

00568  
10



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA  
MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA  
(INGENIERIA DE PROYECTOS)**

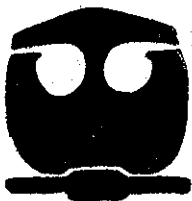
**SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE  
CORRIENTES SUPERFICIALES PARA LA  
DETERMINACION DE LIMITES MAXIMOS  
PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN  
DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA QUIMICA  
(INGENIERIA DE PROYECTOS)**

**P R E S E N T A :**

**JOSE ALFREDO ROJAS GARCIA**



**MEXICO, D. F.**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**2002**



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



**COMISION NACIONAL  
DEL AGUA**

**EL PRESENTE TRABAJO SE IMPRIMIÓ CON EL APOYO DE  
LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Jurado asignado al alumno **José Alfredo Rojas García**, para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Química (Ingeniería de Proyectos), Clave 468.

Presidente:	Dr. Julio Landgrave Romero
Primer Vocal:	Dr. Constantino Álvarez Fuster
Secretario:	M. en C. Jesús García Cabrera
Primer Suplente:	M. en C. Jorge Luis Aguilar González
Segundo Suplente:	M. en C. Alfonso Durán Preciado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

---

## Dedicatorias y agradecimientos

Este trabajo está dedicado a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, a quien agradezco el privilegio de haber sido formado profesionalmente en sus aulas....

.... y a la **Comisión Nacional del Agua**, en donde he enfocado la mayor parte de mis actividades profesionales.

Agradezco también a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido en mi formación y desempeño profesional y que, por ser tantas, no enlisto por temor a omitir alguna,

y muy especialmente a:

**Sonia**, por tu amor y apoyo incondicional....

**Noheli Rubí**, por tu cariño y motivación ...

**Víctor Hugo**, por tu cariño y motivación ...

**Victoria<sup>†</sup>**, por haberme mostrado el camino .

**Willehado**, por tu ejemplo....

**Carlos Israel**, por tu sincera amistad....

**Celestino**, por tu dirección y apoyo....

**Ambrosio**, por tu amistad, colaboración y solidaridad ...

**Fernando**, por tu amistad y apoyo....

# Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>Resumen</b>	v
<b>Introducción e Hipótesis</b>	vi
<b>Objetivos y alcances</b>	viii
<b>1. Generalidades</b>	<b>1</b>
1.1    Disponibilidad del agua en México	1
1.1.1    Cantidad y uso del agua	1
1.1.2    Calidad del agua superficial	3
1.2    Control de la calidad del agua	8
1.2.1    Parámetros de calidad del agua	8
1.2.2    Capacidad natural de los cuerpos de agua para asimilar y diluir contaminantes	12
1.2.3    Criterios de calidad del agua, CE-CCA-001/89	16
1.2.4    Control de la contaminación del agua	19
1.2.5    Norma Oficial Mexicana, NOM-001-ECOL-96	20
1.2.6    Declaratorias de Clasificación	22
<b>2. Simulación de la calidad del agua</b>	<b>23</b>
2.1    Descripción del modelo de calidad del agua	23
2.2    Estaciones de muestreo y aforo	74
2.3    Selección de parámetros a evaluar	76
2.4    Programa de monitoreo y aforo	76
2.5    Evaluación de la calidad del agua	77
2.6    Calibración del modelo de calidad del agua	78
2.7    Capacidad de asimilación y dilución de contaminantes	78
2.8    Gasto de Conservación Ecológica	80
2.9    Simulación de la calidad del agua	80

	<b>Pág.</b>
<b>3. Aplicación a la simulación de la calidad del agua del río San Juan</b>	<b>83</b>
3.1 Descripción de la cuenca del río San Juan	83
3.2 Monitoreo de la calidad del agua y aforo del río San Juan	87
3.3 Resultados de los parámetros de calidad del agua	89
3.4 Situación actual de la calidad del agua en el río San Juan	96
3.5 Calibración del modelo del río San Juan	106
3.6 Capacidad de asimilación y dilución de contaminantes del río San Juan	110
3.7 Simulación de la calidad de agua del río San Juan, bajo distintos escenarios	114
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>116</b>
4.1 Resultados de la simulación de la calidad del agua del río San Juan	116
4.2 Límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales en el río San Juan	134
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>136</b>
Bibliografía	140
Índice de figuras, gráficas y tablas	143
Nomenclatura	147
Glosario	151
Anexo 1. Gráficas de concentración de contaminantes medidos a lo largo del río San Juan	153
Anexo 2. Gráficas de concentración de contaminantes medidos en las descargas de aguas residuales vertidas al río San Juan	162
Anexo 3. Gráficas de cargas de contaminantes aportados por las descargas al río San Juan	170
Anexo 4. Gráficas de la calibración del modelo de calidad del agua para el río San Juan	177
Anexo 5. Listado de datos de entrada y salida de la corrida final de calibración del modelo	185

---

---

## Resumen

Uno de los mecanismos para conservar y mejorar la calidad del agua de los cuerpos receptores es la regulación de las descargas de aguas residuales que se vierten a ellos, estableciendo límites máximos de concentración de los contaminantes presentes y vigilando su cumplimiento. Generalmente, el establecimiento de tales límites se hace con base en la Norma Oficial Mexicana, NOM-001.

En este trabajo se comprobó la hipótesis de que la simulación de la calidad del agua sirve adecuadamente para verificar que los valores establecidos en la NOM-001, como límites máximos de concentración de contaminantes básicos admisibles en descargas de aguas residuales, permitan alcanzar las metas de calidad de la corriente receptora, utilizando como estudio de caso, el río San Juan

Se obtuvo el modelo particular de calidad del agua del río San Juan, a través de la calibración de QUAL2E, un modelo evolutivo, escrito en FORTRAN 77, desarrollado por la US Environmental Protection Agency. Se calibró el modelo con los valores de los parámetros determinados en campañas de monitoreo realizadas por la Comisión Nacional del Agua, tanto de la corriente principal como de sus afluentes, así como de las descargas de aguas residuales municipales, industriales y de retorno agrícola.

Se determinó que algunos tramos del río San Juan están tan contaminados que ya no tienen capacidad de asimilación y dilución de más contaminantes. Las metas para mejorar la calidad del agua, propuestos en la Comisión de Cuenca del río San Juan, son: en el plazo inmediato, agua apta para uso en Riego Agrícola; en el corto plazo, año 2003, agua apta para Uso Público Urbano; y en el mediano plazo, año 2006, agua apta para la Protección de Vida Acuática

Posteriormente se llevó a cabo la simulación de los siguientes escenarios de regulación de las descargas de aguas residuales, con base en la NOM-001: Las descargas cumplen con los límites máximos permisibles establecidos para ríos con uso en (a) riego agrícola, (b) fuente de abastecimiento de agua potable, y (c) protección de la vida acuática.

La simulación realizada, para los contaminantes modelados, demuestra que para alcanzar las metas de calidad del río San Juan, es necesario, además de respetar el Gasto Ecológico, el estricto cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001, por lo que todas las poblaciones y las industrias que descargan a la corriente, deberán tratar la totalidad de sus aguas residuales.

Para otras corrientes receptoras, estudios similares pueden concluir que la norma resulta insuficiente, por lo que se deberán establecer límites más estrictos a través de la simulación de escenarios adicionales.

Cabe señalar que esta metodología para la simulación de la calidad del agua es básica para la definición de estrategias de regulación de descargas, pero es necesario realizar estudios complementarios sobre la presencia de químicos tóxicos



## Introducción e hipótesis

Uno de los recursos naturales más importantes para el desarrollo sustentable del país, pero también de los más vulnerables, es el agua. Todas las actividades humanas lo requieren, en mayor o menor grado. Los principales usos del agua de las corrientes superficiales, ríos y arroyos, de acuerdo a las categorías establecidas en la normatividad vigente son: Fuente de Abastecimiento para Uso Público Urbano, UPU, Riego Agrícola, RA, y Protección a la Vida Acuática, PVA.

La disponibilidad promedio del agua en México es de 4.750 m<sup>3</sup>/año por habitante, lo que lo sitúa entre los que tienen una franca escasez del vital líquido.

Dentro del territorio nacional el agua tiene una distribución completamente irregular; estados como Sonora, Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí, presentan largos periodos de sequía, mientras que otros, como Veracruz, Tabasco, Campeche y Chiapas, tienen graves problemas de inundaciones.

Otro factor que magnifica el problema, es la contaminación de los cuerpos de agua, proveniente de descargas de aguas residuales de origen municipal, agrícola e industrial.

El Gobierno Federal, a través de la Comisión Nacional del Agua, de acuerdo con el Artículo 9 de la Ley de Aguas Nacionales, tiene a su cargo realizar las acciones necesarias para el aprovechamiento integral del agua y la conservación de su calidad.

Uno de los mecanismos para conservar y mejorar la calidad del agua, es la regulación de las descargas de aguas residuales que se vierten a los cuerpos de agua, es decir, establecer límites máximos a los contaminantes presentes en tales descargas, y vigilar su cumplimiento. La Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, establece estos límites, con base en el uso al que se destina el cuerpo de agua.

Los límites de contaminantes establecidos en la norma son de carácter general, esto es, si bien toma en cuenta el tipo y los usos del cuerpo de agua, no considera las características propias del sistema cuerpo receptor–descargas, que hacen a cada sistema diferente a otros, en cuanto a su capacidad de asimilación y dilución de contaminantes.

Por ello, la Ley de Aguas Nacionales prevé un instrumento adicional, denominado Declaratoria de Clasificación, que debe estar sustentada en un estudio técnico detallado y particular de cada cuerpo de agua, para determinar su capacidad de autopurificación, como base para calcular los límites máximos permisibles que deberán cumplir las descargas, para alcanzar con certeza los criterios o metas de calidad establecidos.

Dicho estudio detallado debe estar basado en la simulación de la calidad del agua, con un modelo que permita reproducir los perfiles de concentración de contaminantes presentes en el sistema acuático y predecir los beneficios obtenidos como resultado de la disminución de

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

la concentración de contaminantes provenientes de las descargas de aguas residuales vertidas. Por ello, este trabajo pretende demostrar la siguiente:

### **Hipótesis**

La simulación de la calidad del agua puede servir adecuadamente para verificar si los valores establecidos en la NOM-001, como límites máximos de concentración de contaminantes básicos admisibles en descargas de aguas residuales, permiten alcanzar las metas de calidad de la corriente receptora, utilizando como estudio de caso, el río San Juan

Para cuerpos de agua con problemas de contaminación más graves, en donde la aplicación de la Norma resulte insuficiente se plantean escenarios adicionales de regulación de las descargas, con límites máximos más estrictos que los establecidos en la Norma, hasta alcanzar las metas de calidad propuestas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Objetivos y alcances

Los objetivos y alcances de este trabajo son los siguientes:

### Objetivo principal

Comprobar que la simulación de la calidad del agua puede servir adecuadamente para verificar si los valores establecidos en la NOM-001, como límites máximos de concentración de contaminantes básicos admisibles en descargas de aguas residuales, permiten alcanzar las metas de calidad de la corriente receptora, utilizando como estudio de caso, el río San Juan.

### Objetivos específicos

1. Establecer la metodología para evaluar los valores máximos de concentración de contaminantes en aguas residuales, contenidos en las descargas a corrientes superficiales, que permiten alcanzar las metas de calidad del agua del cuerpo receptor, a través de la aplicación de un modelo de calidad del agua
2. Determinar la situación de la calidad del agua del río San Juan, y sus principales fuentes de contaminación.
3. Obtener el modelo de calidad del agua del río San Juan, con base en los resultados de monitoreo y aforo, realizados por la Comisión Nacional del Agua.
4. Obtener los valores máximos de concentración de los contaminantes modelados, presentes en las descargas al río San Juan, a través de la simulación de escenarios de regulación y control de la contaminación

## Alcances

1. Modelar y Simular la calidad del agua del río San Juan desde aguas arriba del poblado de Aculco, en el estado de México, hasta la presa Zimapán, en Hidalgo, con base en los resultados de monitoreo y aforo, realizados por la Comisión Nacional del Agua.
2. Los Límites Máximos Permisibles determinados a través de la simulación de escenarios de regulación de la contaminación, corresponden únicamente a los contaminantes modelados, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Grasas y Aceites, Sólidos Suspendidos y Sólidos Sedimentables, presentes en las descargas al río San Juan.

# 1.

## Generalidades

### 1.1 Disponibilidad del Agua en México

El indicador de disponibilidad de agua en México es de  $4,841 \text{ m}^3/\text{año}$ <sup>35</sup>. Sin embargo, este indicador no refleja la disponibilidad real de agua existente para todos los mexicanos, si se toma en cuenta la cantidad y la calidad del recurso.

#### 1.1.1 Cantidad y uso del agua

Uno de los principales factores que limitan la disponibilidad del agua es su distribución irregular en el territorio nacional. La mayor escasez de agua se tiene en los estados de Baja California, Sonora, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León y San Luis Potosí, así como en la Ciudad de México y en la cuenca Lerma - Chapala.

Por el contrario, en el sureste de México, algunos estados como Veracruz, Tabasco, Chiapas y Campeche, sufren graves inundaciones debido a los fenómenos meteorológicos que año con año azotan la región.

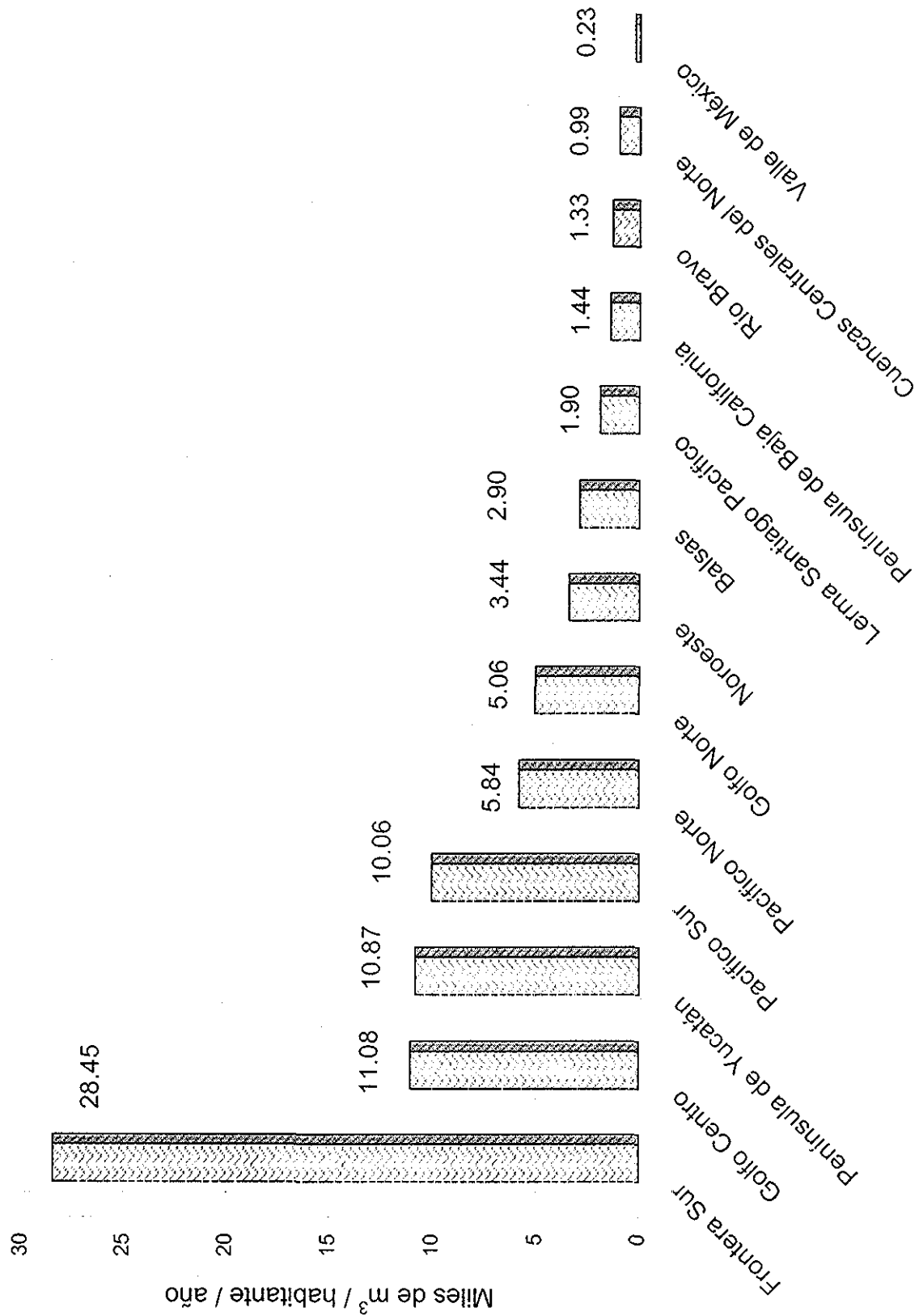
Un elemento adicional que aumenta la insuficiencia de agua en nuestro país es la distribución también irregular de los grandes usuarios, esto es, los núcleos importantes de población, áreas de infraestructura para riego y polos de desarrollo industrial. Sumado a lo anterior, en algunos lugares se tienen limitaciones para el uso del agua debido a su mala calidad<sup>27</sup>.

