

01177

20/1



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

APLICACION DEL MODELO QUAL-TX PARA LA  
EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RIO  
BRAVO DESDE LA PRESA FALCON HASTA MATAMOROS

**MARIA ELENA ISABEL CASTRO CAICEDO**

**T E S I S**

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

( A M B I E N T A L )

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 1990

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

# CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	
1. INTRODUCCION	
1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION	3
1.2. OBJETIVOS.	5
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES	6
2. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.	8
2.1. ASPECTOS ECOLOGICOS.	14
2.2. HIDROGRAFIA DE LA CUENCA BAJA DEL RIO BRAVO	14
3. RECOPIACION DE INFORMACION DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL TRAMO DE ESTUDIO.	17
3.1. ESTACIONES DE MUESTREO Y AFORO.	17
3.1.1. Estaciones CILA sobre el Río Bravo.	17
3.1.2. Estaciones hidrométricas de la T.W.C.	19
3.1.3. Estaciones hidrométricas SICA (SARH).	20

3.2. PARAMETROS DE CALIDAD DE AGUA PARA EL ESTUDIO.	23
4. MODELOS DE CALIDAD DE AGUA EN RIOS.	24
4.1. GENERALIDADES.	24
4.2. TIPOS DE MODELOS DE CALIDAD EN RIOS.	24
a. Investigación y Manejo.	25
b. Estocástico y Determinístico.	25
c. Dinámico y Estado permanente.	25
d. Mecánico y Caja negra	25
4.3. MODELOS DE SIMULACION DE CALIDAD EN RIOS.	26
5. DESARROLLO Y APLICACION DEL MODELO QUAL-TX.	28
5.1. GENERALIDADES.	28
5.2. MODELO COMPUTACIONAL	29
5.2.1. Representación prototipo.	29
a. Cabecera de agua	32
b. Elementos de entrada y salida.	32
c. Elemento patrón.	34
d. Ultimo elemento en el sistema.	34
5.2.2. Limitaciones del modelo	34
5.2.3. Lenguaje del programa y requisitos de operación.	35
5.3. FORMULACION GENERAL DEL MODELO	35

5.3.1. Representación conceptual.	36
5.3.2. Representación funcional.	39
5.3.3. Representación computacional.	41
5.3.4. Características hidráulicas.	41
5.3.5. Aumento de caudal.	42
5.4. REACCIONES E INTERRELACIONES DE LOS CONSTITUYENTES	45
5.4.1. Consideraciones generales.	45
5.4.2. D.B.O. Carbonácea.	46
5.4.3. Oxígeno disuelto.	47
5.4.3.1. Concentración de saturación de oxígeno disuelto.	49
5.4.3.2. Estimación del coeficiente de reaeración atmosférica.	51
5.4.4. Coliformes.	52
5.4.5. Constituyente no conservativo arbitrario	52
5.4.6. Constituyentes conservativos.	53
5.4.7. Coeficientes que dependen de la temperatura.	54
5.4.8. Velocidades de reacción y constantess físicas.	54
6. CALIBRACION Y VERIFICACION.	57
7. RESULTADOS Y DISCUSION.	70
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	77
8.1. CONCLUSIONES	77
8.2. RECOMENDACIONES	78

9. BIBLIOGRAFIA.

80

10. ANEXOS.

83

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

	FIGURAS	pag.
1.	Cuenca del Río Bravo	9
2.	Zonas de riego aguas abajo de la presa Falcón.	10
3.	Perfil del Río Bravo. Presa Falcón-Golfo de México.	12
4.	Mapa general Río Bravo-cuenca baja.	13
5.	Ubicación de las estaciones hidrométricas.	22
6.	Red de segmentos y elementos computacionales.	30
7.	Esquema de aportaciones y extracciones de agua en el Río Bravo desde la presa Falcón hasta el Golfo de México.	37
8.	Representación conceptual del modelo QUAL-TX.	38
9.	Simulación de oxígeno disuelto y promedios de máximos y mínimos durante 1977-1986.	60
10.	Simulación de DBOs y promedios de máximos y mínimos durante 1977-1986.	61
11.	Simulación de $SO_4^{=}$ y promedios de máximos y mínimos durante 1977-1986.	62
12.	Simulación de cloruros y promedios de máximos y mínimos durante 1977-1986.	63
13.	Simulación de sólidos disueltos y promedios de máximos y mínimos durante 1977-1986.	64
14.	Simulación de coliformes y promedios de máximos y mínimos durante 1977-1986.	65
15.	Perfiles de sensibilidad de O.D. con variación del caudal de descarga en la Presa Falcón.	66
16.	Perfiles de sensibilidad de O.D. con variación del caudal de descarga del dren El Morillo.	67

17. Perfiles de sensibilidad de O.D. con variación de la concentración de sulfatos en la descarga del dren El Morillo. 68
18. Perfiles de sensibilidad de OD con variación de la concentración de DBOs en la descarga del dren El Morillo. 69

## TABLAS

I.	Identificación de los segmentos y elementos computacionales	31
II.	Identificación y datos de las aportaciones derivaciones y cabecera de agua.	33
III.	Coefficientes hidráulicos de advección.	43
IV.	Coefficientes de reacción.	48
V.	Métodos de cálculo del coeficiente de reaeración atmosférica.	51
VI.	Intervalos típicos para los coeficientes de reacción	56
VII.	Datos de control para validación del modelo.	59

## 1. INTRODUCCION

El agua es esencial para la sobrevivencia humana; el ecosistema terrestre no puede funcionar sin este recurso. Además del uso doméstico, el agua se necesita para la producción agrícola, procesos industriales y manufactura, generación de potencial hidroeléctrico, recreación y una amplia variedad de usos. Cuando un recurso se utiliza para tantos propósitos es importante que se use y explote racional y eficientemente.

Estimaciones actuales indican que el volumen total de agua sobre la tierra es  $1.4 \times 10^9 \text{ Km}^3$ . 97.3 % del total es salina por lo cual no puede usarse para el consumo humano directo. Del sobrante, sólo 2.7 % es agua dulce, 77.2 % se encuentra almacenada en los mantos de hielo polares y glaciares, 22.4 % aguas subterráneas y humedad del suelo, 0.35 % en lagos y pantanos, 0.04 % en la atmósfera y 0.01 % está en corrientes. La mayor parte del agua superficial corresponde a ríos, corrientes y lagos alcanzando menos del 0.5 % de agua dulce disponible, que básicamente constituye el aporte de agua aprovechable por el hombre, más la explotación de aguas subterráneas que se está desarrollando rápidamente.

(1)

Esta situación agravada por el aumento de población ha generado una nueva concepción ecológica y de educación ambiental para mantener una óptima calidad del agua en ríos internacionales de las diversas fuentes de agua que el hombre dispone. La elaboración de la legislación es un avance en la utilización racional de los recursos y en ocasiones los proyectos de cooperación entre países vecinos

constituyen un claro ejemplo del aprovechamiento de la tecnología para mantener una óptima calidad del agua en ríos internacionales.

Un caso concreto es el río Bravo que sirve como límite geográfico entre México y Estados Unidos de América, en el cual se realizan monitoreos continuos para evaluar las condiciones fisicoquímicas y biológicas que permitirán detectar la variabilidad de los parámetros. La información recopilada en boletines periódicos facilita la elaboración de estudios de calidad del agua y además hacen posible prever el grado de contaminación, mediante la simulación a partir de modelos que incluyen los distintos constituyentes o parámetros factibles de una evaluación matemática bastante aproximada a las condiciones previstas naturalmente.

Se han llevado a cabo diversos estudios de calidad de agua en el Río Bravo, entre ellos se destaca el realizado en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., Sección de Ingeniería Ambiental, patrocinado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) y CONACYT. Dicho estudio se realizó básicamente en la cuenca media del Río Bravo y se evaluaron principalmente los niveles de OD y DBO, utilizando el modelo RIBOD para la simulación, desarrollado en la división para tal fin. (17)

El presente trabajo es una continuación de dicho estudio y se realiza en la cuenca baja del Río Bravo, tramo comprendido entre la presa Falcón y Matamoros (Brownsville). Para ello se utilizará el modelo QUAL-TX desarrollado básicamente por la E.P.A. con el cual se evalúa, además de

OD y DBO otros parámetros tales como: sólidos disueltos, sulfatos, cloruros y coliformes.

El modelo opera en condiciones de estado permanente lo cual permite predecir la calidad del agua en la corriente, analizar el impacto de las aportaciones de aguas residuales y principalmente conocer y predecir los perfiles de OD y DBO a lo largo del río.

Se analizan detalladamente los datos de escurrimiento y los parámetros de calidad registrados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H), La Comisión Internacional de Límites y Aguas (C.I.L.A) México - Estados Unidos, y la oficina de Recursos Hidráulicos del Estado de Texas en Estados Unidos (T.W.C). El modelo se calibra y verifica, y, finalmente se presenta la interpretación de los resultados de la calidad del agua en el tramo de estudio.

#### 1.1. Antecedentes y justificación.

Por su relativa abundancia, durante mucho tiempo el agua se usó sin restricciones. Posteriormente, el crecimiento de la población, el desarrollo y diversificación de las actividades productivas y de servicios, incrementaron rápidamente la demanda de agua y los distintos usos a la cual se destina.

A partir de 1931 se ha publicado anualmente el boletín hidrométrico de la CILA, relativos al gasto y escurrimiento del Río Bravo en el tramo limítrofe entre México y los Estados Unidos. Las secciones de la Comisión Internacional de Límites y Aguas de ambos países publican conjuntamente

esta información que son los resultados de observaciones hechas en el Río Bravo y en sus principales tributarios cerca de sus confluencias, desde la presa Elephant Butte hasta el golfo de México.

Algunos de los datos que se publican relativos a áreas regadas, análisis químicos y bacteriológicos, sedimentos, agua almacenada, evaporación, precipitación pluvial y aguas para usos municipales, los suministran oficinas gubernamentales y empresas particulares de los dos países (2).

De los 869000 Km<sup>2</sup> del área total de la cuenca del Río Bravo, el 46 % no produce aportación superficial al río, quedando 457000 Km<sup>2</sup> de cuenca productiva de escurrimientos directos que aportan anualmente 14541 millones de metros cúbicos, de los cuales 7085 corresponden a México, 7366 millones a Estados Unidos, que incluyen 700 millones en la presa Internacional De La Amistad y 500 millones en la presa Internacional Falcón.

En 1986 se regaron en la cuenca con aguas del río Bravo y sus afluentes, aguas abajo de la presa Elephant Butte 769410 hectáreas, correspondiendo 391215 hectáreas a México y 378195 a Estados Unidos. El río descargaba al Golfo de México un promedio anual de 3100 millones de metros cúbicos antes de que se construyera la Presa Internacional Falcón en 1953. De 1954 a 1986 la descarga media al golfo es de 1093 millones de metros cúbicos anuales, con un máximo de 4484 millones de metros cúbicos en 1967. (3)

El presente estudio se justifica debido a la importancia

geográfica del Río Bravo y en virtud de los tratados internacionales suscritos entre México y los Estados Unidos respecto a los volúmenes de utilización de sus aguas, por lo cual se hace necesario conocer su comportamiento como cuerpo natural de agua sujeto a distintos usos y estimar su capacidad de asimilación de aguas residuales con objeto de tomar en cuenta las medidas pertinentes tendientes a preservar un nivel de calidad adecuado al desarrollo de la zona ribereña.

Para llevar a cabo este tipo de estudios se han desarrollado diferentes clases de modelos matemáticos y dada su relativa reciente utilización y el uso cada vez mayor que se va a hacer de estos, es necesario aplicar un modelo específico que reúna características de confiabilidad y eficiencia, que permita evaluar el complejo comportamiento de un río.

La zona escogida para el análisis está comprendida entre la presa Falcón y Matamoros la cual presenta escasa precipitación, crecimiento de la agricultura de riego y poca aportación superficial de la cuenca al río. (10)

## 1.2. Objetivos.

El objetivo general del presente trabajo es la aplicación de un modelo matemático para la evaluación de la calidad del agua en ríos mediante la simulación de parámetros específicos utilizando los datos de monitoreo. Se complementa a su vez con la realización de los objetivos particulares siguientes:

a. Seleccionar el tramo de estudio tomando en cuenta su

importancia y problemática.

- b. Elegir el modelo apropiado para la evaluación de la calidad del agua del tramo seleccionado.
- c. Escoger los parámetros para la simulación considerando la disponibilidad y consistencia de los datos.
- d. Evaluar las variaciones de la calidad del agua del Río Bravo desde la presa Falcón hasta Matamoros tomando como referencia las normas establecidas para ello.
- e. Valorar la aplicabilidad del modelo para este caso en particular.
- f. Proponer algunas alternativas de estudio, manejo y prevención de la contaminación del río mediante la inferencia obtenida con la evaluación de los datos simulados.

### 1.3. Alcances y limitaciones.

Con el fin de lograr los objetivos propuestos se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- a. Recopilar, procesar y analizar exhaustivamente la información referente a los parámetros físico-químicos y biológicos disponibles.
- b. Calcular las constantes hidráulicas y coeficientes requeridos para la simulación de la calidad del agua utilizando el programa QUAL-TX.

c. Calibrar, verificar y analizar la sensibilidad del modelo matemático empleado.

El presente trabajo tiene las siguientes limitaciones:

a. Se realiza la simulación durante el mes de diciembre, época del año en la cual se presenta la máxima disminución de caudal.

b. El período de diez años comprendido entre 1977 y 1986.

c. La evaluación de los siguientes parámetros: OD, DBO, sulfatos, cloruros, sólidos disueltos y coliformes, aunque el modelo tiene capacidad para simular hasta quince constituyentes de la calidad del agua.

d. Se encuentran además las limitaciones propias del modelo matemático empleado, las cuales son en términos generales: el tipo de modelo, el cual es determinístico y de estado permanente, asume que los mecanismos de transporte, advección y dispersión son significativos únicamente en la dirección longitudinal del flujo.

## 2. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Río Bravo nace en los Estados Unidos, en las montañas Rocallosas a elevaciones de unos 4000 m.s.n.m y baja con rumbo hacia el sur hasta Ciudad Juárez. A partir de este lugar corre con rumbo general hacia el sureste hasta su desembocadura en el Golfo de México, constituyendo la frontera entre México y los Estados Unidos. El Río Bravo recorre una distancia de 2020 Km desde Cd Juárez hasta su desembocadura.

En esta región internacional el río está constituido por tres cuencas importantes : alta (poniente), media (central) y baja (oriente), según clasificación de la SARH. (Figura 1). En la cuenca alta el río está formado por dos tramos importantes. El primero entre Ciudad Juárez (El Paso) y Ojinaga (Presidio) (confluencia del río conchos con el Río Bravo). El segundo entre Ojinaga (Presidio) y la presa la Amistad. Ambos tramos suman una longitud de 1096 Km.

En la cuenca media se define el curso del Río Bravo por el tramo comprendido entre los embalses la Amistad y Falcón, que tiene una longitud de 482 Km. Finalmente la cuenca baja abarca el tramo definido entre la Presa Internacional Falcón y la desembocadura en el Golfo de México, en una longitud de 442 Km.

El tramo de estudio se ubica entre la Presa Internacional Falcón y la estación hidrométrica (CILAD) cerca de Matamoros. El área de aporte de este tramo es 41065 Km<sup>2</sup> en México y 3128 Km<sup>2</sup> en E.E.U.U.. La superficie de riego es 283633 Ha y 290629 Ha en México y E.E.U.U. respectivamente (Figura 2).



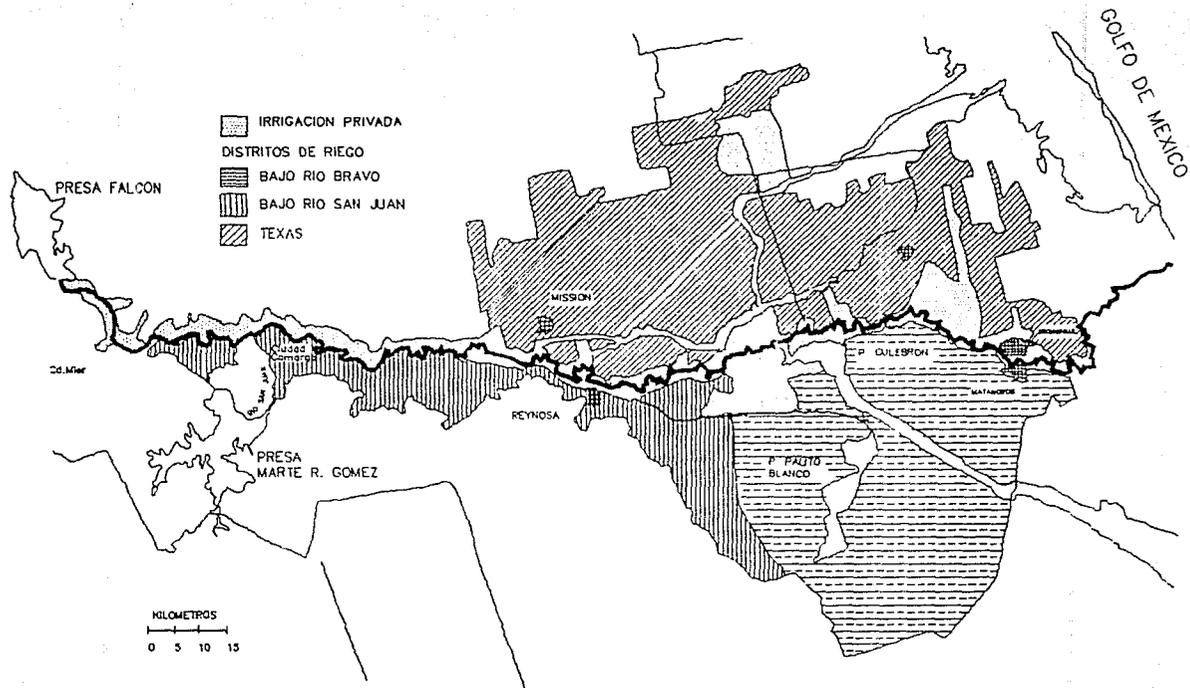


FIGURA 2. ZONAS DE RIEGO AGUAS ABAJO DE LA PRESA FALCON

FUENTE: IBWC, Lower Rio Grande Flood Control Works and Irrigation Developments. 1964

La elevación de la corriente varía desde aproximadamente 55 hasta 5 m.s.n.m. (Figura 3).

El caudal se caracteriza por amplias fluctuaciones de escurrimiento, máximos en los meses de mayo y julio y mínimos en noviembre y diciembre (Anexo 1 a 5).

Geográficamente ésta zona va desde los  $24^{\circ} 50'$  a los  $28^{\circ} 40'$  de latitud norte y de los  $97^{\circ} 10'$  a los  $101^{\circ} 50'$  de longitud de WG (11). En territorio estadounidense comprende los condados de Zapata, Starr, Hidalgo y Camerón del estado de Texas y los municipios de Nueva Ciudad Guerrero, Ciudad Mier, Miguel Alemán, Camargo, Díaz Ordáz, Reynosa, Río Bravo, Valle Hermoso y Matamoros del estado de Tamaulipas en territorio mexicano. (Figura 4).

La cuenca baja presenta una característica mixta, rural y urbana, con una población de aproximadamente 750.000 habitantes. Al río llegan algunas descargas municipales y la principal obra de ingeniería es la presa Falcón, operada por CILA. Esta presa se construyó para el control de avenidas, almacenamiento para riego agrícola, generación de energía eléctrica, retención de azolves y fines recreativos.

Dispone de una capacidad de 272 millones de  $m^3$  para azolves, 3290 millones de  $m^3$  de capacidad útil y para control de avenidas 1617 millones de  $m^3$ ; haciendo un total de 4907 millones de  $m^3$  de capacidad total. Los anteriores datos se basan en el levantamiento topográfico de 1972. (3).

