltitlán pertenece a la lengua o idioma náhuatl y significa "Entre tules", de tollin o tullin, tule, espadaña y titlan, entre..."



Glifo de Tultitlán

El glifo de Tultitlán está representado en el Códice Mendocino, Códice de Huichapan, Códice Osuna.

El Municipio de Tultitlán se localiza en el estado de México, en la parte norte-central. Limita al norte con los municipios de Cuautitlán y Tultepec; al oriente con Jaltenco, Ecatepec y Coacalco; al sur con Tlalnepantla y el Distrito Federal y al poniente con Cuautitlán Izcalli. Las coordenadas geográficas en el centro de la cabecera municipal son: 19° 38' 44" de latitud Norte y 99° 10' longitud oeste.



Mapa de localización de Tultitlán

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Medio geográfico. El municipio cuenta con sierras, montañas, lomeríos y cañadas, un macizo montañoso, una sierra de 18 kms y depresiones pequeñas, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 16.2 °C. Altitud: 2,240 msnm. La superficie del ayuntamiento es de 71.09 Km².

⁵³ Fuente de información: <http://www.tultitlan.gob.mx/historia/historia.html> (Consultado el día 6 de enero de 2003).

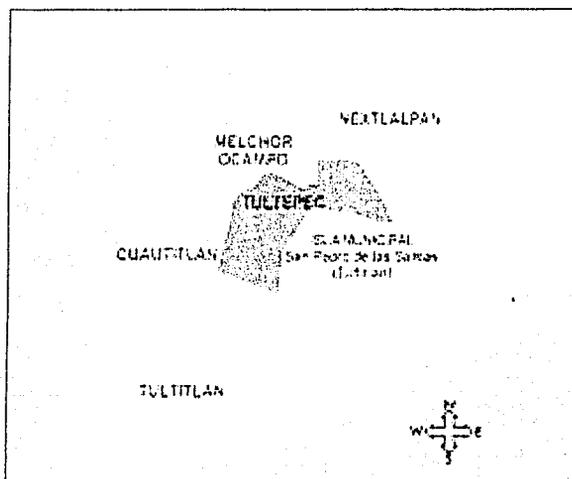
INFORMACIÓN GENERAL DEL AYUNTAMIENTO DE TULTEPEC⁵⁴



En el Cerro de Tule

Glifo y significado náhuatl de Tultepec

El Ayuntamiento de Tultepec, colinda al norte con los municipios de Melchor Ocampo y Nextlalpan; al sur con Tultitlán y Coacalco; al oriente con Nextlalpan y Tultitlán y al poniente con Cuautitlán



Mapa de localización del Ayuntamiento de Tultepec

Las coordenadas geográficas del municipio son:

Latitud máxima 19°42'35"

Latitud mínima 19°39'08"

Longitud máxima 99°08'36"

Longitud mínima 99°04'28"

Altitud media de 2,240 msnm

El municipio tiene una superficie de 19.02 Km².

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁵⁴ Fuente de información: <http://www.edomexico.gob.mx/se/tultepec.htm> (Consultado el día 6 de enero de 2003)