Se han presentado ya problemas entre estados vecinos por el uso del agua, como es el caso de Nuevo León y Tamaulipas, que requieren disponer del agua, en cantidad y calidad suficientes para su desarrollo<sup>26</sup>.

En la gráfica 1.1 se presenta el volumen de agua por habitante, de las regiones del país<sup>5</sup>. La región Frontera Sur tiene la mayor disponibilidad,  $28,450 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ . Muy por debajo se encuentran las regiones Golfo Centro, Península de Yucatán y Pacífico Sur, con disponibilidad alrededor de  $10,000 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ . Otras regiones mostradas, cuentan con disponibilidad menor de  $5,840 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ , sobresaliendo el Valle de México, con apenas  $230 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ .

La grave escasez de agua en el Valle de México, los problemas existentes de contaminación del agua, y el cuantioso desperdicio de agua, conducen a que el mayor problema de contaminación de la Ciudad de México, es el del agua, como fue reconocido en el VIII Congreso Internacional de CONIECO, en septiembre de 2000<sup>15</sup>.

Gráfica 1.1 Disponibilidad promedio de agua por habitante, en las Regiones Hidrológicas de México<sup>5</sup>.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Se estima que en año 2000 se extrajeron de los ríos, lagos y acuíferos del país 72 km<sup>3</sup> para los principales usos consuntivos. Este volumen representa el 15% de la disponibilidad natural media nacional (escurrimiento superficial virgen y recarga de acuíferos), y de acuerdo con la clasificación de la ONU el recurso del país se considera como sujeto a presión moderada. Sin embargo, en las zonas del centro, norte y noroeste, este indicador alcanza un valor de 44%, lo que convierte al agua, en un elemento sujeto a alta presión y limitante del desarrollo

El uso consuntivo predominante en el país es el agrícola, que representa el 8% de la extracción, seguido por el uso público urbano con el 12 %.

Tabla 1 1 Extracciones brutas de agua para los principales usos consuntivos.

USO	Volumen Total (km <sup>3</sup> )	Porcentaje (%)
Agrícola	56.16	78
Público	8.64	12
Industria	5.76	8
Pecuario	1.44	2
Total	72	100

Fuente: Programa Nacional Hidráulico 2001 – 2006<sup>35</sup>

Los principales consumidores de agua para uso agrícola se encuentran en los estados del norte y noroeste y en el Bajío. Las extracciones de agua para la industria se localizan principalmente, en las ciudades de México y Monterrey en la cuenca del río Lerma; y las de generación de energía eléctrica en el sureste del país.

En las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey se concentra alrededor del 50% de las extracciones para uso público urbano.

### 1.1.2 Calidad del agua superficial

La calidad del agua se mide a través del conjunto de características físicas, químicas y biológicas que la hacen adecuada o inadecuada para un uso específico. La evaluación de la calidad del agua permite el conocimiento de la situación en que se encuentra, en relación con su calidad natural, los efectos humanos y los usos a los que va a destinarse, en particular aquellos que pueden afectar la salud humana o la vida acuática<sup>9</sup>

Con el fin de determinar la calidad del agua, así como los efectos de las aguas residuales descargadas a los cuerpos de agua superficiales, la Comisión Nacional del Agua, lleva a cabo, desde 1974, el monitoreo sistemático de la calidad del agua en los principales cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país, a través de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNM) y de estudios adicionales.

En el 2000, la CNA contó con 744 estaciones de muestreo, de las cuales 238 estaciones pertenecen a la Red Primaria para aguas superficiales, 53 a zonas costeras y 229 estaciones están propuestas para la Red Secundaria, 56 en Estudios Especiales, 117 en la Red de Referencia Subterránea y 51 en la Red Primaria Subterránea, distribuidas a lo largo de la República Mexicana.

La determinación de la calidad del agua, para la RNM, se hace mediante el análisis de 18 parámetros de calidad del agua, los cuales consideran características físicas, químicas y microbiológicas. En estudios especiales, se considera además, la determinación de metales pesados y sustancias tóxicas. El ICA toma valores de 0 a 100. Valores cercanos a 0 indican un alto grado de contaminación y valores cercanos a 100 indican muy buena calidad del agua.

En La figura 1.1 “Calidad del Agua Superficial en el Ámbito Nacional, en 2000”<sup>22</sup>, se muestra la calidad del agua de 540 cuerpos receptores monitoreados por la CNA en el año 2000, utilizando colores para mostrar el grado de contaminación, de acuerdo con el ICA. Los resultados de la evaluación muestran lo siguiente:

El 27% de los cuerpos de agua presentan una calidad satisfactoria que posibilita su uso para prácticamente cualquier actividad; 48% se encuentran poco contaminados, lo que restringe el uso directo del agua en ciertas actividades y 25% se encuentra contaminado o altamente contaminado, haciendo difícil su uso directo en casi cualquier actividad.

En lo particular, 6% de los cuerpos de agua presentan excelente calidad, lo que los hace aptos para cualquier uso; sin embargo, para el abastecimiento y consumo humano será requerido el tratamiento de potabilización, al menos la desinfección, para asegurar la calidad bacteriológica y el cumplimiento de la normatividad en materia de agua potable.

El 21% de los cuerpos de agua muestran una calidad aceptable; en el caso de fuente de abastecimiento, se requeriría una planta de potabilización con tratamiento convencional, y en el resto de los usos del agua, la calidad es apta y satisfactoria.

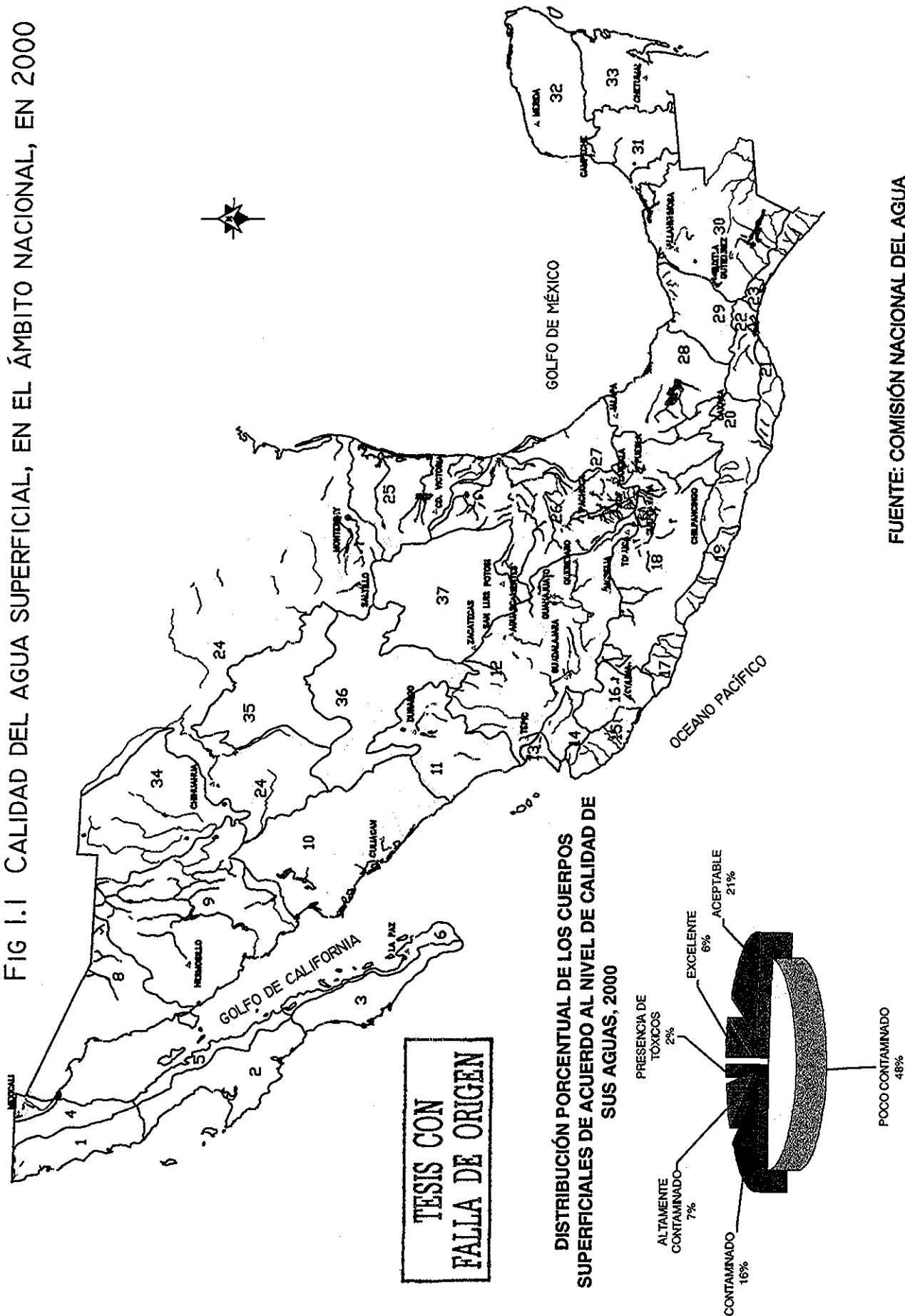
El 48 % de los cuerpos de agua monitoreados resultó poco contaminado, si bien, en caso de utilizarse como fuente de abastecimiento, requeriría un tratamiento avanzado; en caso de uso recreativo, es apta cuando no se tiene contacto directo, pero no es recomendable para contacto directo; para la acuicultura es apta en general, pero no lo es para ciertos organismos acuáticos sensibles, como algunas especies de trucha y bagre; además, se considera apta para la mayoría de los usos industriales así como para riego de casi cualquier cultivo, excepto hortalizas.

El 25% de los cuerpos de agua están contaminados o altamente contaminados, lo que impide su utilización directa en prácticamente cualquier actividad; en contados casos se presenta alguna sustancia tóxica.

En el diagrama de pastel que aparece en el mapa se muestra el porcentaje de cuerpos de agua que resultaron en cada una de las categorías de calidad del agua mencionadas.

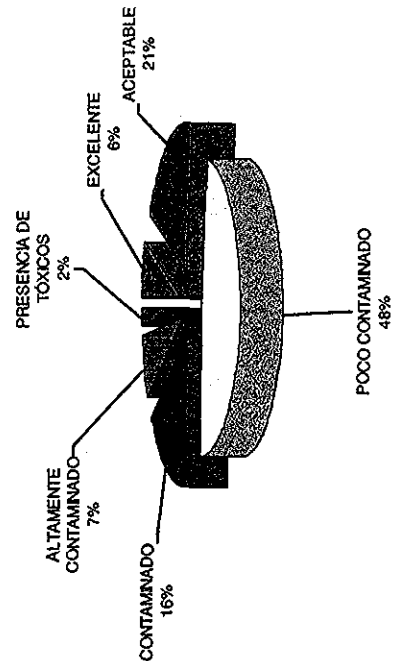


FIG 1.1 CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL, EN EL ÁMBITO NACIONAL, EN 2000



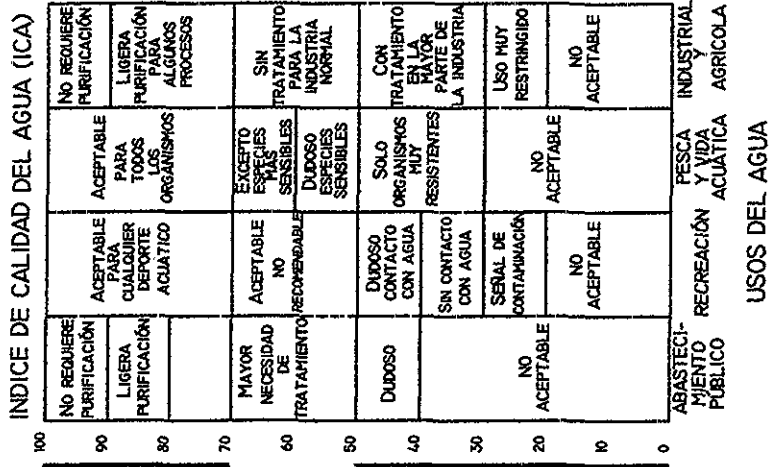
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS CUERPOS  
SUPERFICIALES DE ACUERDO AL NIVEL DE CALIDAD DE  
SUS AGUAS, 2000**



FUENTE: COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

ESCALA DE CALIFICACION GENERAL DE LA CALIDAD DEL AGUA



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

- REGIONES HIDROLÓGICAS
1. BAJA CALIFORNIA NOROESTE
  2. BAJA CALIFORNIA CENTRO OESTE
  3. BAJA CALIFORNIA SURESTE
  4. BAJA CALIFORNIA NOROESTE
  5. BAJA CALIFORNIA CENTRO ESTE
  6. BAJA CALIFORNIA SURESTE
  7. BAJA CALIFORNIA SURESTE
  8. BAJA CALIFORNIA SURESTE
  9. BAJA CALIFORNIA SURESTE
  10. SONORA SUR
  11. SINALOA
  12. PRESIDIO-SAN PEDRO
  13. LERMA-SANTIAGO
  14. AMEICA
  15. COSTA DE JALISCO
  16. ARMERIA-COAHUYANA
  17. COSTA DE MICHOACAN
  18. BALSAS
  19. COSTA GRANDE
  20. COSTA CHICA-RIO VERDE
  21. COSTA DE OAXACA
  22. TEHUANTEPEC
  23. COSTA DE CHIAPAS
  24. SIERRA
  25. PANAMA
  26. GUAYMAS
  27. GUAYMAS
  28. TUXTLA
  29. COAHUILCO
  30. GRUAMIA-ISMAGINTA
  31. YUCATAN-OESTE
  32. YUCATAN-NORTE
  33. YUCATAN-ESTE
  34. CUENCAS CERRADAS DEL NORTE
  35. NAZAS-AGUANAVAL
  36. EL SALADO
  37. EL SALADO

- EXCELENTE; 100 - 85
- ACEPTABLE; 84 - 70
- POCO CONTAMINADO; 69 - 50
- CONTAMINADO; 49 - 30
- ALTAMENTE CONTAMINADO; 29 - 0
- PRESENCIA DE TOXICOS
- SIN DATO
- CAPITALES ESTATALES

Los principales contaminantes de los cuerpos de agua corresponden a materiales del tipo orgánico y bacteriológico. Sin embargo, hay casos en que la contaminación es causada por nutrientes y tóxicos como metales pesados.