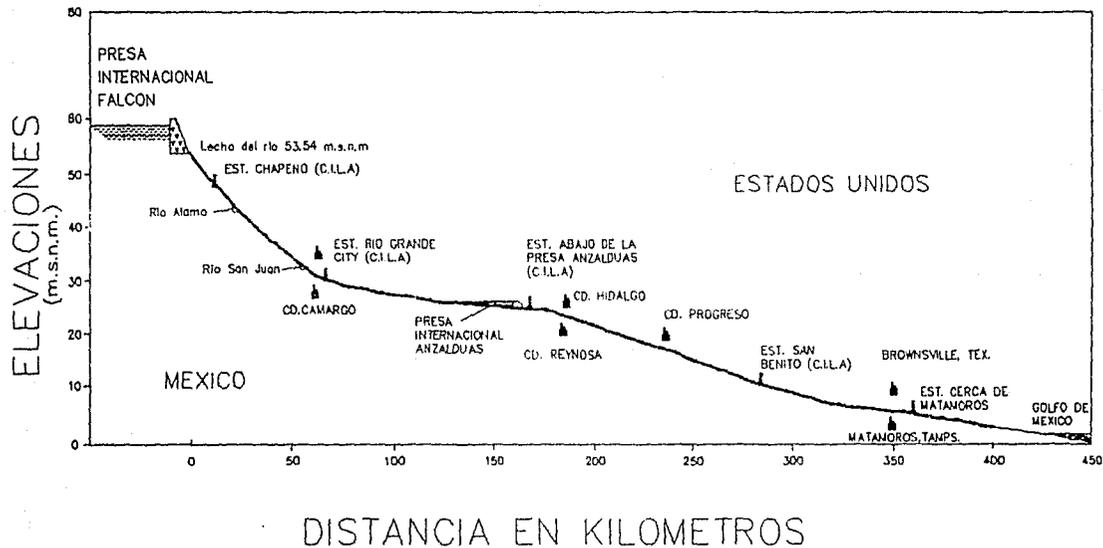
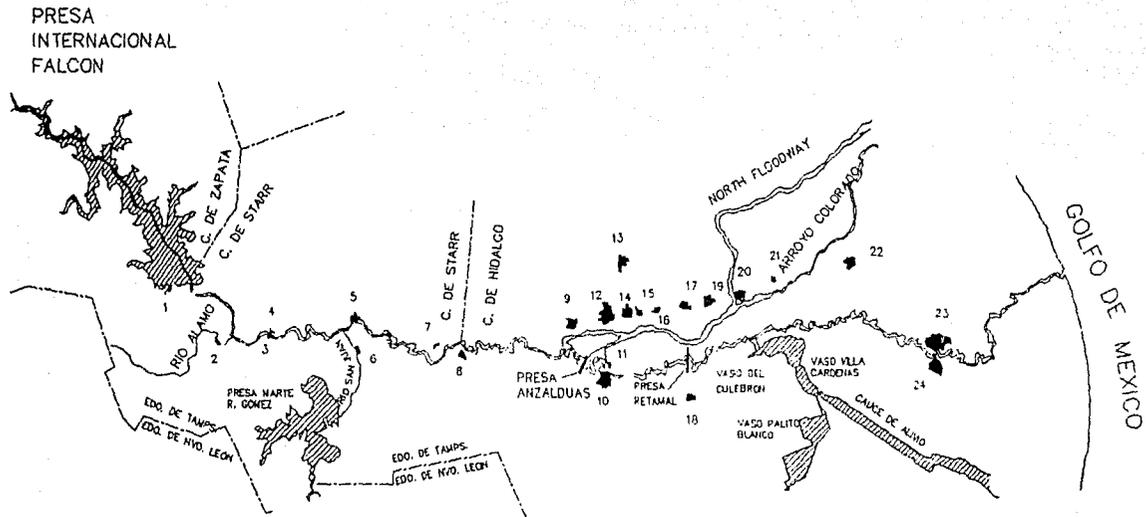


FIGURA 3. PERFIL DEL RIO BRAVO. PRESA FALCON-GOLFO DE MEXICO

FUENTE: Secretaría de Recursos Hidraulicos. (1972)



- |                      |                      |                   |                     |
|----------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| 1. NVA. CD. GUERRERO | 7. CIUDAD GRULLA     | 13. CD. EDIMBURG  | 19. CD. WESLACO     |
| 2. CIUDAD MIER       | 8. SAN M. DE CAMARGO | 14. CD. PHARR     | 20. CD. MERCEDES    |
| 3. CD. MIGUEL ALEMAN | 9. CD. MISSION       | 15. CD. SAN JUAN  | 21. CD. L A FERIA   |
| 4. CIUDAD ROMA       | 10. CD. REYNOSA      | 16. CD. ALAMO     | 22. CD. SAN BENITO  |
| 5. RIO GRANDE CITY   | 11. CD. HIDALGO      | 17. CD. DONNA     | 23. CD. BROWNSVILLE |
| 6. CD. CAMARGO       | 12. CD. McALLEN      | 18. CD. RIO BRAVO | 24. CD. MATAMOROS   |

FIGURA 4. MAPA GENERAL RIO BRAVO — CUENCA BAJA

FUENTE: Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos. (1977)

## 2.1. Aspectos ecológicos.

Debido al régimen climático de México en casi todos los ríos existe una diferencia notable del volumen de agua que llevan entre la época lluviosa y la época seca del año. Las obras de retención del agua y del uso para irrigación a menudo acentúan todavía más estas variaciones, de tal manera que muchos ríos originalmente permanentes ahora se vuelven intermitentes, al menos en algunos tramos de su recorrido. En amplias zonas la destrucción de la vegetación natural y la erosión activa del suelo, al aumentar el escurrimiento superficial y disminuir la infiltración del agua de la lluvia, contribuyen también al mismo fenómeno.

Estas características se correlacionan con los datos obtenidos para la Cuenca Baja del Río Bravo, siendo la época de menor caudal los meses de diciembre y enero. En general el clima es extremoso, en particular durante el día (promedio anual de oscilación diurna hasta 20°C). La insolación suele ser muy intensa, la humedad atmosférica en general baja y en consecuencia la evaporación y la transpiración alcanza valores altos. Las lluvias son del orden de 200 a 500 mm anuales, registrándose valores inferiores a 200 mm únicamente en pequeñas áreas. La región de la Cuenca Baja del Río Bravo ecológicamente se clasifica como Matorral Xerófilo (9).

## 2.2. Hidrografía de la cuenca baja del Río Bravo.

A esta cuenca le corresponde una área de 44158 Km<sup>2</sup> equivalente a un 0.8% del área total del río (459915 Km<sup>2</sup>), hasta el sitio de la estación hidrométrica abajo de

Brownsville. Siendo el colector general el Río Bravo, recibe en territorio nacional al Río Alamo, a 20 Km aguas abajo de la cortina de la presa Falcón, con una área de 4996 Km<sup>2</sup> y el Río San Juan, a 58 Km aguas abajo de la misma presa con una cuenca de 32972 Km<sup>2</sup>, siendo los únicos afluentes importantes. En la margen izquierda en los Estados Unidos de Norteamérica solo existe una pequeña cuenca que aporta directamente al río. El río Alamo tiene como afluentes al Río Sosa y sus arroyos San Jerónimo, Urías y Reyes, así como los arroyos de las Nueces, de Machoym Lajitas. El Río San Juan tiene como tributarios los Ríos Santa Catarina, Ramos, Pilón, Pesquería y Salinas.

En esta cuenca se localizan varios embalses destacándose los siguientes : Rodrigo Gomez (41 millones de m<sup>3</sup>) y Marte Río Gomez (el Azúcar) (1096.90 millones de m<sup>3</sup>) en los orígenes y al final del Río San Juan respectivamente. Cerca del Golfo de México se encuentran los almacenamientos menores, el Culebrón y Cárdenas (conjuntamente 111 millones de m<sup>3</sup>) y Palito Blanco (153 millones de m<sup>3</sup>).

En el municipio Río Bravo aguas arriba de Reynosa (México) se ubica la presa Retamal cuya función es derivar por un cauce de alivio del mismo nombre las aguas que excedan la capacidad del Río Bravo en Matamoros (Brownsville), este canal unido posteriormente al canal Anzaldúas constituye un cauce de alivio que desemboca directamente en el mar, al sur de Matamoros (México).

Al igual que en el lado mexicano, en un punto situado a 1300 metros aguas arriba de la presa de Anzaldúas, los Estados Unidos utilizan el cauce de alivio Banker que luego, cerca

de la población Mercedes (Texas) se bifurca dando origen al cauce del arroyo Colorado y al canal North Floodway, a través de los cuales descargan las excedencias del Río Bravo al Golfo de México. (Figura 4).

A partir de la ciudad Río Bravo (México) el tramo final del Río constituye prácticamente un emisor con cerca de 200 Km que desemboca en el mar a la altura de los poblados Bagdad y Bocachica en México y los Estados Unidos respectivamente.

### 3. RECOPIACION DE INFORMACION DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL TRAMO DE ESTUDIO.

#### 3.1. Estaciones de muestreo y aforo

La información utilizada como base de datos para alimentar, verificar y calibrar el modelo se tomó de los boletines hidrométricos publicados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (C.I.L.A.) (período 1977 a 1986) y del sistema de información de la calidad del agua (S.I.C.A.) de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (período 01-01-73 a 02-11-83) y de la Comisión de Aguas de Texas (Período 01-01-68 a 05-12-87).

En los boletines de la C.I.L.A., además de datos hidrométricos se encuentran registros de calidad del agua, fenómenos climatológicos, áreas de la cuenca, superficies de riego y agua para usos municipales.

En los boletines del S.I.C.A. y de la T.W.C. hay información únicamente de calidad del agua. Las estaciones hidrométricas y de monitoreo son las siguientes :

#### 3.1.1. Estaciones C.I.L.A sobre el Río Bravo

a. Río Bravo, abajo de la presa Falcón, cerca de Falcón, Texas y Nueva Cd. Guerrero, Tamps. Los gastos tabulados son los que descarga al Río Bravo la presa Falcón, ubicada en Nueva Ciudad Guerrero Tamps., a 138.6 Km aguas abajo de Nuevo Laredo, Tamps., y 442.3 Km río arriba del Golfo de México. (4).

b. Río Alamo en Ciudad Mier, Tamps. Ubicada a 1 Km al norte de Ciudad Mier, Tamps. y a 8 Km río arriba de la confluencia del Alamo con el Río Bravo, la cual está a 422.3 Km río arriba del Golfo de México.

c. Río San Juan en Camargo Tamaulipas. Localizada 15 Km aguas abajo de la presa Marte R. Gómez y a 5 Km aguas arriba de la desembocadura del Río San Juan en el Bravo, la cual está a 384.1 Km río arriba del Golfo de México.

d. Río Bravo en Río Grande City, Texas, cerca de Camargo, Tamps. Situada a 7 Km al NW de Camargo Tamps., a 1.6 Km al este del Río Grande City, Texas., 6 Km aguas abajo de la confluencia del Río San Juan con el Bravo y a 378.1 Km aguas arriba del Golfo de México.

e. Río Bravo abajo de la presa Anzaldúas, cerca de Reynosa, Tamps. y Mission, Texas. Situada a 840 m aguas abajo de la presa Internacional Anzaldúas a 7 Km en línea recta al noroeste de Reynosa, Tamps., a 273 Km río arriba del Golfo de México.

f. Río Bravo cerca de San Benito, Texas, y Ramirez Tamps., ubicada a 286.4 Km abajo de la presa Falcón, 66.2 Km río arriba de Matamoros, Tamps., y Brownsville, Texas., y a 155.8 Km aguas arriba del Golfo de México.

g. Río Bravo, cerca de Brownsville, Texas y Matamoros, Tamps., se encuentra a 11.2 Km río abajo de Matamoros Tamps., y Brownsville Texas, a 78.3 Km río arriba del Golfo de México.

h. Río Bravo, cerca de Ciudad Díaz Ordaz, Tamps., y los Ebanos Texas. Localizada a 54.7 Km aguas arriba de la presa Anzaldúas y a 328.8 Km del Golfo de México.

i. Río Bravo en Reynosa de Díaz, Tamps., y en Peñitas Texas. Localizada en la planta de bombeo Edimburg 26.2 Km arriba de la presa Anzaldúas y a 300.4 Km del Golfo de México.

j. Dren El Morillo cerca de la Presa Anzaldúas. Localizada en la planta de bombeo a 0.6 Km de la confluencia con el Río Bravo o en la estación hidrométrica en el canal de desvío a 0.6 Km de la planta de bombeo. La confluencia del dren El Morillo con el Río Bravo se encuentra a 14.2 Km aguas arriba de la presa derivadora Anzaldúas y a 288.3 Km del Golfo de México. Este dren acarrea aguas de retorno del distrito de riego del bajo Río San Juan al Río Bravo.

k. Río Bravo en Río Rico, Tamps., y Mercedes, Texas. Localizado a 84.6 Km aguas abajo de la presa Anzaldúas y a 189.5 Km del Golfo de México.

### 3.1.2. Estaciones hidrométricas de la T.W.C.

a. Estación No.2302.0025. Localizada en la estación de bombeo el Jardín.

b. Estación No.2302.0100. En el puente internacional sobre U.S. 77 en Brownsville.

c. Estación No. 2302.0150. Abajo del dren el Angelo al sur de las milpas.

- d. Estación No. 2302.0200. En el puente internacional sobre U.S. 281 en Hidalgo.
- e. Estación No. 2302.0210. A 0.8 millas abajo de la presa Anzaldúas al sur de Mission.
- f. Estación No. 2302.0215. Cerca a Peñitas en la toma del canal Edinburg.
- g. Estación No. 2302.0220. En SH. 886 Cerca a los Ebanos, Texas.
- h. Estación No. 2302.0230. En Fort Ringgold, una milla aguas abajo de Río Grande City.
- i. Estación No. 2302.250. Abajo del Río Alamo, cerca a Fronton.(14)

### 3.1.3. Estaciones hidrométricas SICA (SARH)

- a. Estación No. 00TM24BA0070. Río Bravo, Puente Internacional Camargo, carretera Reynosa - Nuevo Laredo, a 5 Km de la carretera después de Cd Camargo.
- b. Estación No. 00TM24CA025. Río Bravo, Puente Internacional que une a Cd Miguel Alemán, Tamps., y Roma, tex.
- c. Estación No. 00TM24EA027. Río Bravo, Puente Internacional de Nuevo Laredo, calle Guerrero, Km 223 carretera Reynosa.
- d. Estación No. 00TM24EA027-0002. Río Bravo, Estación CILA a 1.6 Km aguas abajo del Puente Internacional No. 1.

e. Estación No. 00TM24EA027-0003. Río Bravo, 150 m aguas abajo del dren Coahuila.

f. Estación No. 00TM24AA02-0001. Río Bravo puente internacional viejo que une a las poblaciones de Matamoros Tamps., y Brownsville Texas.

g. Estación No. 00TM24AA02-0002. Río Bravo, 2.5 Km del nuevo puente internacional Matamoros por la calle Tamaulipas al poniente.

h. Estación No. 00TM24AB03-0001. Río Bravo puente internacional Reynosa, que une a Reynosa, Tamps., e Hidalgo, Texas.

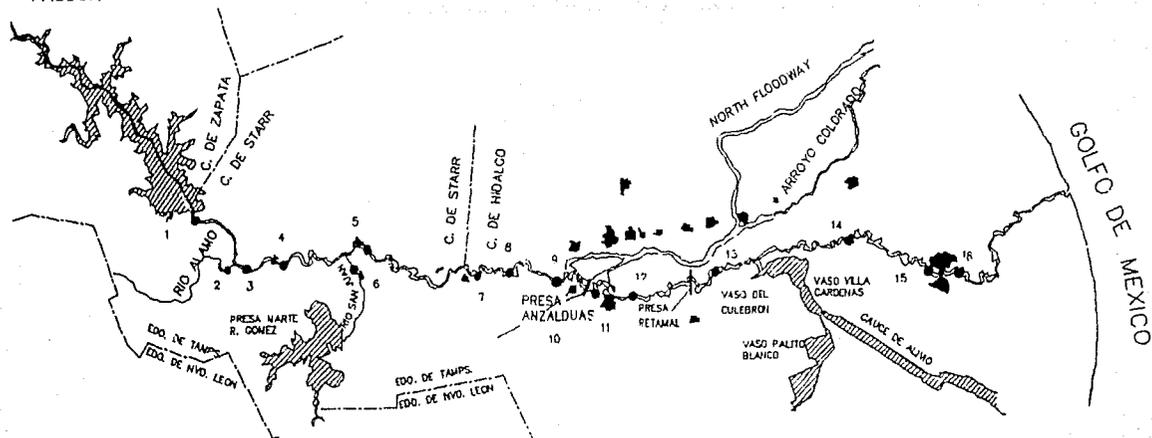
i. Estación No. 00TM24AB032-0004. Río Bravo después de la descarga de petroquímica a 100 m aguas abajo.

j. Estación No. 00TM24AB032-0005. Río Bravo aguas abajo de la descarga del dren Anheló al oriente.

k. Estación No. 00TM24AB033-0001. Río Bravo puente internacional Nuevo Progreso, 13 Km de la desviación Km 14 de la carretera 2 Reynosa-Matamoros.

l. Estación No. 00TM024AC032-0002. Río Bravo, al norte 110 m aguas arriba de la presa Anzaldúas. m. Estación No. 00TM24AC032-0003. Río Bravo, a 100 m aguas abajo del dren Mujeres. (13). (Figura 5).

PRESA  
INTERNACIONAL  
FALCON



- |  |   |
|--|---|
| 1. ABAJO DE LA PRESA FALCON (CILA)             | 9. EN REYNOSA DE DIAZ Y PENTAS (CILA)                   |
| 2. RIO ALAMO EN CD MIER (CILA)                 | 10. DREN EL MORILLO CERCA DE LA P. ANZALDUAS (CILA)     |
| 3. ABAJO DEL RIO ALAMOCERCA A FRONTON (TWO)    | 11. ABAJO DE LA PRESA ANZALDUAS (CILA, TWO)             |
| 4. PUENTE INT. EN CD H. ALONAN Y ROMA (SICA)   | 12. FUENTE INTERNACIONAL REYNOSA (SICA)                 |
| 5. EN RIO GRANDE CITY, CERCA DE CAMARGO (CILA) | 13. EN RIO RIOO Y MERCEDES (CILA)                       |
| 6. RIO SAN JUAN EN CAMARGO (CILA).             | 14. CERCA DE SAN BENITO Y RAMIREZ (CILA)                |
| 7. CERCA DE CD DIAZ BORDAZ Y LOS EDWARDS(CILA) | 15. FUENTE INTERNACIONAL (CICD) EN NATANUDOS (SICA)     |
| 8. 110 M ARRIBA DE LA PRESA ANZALDUAS (SICA)   | 16. CERCA DE NATANUDOS Y BROWNSVILLE. (CILA, TWO, SICA) |

FIGURA 5. UBICACION DE LAS ESTACIONES HIDROMETRICAS.

FUENTE: Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos (1966)

### 3.2. Parámetros de calidad de agua para el estudio.

El modelo QUAL-TX puede simular hasta 15 constituyentes de la calidad de agua. Sin embargo cuando se analizó la disponibilidad de datos, se encontró que únicamente algunos parámetros se podían simular debido a que la información existente está incompleta durante algunos períodos.

En el presente estudio se realiza la evaluación de la calidad del agua desde la presa Falcón hasta Matamoros, durante el mes de diciembre de los años de 1977 a 1986. (Anexo 6 a 13) Se seleccionó este período a partir del análisis de los datos de escurrimiento, encontrándose que en esta época se presenta la máxima disminución de caudal y por lo tanto se incrementan las posibilidades de contaminación debido a la concentración de los mismos. El período de 10 años que se tiene en cuenta para este estudio se debe a que las variaciones de la calidad del agua no son tan drásticas, permitiendo la utilización de promedios sin riesgo de errores en los resultados finales de la simulación. Además la información disponible comprende hasta el año 1986.

Para la selección de los parámetros por simular se tuvo en cuenta aquellos elementos que en los datos de campo se comprueba que están en concentraciones altas, constituyendo un problema fácilmente identificable. Los parámetros mencionados son los siguientes; cloruros ( $Cl^-$ ), sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) y sólidos disueltos totales. Igualmente los niveles de coliformes fecales y nutrientes se encuentran en concentraciones periódicamente elevadas, constituyendo problemas potenciales de la calidad del agua. (15).

## 4. MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA EN RIOS

### 4.1. Generalidades

La mayoría de los modelos de calidad del agua se basan en las dos ecuaciones fundamentales propuestas por Streeter y Phelps en 1925, para predecir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la concentración o déficit de oxígeno disuelto resultante de la descarga de materia orgánica biodegradable en ríos. Recientemente se han propuesto modelos de calidad de agua más complejos, los cuales se aplican para predecir con más exactitud las interacciones físicas, químicas y biológicas de muchos constituyentes y organismos que se encuentran en aguas naturales.

Los problemas de la calidad del agua en ríos se pueden resumir en 2 factores fundamentales, el comportamiento hidrológico de la cuenca y el desarrollo humano, utilización de la tierra y fuentes de agua. De la interacción de estos factores, surge una amplia variedad de problemas de calidad de agua. Esto implica que cada problema de calidad presente características únicas. Esta limitación no impide utilizar principios generales de los modelos para resolver un problema típico de calidad de agua.

### 4.2. Tipos de modelos de calidad en ríos.

Los modelos de calidad en ríos se distinguen de varias maneras, según clasificación de Crabtree.(5)

#### a. Investigación y Manejo

Estos modelos se han preparado en investigación, para facilitar la comprensión de las interacciones físicas, químicas y biológicas, procesos muy dinámicos y activos en ríos. De la misma manera son herramientas muy útiles para ayudar en el manejo y planeación para el control de sistemas de ríos.