ANEXO

DATOS METEOROLÓGICOS

PRECIPITACIÓN PLUVIAL MENSUAL ESTACIÓN METEOROLÓGICA GRAN CANAL (mm mensuales)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1958	23.8	2.5	0	13.8	98.9	14.9	123.3	154.5	198.3	90.3	33.6	18.6
1959	7.3	0	0.5	8.1	62.6	122.8	111.3	89.4	53.6	146.3	0	0
1960	8.3	0	2.1	1.5	31.5	28.5	67	80.6	117	77.2	2.6	4.8
1961	17.8	0.1	0.7	21.8	14.9	129.4	112.7	63.5	48.7	27.2	6.4	0
1962	0	0	0.1	26.6	9.1	73.8	90.3	132.7	151	45.6	1	2.9
1963	0	5.5	45.6	10.1	58.6	141.2	134.8	142.8	153.1	60.6	29.6	7.1
1964	42.1	0	6.7	17.2	129.2	126.4	123.4	67.8	96.1	14.3	15.2	16.9
1965	0.1	20.5	9	19.2	38	80.7	139.4	165	132.4	41	7.7	4.2
1966	6.5	1.5	64.4	26.1	21.2	80.7	195	73.1	62.6	59.1	0	4.4
1967	54.5	0	11	6.5	120	65	100.9	107.9	167.8	36.6	0.3	1.7
1968	3.3	10.4	1.8	52.4	53.7	131.5	104.2	50.9	187.3	49.2	10.4	19.3
1969	11.5	2.2	9.4	27.5	7.7	38	61.3	205.1	53.8	22.3	1.2	0
1970	1.8	6	1	12.5	57.4	85.6	109.5	166.8	104.6	21.9	0.1	0
1971	0.1	0	83.9	4.3	31.4	164.7	102.8	171.3	132	62.5	6.4	3.1
1972	0	2.6	20.3	136	69.8	86.5	146.8	36.8	125	32.1	22.3	1.4
1973	0.2	11.4	2.7	30	14.1	126.7	159.3	201.1	70.4	47.7	10.2	0.8
1974	1.2	4	14.2	13.2	69.3	153.5	133.8	98.9	90.4	28	6.9	0.1
1975	31.8	20.8	6.4	0.2	126.5	176.5	137.6	84.2	103	11.9	2.4	0
1976	0	8.6	20.5	20.3	52	58.8	223	111.5	94.2	94.2	7.1	18.5
1977	11.3	2.5	0	22.6	82.3	84.2	141.8	99.5	94.3	57.7	7.4	4.4
1978	7.1	9.1	38.7	5.1	11.3	179.2	105.3	95.5	138.5	79.9	28.7	
1979	0	39.9	9.6	43.9	49.9	80.9	129.8	108.2	118.2	10	3.7	21.8
1980	31.4	4.5	4	43.8	48.1	40.7	49.3	113.5	154.5	43.3	26.3	0.1
1981	25.7	5.1	11.5	91.2	29.4	108.7	83	131.1	43.7	125.7	1.5	0.1
1982	0	4.1	8.7	25.2	93.3	64.1	89.2	68.7	18.8	66.6	0.1	4.5
1983	28.5	2	5.2	0	24.8	105.8	117.8	85.6	73.9	36.5	6.9	6.6
1984	11.4	24.5	2.8	0.8	14	85.3	222.9	84.1	126.8	33.6	4.4	0
1985	4.5	0.8	33.7	34.1	59.3	165.5	99.2	50.7	57.2	19.6	20.6	0.6
1986	0	0.4	0	34.6	43.2	219.4	86.9	145.7	86.9	74.9	17.9	0
1987	0	1.8	10.3	3.2	55.6	117.9	163.8	96.3	9.3	0	10.4	0
1988	20	6.9	44.1	33.6	56.1	62.5	120.2	103.2	66.2	40.2	17	0
1989	3.1	0	5	16	49.3	130.7	64.4	159.3	83	16.7	0	20
1990	5.9	12.2	3.7	32	46.5	149.5	164.3	144.3	72.9	105		
1991	2	0	4.3	11.5		148	207.4	56.7	146.3	99.4	19.3	
1992	31.2	3	2.4	11.4	86.5	39.3	42.4	110.5	42.7	113.6		
1993	14.6	0	0.2	0	15.6	67.2	66.1	67.7	91.2	12.8	0.5	
1994	21.4	0	1.5	18.5	62		170.9	111.1	88.5	55.8	2.6	
1995	0	0	8.8	18.5	23.9	79.8	64.8	175.7	69.8	54.1	26.2	6.5
1996	0	0	0.3	26.4	40	39.7	101.7	97.9	98.2	42	0	1
1997	0	0	44.5	46.3	59.6	137	103.3	76.8	22.2	25.6	0	3.7
1998	14.9	0	0	0	0	71.8	44.9	95.1	189.8	56.8	0	0
1999	0	0	10.1	17.8	2.5	26	78.4	119.1	88.1	79	18	0
2000	0	0	18.4	2.1	68.9	102.3	53.1	124.6	63.3	2.4	37.5	4.5
2001	12.5	1.4	5.1	32.2	96.1	85.2	110.4	100.4	79.2	18.7	0	0
2002	10.6	13	3	17.2	9	68.1						

MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Estación climatológica Tultepec

Altitud: 2,250 msnm

Coordenadas geográficas: 19° 41' 05" LN – 99° 07' 48" LW

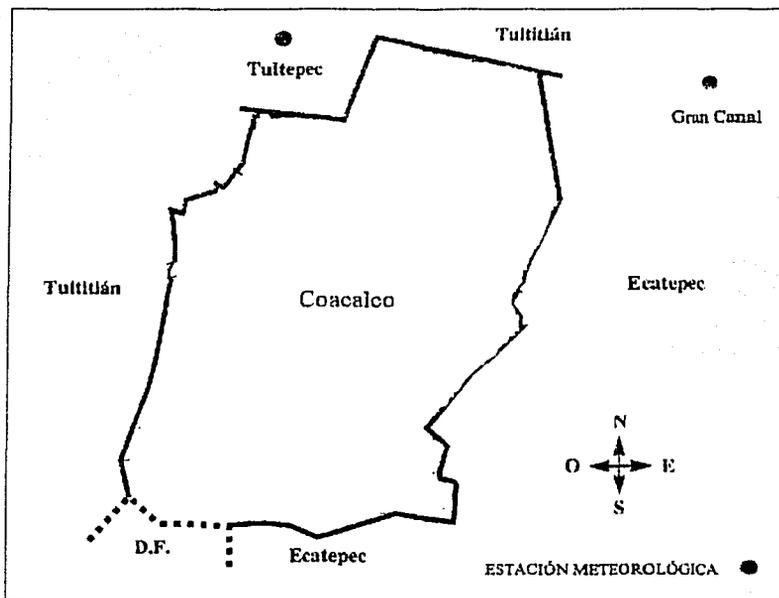
Ubicación: Se localiza en la "Casa del Observador", en la población de Tultepec, Estado de México.

Estación climatológica Gran canal

Altitud: 2,243 msnm

Coordenadas geográficas: 19° 38' 20" LN – 99° 03' 10" LW

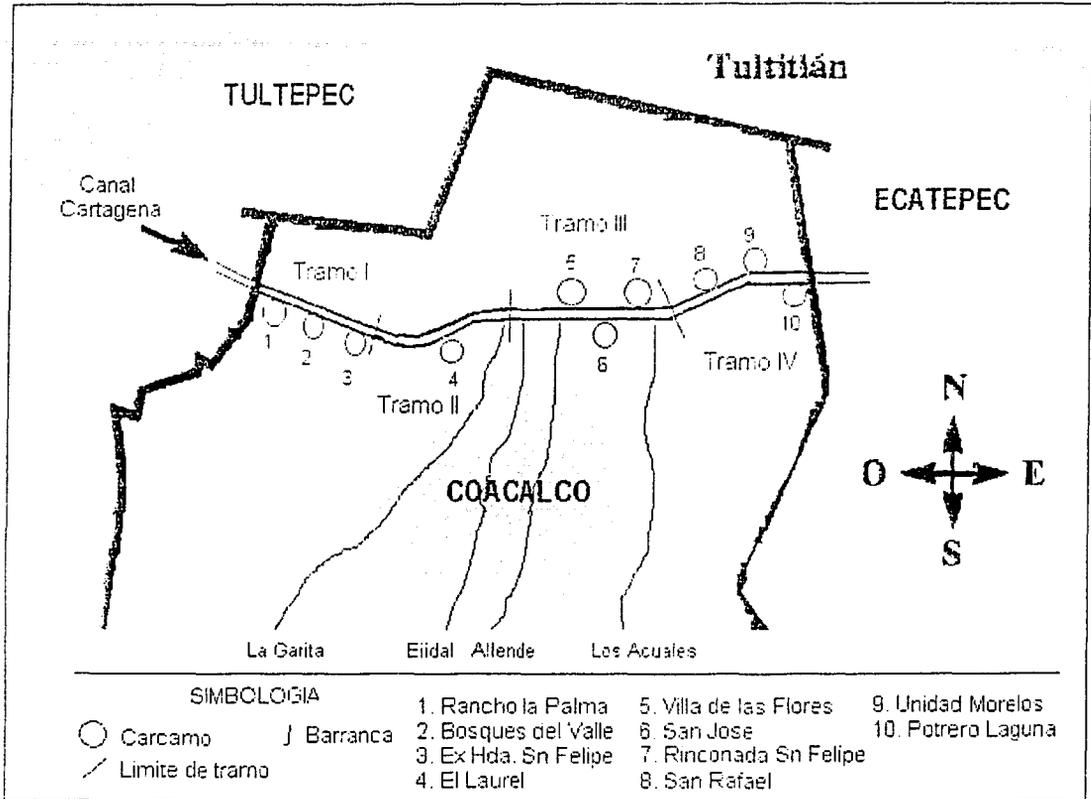
Ubicación: Se localiza en el kilómetro 27 + 250 del Gran canal, en el ayuntamiento de Ecatepec, Estado de México.