En materia de tratamiento de aguas residuales, el país cuenta con 1018 sistemas municipales con una capacidad instalada de 75.9 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 793 se encuentran en operación con un caudal tratado de 45.9 m<sup>3</sup>/s. Mediante sistemas de alcantarillado se recolectan 200 m<sup>3</sup>/s, por lo que cerca de 23% de las aguas residuales recolectadas, procedentes de localidades urbanas a nivel nacional reciben tratamiento.

Existen también 1479 plantas de tratamiento industriales, con una capacidad de diseño de 41.5 m<sup>3</sup>/s, de las cuales operan 1399 con un gasto de 25.3 m<sup>3</sup>/s.

La mayoría de los cuerpos de agua presenta una calidad que se considera adecuada para su aprovechamiento, bajo ciertas condiciones de tratamiento, en sus diferentes usos. Sin embargo, la mayoría muestra una tendencia a incrementar su índice de contaminación, como consecuencia del crecimiento de la población y a las actividades económicas inherentes.

Los principales contaminantes de las aguas nacionales superficiales son bacterias, materia orgánica, grasas y aceites, ortofosfatos, sólidos disueltos y sustancias activas al azul de metileno.

La reutilización del agua se constituye como una alternativa de gran relevancia en los estados áridos y semiáridos del país, donde uno de los principales problemas es la escasez del recurso.

Actualmente son aprovechadas en el riego agrícola, las aguas crudas de origen municipal en los Valles del Yaqui, Mayo y Guaymas, en Sonora, Chiconautla en el Estado de México, Tula, Alfajayucan y Tulancingo en Hidalgo, Valle de Juárez en Chihuahua y Valsequillo en Puebla, entre otros.

De igual forma, el uso del agua residual tratada en la planta industrial mexicana tiene dos vertientes, una es la toma del agua residual tratada municipal y la otra se refiere a la reutilización del agua generada por la propia industria. Existen ejemplos en la Comisión Federal de Electricidad, PEMEX y Altos Hornos de México, que recurren a la primera alternativa; la otra alternativa es utilizada principalmente por industrias termoeléctricas, de celulosa y papel, química, acera, y petroquímica, que la utilizan principalmente para sus procesos, sistemas de enfriamiento o calderas<sup>35</sup>.

## 1.2 Control de la Calidad del Agua

### 1.2.1 Parámetros de calidad del agua

La calidad del agua se determina a través de la medición de los contaminantes presentes y comparando estos valores medidos con los valores de referencia o criterios de calidad.

Para tener la certeza de que estas comparaciones se realizan objetivamente, se utilizan los parámetros de calidad del agua, que son valores determinados sistemáticamente, siguiendo un procedimiento estandarizado tanto en el muestreo y manejo de las muestras, como en el análisis en campo y en laboratorio.

En la tabla 1.2, se presenta una aproximación de los parámetros que deben determinarse en función del tipo de agua, sin olvidar que en la selección final, depende de varios factores, como son, los contaminantes presentes, el tipo de descargas, los giros industriales de las empresas que descargan al cuerpo de agua, los agroquímicos utilizados, y los usos a los que se destina el recurso, entre otros.

Tabla 1.2 Parámetros más frecuentemente determinados en las muestras de agua

Parámetro	Unidades	Agua de río	Agua potable	Agua residual cruda	Agua residual tratada
pH	Unid. de pH	✓	✓	✓	✓
Temperatura	°C	✓	✓	✓	
Color	Unid. Pt-Co.	✓	✓		
Turbiedad	Esc. .Silice	✓	✓		
Sabor			✓		
Olor		✓	✓		
Sólidos totales	mg/L	✓	✓		
Sólidos sedimentables	mL/L			✓	
Sólidos suspendidos	mg/L			✓	✓
Conductividad	µmhos/cm	✓	✓		
Radioactividad	Bq/L	✓	✓		
Alcalinidad	mg/L	✓	✓	✓	
Acidez	mg/L	✓	✓	✓	✓
Dureza	mg/L	✓	✓		
Oxígeno disuelto	mg/L	✓	✓		✓
Demanda bioq. de oxígeno	mg/L	✓		✓	✓
Demanda química de oxígeno	mg/L			✓	✓
Nitrógeno orgánico	mg/L			✓	✓
Nitrógeno amoniacal	mg/L	✓		✓	✓
Nitrógeno de nitritos	mg/L	✓	✓	✓	✓
Nitrógeno de nitratos	mg/L	✓	✓	✓	✓
Cloruros	mg/L	✓			
Fosfatos	mg/L	✓		✓	✓
Detergente sintético	mg/L	✓		✓	✓
Coliformes	NMP/100 mL	✓	✓		

Con el objeto de tener mayor claridad, se incluye en este capítulo una descripción breve de los parámetros más usuales

**Sólidos.** - Las descargas domésticas contienen grandes cantidades de sólidos que en su mayoría son de naturaleza orgánica. Las descargas de aguas residuales de la industria pueden contener una amplia variedad de impurezas suspendidas, tanto orgánicas como inorgánicas. Durante la recolección de las aguas residuales, se arrastran sólidos inorgánicos. Las aguas de lluvia arrastran gran cantidad de sólidos.

Las pruebas estándar que comúnmente se desarrollan para la determinación de sólidos, son de tipo gravimétrico.

La prueba de sólidos totales cuantifica los sólidos presentes en una muestra de agua, suspendidos y disueltos; orgánicos e inorgánicos. Este parámetro se determina evaporando una muestra de agua a 103-105 °C hasta lograr un peso constante de residuo seco. La cantidad total de residuo no evaporado se expresa en miligramos de materia seca por litro de agua residual.

Los sólidos suspendidos totales pueden determinarse filtrando una muestra de agua; secando el retenido en un filtro a 103-105 °C hasta un peso constante y determinando la masa del residuo conservado en el filtro. La cantidad de sólidos, en peso seco, que atraviesa el filtro, corresponde a los sólidos disueltos totales.

La filtración de una muestra de agua no divide exactamente a los sólidos en suspendidos y disueltos. Algunos coloides podrían pasar el filtro y ser medidos como disueltos o algunos disueltos podrían ser adsorbidos por el filtro. Por ello, pueden clasificarse en filtrables y no filtrables. Una vez que las muestras han sido secadas y pesadas, el contenido orgánico para sólidos totales y suspendidos, puede determinarse incinerando las muestras a una temperatura de 550 ±50°C durante 15 minutos. La fracción orgánica se volatilizará convirtiéndose a dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases.

Por lo tanto, el material que se conserve representará a la materia inorgánica o sólidos totales fijos, y sólidos suspendidos fijos. Por diferencia se calculan los sólidos totales volátiles y los sólidos suspendidos volátiles.

**Materia orgánica.** - La materia orgánica comúnmente está compuesta por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno y en algunos casos, por nitrógeno.

Otros elementos importantes presentes en menor cantidad son el azufre, hierro y fósforo. Los principales grupos de macromoléculas presentes en la materia orgánica de las aguas residuales son las proteínas, los polisacáridos y las grasas.

Muchos compuestos orgánicos son solubles en agua. Gran proporción de ellos proviene del proceso de transformación de sólidos orgánicos de origen natural o de las actividades humanas, mientras que otra parte está compuesta por sustancias

orgánicas sintéticas que el hombre desecha. Los compuestos orgánicos disueltos en agua se dividen en dos categorías generales: biodegradables y no biodegradables.

La materia orgánica biodegradable consiste de compuestos orgánicos que pueden ser utilizados como nutrientes por los microorganismos bajo condiciones adecuadas en el transcurso de un intervalo de tiempo relativamente corto, equivalente al tiempo de retención del contaminante en el sistema

En forma disuelta son producto de la descomposición microbiana de tejidos de plantas o animales arrastrados por las corrientes o de las descargas de aguas residuales. Las poblaciones microbianas llevan a cabo la utilización de compuestos orgánicos disueltos mediante uno de los siguientes procesos:

Oxidación. Adición de oxígeno al medio que contiene la materia orgánica al ser transformada por los microorganismos. Reducción. Sustracción de oxígeno del medio que contiene a la materia orgánica.

La cantidad de oxígeno consumida durante las reacciones metabólicas responsables del tratamiento biológico de las aguas residuales, es una medida de la cantidad de materia orgánica susceptible de ser eliminada por microorganismos. Esta medida indirecta de la cantidad de materia orgánica presente en el agua se denomina Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

La DBO se mide determinando el oxígeno consumido por los microorganismos en una muestra de agua residual contenida en una botella sin paso de aire, incubada en la oscuridad a 20 °C por cinco días. La luz debe evitarse para prevenir crecimientos de algas que podrían producir oxígeno en la botella.

Existen sustancias orgánicas que por sus características constructivas son resistentes al tratamiento biológico. Un ejemplo es el compuesto de detergentes, alquil benceno sulfonado (ABS) cuyo problema disminuye con la utilización de compuestos alquil lineal sulfonados.

La degradación biológica de algunos compuestos orgánicos es tan lenta que se consideran no biodegradables, tal es el caso de aguas que contienen celulosa.

Sustancias como los plaguicidas y descargas industriales específicas se consideran no biodegradables por ser tóxicos a los organismos.

Una forma más rápida de obtener un valor indicativo del contenido de materia orgánica es realizando la prueba de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En tres horas se pueden obtener la cantidad de materia orgánica susceptible de oxidación en un medio ácido. Es decir, incluye la oxidación de la parte biodegradable medida mediante la DBO y además, la de aquella materia orgánica resistente que se considera no biodegradable por no ser posible su eliminación mediante el tiempo y las condiciones dadas en un proceso biológico.

Nutrientes.- Los elementos esenciales para el crecimiento y reproducción de los organismos presentes en los procesos biológicos son conocidos como nutrientes. Aunque una gran variedad de minerales y elementos traza caen dentro de esta clasificación, los más importantes son carbono, nitrógeno y fósforo.

El nitrógeno se encuentra en cuatro formas:

Nitrógeno orgánico Como proteínas, aminoácidos y urea.

Nitrógeno amoniacal Nitrógeno como sales de amoniaco; por ejemplo  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , o como amoniaco libre.

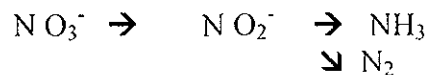
Nitritos Una etapa intermedia de oxidación que normalmente se presenta en grandes cantidades.

Nitratos Producto final de la oxidación del nitrógeno.

La oxidación de los compuestos de nitrógeno, llamada nitrificación, se expresa de la siguiente forma:



La reducción del nitrógeno se llama desnitrificación, puede invertir el proceso:



Las concentraciones relativas de las diferentes formas de nitrógeno son indicativas de la naturaleza de la muestra. Si el agua contiene altas concentraciones de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal y bajas concentraciones de nitritos y nitratos, es indicio de una reciente contaminación. Por otro lado, una muestra sin nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal y poca cantidad de nitratos, indica que el proceso de nitrificación se llevó a cabo y su contaminación no es reciente.

El fósforo es requerido para la reproducción y síntesis de nuevos tejidos celulares y su presencia es necesaria para el tratamiento biológico. El agua residual doméstica es relativamente rica en fósforo (como fosfatos), debido a su alto contenido de desechos humanos y detergentes sintéticos.

Temperatura.- La temperatura tiene un efecto importante sobre la velocidad de las reacciones bioquímicas y la solubilidad de los gases. A bajas temperaturas la rapidez de las actividades biológicas (consumo de nutrientes, crecimiento y reproducción) son más lentas. El grado de saturación de oxígeno molecular es una función de la temperatura

Alcalinidad - La alcalinidad del agua es una medida de su capacidad para neutralizar un ácido. Los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ) son las principales formas de alcalinidad. Aunque tienen su origen mineral también pueden generarse por reacciones tanto del dióxido de carbono atmosférico como del producido durante las reacciones bioquímicas de eliminación del material orgánico, las cuales utilizan iones hidrógeno e hidróxidos, de aquí que las cantidades relativas de las especies de alcalinidad sean dependientes del pH.

### 1.2.2 Capacidad natural de los cuerpos de agua para asimilar y diluir contaminantes

Los elementos químicos tienden a circular en la biósfera por vías características del ambiente a los organismos y de los organismos nuevamente al ambiente<sup>29</sup>. Estas trayectorias reversibles se conocen como ciclos biogeoquímicos. Para cada ciclo es conveniente designar asimismo dos reservorios, esto es, el de depósito que es un componente grande, de movimiento lento y, por regla general, no biológico, y el de intercambio, que es una porción más pequeña pero más activa que se desplaza rápidamente entre los organismos y su medio inmediato. Desde el punto de vista de la biósfera como un conjunto, existen dos tipos principales de ciclos: los de tipo gaseoso, en los que el depósito está en la atmósfera o la hidrosfera, y los de tipo sedimentario, en los que el depósito está en la corteza terrestre.

El nitrógeno está presente en los ambientes acuáticos en diversas formas. El mayor reservorio de nitrógeno, el aire, está disponible a los organismos acuáticos sólo a través de la actividad de algunas pocas especies de bacterias y algas azul-verdes que son capaces de fijar esta fuente en una forma disponible para el resto de la biota. El ciclo del nitrógeno es, en realidad, un ciclo doble, esto es, un ciclo de oxidación y reducción del nitrógeno por plantas típicas, animales y descomponedores, y un ciclo mayor, acoplado al ciclo menor, por la acción de los organismos fijadores de nitrógeno y bacterias desnitrificantes.

Ocasionalmente el nitrógeno es limitante de la producción vegetal y es el segundo, después del fósforo, en la mayoría de los ecosistemas acuáticos. En el agua, las formas de interés incluyen nitrógeno orgánico disuelto y particulado, que son varias formas reducidas que varían desde aminas simples a proteínas complejas en materiales muertos y vivos; el nitrógeno amoniacal, que es la forma más reducida, y es producto de la descomposición orgánica; y los nitratos y nitritos, que son las formas oxidadas resultantes de la nitrificación del amoniacal.

El nitrógeno amoniacal se encuentra comúnmente en pequeñas cantidades (menos de 1 mg/L) en aguas no contaminadas y bien oxigenadas, pero puede alcanzar 5 o 10 mg/L en el hipolimnion anaerobio de un lago eutrófico. Elevadas concentraciones de amoniacal cuando se encuentra en su forma no disociada ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) son tóxicas. La proporción relativa del hidróxido de amonio tóxico se incrementa con el pH.