#### b. Estocástico y Determinístico

Los modelos determinísticos tienen una relación fija entre la entrada y salida de datos. Estas relaciones son estrictamente definidas y además se asume que no presentan variaciones aleatorias. Los modelos estocásticos permiten variaciones aleatorias en los sistemas naturales que se pretende simular. Actualmente los modelos presentan componentes determinísticos y estocásticos.

#### c. Dinámico y Estado permanente.

Los modelos de estado permanente asumen que todas las variables son independientes del tiempo, en cambio en los dinámicos todos los parámetros de entrada son variables en tiempo. Aunque esta diferencia no está muy clara puesto que existen modelos pseudodinámicos en los cuales sólo algunas variables pueden cambiar.

#### d. Mecánico y Caja negra.

Los modelos mecánicos simulan los procesos que ocurren dentro del sistema del río. De tal manera que describen los

efectos de varios componentes cambiantes en el sistema. Los modelos de caja negra únicamente simulan las relaciones entre entradas y salidas sin representar los procesos que ocurren internamente.

#### 4.3. Modelos de simulación de calidad en ríos.

Algunos de los modelos de simulación de la calidad del agua en ríos son los siguientes:

-SIMOX I y II. Simula los niveles de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno. La versión II simula además DBO nitrogenada, demanda bental de oxígeno, fotosíntesis y respiración de las algas, bacterias y sustancias conservativas.

-RUNOFF/RECEIV. Simula la contaminación aportada por el escurrimiento superficial (RUNOFF), y el RECEIV la calidad del agua en el río.

-NEKAR Y y II. Simula la DBO y OD (I), y optimiza los niveles de tratamiento a las descargas residuales (II).

-POTAME. Este modelo simula OD, DBO,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^-$ , e hidrocarburos.

-WQRRS. Es un modelo ecológico y requiere una gran cantidad de información.

-HSPF. Está diseñado para simular algunos parámetros de contaminación urbana, escurrimientos en zonas agrícolas, cantidad y calidad de aguas subterráneas y

evapotranspiración.

-TOMCAT. Simula variaciones cíclicas, correlación de entradas, sistemas físicos y ecológicos.

-QUAL-2E. Simula OD, DBO, temperatura, algas, nitrógeno,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ , P orgánico, P disuelto, coliformes y constituyentes no conservativos.

-QUAL-TX. Es una nueva versión del QUAL-2E desarrollada por la TWC.

## 5. DESARROLLO Y APLICACION DEL MODELO QUAL-TX.

### 5.1. Generalidades

QUAL - TX es un modelo de calidad de agua del tipo estado permanente y unidimensional. Este modelo lo elaboró la sección de manejo de calidad de agua del departamento de recursos de agua de Texas. Es una versión modificada de QUAL - II. El modelo QUAL - II original lo desarrolló la " Water Resources Engineers" para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. A partir de esta versión se hicieron varias modificaciones, una de ellas es QUAL-TX. Las técnicas de solución básicas no difieren totalmente del modelo original. De tal manera que toda la información disponible del modelo QUAL - II es muy útil para la aplicación del QUAL - TX (16).

Una de las ventajas es el amplio número de constituyentes de la calidad del agua que puede simular, la utilidad para corrientes ramificadas completamente mezcladas, los mecanismos de transporte se consideran únicamente en la dirección longitudinal de la corriente. También se utiliza para descargas residuales múltiples, salidas, caudales de tributarios y un aumento de caudal de entrada y salida. Permite calcular el caudal de dilución requerido para el adecuado incremento de influente a un determinado nivel de oxígeno disuelto pre-establecido.

Desde el punto de vista hidráulico este modelo simula períodos de tiempo durante los cuales el caudal, la cuenca del río y las aportaciones son esencialmente constantes. El modelo se utiliza para estudiar el impacto de aportaciones

residuales sobre la calidad del agua de la corriente. Este modelo se considera determinístico debido a que todas las relaciones están rígidamente determinadas y las entradas y salidas no están sujetas a variaciones aleatorias.

La selección de este modelo se hizo a partir de la comparación de sus características y la naturaleza del problema por modelar en la cuenca baja del Río Bravo, encontrándose una concordancia muy significativa que permitió formular este proyecto con unos objetivos claros, ya que se contaba con lo esencial, una base de datos suministrada por el programa de monitoreo México-Estados Unidos, la disponibilidad del programa QUAL-TX y el equipo necesario para su aplicación.

## 5.2. Modelo Computacional

### 5.2.1. Representación prototipo.

QUAL-TX permite la simulación de algunas ramificaciones, y sistemas de corrientes unidimensionales. Inicialmente se divide la corriente en segmentos, teniendo en cuenta que los tramos deben tener características hidráulicas uniformes. Cada segmento se divide en elementos computacionales de igual longitud, por lo cual todos los segmentos deben tener un número entero de elementos. (Figura 6).

Los segmentos en los cuales se dividió el tramo Presa Falcón - Matamoros de la cuenca baja del Río Bravo, los elementos constituyentes de cada uno, y la longitud correspondiente de segmentos y elementos computacionales se presenta en la tabla (I). La distancia se mide a partir de la desembocadura

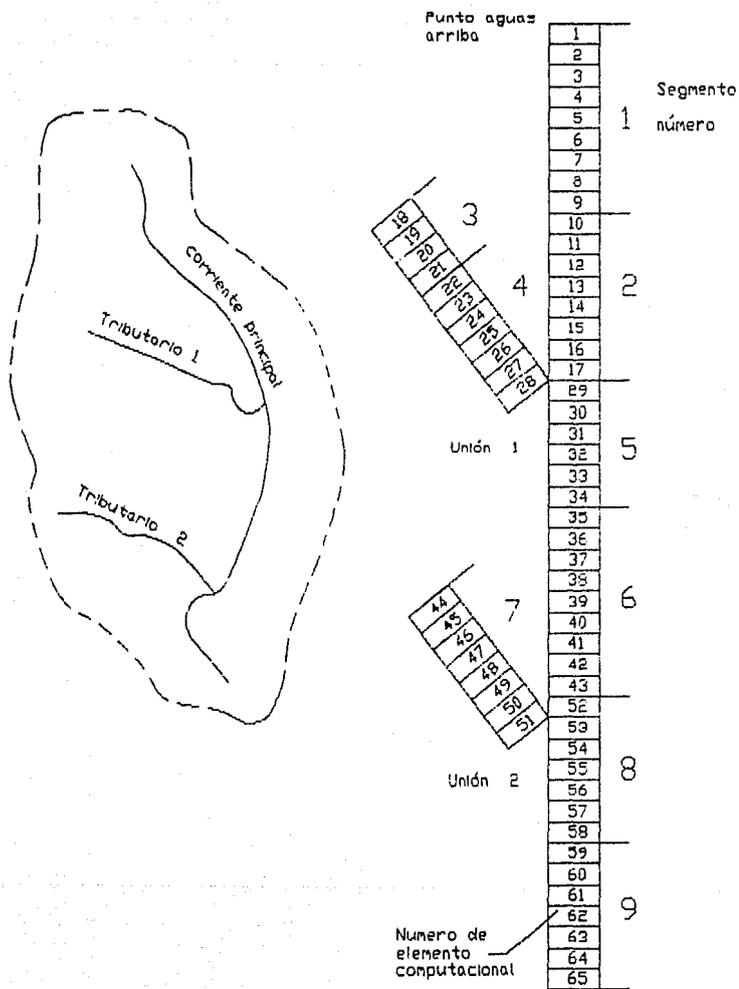


FIGURA 6. RED DE SEGMENTOS Y ELEMENTOS COMPUTACIONALES

FUENTE: Linfield C. et al. Manual QUAL2E 1985

TABLA I. IDENTIFICACION DE LOS SEGMENTOS  
Y ELEMENTOS COMPUTACIONALES

ELEMENTO No.	N O M B R E	DISTANCIA (Km)		LONGITUD (Km)		ELEMEN POR SEGMENTO
		INICIAL	FINAL	ELEMEN	SEGM.	
1	ABAJO DE FALCON-CONF RIO ALAMO	442.3	422.3	2.0	20.0	20.0
2	CONF. RIO ALAMO-CONF. RIO SN JUAN	422.3	384.3	2.0	38.0	38.0
3	CONF. RIO SN JUAN-CONF. D. PUERTECITOS	384.3	352.0	1.5	31.5	31.5
4	CONF. PUERTECITOS-PRESA ANZALDUAS	352.8	274.8	2.0	78.0	78.0
5	PRESA ANZALDUAS-PRESA EL RETAMAL	274.8	213.3	1.5	61.5	61.5
6	PRESA EL RETAMAL-HATAMOROS	213.3	77.2	2.0	136.0	136.0

FUENTE: Boletines hidrometricos CILA

en el Golfo de México hasta la Presa Internacional Falcón.

El modelo considera siete clases de elementos computacionales, sin embargo para cada caso se representa el número exacto de elementos, dependiendo de las características específicas del problema que se está analizando. Para el tramo Presa Falcón - Matamoros se incluyen los siguientes elementos:

a. Cabecera de agua.

Cuando se simulan tributarios la cabecera de agua es el elemento característico aguas arriba en los límites del sistema. En caso contrario la cabecera es el primer elemento del sistema. Los datos del elemento se requieren para resolver la ecuación del balance de masas del primer elemento computacional. Estos elementos son la base para el cálculo de incremento de caudal.

Para el tramo Presa Falcón-Matamoros, el elemento designado como cabecera de agua comienza en la estación hidrométrica CILA inmediatamente aguas abajo de la Presa Falcón, con una longitud de 2 kilómetros.

b. Elementos de entrada y salida.

Son aquellos elementos en los cuales hay aportaciones de aguas residuales o tributarios no simulados y derivaciones respectivamente.

Las aportaciones, derivaciones y tributarios no simulados se presentan en la tabla (II). En ella se incluyen, número del

TABLA II. IDENTIFICACION Y DATOS DE LAS APORTACIONES  
DERIVACIONES Y CABEDERA DE AGUA

ELEMENTO	NOMBRE	CAUDAL m <sup>3</sup> /s	TEMP. °C	CONDUC. u/moms	CLORUR mg/L	D.O. mg/L	DBO mg/L	SOL.DIS mg/L	COLIF. MP/100ml	SULFAT mg/L
1	EST. HID. ABAJO DE FALCON	28.41	17	1012	115	9.40	1.80	566	9.14	241.70
1	NUEVA CIUDAD GUERRERO	-0.020	--	--	--	--	--	--	--	--
10	CIUDAD NIER	-0.020	--	--	--	--	--	--	--	--
11	RIO ALAMO	0.518	18.1	1007	129	10.70	2.00	657.50	750	23800
15	CIUDAD MIGUEL ALEMAN	-0.034	--	--	--	--	--	--	--	--
27	DREN RANCHERIAS	0.060	18.0	6286	16.00	7.50	12.00	4104.10	20.00	220.00
30	RIO SAN JUAN	0.992	17.00	1944	115	10.50	2.00	1269.20	940.00	241.00
51	DREN PUERTECITOS	0.450	17.50	3029	220	8.50	10.00	1977.6	2000	1080.00
83	DREN MORILLO	1.148	17.80	7900	1738	6.50	45.00	5200.00	36.00	1488.00
90	CANAL ANZALDUAS	-3.760	--	--	--	--	--	--	--	--
113	CIUDAD RIO BRAVO	-0.002	--	--	--	--	--	--	--	--
195	AN. BROWNSVILLE	0.313	20.0	2360	570.00	6.00	80.00	1540.80	100000	15000

FUENTE: Boletines CIA, TWC y SARH.

elemento computacional, nombre del influente y/o efluente. En caso de las derivaciones el caudal se indica con signo negativo y en las aportaciones con signo positivo, además se incluyen las concentraciones de los parámetros a simular y aquellas que sean necesarias. El programa acepta un máximo de 170 entradas y salidas.

c. Elemento patrón.

La única entrada o salida permitida en el elemento patrón es el incremento o disminución de caudal. El aumento o disminución de caudal a lo largo del segmento se distribuye uniformemente en cada elemento computacional, permitiendo simular los efectos de entradas no puntuales al sistema o el efecto de pérdida de caudal por infiltraciones. Según lo anterior todos los elementos del presente estudio se incluyen en esta clasificación porque se tienen en cuenta las derivaciones del lado americano para riego agrícola y usos domésticos. (4)

d. Ultimo elemento en el sistema.

Tiene una longitud de 2 Km y termina 1 Km abajo de la Estación Hidrométrica CILA, cerca de Brownsville, Texas y Matamoros, Tamaulipas.

### 5.2.2. Limitaciones del modelo

El modelo QUAL-TX se desarrolló como un programa general; sin embargo tiene algunas limitaciones dimensionales, éstas son:

-Segmentos: en un máximo de 50.

- Elementos de cabecera: un máximo de 10.
- Elementos de unión: un máximo de 9.
- Elementos de entrada y salida: un máximo de 170.

### 5.2.3. Lenguaje del programa y requisitos de operación.

Escrito en ANSI FORTRAN 77 compatible con la base principal y con sistemas de computadoras personales que admiten este lenguaje. Requiere 256 K bytes de memoria. El dispositivo de entrada y salida es por medio de archivo en disco.

### 5.3. Formulación general del modelo

El objetivo fundamental al elaborar un modelo de calidad de agua es producir una herramienta que permita la simulación del comportamiento hidrológico y componentes de la calidad de agua en un sistema. Para simular el comportamiento del prototipo mediante la aplicación de un modelo matemático en un computador digital se requieren tres fases generales; representación conceptual, funcional y computacional.

La representación conceptual se hace mediante una gráfica típica que describe las propiedades geométricas que se van a modelar, también identifica las condiciones de frontera e interrelaciones entre los componentes del sistema propuesto.

La representación funcional incluye la representación de las características físicas, procesos y condiciones de frontera en una serie de ecuaciones algebraicas, lo anterior permite definir cada variable y las relaciones con otros parámetros que caracterizan el modelo o también las relaciones de

entradas y salidas.

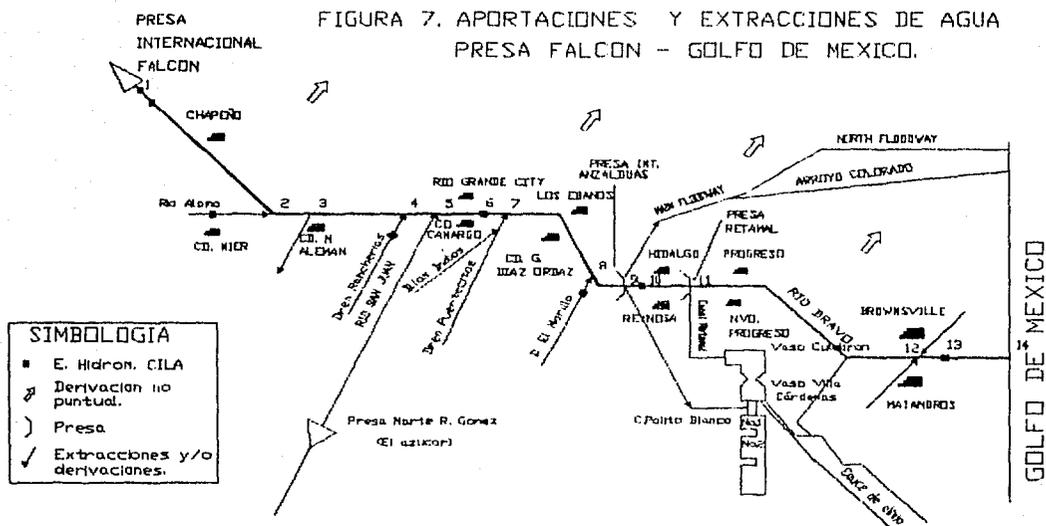
La representación computacional es el proceso por medio del cual el modelo funcional se traduce en fórmulas matemáticas y procesos computacionales requeridos por la solución del problema en espacio y tiempo. Esto implica el desarrollo de una técnica de solución específica que se adecúa a una computadora y con la codificación de ésta en lenguaje de máquina.

El desarrollo de las anteriores representaciones se hará utilizando únicamente las características del sistema que se tuvieron en cuenta para modelar la calidad del agua de la cuenca baja del Río Bravo en el tramo Presa Falcón-Matamoros. (Figura 7).

### 5.3.1. Representación conceptual

La corriente se divide en segmentos (n) y estos a su vez en elementos computacionales de longitud  $\Delta X$ . El balance hidrológico de los elementos se describe en función del caudal superficial en la parte anterior aguas arriba del elemento ( $Q_{xi}$ ), y el caudal de salida ( $Q_{xi}$ ) a través de la superficie aguas abajo del elemento. De igual manera se puede realizar el balance de masas para cualquier elemento considerándose los dos transportes, advección ( $Q.C$ ) y dispersión [ $ACDL/\Delta X$ ]( $\partial C/\partial X$ ) que ocurren a lo largo del eje de la corriente. La masa se suma o se suprime del sistema vía fuentes y salidas externas ( $Q_x C_x$ )<sub>i</sub> y se añade o suprime vía fuentes internas (SI) así como fuentes bénticas y transformaciones biológicas. Cada elemento computacional se considera completamente mezclado. (figura 8).

FIGURA 7. APORTACIONES Y EXTRACCIONES DE AGUA  
PRESA FALCON - GOLFO DE MEXICO.



Puntos de interseccion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Progresiva referida al Golfo de Mexico (Km)	442.3	422.3	412.3	388.8	384.3	378.1	352.6	288.2	274.8	273.3	213.3	84.0	77.3	0.00
Distancia entre puntos (Km)	20	10	23.5	4.5	6.0	89.5	64.5	167.1	15	60	129.3	6.7	77.3	
Distancia acumulada (Km)	20	30	53.5	58.0	64.2	89.5	154.0	167.1	182	229	358.3	365	442.3	

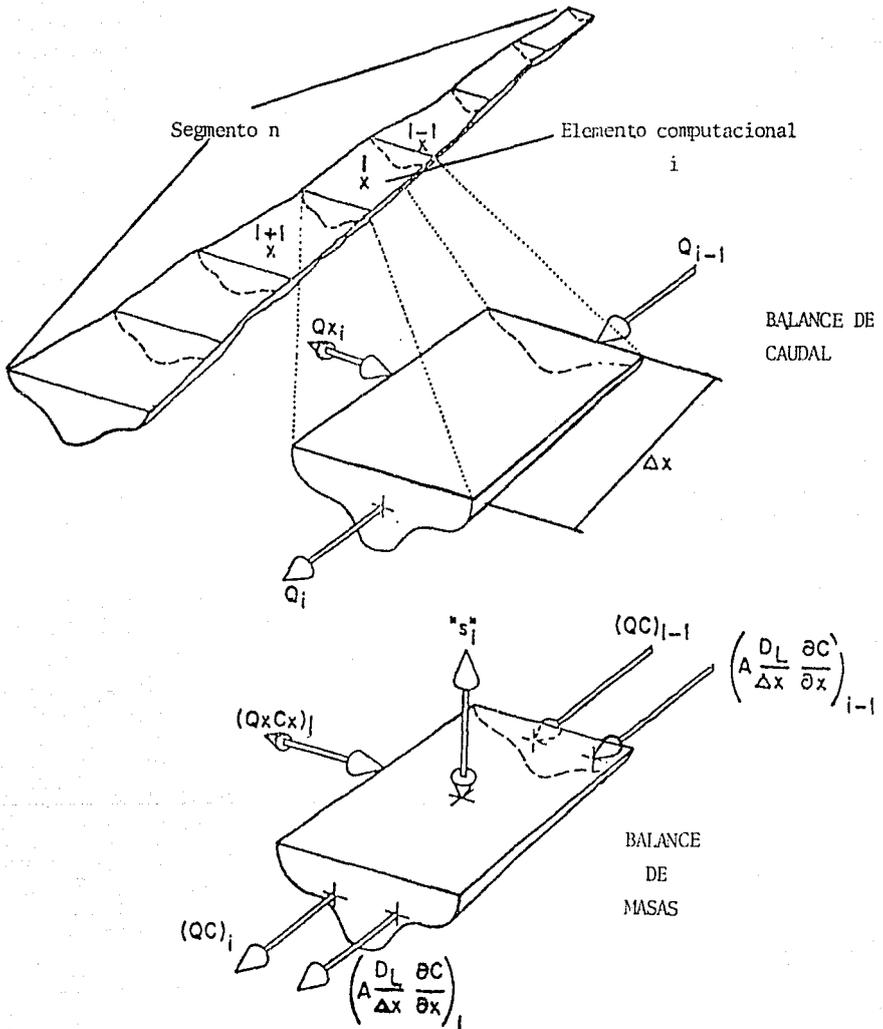


FIGURA 8. REPRESENTACION CONCEPTUAL DEL MODELO QUAL-TX.