Localización de las estaciones meteorológicas de Tultepec y Gran Canal

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MAPA DE LOS TRAMOS DE CANAL CARTAGENA



Áreas de procedencia tributarias que aforan al canal Cartagena (Jurisdicción de Coacalco)

Tramo I Canal Cartagena. Tultitlán, Tultepec, Rancho la Palma y Ex Hda. San Felipe.

Tramo II Canal Cartagena. El Laurel y la Garita.

Tramo III Canal Cartagena. Ejidal, Allende, Villa de las Flores, San José, Rinconada San Felipe.

Tramo IV Canal Cartagena. San Rafael, Unidad Morelos, Potrero Laguna.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DIRECTORIO DE INSTITUCIONES

Para la realización de este trabajo se solicitó y consultó información del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática *INEGI*, del Servicio Meteorológico Nacional *SMN*, de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México *GRAVAMEX*, de la Dirección de Operación y Construcción de Tultitlán, de la Dirección de Agua Potable de Tultepec, y así mismo se tomo en consideración las sugerencias, opiniones de expertos en el tema del Organismo Público Descentralizado Municipal de Sistema de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Coacalco *SAPASAC*. A continuación se presenta el directorio de las instituciones visitadas.

AGUA POTABLE ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE TULTITLÁN. DIRECCIÓN DE OPERACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

Dirección: Isidro Fabela No. 3, Bo. San Bártolo, Tultitlán, Estado de México.
Teléfono: 58 88 19 00

DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE DE TULTEPEC

Dirección: Av. Hidalgo No. 1, Colonia Centro, Tultepec, Estado de México.
Teléfono: 58 92 01 25

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA. CI TLALNEPANTLA

Dirección: Av. Dr. Gustavo Baz No. 142, 2º piso Edificio Madero, Tlalnepantla, Estado de México
Teléfono: 53 65 36 25

GERENCIA REGIONAL DE AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO

Dirección: Av. José Loreto Fabela # 868, Colonia San Juan de Aragón, Delegación Gustavo A. Madero, Distrito Federal.
Teléfono: 57 60 00 49

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

Dirección: Av. Observatorio No. 192, Delegación Miguel Hidalgo, Distrito Federal.
Teléfono: 56 26 86 95

SISTEMA DE AGUA POTABLE ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE COACALCO. GERENCIA OPERATIVA

Dirección: Cerrada Bartolomé Flores No. 4, Cabecera municipal, Coacalco, Estado de México.
Teléfono: 58 75 41 12