Los nitratos generalmente se encuentran en pequeñas concentraciones en las aguas naturales. Las concentraciones naturales rara vez exceden los 10 mg/L y, frecuentemente, son inferiores a 1 mg/L, especialmente durante periodos de elevada producción primaria. Elevadas concentraciones de nitratos (mayores de 20 mg/L) pueden ser dañinas para mamíferos jóvenes.

El fósforo de las aguas está presente en diversas formas solubles y particuladas, incluyendo el fósforo ligado orgánicamente, los polifosfatos inorgánicos y los ortofosfatos inorgánicos. Los ortofosfatos son generalmente iones de ácido fosfórico.

A concentraciones de pH naturales, los iones fosfato mono y dihidrogenados son dominantes. Debido a que el fósforo es un elemento biológicamente activo, circula a través de muchos estadios en el ecosistema acuático, y su concentración en cualquiera de estos depende de su grado de síntesis metabólica o descomposición que ocurre en el sistema; por ejemplo, bajas concentraciones son de esperarse cuando se desarrolla una actividad fotosintéticamente elevada.

Las fuentes naturales de fósforo derivan del lavado de rocas fosfatadas y de la descomposición de la materia orgánica. Fuentes adicionales son los fertilizantes artificiales, aguas negras domésticas y detergentes. El fósforo se elimina del agua por adsorción a las arcillas y precipitación química al sedimento.

El fósforo es el elemento que genera una mayor estimulación a la producción vegetal y por ello muchas veces se determina con relación a la producción excesiva y los problemas de eutroficación. En un momento dado, el elemento limitante del proceso es el elemento presente en la concentración más baja relativa a la demanda. La relación promedio de tres elementos importantes en las macrófitas acuáticas y en las algas es 40 C: 7 N: 1 P por 100 g de peso seco.

Aunque el fósforo es el elemento que más frecuentemente resulta ser limitante, ocasionalmente el nitrógeno y rara vez el carbono, limitan la producción vegetal. La concentración total de fósforo en aguas no contaminadas es usualmente inferior a 0.1 mg/L y de ortofosfatos inferior a 0.01 mg/L.

El azufre tiene su reservorio principal en la tierra y uno de menor medida en la atmósfera. El sulfato, al igual que el nitrato y el fosfato, es la forma principal disponible que es reducida por los autótrofos e incorporada a proteínas, siendo el azufre un componente indispensable de determinados aminoácidos. Cuando se forman sulfuros de hierro en los sedimentos, el fósforo es convertido de una forma insoluble a una soluble haciéndose disponible a los organismos vivos. En condiciones de anoxia, las bacterias reducen el azufre a ácido sulfhídrico, el cual pasa a la atmósfera. El ecosistema no necesita tanto azufre como nitrógeno y fósforo, ni es con tanta frecuencia limitativo para el crecimiento de las plantas y los animales; no obstante, el ciclo del azufre es un ciclo capital en el esquema conjunto de la producción y la descomposición. El azufre casi siempre está presente en cantidades adecuadas para los requerimientos de la síntesis proteica.

Las capas aerobias contienen sulfato, mientras que el ácido sulfhídrico tiende a acumularse en las capas anóxicas profundas. La mayoría del azufre de los lagos se almacena como sulfatos y ácido sulfhídrico en el agua, y como sulfuro en los sedimentos. La fracción empleada por los organismos no afecta de manera importante el ciclo.

En el proceso de estabilización del material orgánico que se realiza a lo largo de una corriente de agua intervienen diversos factores físicos, químicos y biológicos de manera, simultánea o alternativa. Los más importantes son los siguientes:

La dilución dispersa y reduce la concentración de los contaminantes, reduciendo la DBO y elevando la concentración de oxígeno disuelto.

La sedimentación de partículas contaminantes presentes en el agua es un factor significativo en la reducción de su riesgo. La sedimentación hace posible la remoción de una proporción importante de DBO. Una vez que se sedimenta, el lodo orgánico bentónico se comienza a descomponer principalmente en forma anaerobia, por lo cual no hay un consumo del oxígeno del agua. Junto con las partículas, se sedimentan bacterias y otros microorganismos asociados lo que representa una reducción de patógenos. Las partículas que floculan, arrastran microorganismos al fondo participando en el proceso de autodepuración del agua.

El grado de agitación del agua debido a su velocidad, accidentes del terreno y a la acción del viento constituye un factor importante de oxigenación del agua. En la superficie del agua contaminada, que generalmente esta insaturada de oxígeno, se forma una delgada capa saturada del gas por el contacto con el aire atmosférico. Debido a la turbulencia, esta capa saturada se mezcla continuamente con el resto del agua contaminada, favoreciendo su reoxigenación. Este proceso es más eficiente que el proceso natural de difusión que es sumamente lento debido a que se lleva a cabo molécula a molécula. Los ríos que presenta rápidos y caídas de agua poseen una capacidad de reoxigenación mayor y pueden degradar el material contaminante más rápidamente. Sin embargo, hay que aclarar que un exceso de turbulencia causa la resuspensión de los sedimentos y con ello la elevación de la DBO.

La radiación ultravioleta tiene un efecto bactericida importante. La luz es un factor determinante para el proceso fotosintético que produce oxígeno por parte del fitoplancton y las macrofitas acuáticas que contribuyen a la degradación de la DBO y a mantener saturada la columna de agua.

Una elevación de la temperatura del agua incrementa la velocidad de las reacciones metabólicas, lo que acelera la contaminación de los compuestos orgánicos del medio. Sin embargo, debido a esta aceleración de los procesos bioquímicos disminuye con mayor rapidez la concentración de oxígeno disuelto en el agua y su capacidad almacenadora. Otros efectos de la variación de la temperatura en la autodepuración pueden derivar de la estratificación térmica provocada por la diferencia de densidad

resultante del calentamiento diferencial de las capas de agua superficial. Este proceso retarda la degradación del material orgánico de las capas profundas que por no poder mezclarse con las superficiales se ven desprovistas rápidamente de oxígeno disuelto.

Algunas actividades químicas y fisicoquímicas pueden interferir con los procesos de autodepuración. La oxidación del hierro bivalente para formar hierro trivalente tiene una doble implicación. Por un lado requiere de oxígeno para llevarse a cabo, por lo cual disminuye el consumo de DBO; sin embargo, como forma flóculos, remueve eficientemente bacterias y partículas de diversa naturaleza en forma asociada cuando sedimenta.

Las principales transformaciones que se presentan durante el proceso de autodepuración son de tipo bioquímico. En la producción de energía biológica, los compuestos orgánicos más variados experimentan la acción de enzimas bacterianas y de otros organismos que los transforman en células vivas o son oxidadas vía la respiración. Muchas de las enzimas producidas por microorganismos son secretadas al exterior, las cuales transforman la materia particulada en disuelta a través de la membrana celular. Estas transformaciones implican reacciones tanto de oxidación como de reducción, siendo las primeras más rápidas que las segundas. La reacción metabólica más importante es la fotosíntesis, ya que permite liberar oxígeno al medio, como producto secundario, el cual ayuda a mantener su concentración a niveles adecuados para la vida aerobia.

La depredación constituye una actividad de gran importancia relacionada con la limitación de las poblaciones de las especies depredadas y mantenimiento de su actividad. Asociado a la formación de densas poblaciones bacterianas en los lugares en donde existe una concentración de material orgánico, aparecen poblaciones de protozoos ciliados depredadores de bacterias. Estos mantienen una población estable de bacterias en crecimiento activo, lo que permite que la tasa de degradación del material orgánico sea elevada. La presencia de virus parásitos de bacterias patógenas contribuye a la eliminación de patógenos del medio incrementando su tasa de autodepuración.

Existe una amplia diversidad de sustancias antibióticas y toxinas que son producidas por bacterias, hongos, algas y protozoos durante su metabolismo. Este tipo de sustancias favorecen el desarrollo de las poblaciones productoras del antibiótico o la toxina, limitando el desarrollo de otras poblaciones de organismos competidores. Si el efecto es importante se presenta una disminución en la capacidad autodepuradora del cuerpo de agua. Adicionalmente, muchas de estas sustancias son nocivas para organismos superiores como peces, ganado y el hombre.

Algunas bacterias y protozoos secretan gran cantidad de sustancias gelatinosas que pueden originar flóculos de materia coloidal con propiedades adsorbentes y aglutinantes. También hay organismos que forman flóculos con la materia orgánica coloidal sin necesidad de secretar sustancias gelatinosas. De esta manera, una

cantidad importante de materia orgánica coloidal y microorganismos forman flóculos que son eliminados al fondo, en donde son degradados.

### **1.2.3 Criterios de calidad del agua, CE-CCA-001/89**

El instrumento de referencia de la calidad de los cuerpos de agua en México son los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, CECA-001/89<sup>34</sup>, publicados el 2 de diciembre de 1989, en el Diario Oficial de la Federación, por la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Se establece que estos criterios deben observarse en la aplicación de la política general de ecología, el aprovechamiento racional del recurso, la prevención y control de la contaminación del agua, y la protección de la flora y la fauna acuáticas.

Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua precisan los niveles permisibles de los parámetros o sustancias que se encuentran en el agua. Estos criterios sirven como base para calificar a los cuerpos de agua, como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, para uso en la acuicultura, o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática. Estos parámetros constituyen la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua en los casos mencionados. En la tabla 1.3 se muestran los criterios más frecuentemente utilizados.

Tabla 1.3 Criterios ecológicos de calidad el agua, CECA-001/89

Parámetro*	Fuente de abastecimiento de agua potable	Recreativo con contacto primario	Riego agrícola	Pecuario	Protección de la vida acuática	
					Agua dulce	Agua marina (áreas costeras)
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	400				(IV)	(IV)
Arsénico (II)	0.05 (III)	0.05	0.1	0.2	0.2 (como As III)	0.04 (como As III)
Boro (II)	1	1	0.7 (XI)	5		0.009 (XII)
Cadmio (II)	0.01	0.01	0.01	0.02	(XIII)	0.0009
Cianuro (como CN <sup>-</sup> )	0.2	0.02	0.02	0.02	0.005 (XII)	0.001 (XIV)
Cloro residual					0.011 (XII)	0.0075 (XII)
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250	250	147.5	250		
Cobre	1	1	0.2	0.5	(XVII)	0.003 (XIV)
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	500	500	1000		(XVIII)	(XVIII)
Color (Unid. Escala Pt-Co)	75	75	C N + 10	C N + 10	(XIX)	(XIX)
Conductividad eléctrica $\mu$ mhos	1000	1000	1000	1000		
Cromo hexavalente	0.05	0.05	1	1	0.01 (XII)	0.001
DBO	40	20	80	40	20	40
DQO (II)	80	40	120	180	40	80
Fenol	0.001	0.001	0.2	0.1	0.1 (I)	0.06 (I)
Fierro	0.3	0.3	5	1	1	0.05
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.5	1	1	2	1	0.5
Fosfatos (como PO <sub>4</sub> )	0.1	0.1	1	1	(XXV)	0.002
Grasas y aceites	10	5	10	10	10	10
Materia flotante	V 2	V 2	V 2	V 2	V 2	V 2
Mercurio (Hg II)	0.001	0.0005	0.01	0.003	0.00001 (XII)	0.00002 (XII)
Níquel	0.01	0.01	0.2	1	0.01 (XXVII)	0.008 (XII)
Nitratos (como N)	5	5		90		0.04
Nitritos (como N)	0.05	0.05	5	10	0.002	0.002
Nitrógeno amoniacal	1	0.5	5	2	0.06	0.01
Oxígeno Disuelto	4	4	3.2	4	5	5
Potencial Hidrógeno (pH) (XXXI)	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Plomo	0.05	0.01	5	0.1	(XXXIV)	0.001
Sólidos disueltos totales	500	200	500	1000	200	
Sólidos sedimentables (ml/L)	0.5	0.5	1	0.8	0.05	0.001
Sólidos suspendidos totales	20	20	30	25	20	30
Sólidos totales	1000	500	1000	1000	500	
Sustancias activas al azul de metileno	0.5	0.1	3	1	0.1	0.1
Sulfatos	500	100	130	100	0.005	
Temperatura (°C)	C.N. $\pm$ 2.5	C.N. $\pm$ 2.5	C.N. $\pm$ 2.5	C.N. $\pm$ 2.5	C.N. $\pm$ 1.5	C.N. $\pm$ 1.5

\* Todos los parámetros en mg/L, excepto los que se especifican

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## NOTAS

- C N Condiciones naturales del cuerpo receptor:
- I El nivel de esta sustancia se obtuvo de multiplicar la toxicidad agua reportada por 0.01;
- II La sustancia presenta bioacumulación o riesgos de cáncer, por que debe reducirse a un mínimo la exposición humana;
- III El nivel ha sido extrapolado mediante el empleo de un modelo matemático, por lo que en revisiones posteriores podrá ser modificado a valores menos críticos;
- IV La alcalinidad natural del cuerpo de agua no debe ser reducida en más de 25%, cuando ésta sea menor o iguala 20 mg/L no deberán admitirse reducciones inducidas;
- V El cuerpo de agua debe estar libre de sustancias atribuibles a aguas residuales u otras descargas que contengan materia flotante como partículas, aceites u otros residuos que den apariencia desagradable;
- XI Para riego de cultivos sensibles al boro, el agua contendrá como máximo 0.75 mg/L de esta sustancia, exento para otros cultivos donde se pueden aplicar concentraciones de hasta 3 mg/L;
- XII La concentración promedio de 4 días de esta sustancia, no debe exceder este nivel, más de una vez cada 3 años;
- XIII La concentración promedio de cadmio de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico de la siguiente ecuación:  $\text{Cd } (\mu\text{g/L}) = e^{(0.785 z [\ln (\text{dureza}) - 3.490])}$   
Dureza = mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ;
- XIV La concentración promedio de una hora de esta sustancia no debe exceder este nivel, más de una vez cada 3 años;
- XVII La concentración promedio de cobre de 4 días en  $\mu\text{g/L}$ , no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico de la siguiente ecuación:  $\text{Cu } (\mu\text{g/L}) = e^{(0.8545 [\ln (\text{dureza}) - 1.465])}$   
Dureza = mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ;
- XVIII Los organismos no deben exceder de 200 como número más probable en 100 mililitros (NMP/100 ml) en agua dulce o marina, y no más del 10% de las muestras mensuales deberá exceder de 400 NMP/100 ml;
- XIX Los sólidos suspendidos (incluyendo sedimentables) en combinación con el color, no deben reducir la profundidad del nivel de compensación de la luz para la actividad fotosintética en más de 10% a partir del valor natural;
- XXV Los fosfatos totales, medidos como fósforo, no deberán exceder de 0.05 mg/L en influentes a lagos o embalses ni de 0.025 mg/L dentro del lago o embalse, para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y para controlar la eutroficación acelerada. Para el caso de ríos y arroyos se permitirán concentración de hasta 0.1 mg/L;
- XXVII La concentración promedio de níquel de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico de la siguiente ecuación:  $\text{Cu } (\mu\text{g/L}) = e^{(0.8460 [\ln (\text{dureza}) + 1.1645])}$   
Dureza = mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ;
- XXX Para oxígeno disuelto, los niveles establecidos deben considerarse como mínimos;
- XXXI Para el potencial de hidrógeno (pH), los niveles establecidos deben considerarse como mínimos y máximos;
- XXXIV La concentración promedio de plomo de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico de la siguiente ecuación:  $\text{Pb } (\mu\text{g/L}) = e^{(1.273 [\ln (\text{dureza}) - 4.105])}$   
Dureza = mg/L como  $\text{CaCO}_3$ ;

La comparación de los Criterios Ecológicos con la calidad real de los cuerpos de agua permite identificar la necesidad de establecer programas coordinados de prevención y control de la contaminación del agua, orientados a restaurar la calidad de aquellos cuerpos de agua que muestran signos de deterioro, o bien, a proteger aquellos que actualmente presentan mejores condiciones que las establecidas en los propios criterios, así como identificar los casos en que deberán fijarse condiciones de descarga de aguas residuales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.2.4 Control de la contaminación del agua

La propiedad de las aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde a la Nación, como se establece en el artículo 27, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En este mismo artículo se establece que la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, sólo podrá realizarse por los particulares mediante concesiones que otorgue el Ejecutivo Federal.