De esta manera la corriente se conceptualiza como una cadena de reactores totalmente mezclados y unidos mediante los mecanismos de transporte y dispersión. Los grupos de estos reactores se definen como segmentos en los cuales los elementos tienen las mismas propiedades hidrogeométricas y constantes biológicas, tal como se muestra en la figura 8.

### 5.3.2. Representación funcional

La ecuación básica que resuelve el modelo es la ecuación de transporte de masa de advección y dispersión unidimensional, esta ecuación se integra en espacio-tiempo para cada constituyente de la calidad de agua. Para algunos constituyentes la ecuación se describe así:

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right) = \frac{\partial [AxDL(\partial c/\partial x)]}{\partial x} dx - \frac{\partial (\bar{A} \times u C)}{\partial x} dx + (Ax dx)(dc/dt) + s \quad (1)$$

donde :

- M = masa (MD)
- x = distancia (L)
- t = tiempo (TD)
- c = concentración (ML<sup>-3</sup>)
- Ax = Area de la sección transversal (L<sup>2</sup>)
- DL = Coeficiente de dispersión (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>)
- $\bar{u}$  = Velocidad media (LT<sup>-1</sup>)
- s = Fuente externa o decaimiento (MT<sup>-1</sup>)

Además; M = vc, puede escribirse:

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right) = \partial(vc) / (\partial t) = v(\partial c / \partial t) + c(\partial v / \partial t) \quad (2)$$

donde:

$$v = A_x dx = \text{incremento de volumen (L}^3\text{)}$$

si se supone que el flujo en la corriente es constante, se tiene;

$$(\partial Q/\partial t) = 0, \text{ y } \partial V/\partial t = 0$$

obteniéndose la ecuación (2) así:

$$(\partial M/\partial t) = v(\partial C/\partial t) \quad (3)$$

Combinando las ecuaciones (1) y (3) y reordenando;

$$(\partial C/\partial t) = \frac{\partial[A_x D_L (\partial C/\partial X)]}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x \bar{u} c)}{A_x \partial x} + dc/dt + s/v \quad (4)$$

El término  $\partial C/\partial t$  es el gradiente de concentración parcial e incluye el efecto de cambio de constituyentes, tales como dispersión, advección, fuentes o producción y dilución.

En estado constante la derivada parcial es igual a cero.

$$\text{Por lo tanto } \partial C/\partial t = 0 \quad (5)$$

Los cambios que se presentan en los constituyentes individuales o particulares independientes de advección, dispersión y entradas de residuos se definen como:

$$dc/dt = \text{cambios individuales de los constituyentes} \quad (6)$$

Estos incluyen cambios físicos, químicos, reacciones biológicas, interacciones que ocurren en la corriente. Ejemplos de estos cambios son reaeración, respiración de algas, fotosíntesis y muerte de coliformes.

### 5.3.3. Representación computacional

La ecuación (4) se resuelve variando la concentración del constituyente,  $i$  veces, para cada elemento computacional  $n$  del sistema, debido a la dificultad para obtener soluciones analíticas a estas ecuaciones que corresponden a situaciones típicas, el método más apropiado es el de las diferencias finitas, que permite encontrar los valores de una variable como una función de espacio y tiempo  $n + 1$ , cuando se conoce su distribución espacial en el tiempo  $n$ . El tiempo cero (0) corresponde a la condición inicial.

### 5.3.4 Características hidráulicas

El modelo asume que el régimen hidráulico es constante

$$\partial Q / \partial t = 0$$

por lo tanto el balance hidrológico para un elemento computacional se escribe: (fig 8)

$$\partial Q / \partial x = (Q_x)_i \quad (7)$$

donde  $(Q_x)_i$  es la suma de entradas externas y salidas para ese elemento.

Las restantes características hidráulicas de los segmentos se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\bar{u} = a Q^b \quad (8)$$

$$A_x = Q / \bar{u} \quad (9)$$

$$d = c Q^d + e \quad (10)$$

donde:

a, b, c y d son constantes hidráulicas, d es la profundidad del río y e es una profundidad constante.

En este caso se considera  $e=0$ .

Para el cálculo de los coeficientes que se utilizan en este módulo se desarrolló un programa computacional en el cual se utiliza un intervalo de valores reales de velocidad y profundidad y los datos de escurrimiento registrados por CILA. Dicho programa se basa en el artificio matemático de prueba y error de las ecuaciones (8) y (10) (Anexo 14).

En la tabla (III) se indican los coeficientes hidráulicos de advección.

#### 5.3.5. Aumento de caudal

Cuando la concentración de oxígeno disuelto es menor que el nivel requerido, según lo especifique el investigador, es deseable incrementar la concentración aumentando el caudal del río.

Según Frank D. Masch y asociados y la " Texas Water Development Board (1971) ", quienes realizaron la subrutina en el modelo QUAL-2E, no existe una relación exacta para calcular la cantidad de caudal necesario para elevar la concentración de OD requerido.

**TABLA III. COEFICIENTES HIDRAULICOS  
 DE ADVECCION**

SEGMENTO	COEF. DE VELOC.		COEF. DE PROF.	
	a	b	c	d
1	0.40	0.20	0.54	0.3
2	0.41	0.22	0.55	0.25
3	0.38	0.23	0.55	0.29
4	0.40	0.24	0.55	0.29
5	0.36	0.23	0.55	0.30
6	0.37	0.23	0.54	0.28

La siguiente relación matemática es una buena aproximación para efectuar este cálculo:

$$ODR = ODT - OD_{min} \quad (11)$$

y

$$QR = Qc [ ODR/ODT + 0.15(ODR/ODT)^2 ] \quad (12)$$

donde :

ODR = Concentración de OD necesario para reunir las condiciones deseables (mg/L).

ODT = Nivel de OD requerido, (mg/L).

ODMIN= Concentración de OD crítica en la curva SAG (mg/L).

QR = Aumento de caudal requerido; m<sup>3</sup>/s o pies<sup>3</sup>/seg.

Qc = Caudal en el punto crítico en la curva SAG m<sup>3</sup>/s ó pie<sup>3</sup>/s.

El modelo realiza este cálculo comparando el valor de OD simulado con el especificado en cada segmento, una vez que se han alcanzado las condiciones constantes, si el OD calculado es menor que el requerido, el programa encuentra las probables fuentes aguas arriba que han sido especificadas con propósito de dilución y agrega agua uniformemente de todas las fuentes. El cálculo de OD se repite hasta alcanzar el nivel prescrito.

Los valores de OD aprobados por la legislación mexicana referentes al agua y su contaminación para usos agrícolas el OD es de 3.2 mg/L, y para otros usos 4.0 mg/L. De tal manera que en esta simulación se asume el mismo valor. (17)

## 5.4. Reacciones e interrelaciones de los constituyentes.

### 5.4.1. Consideraciones generales.

Una de las consideraciones más importantes para determinar la capacidad de asimilación de descargas en una corriente es la condición de mantener una concentración adecuada de O. D.

El agua contaminada expuesta al aire absorbe oxígeno el cual reemplaza a aquél que se utiliza en la estabilización de residuos orgánicos. La velocidad de reoxigenación es directamente proporcional al déficit de oxígeno disuelto, que es la diferencia entre la concentración de saturación a una temperatura dada y la actual.

Aunque la reaeración atmosférica es la fuente primaria, el oxígeno también puede añadirse a un río mediante tributarios no contaminados o precipitación pluvial. Las algas y macrófitas acuáticas adheridos al substrato proveen suficiente oxígeno mediante fotosíntesis

Si bien el déficit de oxígeno regula la velocidad de absorción, la capacidad de reaeración de una corriente se relaciona directamente con las características físicas e hidrológicas de la misma, turbulencia, profundidad, área superficial, temperatura y otros factores. (6).

Los coliformes y los constituyentes no conservativos arbitrarios se modelan mediante constantes de decaimiento. Los conservativos por supuesto, ni decaen ni interactúan con otros constituyentes.

Las relaciones matemáticas que describen las reacciones e interacciones de los parámetros usados en esta simulación se presentan a continuación:

#### 5.4.2. DBO Carbonácea

El modelo asume reacciones de primer orden para describir la variación de la DBO última carbonácea en la corriente. La función de DBO como se expresa en el modelo también considera la remoción adicional producida por sedimentación y floculación la cual no necesita oxígeno.

La expresión matemática es:

$$dL/dt = -k_1 L - k_3 L \quad (13)$$

L = Valor de la concentración de la DBO última carbonácea, mg/L.

$k_1$  = Coeficiente de velocidad de desoxigenación, depende de la temperatura, día<sup>-1</sup>.

$k_3$  = La velocidad de disminución de DBO carbonácea, debido a la sedimentación, depende de la temperatura, día<sup>-1</sup>.

El modelo simula DBO última, sin embargo para los valores de entrada y salida se puede usar DBOs, porque se hacen las conversiones necesarias de DBOs a DBO última. La ecuación de conversión es:

$$DBOs = DBO_u (1 - \text{EXP} (C_5 * k \text{ DBO})) \quad (14)$$

donde:

DBOs = DBO 5 días, mg/L

DBOu = DBO última, mg/L

kDBo = Coeficiente de velocidad de conversión de DBO, día<sup>-1</sup>.

En la tabla IV se presentan los coeficientes de velocidad de desoxigenación definitivos para cada segmento.

#### 5.4.3. Oxígeno disuelto.

El balance de oxígeno en la corriente depende de la capacidad de autopurificación, la cual es función de los procesos de advección y difusión que se presentan dentro del sistema y las fuentes internas y disminución de oxígeno. La ecuación diferencial que describe la velocidad de cambio de oxígeno es la siguiente:

$$dO/dt = K_2 (O^* - O) + (\alpha_3 \mu - \alpha_4 \rho)A - k_1 L - k_4/d - \alpha_5 \beta_1 N_1 - \alpha_6 \beta_2 N_2 \quad (15)$$

donde:

O = Concentración de oxígeno disuelto, mg/L.

O\* = Concentración de saturación de oxígeno disuelto a la presión y temperatura del lugar, mg/L.

$\alpha_3$  = Velocidad de producción de oxígeno por unidad de fotosíntesis algal, mg-O/mg-A.

$\alpha_4$  = Velocidad de entrada de oxígeno por unidad de respiración algal, mg-O/mg-A

$\alpha_5$  = Velocidad de entrada de oxígeno por unidad de oxidación de nitrógeno amoniacal, mg-O/mg-N.

TABLA IV. COEFICIENTES DE REACCION

SEGMENTO	K1	K2	K5	K6
1	0.010	2.39-2.40	0.03	0.05
2	0.010	3.19-3.20	0.02	0.02
3	0.010	2.55-2.56	0.01	0.01
4	0.005	2.76-2.91	0.01	0.05
5	0.01	2.40-2.47	0.01	0.01
6	0.050	2.82-3.18	0.01	0.01

k1 = COEFICIENTE DE DESOXIGENACION CARBONACEA

k2 = CONSTANTE DE REAERACION

k5 = CONSTANTE DE DECAIMIENTO DE COLIFORMES

k6 = VELOCIDAD DE DECAIMIENTO DE SULFATOS

- $\alpha_5$  = Velocidad de entrada de oxígeno por unidad de oxidación de nitrógeno de nitrito, mg-O/mg-N.  
 $\mu$  = Velocidad de crecimiento algal, dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.  
 $\rho$  = Velocidad de respiración algal, dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.  
A = Concentración de biomasa algal, mg-A/l.  
L = Concentración de DBO última carbonácea, mg/L.  
d = Profundidad media de la corriente, m.  
 $k_1$  = Velocidad de decaimiento de DBO carbonácea, dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.  
 $k_2$  = Velocidad de reacción de acuerdo a la analogía de difusión de Fickian, dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.  
 $k_4$  = Velocidad de demanda de oxígeno por sedimento, dependiente de la temperatura, g/m<sup>2</sup>-día.  
 $\beta_1$  = Coeficiente de velocidad de oxidación de amoníaco, dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.  
 $\beta_2$  = Coeficiente de velocidad de oxidación de nitritos, dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.  
 $N_1$  = Concentración de nitrógeno amoniacal mg-N/l  
 $N_2$  = Concentración de nitrógeno de nitrito, mg-N/l.

#### 5.4.3.1. Concentración de saturación de oxígeno disuelto.

La solubilidad del oxígeno disuelto en agua es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos e inversamente proporcional a la temperatura y presión atmosférica (7). La ecuación predictiva que utiliza el modelo para calcular la concentración de saturación de oxígeno disuelto es la siguiente:

$$\begin{aligned} \ln O^* = & -139.34410 + (1.575701 \times 10^3/T) - (6.642308 \times 10^7/T^2) \\ & + (1.243800 \times 10^{10}/T^3) - (8.621949 \times 10^{14}/T^4) \quad (17) \end{aligned}$$

donde:

$O^*$  = Concentración de saturación de oxígeno a 1.0 atm, mg/L.  
 $T$  = Temperatura ( $^{\circ}K$ ) = ( $^{\circ}C + 273.150$ ) y  $^{\circ}C$  en el intervalo de 0.0 a 40.0  $^{\circ}C$ .

Para diferentes condiciones de presión, la concentración de saturación se corrige por la ecuación (18).

$$O_p = O^* P \left[ \frac{(1 - P_{vv}/P) (1 - \phi P)}{(1 - P_{vv}) (1 - \phi)} \right] \quad (18)$$

donde:

$O_p$  = Concentración de saturación de oxígeno a una presión determinada, mg/L.

$O^*$  = Concentración de saturación de oxígeno a 1.0 atm, mg/L.

$P$  = Presión (atm) y en el intervalo de 0.0 a 2.0 atm.

$P_{vv}$  = Presión parcial del vapor de agua (atm), la cual se calcula de la siguiente manera:

$$\ln P_{vv} = [11.8571 - (3840.70/T) - 216961/T^2] \quad (19)$$

$$\phi = 0.000975 - (1.426 \times 10^{-5} t) + (6.436 \times 10^{-8} t^2) \quad (20)$$

donde:

t= temperatura, °C.

#### 5.4.3.2. Estimación del coeficiente de reaeración atmosférica.

El coeficiente de reaeración ( $k_2$ ) usualmente se expresa como función de la profundidad y velocidad de la corriente. El programa provee 13 opciones para la estimación o lectura de los valores  $k_2$ . En la siguiente tabla se muestran las distintas opciones y el método de cálculo.

TABLA V Métodos de cálculo del coeficiente de reaeración atmosférica.

OPCION	METODO
1	$K_2 = a$
2	Churchill (1962).
3	O'Connor and Dobbins (1958).
4	Owens and Gibbs (1964).
5	Thackston and Krenkel (1966)
6	Langien and Durum (1967).
7	Ecuación $K_2 = a Q^b$ .
8	Tsivoglou and Wallace (1972)
9	Ecuación $K_2 = a (V^b/D^c)$ .
10	Ecuación $K_2 = [a + b W^c]/D$
11	Ecuación de Texas (1982).
12	Banks (1975).
13	Johanson (1977).

Fuente: Texas Water Commission. QUAL-TX user's manual version 3.2. Austin, Texas. (1986).

Los resultados óptimos se encontraron aplicando la ecuación de Langien y Durum (1967).

#### 5.4.4. Coliformes.

Estos organismos son indicadores de contaminación patógena en aguas superficiales. El cálculo estimativo de la concentración se realiza mediante funciones de decaimiento de primer orden, para el número más probable (NMP) de coliformes, la velocidad de cambio con respecto al tiempo es igual a:

$$dE/dt = -k_5 E \quad (21)$$

donde:

E = NMP de coliformes.

$k_5$  = Velocidad de decaimiento de coliformes, dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.

#### 5.4.5. Constituyente no conservativo arbitrario.

El modelo permite calcular un constituyente no conservativo arbitrario (NCA). Además de los mecanismos de decaimiento de primer orden considera en el balance de masa las fuentes y salidas. La ecuación diferencial que describe las interacciones del constituyente no conservativo arbitrario es:

$$dR/dt = -k_6 R - \sigma_6 R + \sigma_7 / d \quad (22)$$

donde:

R = Concentración del constituyente no conservativo,  
mg-NCA/l.

$k\sigma$  = Velocidad de decaimiento para el constituyente,  
dependiente de la temperatura, día<sup>-1</sup>.

$\sigma_6$  = Coeficiente de velocidad de sedimentación, dependiente  
de la temperatura, día<sup>-1</sup>.

$\sigma_7$  = Fuentes bénticas, dependiente de la temperatura,  
mg-NCA/m<sup>2</sup>-día.

d = Profundidad media de la corriente, m.

El constituyente no conservativo que se utilizó en esta simulación es el sulfato, en la tabla IV se presenta la constante de decaimiento ( $k\sigma$ ); es necesario indicar que las constantes de fuentes bénticas y la velocidad de sedimentación no se tienen en cuenta debido a la falta de información requerida para encontrar estos coeficientes.

#### 5.4.6. Constituyentes conservativos.

Dentro de este parámetro se incluyó la simulación de sólidos disueltos y cloruros. La información disponible sobre sólidos disueltos es incompleta y por esta razón los datos faltantes se calcularon a partir de los datos de conductividad eléctrica. Aunque no existe una relación exacta entre la conductividad y los sólidos disueltos en el agua, un estudio de datos del agua del Río Bravo indica que esa relación puede expresarse con una aproximación de un 10% utilizando las siguientes ecuaciones. (3)

$$S_{61} \text{ Dis. (Kg/m}^3\text{)} = 0.0006529 (C E \times 10^6 \text{ a } 25^\circ\text{C}) \quad (23)$$

con conductividad < 7520  $\mu\text{homs}$  y

$$\text{Sól. Dis. (Kg/m}^3\text{)} = 0.0007737 (\text{C E} \times 10^6 \text{ a } 25^\circ\text{C}) - 0.9033(24)$$

con conductividad de 7520 a 22000  $\mu\text{homs}$ .

#### 5.4.7. Coeficientes que dependen de la temperatura.

Las correcciones por temperatura para los distintos coeficientes se realiza utilizando la fórmula de Streeter - Phelps:

$$X_T = X_{20} \theta^{(T - 20^\circ)}$$

donde:

$X_T$  = El valor del coeficiente a la temperatura local (T).

$X_{20}$  = El valor del coeficiente a la temperatura patrón (20  $^\circ\text{C}$ ).

$\theta$  = Constante empírica para cada coeficiente de reacción.

Los valores del factor de corrección  $\theta$  utilizados en esta simulación son los recomendados por el programa QUAL-TX los cuales se asumen automáticamente.

#### 5.4.8. Velocidades de reacción y constantes físicas.

Las reacciones químicas y biológicas que simula el modelo QUAL-TX son una serie de ecuaciones complejas que incluyen los parámetros del sistema que se está modelando, algunas de

estas cambian en el espacio y otras dependen de la temperatura. En la tabla VI se indican los parámetros del sistema y da el intervalo común de los valores, unidades y tipos de variación. (7).

En los anexos 15 y 16 se presentan, una parte del archivo de salida de los resultados de la simulación y un ejemplo de cálculo del oxígeno disuelto para un elemento computacional, respectivamente.

TABLA VI INTERVALOS TÍPICOS PARA LOS COEFICIENTES  
DE REACCIÓN

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	INTERVALO DE VALORES	VARIABLE POR SEGMENTO	DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA
K1	CONSTANTE DE DESOXIGENACIÓN CARBONACEA	1/DÍA	0.02-3.4	SI	SI
K2	CONSTANTE DE REAERACIÓN	1/DÍA	0.0 - 100	SI	SI
K5	CONSTANTE DE DECAIMIENTO DE COLIFORMES	1/DÍA	0.05 - 4.0	SI	SI
K6	VELOCIDAD DE DECAIMIENTO DEL MATERIAL NO CONSERVATIVO ARBITRARIO	1/DÍA	VARIABLE	SI	SI

FUENTE: Linfield C., et al. Manual QUAL2E 1985.

## 6. CALIBRACION Y VERIFICACION

Cuando se trabaja con un modelo para análisis de la calidad del agua de un río, uno de los aspectos más importantes es la calibración, la cual involucra la estimación y ajuste de varios parámetros del modelo y su respectivo análisis de sensibilidad. Los valores que se utilizan para la simulación se comparan con los datos de campo.

Para calibrar el modelo se utilizaron los datos de informes periódicos suministrados por la SARH, CILA, y la TWC, tomando en cuenta las siguientes estaciones de monitoreo: abajo de la Presa Falcón, Puente Internacional en Ciudad Miguel Alemán y Roma (Texas), cerca de Ciudad Díaz Ordáz y los Ebanos (Texas), Puente Internacional Reynosa (Tamaulipas) e Hidalgo (Texas), en Reynosa de Díaz (Tamaulipas), y en Peñitas (Texas).