El marco jurídico general en que se encuadra el Programa Nacional Hidráulico 2001–2006 y que al mismo tiempo constituye el derecho vigente que regula toda la materia de aguas en nuestro país, queda representado por las distintas leyes emanadas de la Constitución y otras disposiciones de observancia general relativas a la administración del recurso hidrológico. Las principales son:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Artículo 27, párrafo quinto, así como el Artículo 115, modificado en el año de 1987.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente<sup>36</sup>, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1996.
- Ley de Aguas Nacionales<sup>10</sup>, promulgada en diciembre de 1992.- Es una ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia de aguas nacionales.
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales<sup>13</sup>, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 12 de enero de 1994.
- Leyes estatales en materia de agua potable y alcantarillado, promulgadas de 1969 a 1994 en las 31 entidades federativas y en el Distrito Federal.

La única autoridad federal facultada para administrar las aguas nacionales es la Comisión Nacional del Agua, la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

El Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 es el instrumento en donde se establecen las estrategias nacionales en materia de agua potable, alcantarillado y saneamiento, orientadas a garantizar la disponibilidad del agua en cantidad y calidad adecuadas para los diversos usos de la población y de impulsar el desarrollo de las actividades económicas. Por ello, la política hidráulica no solamente toma en cuenta los aspectos regulatorios, además establece un proceso de promoción e inducción de inversiones, creación de mercados y participación de la sociedad.

Los principios rectores del Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 son los siguientes:

1. El desarrollo del país debe darse en un marco de sustentabilidad.
2. El agua es un recurso estratégico y de seguridad nacional.
3. La unidad básica para la administración del agua es la cuenca hidrológica, ya que es la forma natural de ocurrencia del ciclo hidrológico.
4. El manejo de los recursos naturales debe ser integrado.

5. Las decisiones se toman con la participación de los usuarios al nivel local, en función de la problemática a resolver.

Los principales instrumentos de control de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores son:

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-96 "Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales"<sup>37</sup>.
- Declaratorias de Clasificación de Cuerpos de Aguas Nacionales

### 1.2.5 Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-96

La NOM-001-ECOL-1996, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas

En la norma se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes básicos (grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, temperatura y pH), contaminantes patógenos (tomando como indicador los coliformes fecales), contaminación parasitaria (tomando como indicador los huevos de helminto), metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc) y cianuros

Los límites máximos permisibles se establecen en la norma considerando el uso que se le da al cuerpo receptor (para el caso de ríos los usos considerados son Riego Agrícola, Uso Público Urbano, y Protección de Vida Acuática), Tabla 1 4.



Tabla 1.4 Límites Máximos Permisibles para descargas a ríos (NOM-001-ECOL-1996).

Parámetro*	Uso en Riego Agrícola (A)		Uso Público Urbano (B)		Protección de Vida Acuática (C)	
	Promedio Mensual <sup>4</sup>	Promedio Diario <sup>5</sup>	Promedio Mensual <sup>4</sup>	Promedio Diario <sup>5</sup>	Promedio Mensual <sup>4</sup>	Promedio Diario <sup>5</sup>
Temperatura, °C <sup>1</sup>	No aplica	No aplica	40	40	40	40
Grasas y Aceites <sup>2</sup>	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante <sup>3</sup>	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables, ml/L.	1	2	1	2	1	2
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10
pH, Unid. de pH	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10
Coliformes Fecales, NMP/100 ml	1000	2000	1000	2000	1000	2000
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Cianuro	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20

\* Todos los parámetros en mg/l, excepto los que se especifican

A, B, C: Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos

<sup>1</sup> Instantáneo

<sup>2</sup> Muestra Simple Promedio Ponderado

<sup>3</sup> Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006

<sup>4</sup> Promedio mensual, promedio ponderado de al menos dos muestras compuestas.

<sup>5</sup> Promedio diario, valor del análisis de una muestra compuesta.

Tanto para las descargas municipales como para las no municipales, las fechas de cumplimiento son progresivas, para las primeras conforme a rangos de población y para las segundas considerando la carga contaminante expresada como demanda bioquímica de oxígeno o sólidos suspendidos totales

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.2.6 Declaratorias de Clasificación

Conforme a la Ley de Aguas Nacionales, el Gobierno Federal debe expedir las Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, que se publicarán en el Diario Oficial de la Federación y contendrán los parámetros que deben cumplir las descargas, la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos y las cargas de contaminantes que éstos pueden recibir, así como las metas de calidad y los plazos para alcanzarlas.

De acuerdo al Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, los parámetros y límites máximos que deriven de las Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, junto con los contenidos en las Normas Oficiales Mexicanas, los derechos a terceros, la programación hidráulica y demás consideraciones de interés público o de salud general que emitan las autoridades competentes y que establezcan restricciones adicionales para la descarga de aguas residuales en los cuerpos receptores, serán tomados en cuenta para determinar las Condiciones de Descarga.

Las Declaratorias de Clasificación deben incluir los parámetros que deberán cumplir las descargas según el cuerpo de agua clasificado, conforme a los periodos previstos en dicho Reglamento, tomando en consideración los usos del agua establecidos en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua<sup>11</sup>, así como la capacidad de autodepuración del cuerpo de agua

## 2.

### Simulación de la calidad del agua

#### 2.1 Descripción del modelo de calidad del agua.

Para conservar y mejorar la calidad de los cuerpos de agua, se fijan a los responsables de descargas de aguas residuales, límites máximos de concentración de contaminantes, por medio del establecimiento de condiciones de descarga. La Norma Oficial Mexicana, NOM-001 ECOL/1996, establece de manera general estos límites; sin embargo, en algunos casos, o bien, para algunos de los parámetros de calidad del agua regulados, la norma puede ser insuficiente. Para tener la certeza de que los límites establecidos serán suficientes para alcanzar las metas de calidad propuestas para el cuerpo de agua, y de que las fuertes inversiones en infraestructura, y posteriormente en la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento requeridas, darán los resultados esperados, se requiere de estudios profundos y particulares para cada cuerpo de agua, con el propósito de conocer su real situación actual, y el impacto de las descargas en su calidad, y con ello tener elementos bien fundamentados para elegir apropiadamente estrategias y acciones correctivas para el saneamiento de la corriente, o la implantación de medidas preventivas para conservar y mejorar su calidad.

Estos estudios deben estar sustentados en la simulación del comportamiento de los contaminantes en el agua, para garantizar que sean realistas y útiles. La forma más accesible para realizar una simulación de la calidad del agua, es emplear modelos que involucren los principales parámetros de interés sanitario y ambiental.

Los resultados del uso de un modelo proporcionan solo una representación aproximada de las condiciones reales y, mientras mayor precisión se requiera, mayor será el número de elementos que deben agregarse al modelo, con las consiguientes complicaciones debidas principalmente al costo de la información requerida. Desde luego, el modelo debe considerar las principales entradas y salidas de materia y energía al sistema.

A través de la simulación se puede predecir los efectos en la calidad de un cuerpo de agua que se van a presentar a causa de las diferentes descargas de aguas residuales presentes o proyectadas, los efectos de eliminar descargas o bien de reducir las cargas de contaminantes en descargas o en corrientes tributarias, así como el efecto de modificar el gasto que fluye en la corriente, por ejemplo, por el establecimiento del Gasto Ecológico. De esta manera se obtienen valiosos elementos de juicio que van a sustentar la toma de decisiones en relación con un programa de la calidad de agua.

Actualmente existen diferentes modelos para simular la calidad del agua en corrientes superficiales, como SICLACOR y RÍOS4, centrados principalmente en el comportamiento del oxígeno disuelto ante la presencia de materia orgánica proveniente de distintos tipos de descargas de aguas residuales, en virtud de que el contenido de oxígeno disuelto es fundamental para el sostenimiento de la vida acuática aerobia, y como fuente de abastecimiento de agua potable. Estos modelos consideran solamente las principales entradas y salidas, como la reaeración a través de la superficie del cuerpo de agua, la solubilidad en función de la temperatura y la remoción debida a la actividad microbiana sobre la materia orgánica carbonosa.

QUAL2E<sup>23</sup> incluye además la producción y el consumo de oxígeno por la actividad de las algas, la solubilidad en función de la presión barométrica y la remoción por oxidación del nitrógeno amoniacal en el proceso de nitrificación, así como la demanda bioquímica de oxígeno de los sedimentos.

Además, QUAL2E simula otros parámetros distintos al oxígeno disuelto que pueden o no estar relacionados con él, por ejemplo, la demanda bioquímica de oxígeno, temperatura, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos, fósforo orgánico y soluble, algas (como clorofila), coliformes fecales y componentes conservativos. Mientras más parámetros puedan ser simulados por un modelo, mayor es su utilidad en programas de calidad del agua, siempre que su calibración esté soportada por una base de datos adecuada y confiable.

Un modelo alternativo es WASP5, Water Quality Analysis Simulation Program, desarrollado por la U.S. EPA<sup>43</sup>, para modelar los contaminantes en aguas superficiales que incluye la demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, nutrientes, contaminación bacteriológica y el movimiento de químicos tóxicos.

El modelo QUAL2E, desarrollado por la U.S. Environmental Protection Agency, es la herramienta utilizada en este trabajo, para la simulación de la calidad del agua de las corrientes. Algunas de sus características que lo hacen apto para los fines que aquí se persiguen, son:

- Se puede simular los principales parámetros de la calidad del agua: oxígeno disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno, nutrientes, organismos coliformes, y adicionalmente, un componente no conservativo y hasta tres componentes conservativos.
- Está diseñado para simular diferentes escenarios, estrategias alternativas o complementarias para conservar y mejorar la calidad del agua de corrientes superficiales.
- Permite evaluar la capacidad de asimilación y dilución de contaminantes del cuerpo receptor.

- Se pueden incluir múltiples descargas de aguas residuales y aprovechamientos.
- Incluye módulos para modelar fenómenos físicos, como la dilución de contaminantes por la adición de agua y la dilución de oxígeno en el agua a través del proceso de reaeración.
- El modelo se calibra con los parámetros medidos en la corriente, para representar la calidad del agua para cada sistema o río en particular.

Con fines introductorios, para tener una idea general del desarrollo del estudio de caso, en la Figura 2.1 se muestra, un esquema simplificado del sistema a modelar, indicando los aspectos básicos que se consideraron en el modelo, como son las entradas y salidas de agua y de contaminantes, la división de la corriente en tramos con características hidráulicas uniformes, la división de los tramos en elementos diferenciales completamente mezclados, las estaciones de monitoreo y aforo de la corriente localizadas en los lugares considerados como el inicio y el final del segmento de río estudiado, así como otras estaciones sobre la corriente, necesarias como referencia para ajustar el modelo a las condiciones medidas, en el proceso de calibración, y finalmente, estaciones sobre las descargas, afluentes y aprovechamientos.

En la misma figura se incluye una gráfica mostrando el comportamiento de la concentración de un parámetro medido a lo largo de la corriente, el cual, una vez calibrado, debe ser reproducido satisfactoriamente por el modelo. En esta gráfica también se incluye una línea horizontal mostrando la meta (concentración del contaminante) que se desea alcanzar en la corriente, y como resultado de la simulación, una curva de la concentración del contaminante alcanzada por las acciones propuestas en un determinado escenario de regulación de las descargas.

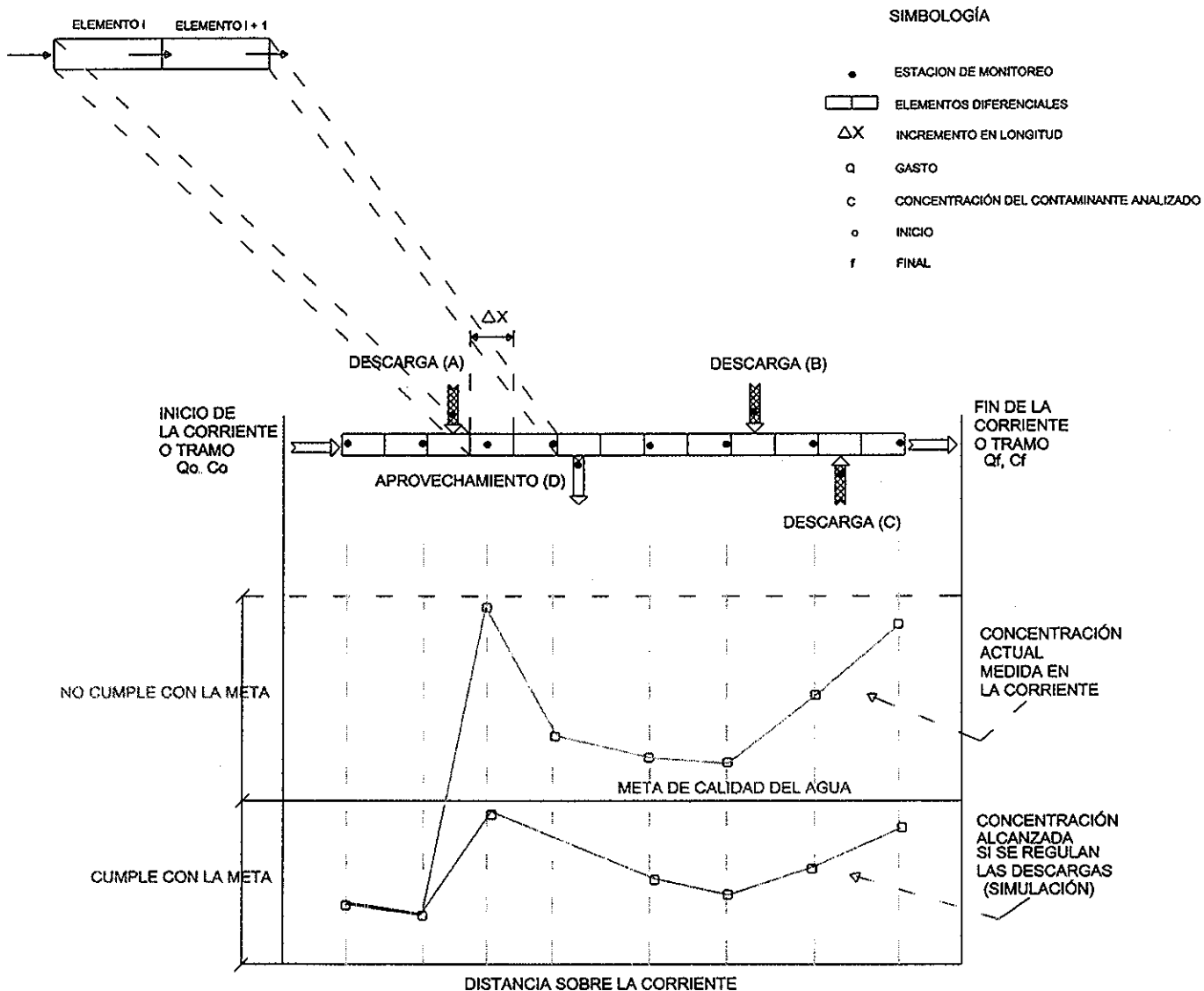


Fig. 2.1 Esquema simplificado del sistema hidrológico y de la interpretación de resultados de la simulación.

El caso de estudio que se presenta en este trabajo, para ejemplificar la metodología para la modelación y simulación de la calidad del agua, es el río San Juan, desde la población de Aculco, en el Estado de México, pasando por Querétaro, donde se encuentran los mayores problemas de contaminación, especialmente en San Juan del Río, hasta la presa Zimapán, en Hidalgo.

La modelación y la simulación realizada en este estudio tienen como base fundamental la información generada a través de campañas de monitoreo y aforo, realizadas por la Comisión Nacional del Agua. Esto es, los parámetros y gastos determinados en campo y en laboratorio, en cada una de estas campañas.

Una vez calibrado el modelo, se simuló la calidad del agua del río San Juan, para predecir los cambios en los perfiles longitudinales de concentración de los distintos parámetros, bajo distintos escenarios, como es, por ejemplo, la aplicación y cumplimiento de la NOM-001 ECOL/1996 a las descargas de aguas residuales y el cumplimiento del gasto de conservación ecológica en la corriente.

El modelo puede simular los siguientes parámetros de calidad de agua, en cualquier combinación: oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, temperatura, algas (como clorofila *a*), nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de nitratos, fósforo orgánico, fósforo disuelto, coliformes, un componente no conservativo adicional y tres componentes conservativos.

Se asumen las siguientes condiciones:

- La corriente está bien mezclada.
- Los principales mecanismos de transporte, convección y dispersión, son significativos sólo a lo largo de la dirección principal del flujo (eje longitudinal de la corriente o canal).

El modelo está limitado para la simulación en periodos durante los cuales, tanto el flujo de la corriente en el río como la carga de desechos son constantes. Modelando en estado estacionario se puede estudiar el impacto de descargas (magnitud, calidad y localización) en la calidad del agua de la corriente. En conjunción con un programa de muestreo de campo, puede usarse para identificar la magnitud y las características de calidad de descargas de fuentes no puntuales.

Los parámetros de calidad del agua que se pueden simular con el modelo, pueden ser conservativos y no conservativos. Los primeros se representan con gran sencillez en la simulación, puesto que la cantidad de materia permanece constante en el tiempo y en la distancia, al no intervenir en reacciones que modifiquen su estado químico o físico, y se resuelven por medio de un simple balance de materia de cada punto o segmento donde haya extracción o incorporación de agua, ejemplos de este tipo de parámetros son cloruros y sólidos suspendidos fijos.

Los parámetros no conservativos son los que modifican su estado inicial por intervenir en reacciones biológicas o en ciclos bioquímicos. Presentan complicaciones y menor precisión al ser simulados, puesto que sus tasas de velocidad de cambio normalmente son aproximaciones a las condiciones reales, ya que se asumen condiciones de estado estacionario. Su comportamiento se representa con ecuaciones de primer orden y, por necesidades de simplificación, no siempre se toma en cuenta todos los mecanismos que intervienen en su evolución. Por ello, deberá tenerse en mente que los resultados de una simulación de este tipo de parámetros van a diferir, en cierta medida, de las condiciones reales.

El primer paso en el modelado del sistema es subdividirlo en tramos o segmentos que tienen características hidráulicas uniformes. Cada tramo se divide a su vez en elementos computacionales de igual longitud.

Por su ubicación, se pueden considerar siete tipos de elementos: elemento inicial, elemento estándar, elemento situado aguas arriba de una confluencia, elemento de confluencia, elemento final en el sistema, elemento de entrada o tributario, y elemento de salida o aprovechamiento.

**Elemento inicial** - Se utiliza un elemento inicial en el origen del colector principal y en el origen de las corrientes tributarias, que también se van a simular por tramos.

**Elemento estándar** - Estos elementos son los que no califican en ninguno de los otros seis tipos de elementos. La única entrada permitida en un elemento estándar son incrementos de flujo por fuentes dispersas, como son aportaciones del acuífero y afluentes pequeños o intermitentes que no se incluyen explícitamente como corrientes tributarias en el modelo.

**Elemento situado aguas arriba de una confluencia** - Con este nombre se designa al elemento sobre la corriente principal que se encuentra justamente aguas arriba de la confluencia de una corriente tributaria formalmente simulada, y por lo tanto, también dividida en elementos diferenciales y tramos.

**Elemento final en el sistema** Este es el último elemento computacional de la corriente principal.

**Elemento de entrada** - Este elemento representa una descarga.

**Elemento de salida** Elemento que representa un aprovechamiento.

Los tramos del río, que se representan como conjuntos de elementos, son la base de la entrada de datos. Para todos los elementos computacionales dentro de un tramo, tanto



los datos hidráulicos como los coeficientes de velocidad de reacción, condiciones iniciales e incrementos de flujo, se consideran constantes.

El modelo tiene las siguientes restricciones: 25 tramos como máximo, 20 elementos computacionales por tramo o un total de 250, 7 elementos iniciales, 6 elementos de confluencia, y 25 elementos de descarga o aprovechamiento.

El modelo está constituido por un conjunto de módulos o subrutinas; cada uno de ellos realiza cálculos específicos de los fenómenos involucrados, mediante la solución de ecuaciones diferenciales a través de métodos numéricos y generan o reproducen las condiciones que se presentarían a lo largo de los ríos, esto es, los perfiles de concentración de los principales parámetros de calidad del agua, bajo los escenarios simulados.

El modelo está escrito en FORTRAN 77 y estructurado como un programa principal soportado por 51 subrutinas. La figura 2.2 ilustra las relaciones funcionales entre el programa principal y las subrutinas.

El modelo calibrado para el cuerpo de agua en estudio, proporciona una potente herramienta para simular el comportamiento hidrológico y de los parámetros de calidad de agua.

El proceso de calibración del modelo implica la generación de un esquema o prototipo del sistema, que involucra una idealización gráfica del sistema a través de la descripción de las propiedades geométricas que se van a modelar y la identificación de las condiciones a la frontera y la interrelación entre las diversas partes del prototipo.

Este proceso conlleva a la división del prototipo en elementos discretos de un tamaño compatible con los objetivos para los que el modelo debe servir, definiendo estos elementos de acuerdo a reglas geométricas simples y considerando el modo en que se conectan física o funcionalmente, como parte integral de un todo.

En la figura 2.3 se muestra un tramo de la corriente ( $n$ ) que ha sido dividido en subtramos o elementos computacionales de longitud  $\Delta x$ . Para cada elemento en el balance hidráulico se considera el flujo que entra por la cara aguas arriba del elemento ( $Q_{i-1}$ ), las fuentes externas o aprovechamientos ( $Q_{xi}$ ) y el flujo saliente ( $Q_i$ ) a través de la cara aguas abajo del elemento.



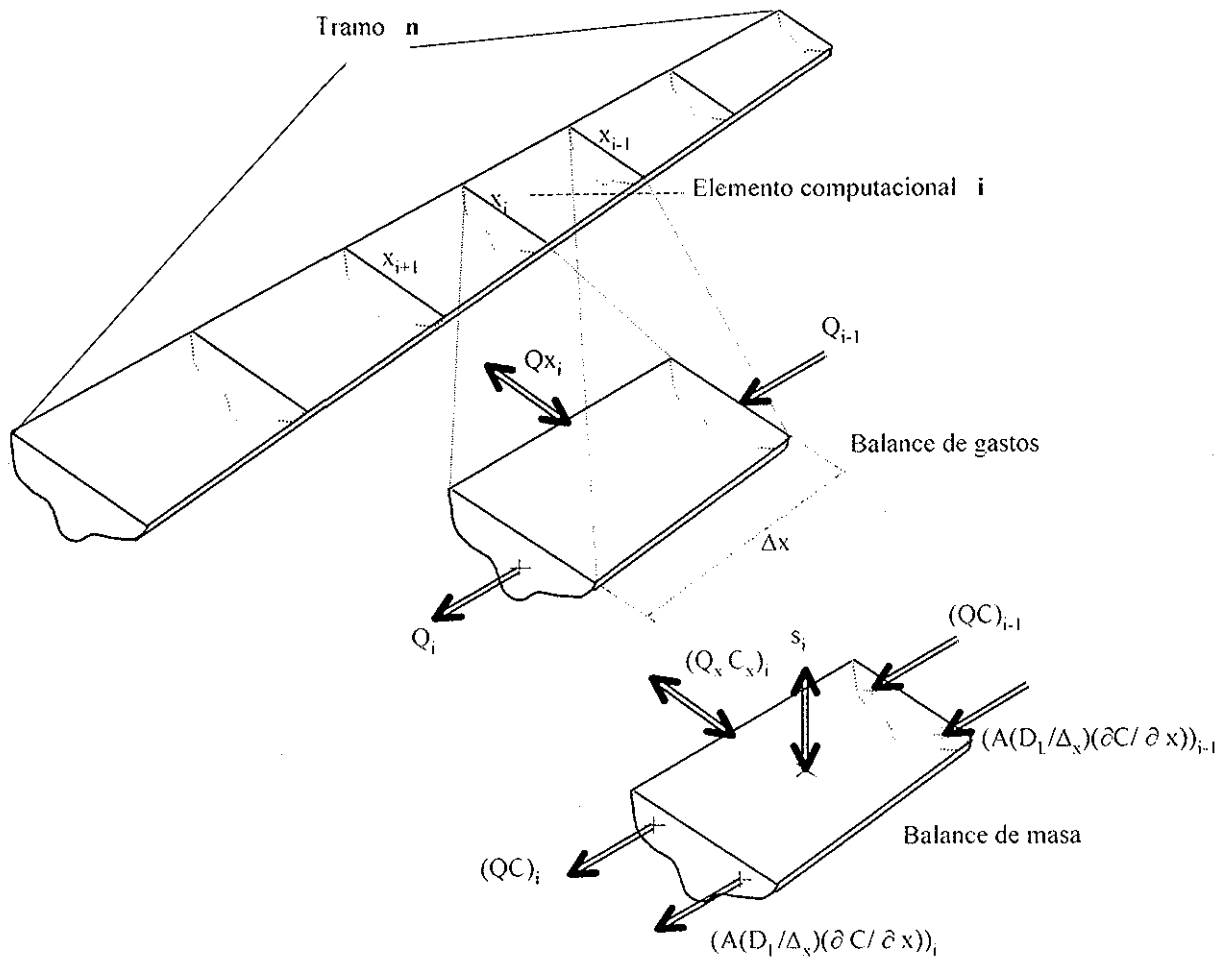


Figura 2.3 Sistema diferencial de la corriente

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De manera similar, para el elemento, se puede escribir un balance de materiales para cualquier componente  $C$ . En el balance de materiales se considera tanto transporte de masa ( $QC$ ) como dispersión,  $\left( A \frac{D_i}{\Delta x} \frac{\partial C}{\partial x} \right)$ , conforme la masa se mueve a lo largo del eje de la corriente. La masa puede removerse y añadirse del sistema vía fuentes y aprovechamientos externos ( $Q_i C_i$ ), y también, puede ser añadida y removida vía fuentes y sumideros internos ( $S_i$ ), tales como fuentes bénticas y transformaciones biológicas

La corriente se conceptualiza como una cadena de reactores completamente mezclados (elementos computacionales) que están ligados secuencialmente, uno a otro, vía los mecanismos de transporte y dispersión. Los grupos secuenciales de estos reactores se definen como tramos en los cuales los elementos computacionales tienen las mismas propiedades hidrogeométricas (pendiente de la corriente, sección transversal de canal, rugosidad, etc.) y constantes de velocidad biológica (velocidad de consumo de DBO, velocidad de fuentes bénticas, velocidad de sedimentación de algas, etc.) En la figura 2.4 se muestra como una corriente puede representarse conceptualmente por el agrupamiento de tramos y elementos computacionales.

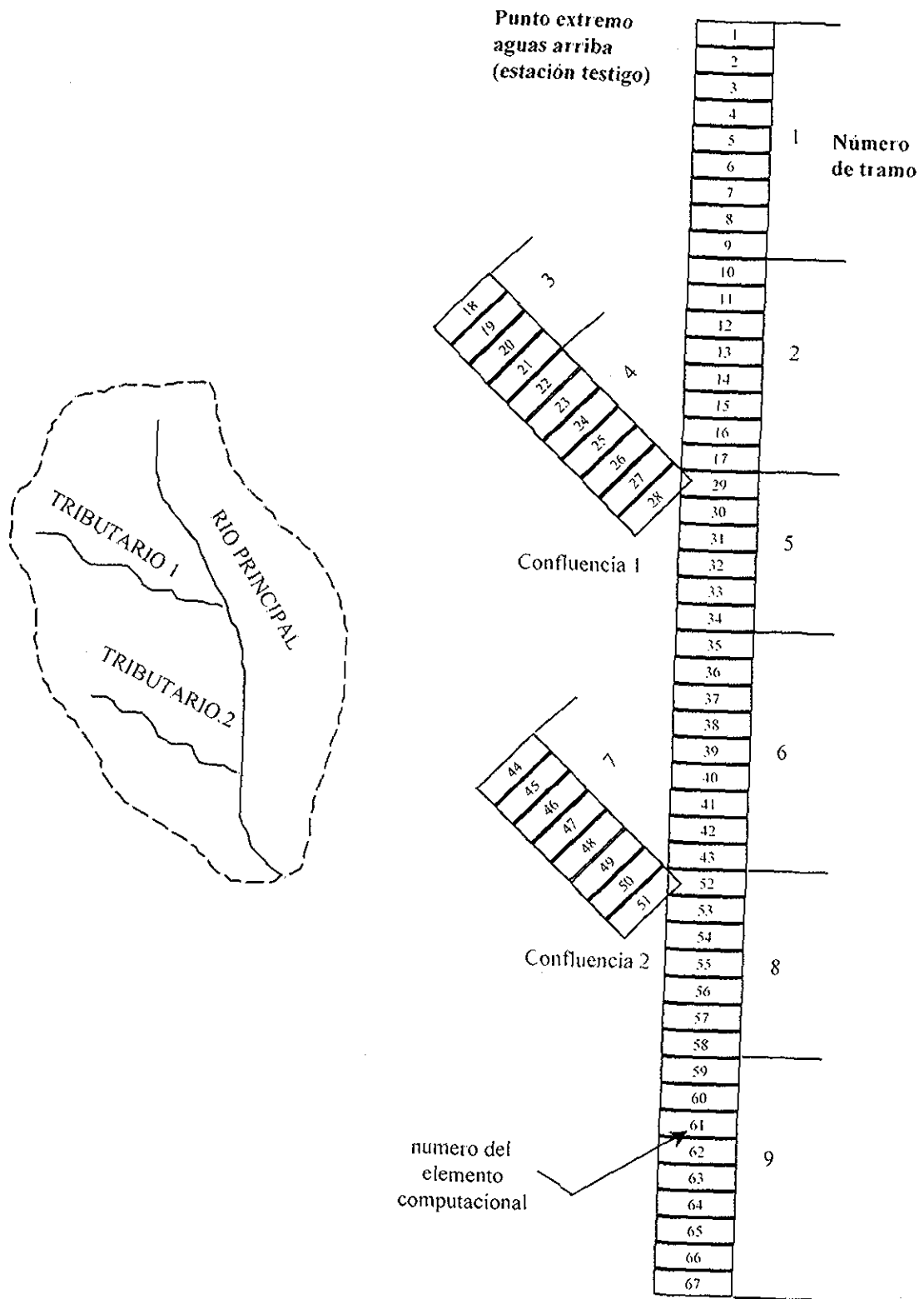


Figura 2.4 División de la corriente en elementos computacionales y tramos

La ecuación básica del modelo es la ecuación de transporte de masa, que se integra numéricamente en tiempo y espacio para cada parámetro de calidad del agua. Esta ecuación incluye los efectos de convección, dispersión, dilución, reacciones de los componentes e interacciones, y fuentes y sumideros.