Teniendo en cuenta los resultados de esta calibración no fue necesario realizar modificaciones a la estructura del modelo, sin embargo se realizaron algunos ajustes de los coeficientes hidráulicos, rearación, DBO, coliformes y sulfatos.

Para la verificación o validación se tomó como punto de referencia los datos de escurrrimiento y calidad de agua registrados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) México-Estados Unidos de América en las estaciones hidrométricas, abajo de la Presa Falcón en Nueva Ciudad Guerrero, (Tamaulipas) y Villa Falcón, Tex., cerca de Camargo, Tamps., y Río grande City, Texas., Río Rico, Tamaulipas y Mercedes, Texas, Abajo de la Presa Anzaldúas

cerca de Reynosa, Tamps. y Misión, Texas., cerca de Matamoros, Tamps. y Brownsville, Texas.

La selección de estos puntos de control se hizo teniendo en cuenta la cantidad y calidad de datos disponibles. Los datos de control y los resultados de la simulación se presentan en la tabla (VII) y en las figuras 9 a 14 respectivamente.

Una prueba adicional que se realizó para verificar si los parámetros estimados y ajustados son los adecuados y además evaluar la receptividad del sistema a diferentes opciones, es el análisis de sensibilidad, el cual se llevó a cabo tomando en cuenta otras condiciones de frontera y comparando estos cambios tomando como base las variaciones en la concentración de OD. Para tal efecto se realizaron las siguientes modificaciones:

- 1-. Variación del caudal de descarga en la Presa Falcón. Se corrió el programa con un caudal de descarga máximo de  $56.4 \text{ m}^3/\text{s}$ . y otra con un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- 2-. Variaciones de caudal, concentraciones de sulfatos y DBO en la descarga del dren El Morillo.  
Se corrió el programa con cada una de las siguientes modificaciones:
  - Caudal máximo de  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$  y mínimo de  $0.57 \text{ m}^3/\text{s}$ .
  - Concentración de sulfatos máxima de  $1700 \text{ mg/L}$  y mínima de  $744 \text{ mg/L}$ .
  - Con remoción de DBOs del 80% y un incremento del 33% tomando como base los datos de monitoreo.

Los resultados del análisis de sensibilidad se indican en las figuras 15 a 18 y en el capítulo 7.

TABLA VII. DATOS DE CONTROL PARA VALIDACION DEL  
MODELO

ESTACIONES DE CONTROL	PARAMETROS							
	CAUDAL m <sup>3</sup> /s	TEMP. oC	D. D. mg/L	D. B. D. mg/L	SOL.DIS. mg/L	COLIF. MP/100ml	SULFAT. mg/L	CLORUR mg/L
ABAJO DE FALCON	■ 56.08	20	12.2	--	711	20	299	140
	● 22.90	17	9.4	--	586	9.14	241.7	122.1
	▲ 8.68	15	7.8	--	500	0	210	100
RIO GRANDE CITA	94.6	20.5	10	4	975	--	320	260
	40.23	16	9.5	3.6	798.4	--	251.4	179
	0	11	8.3	2.7	628	--	220	120
ABAJO DE LA PRESA ANZALDUAS	81.0	23.5	12.3	4.9	1550	--	440	460
	28.2	17.9	10.0	3.5	1016.1	--	334	250
	5.7	11	8.5	1.9	688	--	240	140
RIO RICO Y MERCEDES	28.32	22.6	11.4	4.0	1235.29	26000	370	329
	18.13	18.8	9.0	3.8	1030.93	3960	296	221
	5.66	12.2	6.3	3.5	762.59	20	210	112
CERCA DE MATAMOROS	34.0	22	12.5	4.5	1080	2400	380	290
	12.82	19	10.1	3.0	926.7	748	268.2	228
	11.3	5.1	9.1	1.3	760	44	210	140

■ MAXIMO

● MEDIO

▲ MINIMO

FUENTE: Boletines CILA, TWC y SARH.

RIO BRAVO  
PRESA FALCON - MATAMOROS

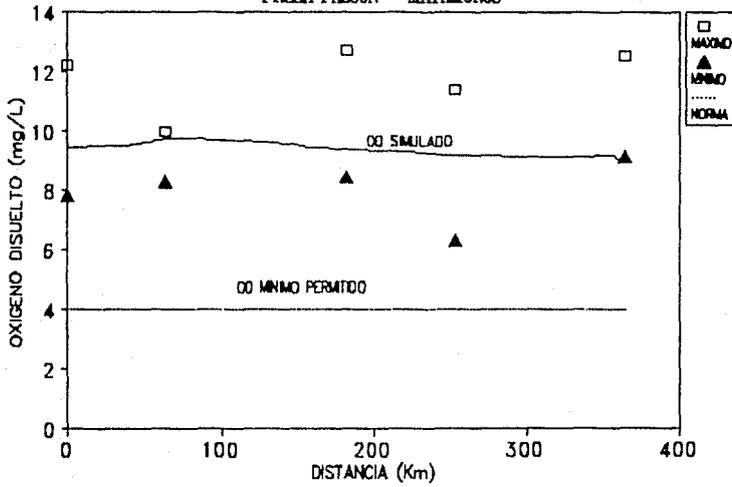


FIGURA 9. SIMULACION DE DO Y PROMEDIOS DE MAXIMOS Y MINIMOS DURANTE 1977 - 1986.

RIO BRAVO  
PRESA FALCON - MATAMOROS

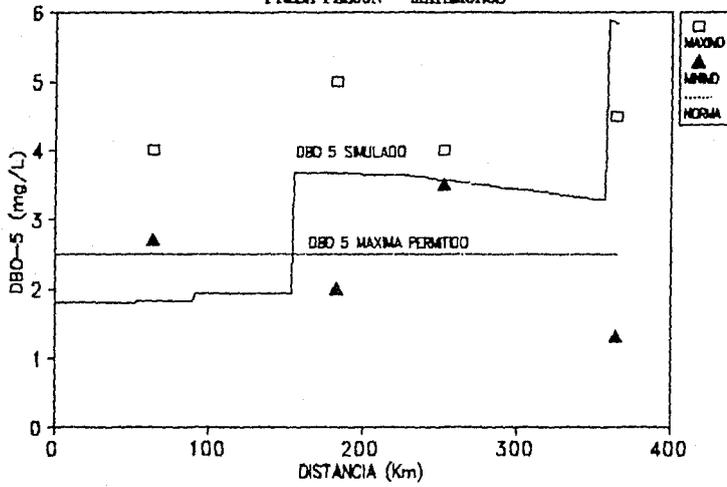


FIGURA 10. SIMULACION DE DBOS Y PROMEDIOS DE MAXIMOS Y MINIMOS DURANTE 1977 - 1986.

RIO BRAVO  
PRESA FALCON - MATAMOROS

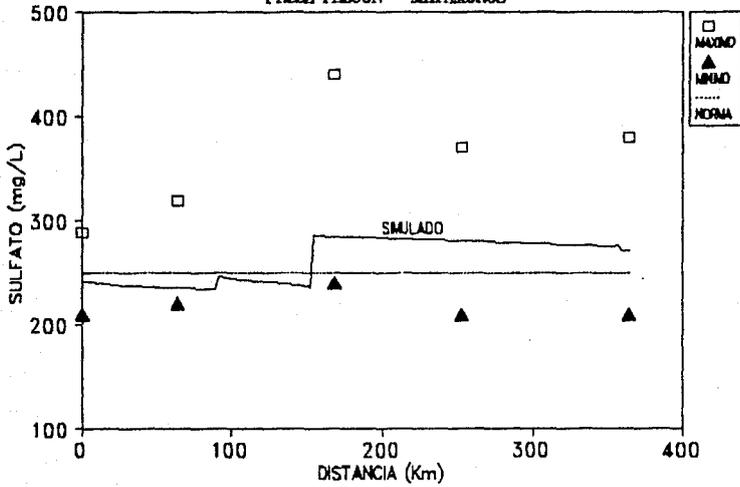


FIGURA 11. SIMULACION DE SULFATOS Y PROMEDIOS DE MAXIMOS Y MINIMOS DURANTE 1977 - 1986.

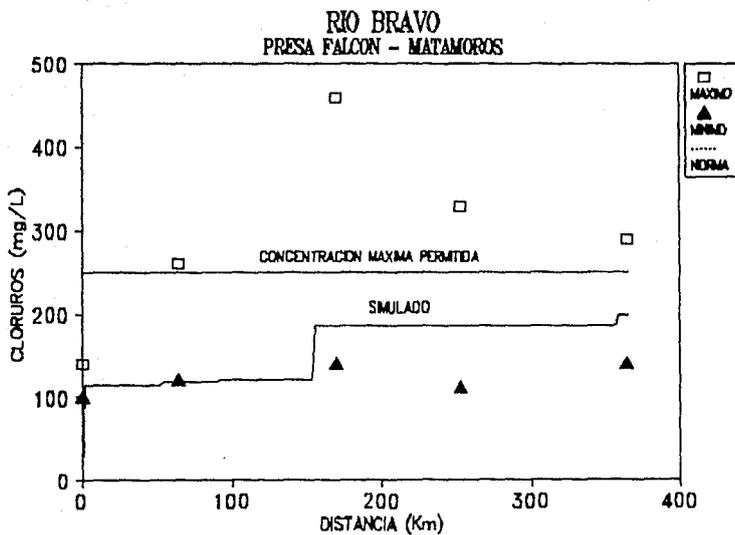


FIGURA 12. SIMULACION DE CLORUROS Y PROMEDIOS DE MAXIMOS Y MINIMOS DURANTE 1977 - 1986.

RIO BRAVO  
PRESA FALCON - MATAMOROS

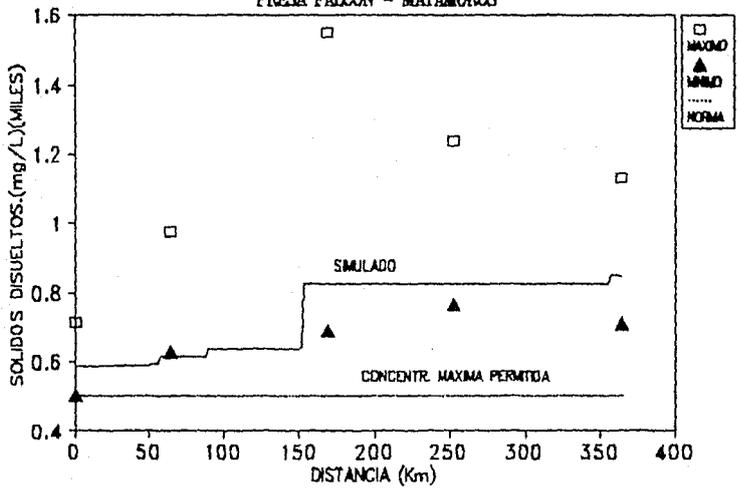


FIGURA 13. SIMULACION DE SOLIDOS DISUELTOS Y PROMEDIOS DE MAXIMOS Y MINIMOS DURANTE 1977 - 19

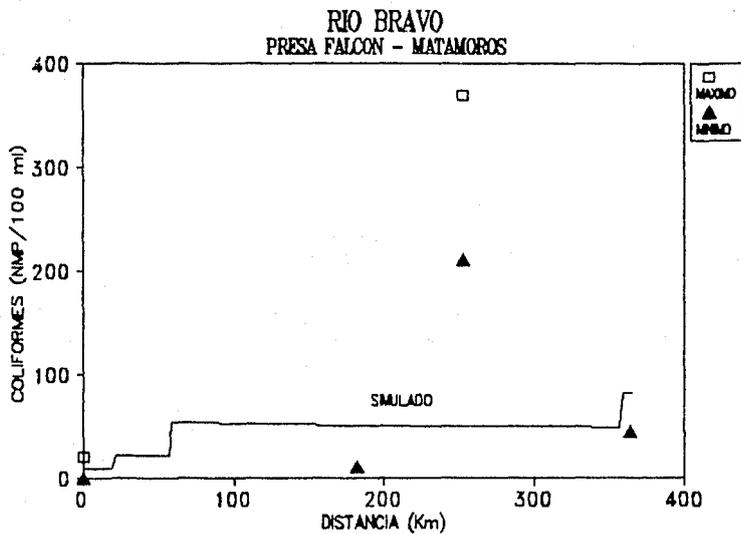


FIGURA 14. SIMULACION DE COLIFORMES Y PROMEDIOS DE MAXIMOS Y MINIMOS DURANTE 1977 - 1986.

### PERFILES DE SENSIBILIDAD DE O.D

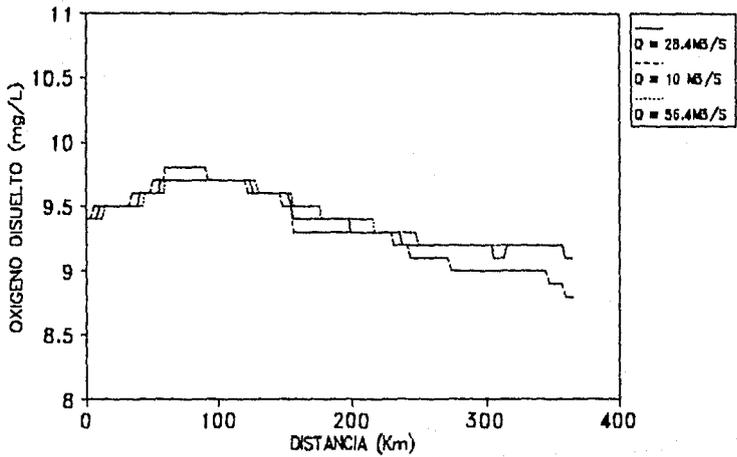


FIGURA 15. CON VARIACION DEL CAUDAL DE DESCARGA DE LA PRESA FALCON.

### PERFILES DE SENSIBILIDAD DE O.D

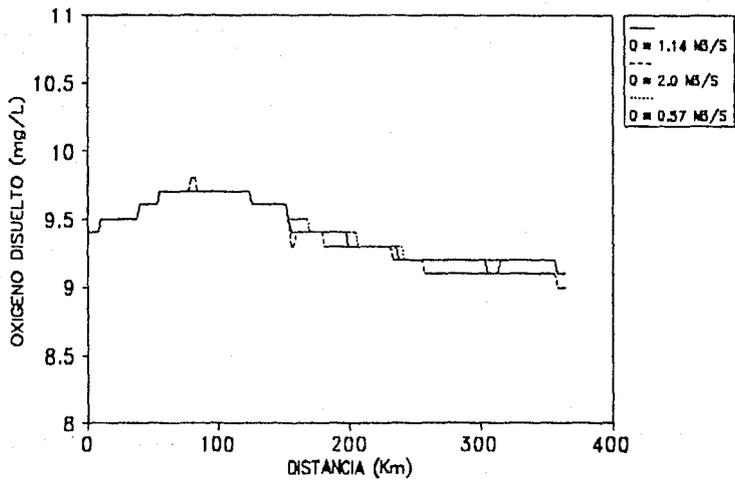


FIGURA 16. CON VARIACION DEL CAUDAL DE DESCARGA DEL OREN EL MORILLO.

### PERFILES DE SENSIBILIDAD DE O.D

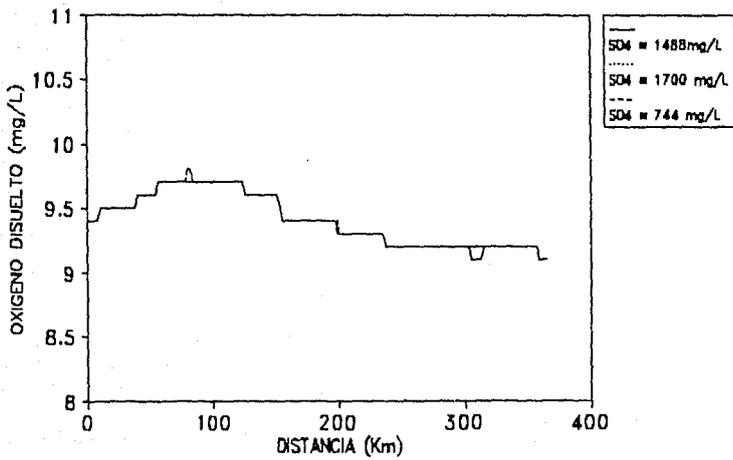


FIGURA 17. CON VARIACION DE LA CONCENTRACION DE SULFATOS EN LA DESCARGA DEL DREN EL MORILLO.

### PERFILES DE SENSIBILIDAD DE OD

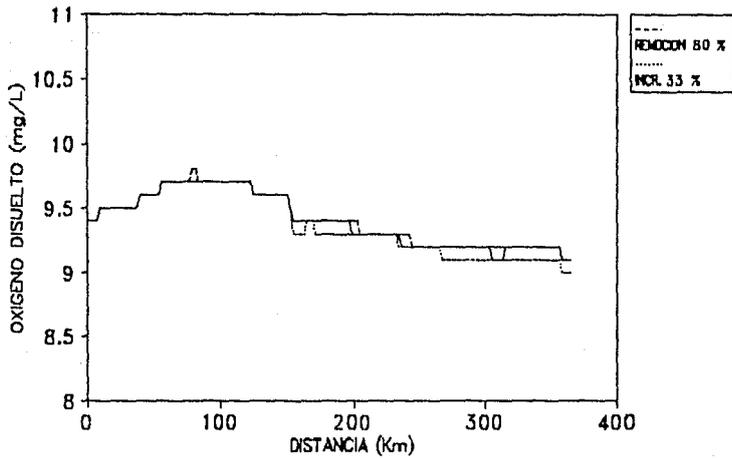


FIGURA 18. CON VARIACION DE LA CONCENTRACION DE OBO 5 EN LA DESCARGA DEL DREN EL MORILLO.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSION.

La contaminación del agua dulce es uno de los problemas ambientales más serios, por lo cual las leyes existentes para evitar los riesgos de contaminación son cada vez más drásticas en la mayoría de países.

Por otro lado la tecnología permite llevar a cabo estudios de la calidad del agua que se utilizan para manejo y planeación de recursos hídricos.

La aplicación de modelos matemáticos y desarrollo de técnicas cada vez más sofisticadas como el uso de satélites y algunas metodologías espectroscópicas para análisis de recursos naturales, incluyendo el agua, es cada día más creciente en países desarrollados. En países en vía de desarrollo se están realizando grandes esfuerzos para controlar y manejar adecuadamente los recursos existentes.

Uno de estos intentos lo constituye la aplicación del modelo QUAL-TX para el análisis de la calidad del agua en el Río Bravo (Presa Falcón-Matamoros) que sirve como complemento al estudio de la cuenca media realizado en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería.

Los datos utilizados para la aplicación de este modelo provenientes de las instituciones ya mencionadas en el trabajo, se complementaron entre sí para obtener la suficiente información que requiere el modelo. Esta limitación impidió la elaboración de análisis estadísticos más completos ya que únicamente se elaboraron promedios de máximos, medios y mínimos de los diversos parámetros.

La simulación se refiere exclusivamente al mes de diciembre de los años comprendidos entre 1977 y 1986, mes en el cual se registran los caudales mínimos de escurrimiento según las gráficas obtenidas al realizar análisis previos a la aplicación del modelo. (Anexo 1 a 5).

Se seleccionó el periodo de 10 años teniendo en cuenta la representatividad de este lapso, la ausencia de obras hidráulicas adicionales que influyen de alguna manera el régimen del río, así como también la disponibilidad de información del mismo.

Se evalúan varios parámetros, pero los más importantes son: oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, y sulfatos. Los dos primeros indican la capacidad de autodepuración del río y el grado de contaminación orgánica respectivamente. En términos generales los resultados de la simulación permiten visualizar que no existe un alto grado de contaminación a lo largo de los segmentos en los cuales se dividió el tramo en estudio.

Analizando las figuras (9 y 10) se observa que las variaciones de OD y DBO concuerdan con los datos reales (6.3 a 12.2 mg/L y 1.3 a 4.9 mg/L respectivamente), medidos en las estaciones consideradas de control cuyas variaciones se deben principalmente a las descargas y a los efectos que ocasionan las obras hidráulicas que se encuentran en el sistema.

Las variaciones de DBO más notables son las siguientes: aumento inicial en el sitio de descarga del dren Puertecitos

y en el sitio de descarga del dren El Morillo (3.8 mg/L), esta concentración se mantiene casi constante durante aproximadamente 90 Km y a partir de este punto disminuye considerablemente (3.2 mg/L) notándose un proceso de autopurificación muy importante en una longitud de aproximadamente 110 Km, hasta un pronunciado aumento en el punto de las descargas de aguas negras domésticas de las ciudades de Brownsville y Matamoros.