Para todo componente  $C$ , esta ecuación puede escribirse como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx - \frac{\partial (A_x \bar{u} C)}{\partial x} dx + (A_x dx) \frac{dc}{dt} + s \quad (2.1)$$

donde

$M$	=	Masa (M).
$x$	=	Distancia (L).
$t$	=	Tiempo (T)
$C$	=	Concentración ( $ML^{-3}$ ).
$A_x$	=	Área de sección transversal ( $L^2$ )
$D_L$	=	Coefficiente de dispersión ( $L^2T^{-1}$ ).
$\bar{u}$	=	Velocidad media ( $LT^{-1}$ ).
$s$	=	Fuentes externas o sumideros ( $MT^{-1}$ )

Como  $M = VC$ , se puede escribir

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial (VC)}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.2)$$

donde

$V = A_x dx =$  incremento de volumen ( $L^3$ )

Si consideramos que el flujo en la corriente es estacionario, esto es,

$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$ , entonces el término  $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$  y la ecuación 2.2 resulta:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t}$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

combinando las ecuaciones 2.1 y 2.3 y reorganizando se tiene que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left( A_v D_l \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{A_v} - \frac{\partial (A_v \bar{u} C)}{A_v} + \frac{dC}{dt} + \frac{s}{V} \quad (2.4)$$

Los términos del lado derecho de la ecuación representan, respectivamente, dispersión, convección, cambios en los componentes y fuentes/sumideros externos y dilución. El término  $\frac{dC}{dt}$  se refiere sólo a cambios en los componentes como aumento

y consumo, y no deben confundirse con el término  $\frac{\partial C}{\partial t}$ , el gradiente local de concentraciones. Este último incluye el efecto de los cambios en los componentes, así como dispersión, convección, fuentes/sumideros y diluciones.

Bajo condiciones de estado estacionario, la derivada local es cero; en otras palabras:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

Los cambios que ocurren a los componentes individuales o partículas, independientemente de la convección, dispersión, y entradas de aguas residuales, están definidos por:

$$\frac{dC}{dt} = \text{cambios en los componentes individuales} \quad (2.6)$$

Estos cambios incluyen las reacciones químicas y biológicas y las interacciones que ocurren en la corriente. Ejemplos de estos son reaeración, respiración y fotosíntesis de algas y decaimiento de coliformes.

**Hidráulica de la corriente** - El programa considera que el régimen hidráulico de la corriente es estado estacionario; esto es,  $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ , por lo tanto, el balance hidrológico para un elemento computacional puede escribirse simplemente como (figura 2.2):

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right)_i = (Q_v)_i \quad (2.7)$$

Donde  $(Q_v)_i$  es la suma de los afluentes externos y aprovechamientos para dicho elemento.

**Coefficientes de descarga.**- Una vez que la ecuación 2.7 se ha resuelto para  $Q$ , las otras características hidráulicas de los segmentos de la corriente pueden determinarse con ecuaciones de la forma:

$$\bar{u} = a Q^b \quad (2.8)$$

$$A_x = Q / \bar{u} \quad (2.9)$$

$$d = \alpha Q^\beta \quad (2.10)$$

Donde  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes empíricas, y  $d$  es la profundidad de la corriente. Estas constantes pueden determinarse generalmente de las curvas de relación etapa - descarga.

Alternativamente, si las propiedades de la sección transversal del segmento de la corriente están disponibles como una función de la profundidad,  $d$ ,  $\bar{u}$  puede obtenerse alternativamente como una función de la descarga, por la solución por ensayo y error de la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1.486}{n} A_x R_x^{2/3} S_c^{1/2} \quad (2.11)$$

donde

- $A_x$  = Área de sección transversal del canal, ft<sup>2</sup>.
- $R_x$  = Radio hidráulico efectivo medio, ft.
- $n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning (generalmente de 0.010 a 0.10).
- $S_c$  = Pendiente de la línea del gradiente de energía (adimensional).
- $Q$  = Gasto, ft<sup>3</sup>/s

El valor para  $\bar{u}$  se determina de la ecuación 2.10.



**Dispersión longitudinal.**- La dispersión es básicamente un mecanismo de transporte convectivo. El término dispersión se usa generalmente para el transporte asociado con la variación espacial de la velocidad promedio, el término difusión se reserva para el transporte asociado principalmente con las fluctuaciones en la velocidad promedio en el tiempo.

Taylor<sup>9</sup>, obtuvo una ecuación predictiva para el coeficiente de dispersión longitudinal,  $D_L$ , en tubos rectos largos:

$$D_L = 10r_0u^* \quad \text{ft}^2/\text{s} \quad (2.12)$$

donde  $r_0$  es el radio del tubo y  $u^*$  es la velocidad cortante promedio definida como:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad \text{ft/s} \quad (2.13)$$

donde

$\tau_0$  = Esfuerzo cortante en la frontera, lb/ft<sup>2</sup>, y  
 $\rho$  = Densidad del fluido, lb-s<sup>2</sup>/ft<sup>4</sup>

Algunos investigadores han intentado aplicar la ecuación de Taylor para flujo de corrientes. Tales aplicaciones son sólo aproximaciones debido a la diferencia entre la distribución de velocidades en el flujo en la corriente y en la tubería.

Elder<sup>10</sup>, consideró que sólo el gradiente de velocidad vertical es importante en el flujo en la corriente y desarrolló una expresión análoga a la de Taylor:

$$D_L = Kdu^* \quad (2.14)$$

Donde  $d$  es la profundidad media de la corriente, ft<sup>2</sup>. Elder usó un valor de 5.93 para  $K$  en esta ecuación.

Otros investigadores han obtenido expresiones similares para  $D_L$ , y han encontrado que es extremadamente sensible a los perfiles de velocidad lateral. La ecuación de Elder, sin embargo, funciona adecuadamente en situaciones unidimensionales, donde el canal no es demasiado amplio. Para canales muy amplios, Fisher<sup>11</sup>, demostró que la razón de la mitad del ancho entre la profundidad, es la escala dominante y que, por lo tanto, es importante para la definición del coeficiente de dispersión longitudinal. Las ecuaciones 2.12 y 2.14 pueden escribirse en términos de la ecuación de Manning y otras variables características para el flujo en canales.

Como ejemplo, para flujo en un canal abierto en estado estacionario

$$u^* = C\sqrt{RS_e} \quad (2.15)$$

donde

- C = Coeficiente de Chezy.  
 R = Radio hidráulico.  
 S<sub>e</sub> = Pendiente del gradiente de energía.

El coeficiente de Chezy está dado por:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (2.16)$$

donde *n* es el coeficiente de rugosidad de Manning tabulado para diferentes tipos de canales <sup>12</sup>, Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning

Tipo de río o canal	<i>n</i>
Bien definidos y rectos	0.025 - 0.030
Sinuosos con remansos y bancos arenosos	0.033 - 0.040
Muy débil, sinuoso y grande	0.075 - 0.150
Aluviales, bien definidos y rectos	0.031 $\bar{d}^{1/6}$ $\bar{d}$ = diám -75 tamaño en pies; = diámetro para el cual el 75% de las partículas son menores a él.

S<sub>e</sub> es la pendiente del gradiente de energía y está dado por:

$$S_e = \left( \frac{\bar{u}n}{1.486R^{2/3}} \right)^2 \quad (2.17)$$

Donde  $\bar{u}$  es la velocidad media. Substituyendo las ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.17 en la ecuación 2.14, y haciendo  $R = d$  para un canal amplio se obtiene la expresión:

$$D_L = 3.82Kn\bar{u}d^{5/6} \quad (2.18)$$

donde

- $D_L$  = Coeficiente de dispersión longitudinal,  $\text{ft}^2/\text{s}$ .  
 $K$  = Constante de dispersión (adimensional).  
 $n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional).  
 $\bar{u}$  = Velocidad media,  $\text{ft}/\text{s}$ .  
 $d$  = Profundidad media,  $\text{ft}$ .

Fisher<sup>11</sup> proporciona valores típicos para los coeficientes de dispersión,  $D_L$ , y los valores para la constante de dispersión,  $K$ .

**Aumento de flujo.**- Cuando la concentración de oxígeno disuelto en una corriente cae por debajo de un nivel objetivo requerido, como por ejemplo, el valor establecido como Criterio Ecológico de Calidad del Agua para la Protección de Vida Acuática, 5 mg/L, es posible elevar esta concentración aumentando el flujo de la corriente. La cantidad de flujo necesaria para lograr que las concentraciones de oxígeno disuelto alcancen los criterios requeridos, se calcula usando la relación:

$$DO_R = DO_T - DO_{\min} \quad (2.19)$$

y

$$Q_R = Q_c \left[ \frac{DO_R}{DO_T} + 0.15 \left( \frac{DO_R}{DO_T} \right)^2 \right] \quad (2.20)$$

donde

- $DO_R$  = Concentración de oxígeno disuelto requerido para mantener las condiciones objetivo,  $\text{mg}/\text{L}$ .  
 $DO_T$  = Nivel objetivo de oxígeno disuelto,  $\text{mg}/\text{L}$ .  
 $DO_{\min}$  = Concentración mínima de oxígeno disuelto (nivel crítico) en la curva de consumo de oxígeno,  $\text{mg}/\text{L}$ .  
 $Q_R$  = Aumento de flujo requerido,  $\text{ft}^3/\text{s}$ .  
 $Q_c$  = Flujo en el punto crítico en la curva de consumo de oxígeno,  $\text{ft}^3/\text{s}$ .

El modelo aumenta el flujo de la corriente después de que se han alcanzado las condiciones de estado estacionario, compara la concentración de oxígeno disuelto simulado con el nivel objetivo previamente especificado en cada tramo. Si esta concentración está por debajo del nivel objetivo, el programa identifica las fuentes corriente arriba que el usuario ha especificado con propósitos de dilución, y añade agua equitativamente de todas estas fuentes. Entonces se repiten los cálculos de oxígeno disuelto. Este proceso prosigue hasta que el nivel objetivo se satisface.

**Reacciones químicas de los componentes** - La capacidad de la corriente para mantener una adecuada concentración de oxígeno disuelto, es uno de los aspectos más importantes a considerar cuando se calcula su capacidad de asimilación. Esta concentración depende principalmente de la reaeración atmosférica, la fotosíntesis, la respiración de plantas y animales, la demanda béntica de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, la nitrificación, la salinidad y la temperatura

En este modelo se incluye las interacciones mayores: ciclos de nutrientes, producción de algas, demanda béntica de oxígeno, captación de oxígeno carbonoso, aireación atmosférica y sus efectos sobre el comportamiento del oxígeno disuelto.

En la figura 2.5, las flechas indican la dirección de la progresión normal del sistema en un ambiente moderadamente contaminado; las direcciones pueden ser reversibles en algunas circunstancias para algunos componentes. Por ejemplo, bajo condiciones de sobresaturación de oxígeno, que puede ocurrir como resultado de la fotosíntesis de algas, el oxígeno podría desabsorberse, esto es, fluir en dirección opuesta a la trayectoria indicada

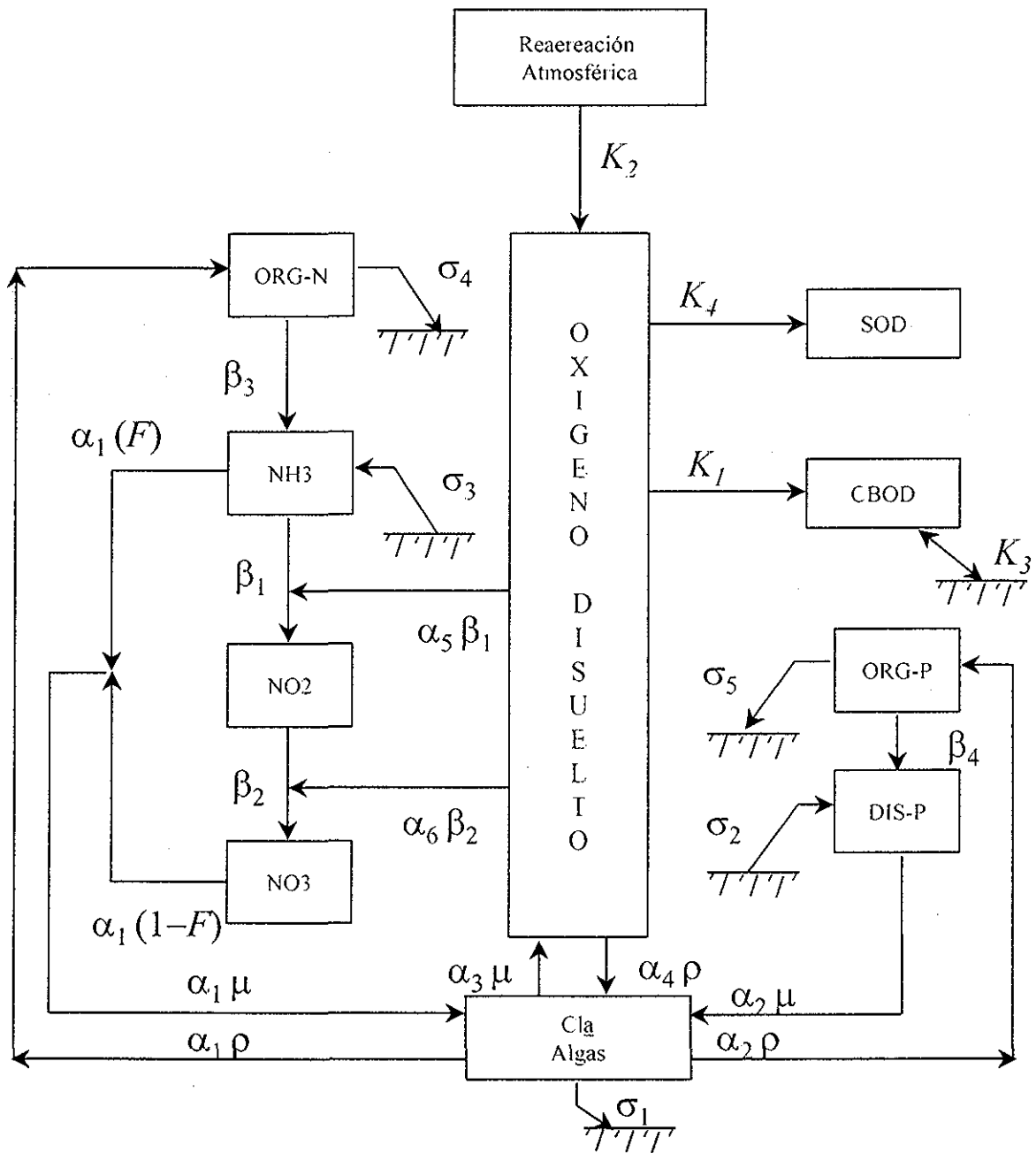


Figura 2.5. Principales interrelaciones de los contaminantes

Los coliformes y los componentes no conservativos adicionales se modelan con decaimiento no conservativo y no interactúan con otros. Los conservativos, por supuesto, ni decaen ni interactúan de ningún modo con otros componentes.