El OD el cual tiene una estrecha relación con el parámetro anterior muestra un aumento inicial, cambiando de dirección en el dren Puertecitos para disminuir notoriamente en el dren El Morillo, por efectos de una suficiente aeración no alcanza niveles muy bajos, sino hasta la descarga en Brownsville (Matamoros). A pesar de su tendencia a disminuir no llega al nivel mínimo establecido por las normas (4.0 mg/L). La influencia de los ríos Alamo y San Juan no es considerable. (17)

Otro de los parámetros considerado de gran importancia es la presencia de sulfatos, los cuales son susceptibles de reducción mediante bacterias anaeróbicas. Su amplia distribución y tolerancia a ambientes extremos es de interés, debido a que el producto terminal es el  $H_2S$ , considerado como un contaminante de agua dulce. Este compuesto además de darle el olor desagradable característico también forma sulfuros insolubles con todos los iones de metales pesados.

Sobre los organismos aerobios y plantas actúa inhibiendo los procesos respiratorios, de tal manera que la diversidad biológica disminuye considerablemente. Finalmente es muy

corrosivo, especialmente si el tiempo de exposición es intermitente.

Los valores más altos de la simulación (248 y 280 mg/L), se presentan en el sitio de descarga de los drenes Puertecitos (Los Indios) y El Morillo respectivamente (Figura 11). El origen de estos incrementos no puede atribuirse a una causa específica debido a la ausencia de información.

Se destaca el hecho de que a partir de la descarga del dren El Morillo, la concentración de sulfatos sobrepasa la norma establecida (250 mg/L) (8).

También se simuló los cloruros, presentes en aguas naturales con una amplia variación. El contenido de ellos se incrementa con la presencia de minerales de origen geológico y también debido a las descargas de aguas residuales domésticas.

En la figura 12 se observa que los niveles de cloruros se incrementan justamente en el punto de descarga del dren Rancherías (120 mg/L), aguas negras de Brownsville/Matamoras (200 mg/L) y es más notorio en la descarga del dren El Morillo (180 mg/L), estos niveles se mantienen constantes debido a que son constituyentes conservativos. A pesar de estos incrementos los valores obtenidos en la simulación están por debajo de la norma establecida (250 mg/L) (8).

Una importante medida para evitar la salinidad del agua del Río Bravo es la desviación parcial de las aguas del dren El Morillo directamente al mar iniciada el 9 de julio de 1969 por la Comisión Internacional de Límites y Aguas.

(México-Estados Unidos) (7).

Los valores de sólidos disueltos obtenidos mediante la simulación se encuentran como la mayoría de los parámetros dentro del intervalo de máximos y mínimos de los valores determinados en campo (500 a 1550 mg/L), sin embargo comparándolos con las normas establecidas para aguas de uso doméstico, los datos reales y los simulados están por encima de este valor (500 mg/L) (8). El incremento más significativo se presenta en los puntos de descarga de los ríos Alamo, San Juan, aguas negras de Brownsville/Matamoros y en los drenes Puertecitos, Los Indios y El Morillo, siendo este último el de mayor aportación (5200 mg/L). (Tabla II).

Dentro de los parámetros utilizados para estudiar la calidad del agua en ríos, el más importante a nivel biológico es el contenido de coliformes que indica generalmente el grado de contaminación orgánica proveniente de desechos domésticos.

Los datos proporcionados por las diferentes entidades que realizan el monitoreo en el Río Bravo, para este parámetro no son suficientes y además el intervalo de variabilidad es muy amplio y contrastante (9.14 a 26000 NMP/100 ml), factores que arrojaron resultados no confiables en la simulación. Esta circunstancia se refleja en la imposibilidad de calcular la constante de decaimiento que se ajuste a los datos reales. (Tablas IV y VI). (Figura 14).

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad teniendo en cuenta la relación entre oxígeno disuelto, caudal, DBO y sulfatos presentan ligeras variaciones que se

registran especialmente en los últimos tramos a partir de la descarga del dren El Morillo hasta el final del tramo en estudio. (Figuras 15 a 18)

De lo anterior se puede concluir que el efecto de las aguas del dren El Morillo es importante para la calidad del agua del Río Bravo, cuyas concentraciones de algunos parámetros se incrementan deteriorándola. Siendo este efecto más notorio al disminuir drásticamente el caudal de descarga de la presa Falcón. ( $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

El estudio de los parámetros físicos y químicos que se usaron para analizar la calidad de agua de la cuenca baja del Río Bravo, permite asegurar que el agua puede usarse para irrigación o tratarse para consumo doméstico, teniendo en cuenta la norma establecida para estos fines.

Esta aseveración obtenida en la presente simulación ratifica el amplio uso para riego agrícola que se lleva a cabo en la cuenca baja del río, de allí la importancia de mantener la calidad del agua de esta cuenca que beneficia un total de 574262 Ha., entre México y Estados Unidos de América. Siendo esta cuenca de escasas lluvias es necesario mantener y vigilar el buen uso de este recurso.

El modelo matemático empleado en el tramo Presa Falcón-Matamorcs, se aplicó presentando un error global del 10.0%, porcentaje adecuado en este tipo de simulación. En el cálculo se excluyó el estudio de coliformes ya que no se obtuvieron resultados confiables (62% de error).

Es importante anotar que no se aprovechó al máximo el modelo

ya que posee amplias ventajas tales como: simular hasta 15 constituyentes de la calidad del agua que en este caso sólo se simularon cinco, la utilidad para corrientes ramificadas bien mezcladas, que se podría utilizar para estudiar en forma adicional los ríos Alamo y San Juan.

El principal problema para la realización de lo planteado anteriormente es la disponibilidad de datos sobre todo en estos afluentes, los cuales se simularon como descargas puntuales y en el caso del río San Juan fue necesario asumir algunos valores entre ellos la concentración de cloruros, sulfatos, OD y DBO, de la misma manera para los drenes Ranchería y Puertecitos (Tabla II).

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 8.1. Conclusiones.

- a. Dentro de los alcances y limitaciones planteados al iniciar el presente trabajo, fue posible realizar la simulación de la calidad del agua en el tramo Presa Falcón-Matamoros utilizando el modelo QUAL-TX.
- b. El comportamiento de esta cuenca durante períodos de bajo caudal se simuló en general con buenos resultados (10.0% de error), los cuales pueden proveer importantes decisiones operacionales para el manejo del río. Este punto es de gran importancia debido al potencial de interés entre la demanda pública del agua y el mantenimiento mínimo del caudal.
- c. Al aplicar el modelo existe una evidente concordancia entre la calidad de los constituyentes del agua observados y obtenidos en la simulación, el porcentaje de error de cada uno de los parámetros es el siguiente: OD (5%), DBO (18%), sulfatos (6%), cloruros (13%), sólidos disueltos (8%), excepto los coliformes con un porcentaje de error del 62%.
- d. La información obtenida durante el estudio sugirió que las descargas de aguas provenientes de los drenes disminuyen apreciablemente la calidad del agua, principalmente el dren El Morillo debido a su caudal y altas concentraciones de contaminantes.
- e. La variación de las condiciones de frontera no arrojó

cambios tan significativos en la concentración de oxígeno disuelto, esto indica una suficiente capacidad de reaeración y autodepuración.

- f. El cálculo de las constantes de velocidad de reacción concuerda con los valores recomendados en la bibliografía.
- g. El control del caudal de descarga en la presa Falcón es de vital importancia, porque conlleva a diferentes situaciones de comportamiento del río aguas abajo de ésta, destacándose entre ellas la apreciable disminución de oxígeno disuelto (de 9.2 a 8.75 mg/L) en los últimos 100 Km, cuando el caudal de descarga es el máximo y el mínimo respectivamente.

## 8.2. Recomendaciones.

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones expuestas se mencionan a continuación algunos comentarios que se consideran más importantes.

- a. El modelo matemático empleado es una herramienta muy útil para estudiar el comportamiento de un río, se pueden alcanzar mejores resultados si se trabaja en combinación con muestreos de campo tendientes a determinar factores que no están considerados en los monitoreos continuos.
- b. Una mejor coordinación entre las entidades que realizan el trabajo de monitoreo sería óptima para obtener mejores y más amplios resultados.

- c. Debido al amplio uso del agua para riego que se hace en esta zona es importante realizar estudios tendientes a determinar los efectos del agua en la agricultura y tomar las decisiones al respecto.
- d. Se recomienda incluir en los boletines hidrométricos información sobre las características hidráulicas del río, con el fin de ampliar criterios para la simulación.
- e. A pesar de que los ríos Alamo y San Juan no afectan considerablemente la calidad del agua del río Bravo se recomienda realizar monitoreos en estos ríos con el fin de evaluar el comportamiento como un sistema más amplio ya que el uso que se hace de éstos aumenta cada vez más de acuerdo al desarrollo que sufren las poblaciones ribereñas.
- f. Se obtienen mejores resultados si los segmentos en los cuales se divide el río son más cortos, por lo cual sería necesario incrementar las estaciones de monitoreo, particularmente aguas abajo de las descargas de aguas residuales especialmente cuando se deseen evaluar constituyentes biológicos de la calidad del agua.

## BIBLIOGRAFIA

1. Biswas A.K. Models Quality Management. U.S.A. Mc Graw-Hill. pp ix-xi. 1981.
2. Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los E.U. Boletín Hidrométrico del Río Bravo. Núm 55-1985.
3. Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los E.U. Boletín Hidrométrico del Río Bravo. Núm 56-1985.
4. Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los E.U. (C.I.L.A.) "Esgurrimientos del Río Bravo y Datos Conexos.", año 1977-1986.
5. Crabtree R.W., et al., "Mathematical Modelling Requirements for River Quality Control". Wat. Pollut. Control 1987. pp 51-58.
6. Hammer Mark J.J. et al. Hydrology and quality of water sources, Jhon Wiley and Sons N.Y. Chichester Brisbane Toronto. 1985.
7. Linfield C., et al. Computer program documentation for the enhanced stream water quality model Qual 2E. Environmental research laboratory office of research and development U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia 30613. 1985.
8. Organización Panamericana de la Salud. 1985.

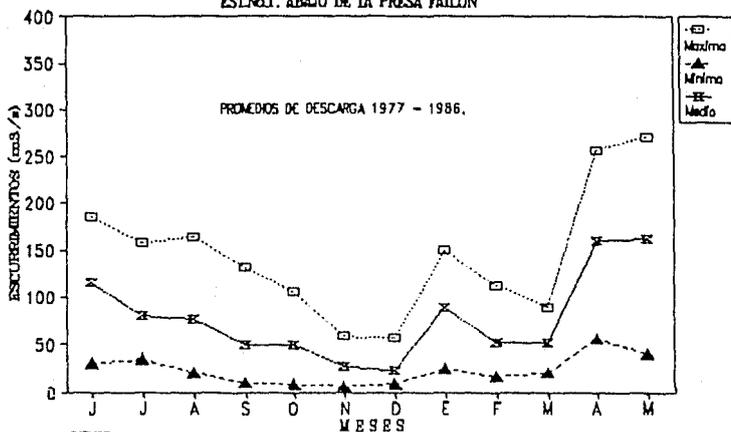
9. Rzedowski, J. Vegetación de México. Ed. Limusa. 1983.
10. S.A.R.H. Proyecciones de población 1979-2000.
11. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.  
''Boletín Hidrológico'', Núm. 53. Región Hidrológica  
Núm. 24 Oriente Bajo Río Bravo. Tomos I, II y III México  
D.F. 1970.
12. Secretaría de Agricultura Y Recursos Hidráulicos.  
''Boletín Hidrológico. Núm. 39 Oriente .Región  
Hidrológica Núm. 24 Oriente'' Tomos I, II y III. México  
D.F. 1970.
13. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.  
Dirección general de usos del agua y prevención de la  
contaminación. Sistema de Información de la calidad del  
agua. (S.I.C.A.)
14. Texas Water Comission, ''Statewide Monitoring Network.  
Sampling data Inventory''. Period of report; 01/01/68 to  
05/12/87. Río Grande River Basin. District 11.
15. Texas Water Comission. The State of Texas Water Quality  
Inventory. 8 th edition. 1986.
16. Texas Water Comission. QUAL-TX user's manual. Versión  
3.2. Austin, Texas. 1986.
17. Vargas Ballester Waldo P., ''Estudio preliminar de la  
capacidad de autopurificación del agua en el Río

Bravo''. Tesis (Maestría en Ingeniería Ambiental),  
U.N.A.M., Facultad de Ingeniería, División de Estudios  
de Posgrado.

## LISTA DE ANEXOS

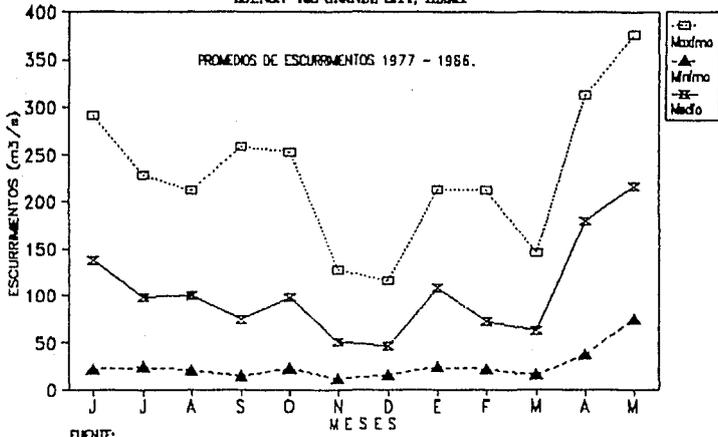
1. Hidrometría estación abajo de Falcón.
2. Hidrometría estación Río Grande City.
3. Hidrometría estación abajo de la Presa Anzaldúas.
4. Hidrometría estación cerca de San Benito.
5. Hidrometría estación cerca de Matamoros.
6. Hidrometría Sistema Río Bravo-Cuenca baja.
7. Datos de calidad del agua en el Río Bravo Presa Falcón- Matamoros. Estación Abajo de Falcón.
8. Datos de calidad del agua en el Río Bravo Presa Falcón- Matamoros. Río Alamo en Ciudad Mier, Tamps.
9. Datos de calidad del agua en el Río Bravo Presa Falcón-Matamoros. Río Grande City.
10. Datos de calidad del agua en el Río Bravo Presa Falcón-Matamoros. Cerca de Ciudad Díaz Ordaz, Tamps y los Ebanos, Tex.
11. Datos de calidad del agua en el Río Bravo Presa Falcón-Matamoros. Dren El Morillo.
12. Datos de calidad del agua en el Río Bravo Presa Falcón-Matamoros. Abajo de la Presa Anzaldúas.
13. Datos de calidad del agua en el Río Bravo Presa Falcón-Matamoros. Cerca de Matamoros.
14. Programa auxiliar para el cálculo de las constantes hidráulicas.
15. Archivo de salida de los resultados de la simulación.
16. Ejemplo de cálculo de OD para un elemento computacional.

ANEXO 1. HIDROMETRIA  
EST. No. 1. ABAJO DE LA PRESA FALCON



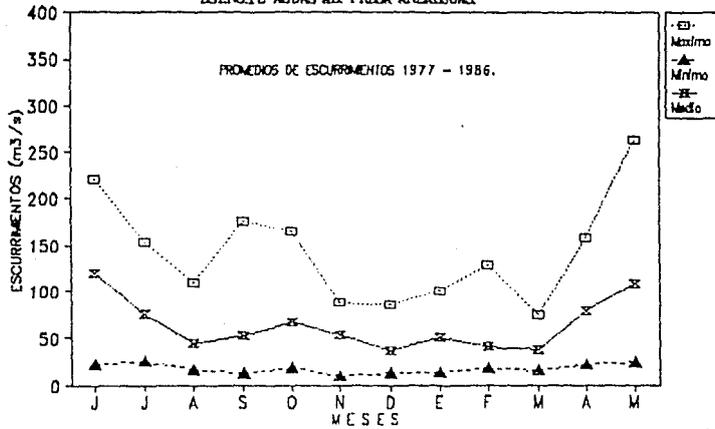
FUENTE:  
Boletines Hidrométricos C.I.L.A.

ANEXO 2. HIDROMETRA  
EST. No. 7 RIO GRANDE CITY, TEXAS.



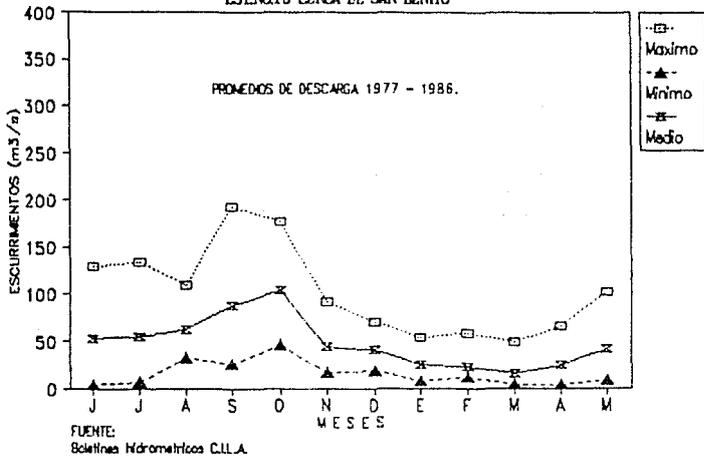
FUENTE:  
Boletines hidrométricos C.L.L.A.

ANEXO 3. HIDROMETRIA  
EST.No.12 AGUAS A.B. PRESA ANZALDUAS

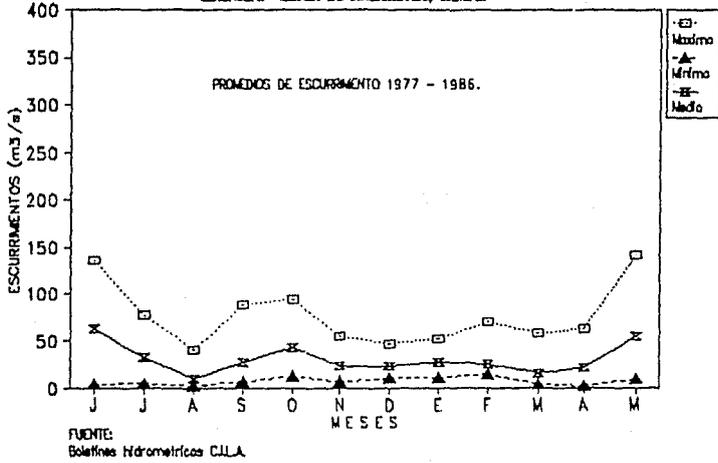


FUENTE:  
Boletines hidrometricos C.J.L.A.

ANEXO 4. HIDROMETRIA  
ESTACIÓN CERCA DE SAN GENTIL



ANEXO 5. HIDROMETRIA  
EST.No.18 CERCA DE MATAMOROS, TAMPS.



## ANEXO 6. HIDROMETRIA RIO BRAVO P. FALCON-MATAMOROS

Periodo:1977-1986 MES DICIEMBRE.

ANOS ESTACION	ESCURRIMIENTOS (m <sup>3</sup> /s)										GASTO MEDIO (m <sup>3</sup> /s)
	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	
MM ABAJO DE mm P. FALCON Mm	1.34 0.70 1.18	1.85 1.44 1.65	100.00 0.52 15.50	52.30 10.30 20.90	61.10 60.10 60.40	62.00 0.51 27.10	121.00 0.51 39.10	50.40 0.51 22.80	71.90 8.84 30.30	29.90 3.34 10.10	56.09 8.68 23.90
MM DERIVACIONES mm P. FALCON Y Mm RIO GDE CITY	0.72 0.14 0.42	0.51 0.03 0.30	0.14 0.05 0.02	0.05 0.04 0.04	0.10 0.05 0.07	0.06 0.04 0.05	0.07 0.05 0.06	1.42 0.10 0.37	0.49 0.00 0.24	0.55 0.08 0.21	0.41 0.06 0.18
MM ESTACION mm RIO GRANDE Mm CITY	132.00 12.10 43.90	294.00 63.40 162.00	153.00 2.39 16.90	89.80 11.30 23.90	98.40 37.10 64.90	70.60 1.38 26.30	136.00 8.16 46.70	65.10 2.50 25.50	92.60 11.40 27.80	36.00 5.95 14.70	116.75 15.57 45.85
MM DERIVACIONES mm R. GDE. CITY Y Mm P. ANZALDUAS	22.20 0.51 9.77	16.90 0.92 9.34	1.00 0.38 0.51	0.40 0.26 0.75	0.57 0.40 0.48	0.42 0.32 0.39	0.23 0.20 0.21	13.80 1.16 6.56	12.00 0.54 5.41	9.08 0.04 3.44	7.66 0.47 3.66
MM DERIVACIONES mm POR EL CANAL Mm ANZALDUAS	15.10 0.00 0.98	20.00 0.00 3.87	15.40 0.04 3.43	14.60 0.04 2.59	12.80 0.04 2.85	27.70 0.04 5.68	14.00 5.30 7.91	15.90 0.04 4.60	20.80 0.04 4.81	19.70 0.04 0.91	17.60 0.66 3.76
MM ABAJO DE LA mm P. ANZALDUAS Mm	71.00 10.40 73.30	292.00 81.00 158.00	84.50 1.80 18.70	62.80 2.50 17.40	95.30 12.00 52.20	60.20 9.10 19.60	110.00 1.70 28.40	26.00 4.50 12.70	43.50 5.75 17.70	17.00 2.50 7.51	85.23 13.16 36.41
MM DERIVACIONES mm P. ANZALDUAS Mm PTE. PROGRESO	14.60 0.21 9.33	12.90 0.30 6.31	5.55 0.00 1.59	5.29 0.00 2.44	13.10 0.40 9.20	9.29 0.10 4.70	13.10 0.22 7.70	8.07 0.22 3.88	15.20 0.16 5.64	7.98 0.00 2.85	10.61 0.16 5.27

## ANEXO 5. HIDROMETRIA RIO BRAVO P. FALCÓN-MATAMOROS

Periodo: 1977-1986 MES DICIEMBRE. (CONTINUACION)

AÑOS ESTACION	DESCARGAS (m <sup>3</sup> /s)										GASTO MEDIO (m <sup>3</sup> /s)
	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	
Má DERIVACIONES	25.30	16.90	13.20	11.50	24.40	12.10	25.20	18.50	15.50	7.23	16.98
má PTE. PROGRESO	3.40	0.00	0.01	1.08	1.21	0.00	2.81	2.31	2.20	0.45	1.35
Mm Y SAN BENITO	12.80	8.69	4.59	4.96	14.50	6.26	12.80	7.90	9.20	3.44	8.51
Má CERCA DE	20.50	258.00	47.00	35.40	55.70	26.50	52.40	8.81	14.40	8.41	52.71
má SAN BENITO	1.92	77.00	2.89	2.78	15.00	3.26	1.54	0.78	0.71	1.56	10.75
Mm	9.92	148.00	13.60	11.60	32.50	8.44	7.79	2.57	3.34	3.42	24.02
Má DERIVACIONES	10.60	4.76	5.10	1.56	9.49	6.40	9.46	2.29	10.20	2.29	5.22
má SAN BENITO Y	1.06	0.82	0.79	0.48	0.82	0.03	0.41	0.58	0.60	0.82	0.60
Mm BROWNSVILLE	3.77	1.95	1.18	0.97	2.48	1.69	2.34	1.14	2.59	1.17	1.92
Má CERCA DE	19.00	261.00	36.20	29.70	52.90	15.40	30.30	9.71	8.38	5.69	46.83
má MATAMOROS	1.31	75.30	2.80	4.22	16.50	0.02	0.52	1.33	0.60	1.74	10.43
Mm	6.43	150.00	12.50	11.10	30.80	6.94	5.72	3.09	1.69	2.67	23.09
Má DERIVACIONES	0.14	0.11	0.14	0.13	0.27	0.16	0.07	0.10	0.12	0.00	0.12
má BROWNSVILLE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mm Y S. DE MEXICO	0.03	0.01	0.01	0.01	0.12	0.05	0.02	0.01	0.03	0.00	0.03
Má DERIVACIONES	60.60	48.70	28.50	22.90	56.40	39.40	62.00	37.70	36.20	22.50	41.50
má PRESA FALCÓN	8.81	2.92	1.53	4.73	3.62	2.13	5.27	6.29	7.50	1.69	4.45
Mm G. DE MEXICO	35.10	26.60	9.80	11.30	37.90	20.90	33.40	20.00	23.10	11.10	22.92

FUENTE: Boletines hidrometricos C.I.L.A.

Má = MAXIMO

má = MINIMO

Mm = MEDIO

ANEXO 7. DATOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RIO BRAVO.  
PRESA FALCON - MATAMOROS

ESTACION No. 1. ABAJO DE FALCON.  
PERIODO: 1977 - 1986 DICIEMBRE

FECHA	HORA GASTO	COND.	PH	TEMP.	DJA TOT R A S	SULF.	CLDR.	ALCAL.	SOL. DIS	OXIGENO BACT.	(DBO5)	SEDIM	
(m/d/a)	(h/m)	(m <sup>3</sup> /s)	UchansUnid.	cC	(CaCO <sub>3</sub> )	SO <sub>4</sub>	Cl	TOTAL	DIS.	DIS.	(OD)	SUSP	
						DIS.	DIS	(CaCO <sub>3</sub> )	DIS.	DIS.	COLIF.		
						mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100	mg/l	
12/13/77	0823	2.6	1060.0	7.8	17.8	280.0	2.9	214.0	118.0	100.0	500.0	8.8	0.0
12/18/78	1415	39.1	1082.0	8.3	17.7	269.0	3.3	237.0	123.0	102.0	500.0	10.2	
12/17/79	0925	7.3	1030.0	7.6	15.5	260.0	3.0	235.0	111.0	104.0	621.0	12.2	6.0
12/15/80	1000	2.1	1020.0	7.9	15.0	260.0	3.0	250.0	110.0	98.0	637.0	9.4	10.0
12/14/81	1015	44.4	934.0	7.8	20.0	250.0	2.7	210.0	100.0	100.0	569.0		
12/27/82	1430	43.9	1020.0	8.6	16.8			250.0	129.0	110.0	510.6	9.0	20.0
12/28/83	1350	56.4	1060.0	8.2	13.3			289.0	135.0	105.0	532.0	8.5	10.0
12/18/84	0930	32.3	1110.0	7.7	19.0	270.0	3.4	260.0	140.0	110.0	711.0	7.8	9.0
12/04/85	1610	44.7	848.0	8.2	19.0	250.0	3.0	242.0	125.0	100.0	660.0	9.6	9.0
12/29/86	1030	11.3	956.0	7.9	15.5	249.0	3.0	230.0	110.0	111.0	620.0		
MAXIMO		56.4	1110.0	8.6	20.0	280.0	3.4	289.0	140.0	111.0	711.0	12.2	20.0
MINIMO		2.1	848.0	7.6	13.3	240.0	2.7	210.0	100.0	98.0	500.0	7.8	0.0
PROMEDIO		28.4	1012.0	8.0	17.0	258.8	3.0	241.7	120.1	104.0	586.0	9.4	8.0

FUENTE: Boletines hidrometricos C.I.L.A.

NOTA: Las casillas en blanco carecen de informacion.

ANEXO 8. DATOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RIO BRAVO.  
PRESA FALCON - MATAHOROS

ESTACION No. 7. RIO GRANDE CITY, TEXAS.  
PERIODO: 1977 - 1986 DICIEMBRE

FECHA	HORA	GASTO MOMENT	COND.	PH	TEMP.	DIA TOT R A S (CaCO <sub>3</sub> )	SULF. CLOR. ALCAL.			SOL. DIS CALC.	OXIGENO DIS. (OD)	BACT. COLIF. NMP/100	(DBO <sub>5</sub> ) mg/l	SEDIM SUSP mg/l
							SO <sub>4</sub> DIS.	CL DIS.	TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )					
(m/d/a)	(h/m)	(m <sup>3</sup> /s)	UhoaeUnid.		oC	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l			mg/l	mg/l
12/19/77	1130	97.2	1070.0	7.8	19.0	270.0	2.9	240.0	130.0	107.0	655.0	8.5		4.0
12/18/78	1500		1061.0	7.8	15.0	290.0	2.8	220.0	130.0	115.0	646.0	8.3		
12/17/79	1655	6.3	1550.0	7.6	12.0	340.0	4.5	300.0	230.0		943.0	11.0		4.0
12/15/80	1245	12.4	1320.0	7.9	16.5	340.0	3.6	280.0	180.0		807.0			
12/15/81	1045	94.6	1010.0	7.7	16.0	270.0	3.1	220.0	120.0	110.0	628.0			2.7
12/13/82	1345	4.5	1530.0	7.7	14.5	330.0	5.1	310.0	260.0	120.0	975.0	10.0		
12/19/83	1145	70.2	1230.0	7.6	11.0	290.0	3.9	290.0	160.0	100.0	767.0			
12/18/84	1400	28.6	1330.0	7.7	20.5	310.0	3.7	270.0	200.0	110.0	813.0			
12/23/85	1345	17.5	1210.0	7.8	20.0	290.0	4.0	280.0	180.0	115.0	810.0			
12/15/86	1115	0.0	1430.0	8.0	15.5	310.0	5.0	320.0	200.0	133.0	940.0			
MAXIMO		94.6	1550.0	8.0	20.5	340.0	5.1	320.0	260.0	133.0	975.0	11.0	0.0	4.0 0.0
MINIMO		0.0	1010.0	7.6	11.0	270.0	2.8	220.0	120.0	0.0	628.0	8.3	0.0	2.7 0.0
PROMEDIO		32.2	1274.1	7.8	16.0	304.0	3.9	273.0	179.0	113.8	798.4	9.5	0.0	3.6 0.0

FUENTE: Boletines hidrometricos C.I.L.A.

NOTA: Las casillas en blanco carecen de informacion.

ANEXO 9. DATOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RIO BRAVO.  
PRESA FALCON - MATAMOROS

ESTACION No.12. AJAJO DE LA PRESA ANZALDUAS.  
PERIODO: 1977 - 1986 DICIEMBRE

FECHA (m/d/a)	HORA (h/m)	GASTO (m <sup>3</sup> /s)	COND. UHOMS	PH	TEMP. oC	DZA TOT (CaCO <sub>3</sub> ) mg/l	SULF.		ALCAL. (CaCO <sub>3</sub> ) mg/l	SOL.DIS CALC. mg/l	OXIGENO BACT. (DBO5)		SEDIM SUSP mg/l
							SO <sub>4</sub> DIS. mg/l	CL DIS mg/l			DIS. (mg/l)	CDLIF. (mg/l)	
12/19/77	1050	50.5	1230.0	7.7	19.0	310.0	3.5	270.0	180.0	115.0	762.0		
12/19/78	0900	56.6	1132.0	8.1	18.5	210.0	3.9	270.0	190.0	139.0	836.0		
12/17/79	850	5.7	1930.0	7.5	13.0	440.0	5.0	380.0	310.0		1200.0		
12/08/80	1140	11.5	2440.0	8.0	21.0	580.0	5.5	440.0	460.0		1550.0		
12/14/81	1170	21.0	1110.0	7.7	20.0	280.0	3.3	240.0	140.0	120.0	688.0		
12/16/82	1145	28.6	1540.0	7.8	23.5	360.0	4.7	340.0	230.0	130.0	982.0		
12/23/83	1130	15.6	1330.0	7.9	11.0	220.0	3.9	310.0	170.0	110.0	923.0		
12/20/84	1130	10.6	2250.0	7.9	21.5	530.0	5.1	430.0	390.0	190.0	1410.0		
12/17/85	0900	36.0	1470.0	7.9	14.5	340.0	4.0	310.0	230.0	127.0	910.0		
12/16/86	1120	5.7	1830.0	8.1	17.0	360.0	5.0	350.0	230.0	144.0	1000.0		
MAYIMO		81.0	2440.0	8.1	23.5	590.0	5.5	440.0	460.0	190.0	1550.0		
MINIMO		5.7	1110.0	7.6	11.0	280.0	3.3	240.0	140.0	110.0	688.0		
PROMEDIO		28.2	1626.3	7.9	17.9	364.0	4.4	334.0	250.0	133.1	1016.1		

FUENTE: Boletines hidrometricos C.I.L.A.

NOTA: Las casillas en blanco carecen de informacion.

ANEXO 10. DATOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RIO BRAVO.  
PRESA FALCON - MATAHOROS

ESTACION No.18. CERCA DE MATAHOROS.  
PERIODO: 1977 - 1986 DICIEMBRE

FECHA (m/d/a)	HORA (h/m)	GASTO (m <sup>3</sup> /s)	COND. Uhoms	PH	TEMP. oC	DIA	TOT	R	A	S	SULF.		ALCAL. (CaCO <sub>3</sub> )	SOL. DIS		OXIGENO (00)	RACT. CODIF.	(DB05) SEDIM	
											SD4 DIS.	CLOR. DIS		TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )	DIS.			DIS.	DIS.
											mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100	mg/l	mg/l	
12/ /77			1550.0	8.0	20.0						210.0	290.0				9.3	2400.0		
12/ /78			1084.0	7.6	20.0						210.0	140.0				9.8	140.0	1.3	
12/18/79	1520	14.0	1530.0	8.5	13.0	370.0	4.1				310.0	210.0	940.0		12.5	1500.0	4.0		
12/17/80	0850	11.0	1730.0	8.2	18.0	410.0	4.5				340.0	290.0		1080.0	9.7	350.0	4.5		
12/02/81	1135	34.0	1230.0	8.3	22.0	330.0	3.4				250.0	170.0	140.0	760.0	10.1	44.0	2.3		
12/01/82	1028		1614.0	8.0	20.2						380.0	271.0			9.1	100.0			
12/29/83	1045	13.4	1326.0	8.4							316.0	200.0			11.8	1200.0			
12/ /84																			
12/09/85	1430	1.1	1967.0	7.9	22.3						320.0	264.0			9.6	250.0			
12/08/86	1130	3.4	1634.0	8.0	21.9						268.0	217.0			9.2				
MAXIMO		34.0	1967.0	8.5	22.3	410.0	4.5				380.0	290.0	140.0	1080.0	12.5	2400.0	4.5	0.0	
MINIMO		1.1	1084.0	7.6	0.0	330.0	3.4				210.0	140.0		760.0	9.0	44.0	1.3	0.0	
PROMEDIO		12.8	1518.0	8.2	15.7	370.0	4.0				269.3	228.0	140.0	729.2	10.1	748.0	3.0	0.0	

FUENTE: Boletines hidrometricos C.I.L.A.

NOTA: Las casillas en blanco carecen de informacion.

ESTACION No.11. DREN MORILLO CERCA DE LA P. ANZALDUAS  
 PERIODO: 1977 - 1986 DICIEMBRE

FECHA	HORA	GASTO	COND.	PH	TEMP.	DZA	TOT	R	A	S	SULF.	CLOR.	ALCAL.	SOL.DIS	OXIGENO	BACT.	(DBO5)	SEDIM		
(m/d/a)	(h/m)	(m <sup>3</sup> /s)	Whoas	Unid.	oC	mg/l					SO4	Cl	TOTAL	DIS.	DIS.	COLIF.		SUSP		
							(CaCO3)				DIS.	DIS	(CaCO3)	mg/l	mg/l	(OD)	NMP/100	mg/l	mg/l	
12/ /77			9400.0		7.7															
12/ /78			8494.0																	
12/17/79	0830	1.7	8590.0		7.7	11.5	1200.0	20.0	1600.0	2000				5800.0						
12/08/80	1110	1.5	9600.0		7.8	25.0	1400.0	20.0	1700.0	2300				5360.0						
12/14/81	1130	1.6	7990.0		7.8	20.0	1200.0	18.0	1500.0	1800			240.0	5280.0						
12/16/82	1120	1.3	7440.0		7.9	23.0	1100.0	17.0	1500.0	1600			250.0	4980.0						
12/23/83	1115	1.0	7030.0		7.9	9.5	900.0	19.0	1300.0	1600			250.0	4730.0						
12/20/84	1115	0.9	7420.0		7.9	21.0	1200.0	18.0	1500.0	1700			240.0	5180.0						
12/17/85	0835		7070.0		7.9	15.5	1100.0	18.0	1500.0	1600			245.0	5000.0						
12/16/86	0915	0.0	5970.0		8.1	19.0	820.0	17.0	1300.0	1300			218.0	4300.0						
MAXIMO		1.7	9600.0		8.1	23.0	1400.0	20.0	1700.0	2300			250.0	6360.0						
MINIMO		0.0	5970.0		7.7	9.5	820.0	17.0	1300.0	1300			218.0	4300.0						
PROMEDIO		1.1	7900.4		7.9	17.8	1115.0	18.4	1487.5	1738			240.7	5200.0						

FUENTE: Poletines hidrometricos C.I.L.A.

NOTA: Las casillas en blanco carecen de informacion.

ANEXO 12. DATOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RIO BRAVO.  
PRESA FALCON - MATAMOROS

ESTACION No. 2. RIO ALAMO EN CD. MIER, TAMPS.  
PERIODO: 1977 - 1986 DICIEMBRE

FECHA	HORA	GASTO	COND.	PH	TEMP.	DZA TOT R A S (CaCO3)	SULF. SO4	CLOR. Cl	ALCAL. TOTAL (CaCO3)	SOL. DIS CALC.	OxIGENO RACT. DIS. (OD)	COLIF. NMP/100	(DBO5) SEDIM SUSP
(m/d/a)	(h/m)	(m3/s)	Uhcac	Unid.	oC	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
12/05/77	1513	20.0	990.0	8.2	21.6		220.0	129.0	106.0		10.6	5.0	
12/16/78	1505		1030.0	8.3	18.2		236.0	136.0	108.0		10.3		
12/17/79	1215		1000.0	8.3	12.6		243.0	131.0	108.0		11.7	56.0	
12/02/80	1105		1100.0	8.1	18.4		248.0	120.0	100.0		9.4	20.0	
12/14/81													
12/27/82	1350		1047.0	8.9	17.8		250.0	140.0	102.0		10.7	20.0	
12/28/82	1430	17.0	1068.0	9.0	16.8		294.0	141.0	97.0		12.5	30.0	
12/18/84	1100	28.3	1269.0	8.6	20.7		270.0	134.0	105.0		11.8	9.0	
12/04/85	1655	26.6	549.0	8.3	19.0		199.0	91.0	120.0		8.9	70.0	
12/16/86													
MAXIMO		28.3	1269.0	9.0	21.6		294.0	141.0	120.0		12.5	70.0	
MINIMO		17.0	549.0	8.1	12.6		199.0	91.0	97.0		8.9	5.0	
PROMEDIO		23.0	1006.6	8.5	18.1		245.0	127.8	105.9		10.7	30.0	

FUENTE: Boletines hidrometricos C.I.L.A.

NOTA: Las casillas en blanco carecen de informacion.

ANEXO 13. DATOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RIO BRAVO.  
PRESA FALCON - MATAMOROS

ESTACION: No. 8. CERCA DE CD. DIAZ ORDAZ, TAMPS. Y LOS ERANDS, TEX.  
PERIODO: 1977 - 1986 DICIEMBRE

FECHA	HORA	GASTO	COND.	PH	TEMP.	DIA TOT	P A S	SULF.	CLOR.	ALCAL.	SOL. DIS	OXIGENO	BACT.	(DB5)	SEDIM
(m/d/a)	(h/m)	(m <sup>3</sup> /s)	Uhoms/Unid.	oC	mg/l	(CaCO <sub>3</sub> )		SO <sub>4</sub>	Cl	TOTAL	CALC.	DIS.	COLIF.	(OD)	SUSP
								DIS.	DIS	(CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	mg/l	NMP/100	mg/l	mg/l
12/19/77	1300	96.8	1140.0	7.7	19.0	290.0	3.3	280.0	140.0	107.0	730.0				
12/18/78	1600		1065.0	7.8	16.0	270.0	2.9	350.0	320.0	131.0	650.0				
12/17/79	1730	6.8	2080.0	7.6	12.0	430.0	5.4	390.0	340.0		1290.0				
12/15/80	1330	14.2	1810.0	7.7	18.5	440.0	4.6	370.0	270.0		1170.0				
12/15/81	1130	39.9	1050.0	7.7	16.0	280.0	3.4	230.0	130.0	110.0	660.0				
12/13/82	1430	4.5	1700.0	7.8	14.0	380.0	5.2	370.0	260.0	140.0	1080.0				
12/19/83	1245	37.9	1240.0	7.9	12.0	310.0	3.7	280.0	170.0	110.0	780.0				
12/26/84	1235	39.6	1380.0	7.8	21.5	310.0	3.7	290.0	178.0	120.0	806.0				
12/23/85	1445	36.5	1490.0	7.7	20.0	370.0	4.0	330.0	240.0	171.0	990.0				
12/15/86	1445		1670.0	8.0	18.0	400.0	4.0	360.0	250.0	153.0	1100.0				
MAXIMO		96.8	2080.0	8.0	21.5	480.0	5.4	390.0	340.0	153.0	1290.0				
MINIMO		4.5	1060.0	7.6	12.0	270.0	2.9	230.0	130.0	107.0	650.0				
PROMEDIO		24.5	1453.5	7.8	16.7	353.0	4.0	325.0	230.8	125.3	921.8				

FUENTE: Boletines hidrometricos C.I.L.A.

NOTA: Las casillas en blanco carecen de informacion.

ANEXO 14. PROGRAMA AUXILIAR PARA EL CALCULO DE LAS  
CONSTANTES HIDRAULICAS.

Entrada de datos

CLOSE

CLS

OPEN "ME.RES" FOR OUTPUT AS #1

cont = 0

PRINT #1, " PROGRAMA PARA CALCULO DE CONSTANTES HIDRAULICAS"

PRINT #1, " Formula:"

PRINT #1,

PRINT #1, " Velocidad = a \* Gasto \*\* b"

inicio:

CLS

PRINT " PROGRAMA PARA CALCULO DE CONSTANTES HIDRAULICAS"

PRINT " VARIABLES:"

PRINT " Velocidad (m/sg)"

PRINT " Gasto (m3/sg)"

PRINT " Constantes hidraulicas a,b"

PRINT " Formula:"

PRINT ""

PRINT " Velocidad = a \* Gasto \*\* b"

LOCATE 12, 10: INPUT " Gasto en m3/sg -----> ", Gasto

LOCATE 13, 10: INPUT " Constante a -----> ", a

LOCATE 14, 10: INPUT " Constante b -----> ", b

Velocidad = a \* Gasto \*\* b

LOCATE 16, 10: PRINT " La velocidad en m/s = ", Velocidad

INPUT " Se imprime en archivo (s/n)": r#

IF r# = "s" OR r# = "S" THEN GOTO imprime

GOTO inicio

imprime:

cont = 1 + cont

PRINT #1, " Corrida No "; cont

PRINT #1, " VARIABLES:"

PRINT #1, " Gasto (m3/sg)"; Gasto

PRINT #1, " Constantes hidraulicas a,b"; a, b

PRINT #1, " Velocidad (m/sg) ="; Velocidad

PRINT #1, : PRINT #1,

INPUT " Se termina la sesion (s/n)", r#

IF r# = "s" OR r# = "S" THEN GOTO fin

GOTO inicio:

fin:

END

CLOSE

TEXAS WATER COMMISSION WATER QUALITY STREAM MODEL  
 QUAL-TX VERSION 3.2 UPDATED JANUARY 17, 1986

\$\$\$ DATA TYPE 1 (TITLES AND CONTROL CARDS) \$\$\$

CARD TYPE	CONTROL TITLES
CNTROL01	RIO BRAVO, PRESA FALCON-MATAMOROS. DEFFI.UNAM 1990.
CNTROL02	SECCION DE INGENIERIA AMBIENTAL.
CNTROL03	YES ECHO DATA INPUT
CNTROL04	YES INTERMEDIATE SUMMARY
CNTROL05	YES CAPSULE SUMMARY
CNTROL06	YES FINAL REPORT
CNTROL07	YES LOADING SUMMARY
CNTROL08	NO LINE PRINTER PLOTS
CNTROL09	NO GRAPHICS CAPABILITY
CNTROL10	YES METRIC UNITS
CNTROL11	YES OXYGEN DEPENDENT RATES
CNTROL12	YES SENSITIVITY ANALYSIS
CNTROL13	YES FLOW AUGMENTATION
ENDATA01	

\$\$\$ DATA TYPE 2 (MODEL OPTIONS) \$\$\$

CARD TYPE	MODEL OPTION
MODOPT01	NO TEMPERATURE
MODOPT02	NO SALINITY
MODOPT03	YES CONSERVATIVE MATERIAL I = SOLIDOS DISUELTOS MG/L
MODOPT04	YES CONSERVATIVE MATERIAL II = CHLORIDE, MG/L
MODOPT05	YES DISSOLVED OXYGEN
MODOPT06	YES BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND
MODOPT07	NO NITROGEN
MODOPT08	NO PHOSPHORUS
MODOPT09	NO CHLOROPHYLL A
MODOPT10	NO MACROPHYTES
MODOPT11	YES COLIFORM
MODOPT12	YES NONCONSERVATIVE MATERIAL =SULFATE, MG/L
ENDATA02	

\$\$\$ DATA TYPE 3 (PROGRAM CONSTANTS) \$\$\$

CARD TYPE	DESCRIPTION OF CONSTANT	VALUE
PROGRAM	SENSITIVITY PARAMETERS PER SET	= 1.00000
PROGRAM	INTERMEDIATE REPORT TYPE	= 3.00000
PROGRAM	FINAL REPORT TYPE	= 1.00000
PROGRAM	SPECIAL REPORT TYPE	= 1.00000

PROGRAM	FLOT CONTROL VALUE	=	3.00000
PROGRAM	DISPERSION CONTROL VALUE	=	1.00000
PROGRAM	BAROMETRIC PRESSURE (MBARS)	=	1013.25000
PROGRAM	KL MINIMUM	=	.60000
PROGRAM	MAXIMUM ITERATION LIMIT	=	100.00000
PROGRAM	0 ERROR CLOSURE LIMITS	=	.00000
PROGRAM	0 RELAXATION COEFFICIENT	=	.50000
PROGRAM	0 ITERATIONS PER CYCLE	=	.00000
PROGRAM	INHIBITION CONTROL VALUE	=	4.00000
PROGRAM	OXYGEN DEPENDENCE THRESHOLD	=	2.00000
PROGRAM	BOD OXYGEN UPTAKE RATE (MG O/MG)	=	2.30000
PROGRAM	NCM OXYGEN UPTAKE RATE (MG O/MG)	=	.00000

ENDATA03

\$\$\$ DATA TYPE 4 (TEMPERATURE CORRECTION CONSTANTS FOR RATE COEFFICIENTS) \$\$\$

CARD TYPE	RATE CODE	THETA VALUE
THETA	BOD DECA	1.04700
THETA	NCM DECA	1.00000
THETA	REAERAT!	1.00000

ENDATA04

\$\$\$ CONSTANTS TYPE 5 (TEMPERATURE DATA) \$\$\$

CARD TYPE	DESCRIPTION OF CONSTANT	VALUE
-----------	-------------------------	-------

ENDATA05

\$\$\$ DATA TYPE 6 (ALGAE CONSTANTS) \$\$\$

CARD TYPE	DESCRIPTION OF CONSTANT	VALUE
-----------	-------------------------	-------

ENDATA06

\$\$\$ DATA TYPE 7 (MACROPHYTE CONSTANTS) \$\$\$

CARD TYPE	DESCRIPTION OF CONSTANT	VALUE
-----------	-------------------------	-------

ENDATA07

\$\$\$ DATA TYPE 8 (REACH IDENTIFICATION DATA) \$\$\$

CARD TYPE	REACH ID NAME	BEGIN REACH KM	END REACH KM	ELEM LENGTH KM	REACH LENGTH KM	ELEMS PER RCH	BEGIN ELEM NUM	END ELEM NUM
-----------	---------------	----------------	--------------	----------------	-----------------	---------------	----------------	--------------

REACH ID											
REACH ID	1	RB	ABAJO DE FALCON - CONF RIO ALAMO	442.30	TO	422.30	2.0000	20.00	10	1	10
REACH ID	2	RB	CONF RIO ALAMO -CONF RIO SN JUAN	422.30	TO	384.30	2.0000	38.00	19	11	29
REACH ID	3	RB	CONF R SN JUAN-CONF DPUERTECITOS	384.30	TO	352.80	1.5000	31.50	21	30	50
REACH ID	4	RB	CONF FUERTECITOS-PRESA ANZALDUAS	352.80	TO	274.80	2.0000	78.00	39	51	89
REACH ID	5	RB	PRESA ANZALDUAZ-PRESA EL RETAMAL	274.80	TO	213.30	1.5000	61.50	41	90	130
REACH ID	6	RB	PRESA RETAMAL-BROWNSVILLE/MATAMS	213.30	TO	77.30	2.0000	136.00	68	131	198

ENDATA08

## \$\$\$ DATA TYPE 9 (ADVECTIVE HYDRAULIC COEFFICIENTS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH ID		VELOCITY "A"	VELOCITY "B"	DEPTH "C"	DEPTH "D"	DEPTH "E"	MANNINGS "N"
HYDR-1	1	RB	.40000000	.200	.540	.300	.000	.040
HYDR-1	2	RB	.41000000	.220	.550	.250	.000	.040
HYDR-1	3	RB	.38000000	.230	.550	.290	.000	.040
HYDR-1	4	RB	.40000000	.240	.550	.290	.000	.040
HYDR-1	5	RB	.36000000	.230	.550	.300	.000	.040
HYDR-1	6	RB	.37000000	.230	.540	.280	.000	.040

ENDATA09

## \$\$\$ DATA TYPE 10 (DISPERSIVE HYDRAULIC COEFFICIENTS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH ID	TIDAL RANGE	DISPERSION "A"	DISPERSION "B"	DISPERSION "C"	DISPERSION "D"
ENDATA10						

## \$\$\$ DATA TYPE 11 (INITIAL CONDITIONS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH ID	TEMP	SALIN	DO	NH3	NO3+2	PHOS	CHL A	MACRO
INITIAL	1	RB	17.00	.00	9.40	.00	.00	.00	.00
INITIAL	2	RB	17.90	.00	10.40	.00	.00	.00	.00
INITIAL	3	RB	16.00	.00	9.50	.00	.00	.00	.00
INITIAL	4	RB	16.70	.00	10.00	.00	.00	.00	.00
INITIAL	5	RB	18.40	.00	9.00	.00	.00	.00	.00
INITIAL	6	RB	19.00	.00	10.20	.00	.00	.00	.00

ENDATA11

## \$\$\$ DATA TYPE 12 (REAERATION, SEDIMENT OXYGEN DEMAND, BOD COEFFICIENTS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH ID	K2 OPT	K2 "A"	K2 "B"	K2 "C"	BKGRD SOD	AEROB BOD DECAY	BOD SETT	BOD CONV TO SOD	ANAER BOD DECAY
COEF-1	1	RB	6.	.270	.200	.000	.000	.010	.000	.000

CDEF-1	2	RB	6.	.230	.190	.000	.000	.010	.000	.000	.000
CDEF-1	3	RB	6.	.240	.200	.000	.000	.010	.000	.000	.000
CDEF-1	4	RB	6.	.240	.200	.000	.000	.005	.000	.000	.000
CDEF-1	5	RB	6.	.240	.200	.000	.000	.010	.000	.000	.000
CDEF-1	6	RB	6.	.250	.200	.000	.000	.050	.000	.000	.000

ENDATA12

## \$\$\$ DATA TYPE 13 (NITROGEN AND PHOSPHORUS COEFFICIENTS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ID	ORG-N DECA	ORG-N SETT	ORGN CONV TO NH3 SRCE	NH3 DECA	NH3 SRCE	PHOS SRCE	DENIT RATE
-----------	-------	----	---------------	---------------	--------------------------	-------------	-------------	--------------	---------------

ENDATA13

## \$\$\$ DATA TYPE 14 (ALGAE AND MACROPHYTE COEFFICIENTS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ID	SECCHI DEPTH	ALGAE: CHL A	ALGAE SETT	ALG CONV TO SOD	ALGAE GRDW	ALGAE RESP	MACRO GROW	MACRO RESP
-----------	-------	----	-----------------	-----------------	---------------	--------------------	---------------	---------------	---------------	---------------

ENDATA14

## \$\$\$ DATA TYPE 15 (COLIFORM AND NONCONSERVATIVE COEFFICIENTS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ID	COLIFORM DIE-OFF	NCM DECAY	NCM SETT	NCM CONV TO SOD
-----------	-------	----	---------------------	--------------	-------------	--------------------

CDEF-4	1	RB	.03	.05	.00	.00
CDEF-4	2	RB	.02	.02	.00	.00
CDEF-4	3	RB	.01	.01	.00	.00
CDEF-4	4	RB	.01	.05	.00	.00
CDEF-4	5	RB	.01	.01	.00	.00
CDEF-4	6	RB	.01	.01	.00	.00

ENDATA15

## \$\$\$ DATA TYPE 16 (INCREMENTAL DATA FOR FLOW, TEMPERATURE, SALINITY, AND CONSERVATIVES) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ID	OUTFLOW	INFLOW	TEMP	SALIN	CM-I	CM-II	INFLOW/DIST
-----------	-------	----	---------	--------	------	-------	------	-------	-------------

INCR-1	1	RB	-.09000	.00000	.00	.00	.00	.00	.00000
INCR-1	2	RB	-.09000	.00000	.00	.00	.00	.00	.00000
INCR-1	3	RB	-.08000	.00000	.00	.00	.00	.00	.00000
INCR-1	4	RB	-2.70000	.00000	.00	.00	.00	.00	.00000
INCR-1	5	RB	-3.95000	.00000	.00	.00	.00	.00	.00000
INCR-1	6	RB	-11.76000	.00000	.00	.00	.00	.00	.00000

ENDATA16

## \$\$\$ DATA TYPE 17 (INCREMENTAL DATA FOR DO, BOD, AND NITROGEN) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ID	DO	BOD	ORG-N	NH3	NO3+2
INCR-2	1	RB	.00	.00	.00	.00	.00
INCR-2	2	RB	.00	.00	.00	.00	.00
INCR-2	3	RB	.00	.00	.00	.00	.00
INCR-2	4	RB	.00	.00	.00	.00	.00
INCR-2	5	RB	.00	.00	.00	.00	.00
INCR-2	6	RB	.00	.00	.00	.00	.00

ENDATA17

## \$\$\$ DATA TYPE 18 (INCREMENTAL DATA FOR PHOSPHORUS, CHLOROPHYLL, COLIFORM, AND NONCONSERVATIVES) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ID	PHOS	CHL A	COLI	NCM
INCR-3	1	RB	.00	.00	.00	.00
INCR-3	2	RB	.00	.00	.00	.00
INCR-3	3	RB	.00	.00	.00	.00
INCR-3	4	RB	.00	.00	.00	.00
INCR-3	5	RB	.00	.00	.00	.00
INCR-3	6	RB	.00	.00	.00	.00

ENDATA18

## \$\$\$ DATA TYPE 19 (NONPOINT SOURCE DATA) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ID	BOD	ORG-N	COLI	NCM	DO
-----------	-------	----	-----	-------	------	-----	----

ENDATA19

## \$\$\$ DATA TYPE 20 (HEADWATER FOR FLOW, TEMPERATURE, SALINITY AND CONSERVATIVES) \$\$\$

CARD TYPE	ELEMENT	NAME	UNIT	FLOW	TEMP	SALIN	CH-I	CH-II
HDWTR-1	1	EST HID ABAJO FALCON	0	28.41000	17.000	.000	586.000	115.000

ENDATA20

## \$\$\$ DATA TYPE 21 (HEADWATER DATA FOR DO, BOD, AND NITROGEN) \$\$\$

CARD TYPE	ELEMENT	NAME	DO	BOD	ORG-N	NH3	NO3+2
HDWTR-2	1	EST HID ABAJO FALCON	9.40	1.80	.00	.00	.00

ENDATA21



\$\$\$ DATA TYPE 26 (WASTELOAD DATA FOR PHOSPHORUS, CHLOROPHYLL, COLIFORM, AND NONCONSERVATIVES) \$\$\$

CARD TYPE	ELEMENT	NAME	PHOS	CHL A	COLI	NCM
WSTLD-3	1	NVA.CE.GUERRERO	.00	.00	.00	.00
WSTLD-3	10	CIUDAD MIER	.00	.00	.00	.00
WSTLD-3	11	RIO ALAMO	.00	.00	750.00	238.00
WSTLD-3	15	CD. MIGUEL ALEMAN	.00	.00	.00	.00
WSTLD-3	27	DREN RANCHERIAS	.00	.00	20.00	220.00
WSTLD-3	30	RIO SAN JUAN	.00	.00	940.00	241.00
WSTLD-3	51	DREN PUERTECITOS	.00	.00	20.00	1000.00
WSTLD-3	83	DREN MORILLO	.00	.00	36.00	1488.00
WSTLD-3	90	CANAL ANZALDUAS	.00	.00	.00	.00
WSTLD-3	113	CD RIO BRAVO	.00	.00	.00	.00
WSTLD-3	195	A.N.BROWNSVILLE	.00	.00	1000.00	150.00

ENDATA26

\$\$\$ DATA TYPE 27 (LOWER BOUNDARY CONDITIONS) \$\$\$

CARD TYPE	CONSTITUENT	CONCENTRATION
ENDATA27		

\$\$\$ DATA TYPE 28 (FLOW AUGMENTATION DATA) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	AVAIL HDWS	TARGET	ORDER OF AVAIL SOURCES					
FLOW AUG	1	1.	4.0	1.	0.	0.	0.	0.	0.
FLOW AUG	2	1.	4.0	11.	0.	0.	0.	0.	0.
FLOW AUG	3	1.	4.0	30.	0.	0.	0.	0.	0.
FLOW AUG	4	1.	4.0	83.	0.	0.	0.	0.	0.
FLOW AUG	5	1.	4.0	90.	0.	0.	0.	0.	0.
FLOW AUG	6	1.	4.0	131.	0.	0.	0.	0.	0.

ENDATA28

\$\$\$ DATA TYPE 29 (SENSITIVITY ANALYSIS DATA) \$\$\$

CARD TYPE	PARAMETER	COL 1	COL 2	COL 3	COL 4	COL 5	COL 6	COL 7	COL 8
SENSIT	HDW FLOW	-50.0	50.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
SENSIT	WSL BOD	-50.0	50.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

ENDATA29

\$\$\$ DATA TYPE 30 (PLOT CONTROL CARDS) \$\$\$

ENDATA30

.....NO ERRORS DETECTED IN INPUT DATA  
 .....HYDRAULIC CALCULATIONS COMPLETED  
 .....TRIAGONAL MATRIX TERMS INITIALIZED  
 .....OXYGEN DEPENDENT RATES CONVERGENT IN 1 ITERATIONS  
 .....CONSTITUENT CALCULATIONS COMPLETED

TOTAL FLOW AUGMENTATION REQUIRED

HDWTR ELEMENT	HEADWATER IDENTIFICATION	INITIAL (CFS)	HEADWATER FLOW (CMS)	TOT. AUG. (CFS)	REQUIRED (CMS)
1	EST RIO ABAJO FALCON	1093.89	28.4100	.00	.0000

1  
 STREAM SUMMARY

RIO BRAVO, PRESA FALCON-NATAMOROS .DEPFI.UNAM.1990  
 SECCION DE INGENIERIA AMBIENTAL.

TRAVEL TIME = 5.6 DAYS  
 MAXIMUM EFFLUENT = 13.6 PERCENT  
 FLOW = 8.4970 TO 29.6841 CMS  
 DISPERSION = .4423 TO .9153 SQ M/S  
 VELOCITY = .6052 TO .8992 M/S  
 DEPTH = .98 TO 1.47 M  
 WIDTH = 14.3 TO 26.3 M  
 BOD DECAY = .00 TO .05 PER DAY  
 NH3 DECAY = .00 TO .00 PER DAY  
 SDMNT OXYGEN DMND= .00 TO .00 G/SQ M/D  
 NH3 SOURCE = .00 TO .00 G/SQ M/D  
 REAERATION = 2.39 TO 3.20 PER DAY  
 BOD SETTLING = .00 TO .00 PER DAY  
 ORGN DECAY = .00 TO .00 PER DAY  
 ORGN SETTLING = .00 TO .00 PER DAY

TEMPERATURE = 16.00 TO 19.00 DEG C  
DISSOLVED OXYGEN = 9.05 TO 9.75 MG/L

ANEXO 16. EJEMPLO DE CALCULO DE OD PARA UN ELEMENTO COMPUTACIONAL.

Se considera el primer elemento (cabecera de agua), abajo de la presa Falcón.

En un sistema semiacoplado donde el OD depende de la DBO las ecuaciones son:

$$1) L = Lu \exp(-kd x/u)$$

$$2) u \frac{dC}{dx} = -kd Lu \exp(-kd x/u) + ka (Cs - C)$$

La solución de las dos ecuaciones es la siguiente:

$$C = Cs - (Cs - Co) \exp(-ka x/u) + [(kd Lu)/(ka - kd)] \{ \exp(-ka x/u) - \exp(-kd x/u) \}$$

donde:

C = Concentración de OD a la distancia x.

Cs = Concentración de saturación de OD = 9.65 mg/L.

Co = Concentración de OD inicial = 9.4 mg/L.

ka = Constante de reaeración = 2.39 mg/L.

x/u = t (tiempo de recorrido).

x = 2000 m; u = 0.781 m/s.

kd = Constante de decaimiento de DBO = 0.01

Lu = Concentración de DBO última.

T = Temperatura = 17.09 °C.

### CALCULO DE DBO ULTIMA

$$L_u = L_s / [1 - \exp(-5 \text{ kd})]$$

$$L_u = 1.8 / [1 - \exp(-5 * 0.01)] = 360.9 \text{ mg/L.}$$

### CALCULO DE OD

$$C = 9.65 - (9.65 - 9.4) \exp(-2.39 * 2000 / 0.781) + \\ [0.01 * 360.9 / (2.39 - 0.01)] [\exp(-2.39 * 2000 / 0.781) - \\ \exp(-0.01 * 2000 / 0.781)]$$

$$C = 9.65 - 0 + 1.516 (0 - 0)$$

$$C = 9.65 \text{ mg/L}$$