A continuación se presentan las relaciones matemáticas que describen estas reacciones individuales e interacciones entre los componentes.

**Clorofila**.- En el modelo se considera que la clorofila es directamente proporcional a la concentración de biomasa de algas fitoplanctónicas. Para los propósitos de este modelo la biomasa de algas se convierte a clorofila por la simple relación:

$$Chl \underline{a} = \alpha_0 A \quad (2.21)$$

donde

- $Chl \underline{a}$  = Concentración de clorofila  $\underline{a}$ ,  $\mu\text{g-Chl } \underline{a} / \text{L}$ .  
 $A$  = Concentración de biomasa de algas,  $\text{mg} - A / \text{L}$ .  
 $\alpha_0$  = Factor de conversión,  $\mu\text{g-Chl } \underline{a} / \text{mg} - A$ .

La ecuación diferencial para el crecimiento y la producción de algas (clorofila  $\underline{a}$ ) se formula de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$\frac{dA}{dt} = \mu A - \rho A - \frac{\sigma_1}{d} A \quad (2.22)$$

donde

- $A$  = Concentración de biomasa de algas,  $\text{mg-A} / \text{L}$ .  
 $t$  = Tiempo,  $\text{d}^{-1}$ .  
 $\mu$  = Velocidad específica de crecimiento de algas, dependiente de la temperatura,  $\text{d}^{-1}$ .  
 $\rho$  = Coeficiente de velocidad de respiración de algas,  $\text{d}^{-1}$ .  
 $\sigma_1$  = Coeficiente de velocidad de sedimentación de algas, dependiente de la temperatura,  $\text{ft/d}$ .  
 $d$  = Profundidad promedio,  $\text{ft}$ .

En el modelo se usa un parámetro simple de velocidad de respiración,  $\rho$ , para representar tres procesos: (a) la respiración endógena de algas, (b) la conversión de fósforo de algas a fósforo orgánico, y (c) la conversión de nitrógeno de algas a nitrógeno orgánico.

La velocidad específica de crecimiento de algas,  $\mu$ , depende de la disponibilidad de la luz y de los nutrientes requeridos (nitrógeno y fósforo).

El programa tiene la capacidad de modelar las interacciones entre estos factores limitantes de tres diferentes maneras.

En una primera opción, las expresiones cinéticas para representar los efectos del nitrógeno, el fósforo y la luz, se multiplican para determinar los efectos netos sobre la velocidad de crecimiento de las algas. Esta opción tiene como base biológica los efectos multiplicativos de los procesos enzimáticos involucrados en la fotosíntesis.

$$\mu = \mu_{\max} (FL) (FN) (FP) \quad (2.23)$$

donde

$\mu_{\max}$	=	Velocidad específica máxima de crecimiento de algas, $d^{-1}$
$FL$	=	Factor de restricción de crecimiento de algas por efecto de luz.
$FN$	=	Factor de restricción de crecimiento de algas por efecto de nitrógeno
$FP$	=	Factor de restricción de crecimiento de algas por efecto de fósforo

En una segunda opción, la velocidad local de crecimiento de algas es limitada por la luz y por nitrógeno o fósforo, pero no ambos. Así, los efectos nutriente/luz son multiplicativos, pero los efectos nutriente/nutriente son alternados

$$\mu = \mu_{\max} (FL) \text{Min} (FN, FP) \quad (2.24)$$

En esta opción, la velocidad de crecimiento de algas es controlada por el nutriente con el menor factor de restricción de crecimiento

Como un compromiso entre las dos opciones anteriores, en el modelo se incluye una modificación de la forma intuitiva sugerida por Scavia y Park<sup>13</sup>. En esta opción, el factor limitante de nutrientes se calcula como el promedio de los recíprocos inversos de los factores individuales de restricción de crecimiento por efecto de nitrógeno y fósforo, esto es:

$$\mu = \mu_{\max} (FL) \left[ \frac{2}{\frac{1}{FN} + \frac{1}{FP}} \right] \quad (2.25)$$

En este caso, la velocidad de crecimiento de algas se controla por una relación multiplicativa entre la luz y los nutrientes, pero las interacciones nutriente/nutriente se representan por una media armónica.

Por otro lado, la velocidad de la fotosíntesis se incrementa cuando aumenta la intensidad de la luz hasta un máximo llamado valor de saturación. A altas intensidades de luz, algunas expresiones para el cálculo de esta velocidad exhiben fotoinhibición, mientras que en otras se muestra que la actividad fotosintética se mantiene en un valor máximo.

El programa reconoce tres opciones para calcular el factor limitante para el crecimiento de algas,  $FL$  en las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25. Los efectos de atenuación de luz sobre la velocidad de crecimiento de algas puede simularse usando el método de saturación media de Monod, la función de Smith, o la ecuación de Steele.

**Método de saturación media de Monod.** En esta opción, el factor limitante para el crecimiento de algas por luz está definido por la expresión de Monod :

$$FL_z = \frac{I_z}{K_{IM} + I_z} \quad (2.26)$$

donde

- $FL_z$  = Factor de atenuación de crecimiento de algas por efecto de la luz a intensidad  $I_z$
- $I_z$  = Intensidad de la luz a profundidad ( $z$ ), Btu/ft<sup>2</sup>-h.
- $K_{IM}$  = Coeficiente de saturación media, por efecto de la luz, Btu/ft<sup>2</sup>-h.
- $z$  = Profundidad, ft

**Método de la función de Smith** En esta opción el factor limitante del crecimiento de algas por efecto de la luz, incluye los efectos de segundo orden de la intensidad de la luz:

$$FL_z = \frac{I_z}{(K_{IS}^2 + I_z^2)^{1/2}} \quad (2.27)$$

donde

- $K_{IS}$  = Intensidad de la luz que corresponde al 71% de la velocidad máxima de crecimiento, Btu/ft<sup>2</sup>-h

Los otros términos se definen igual que en la ecuación 2.26

**Método de la ecuación de Steel.** En esta opción se incorpora una función exponencial para modelar el efecto de fotoinhibición sobre la velocidad de crecimiento de algas.

$$FL_z = \left( \frac{I_z}{K_{IE}} \right) \exp \left( 1 - \frac{I_z}{K_{IS}} \right) \quad (2.28)$$



donde

$K_{LE}$  = Intensidad de saturación de luz en la cual la velocidad de crecimiento de algas es máxima, Btu/ft<sup>2</sup>-h.

los otros términos se definen igual que en la ecuación 2.26

Todas las expresiones en función de la luz, ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28, expresan el valor de  $FL$  para una capa ópticamente delgada. En el modelo, la fotosíntesis ocurre a través de la profundidad de una columna de agua. La intensidad de la luz varía con la profundidad de la columna de acuerdo a la ley de Beer:

$$I_z = I \exp(-\lambda z) \tag{2.29}$$

$I_z$  = Intensidad de luz a una profundidad ( $z$ ), Btu/ft<sup>2</sup> - h.  
 $I$  = Intensidad de luz en la superficie, Btu/ft<sup>2</sup> - h  
 $\lambda$  = Coeficiente de extinción de luz, ft<sup>-1</sup>  
 $z$  = Profundidad variable, ft

Cuando la ecuación 2.29 se sustituye en las ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28 y se integra sobre la profundidad del flujo para obtener el factor de atenuación de luz a profundidad promedio. Las expresiones resultantes por las tres opciones son:

Saturación media:

$$FL = (1/\lambda d) \ln \left[ \frac{[K_{LM} + I]}{K_{LM} + I e^{-\lambda d}} \right] \tag{2.30}$$

$K_{LM}$  = Intensidad de la luz en la cual la velocidad de crecimiento es el 50% de la velocidad de crecimiento máxima.

Función de Smith

$$FL = (1/\lambda d) \ln \left[ \frac{I/K_{LS} + (1 + (I/K_{LS})^2)^{1/2}}{(I/K_{LS})e^{-\lambda d} + (1 + [(I/K_{LS})e^{-\lambda d}]^2)^{1/2}} \right] \tag{2.31}$$

$K_{LS}$  = Intensidad de la luz en la cual la velocidad de crecimiento es 71% de la velocidad de crecimiento máxima.

Ecuación de Steel

$$FL = \frac{2.718}{\lambda d} \left[ e - \left( e^{-\lambda d(I K_{LE})} \right) - e^{-I K_{LE}} \right] \quad (2.32)$$

donde

- $K_{LE}$  = Intensidad de la luz en la cual la velocidad de crecimiento es igual a la velocidad de crecimiento máxima, Btu/ft<sup>2</sup>-h.
- $FL$  = Factor de atenuación de crecimiento de algas por luz, a profundidad promedio
- $\lambda$  = Coeficiente de extinción de la luz, ft<sup>-1</sup>
- $d$  = Profundidad de flujo, ft
- $I$  = Intensidad de la luz en la superficie, Btu/ft<sup>2</sup>-h.

El uso de la función de Smith es preferible al método de saturación media, si los efectos de fotoinhibición no son importantes. Las formas matemáticas de las ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28 se comparan gráficamente en la figura 2.6. Las tres ecuaciones tienen un parámetro simple,  $K_L$ ; sin embargo, este se define de manera diferente en cada ecuación. En la misma figura los valores de  $K_L$  están seleccionados para que cada curva pase a través de un punto común, a saber,  $FL = 0.5$  a  $I = 5$  unidades de intensidad (esto es una razón de saturación media igual a 5 unidades de intensidad de la luz)

La simulación de algas en estado estacionario requiere el cálculo de un valor promedio de  $FL$ , el factor de restricción de crecimiento por la luz, sobre el ciclo diurno.

Hay cuatro opciones en el programa para calcular este promedio. Las opciones se basan en la combinación de situaciones que tiene que ver con dos factores:

- ° La fuente de los datos de radiación solar usados en el cálculo, esto es, si se suministraron externamente por el usuario o se calcularon internamente con base en la temperatura del balance de energía
- ° La forma de obtener promedios, esto es, si se promediaron los valores  $FL$  de cada hora, o se usa un valor promedio diario diurno de radiación solar para estimar el valor medio de  $FL$

Las cuatro opciones para promediar la luz diurna se dan a continuación. En cada caso se usa como ejemplo la función de saturación media.

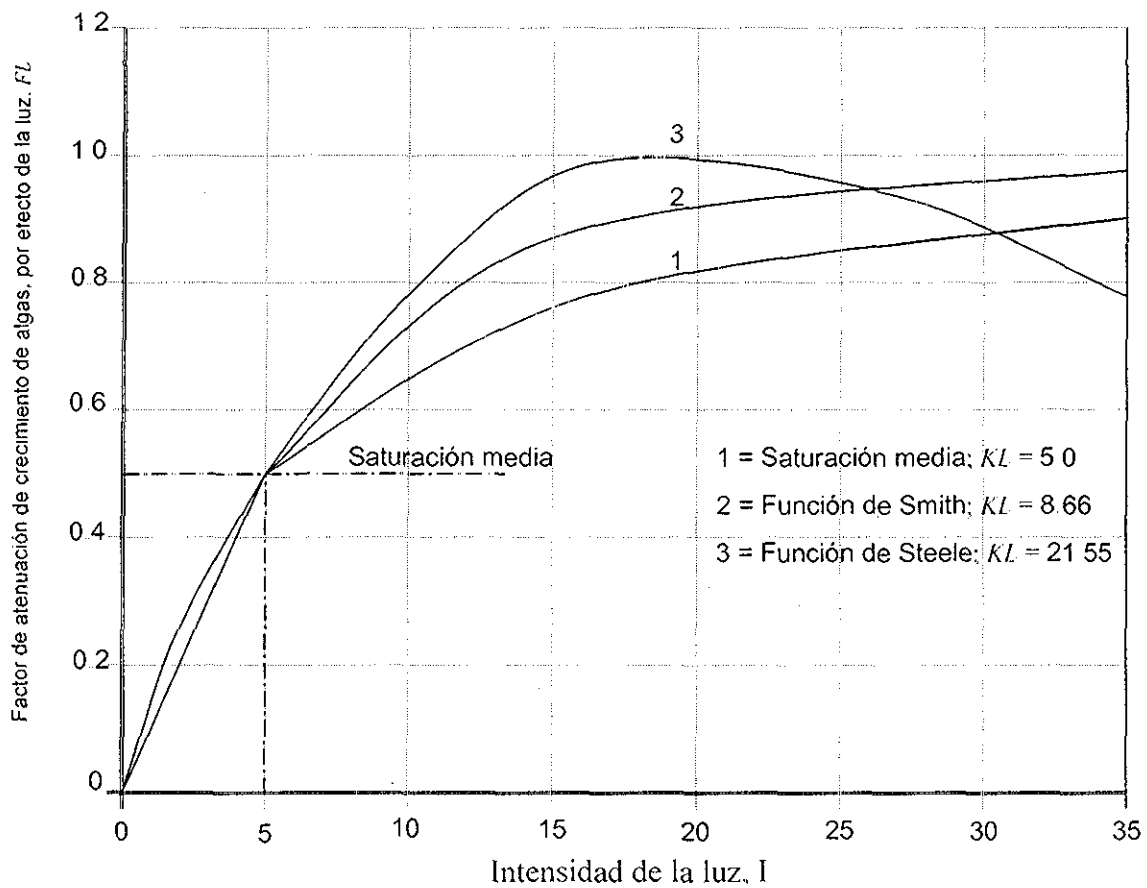


Figura 2.6 Efecto de la luz en el crecimiento de algas

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Opción 1.-  $FL$  se calcula a partir de un valor de radiación solar promedio durante la luz del día, calculado en el balance de calor, a la temperatura de estado estacionario

$$FL = AFACT * f * FL_1 \quad (2.33)$$

$$FL_1 = \frac{1}{\lambda d} \ln \left[ \frac{K_{LM} + I_{alg}}{K_{LM} + I_{alg} e^{-\lambda d}} \right] \quad (2.34)$$

$$\bar{I}_{alg} = TFACT * \bar{I}_{temp} \quad (2.35)$$

donde

- $FL$  = Factor de restricción de crecimiento de algas por la luz, ajustado para horas luminosas y método promedio.
- $AFACT$  = Factor promedio para la luz, para proporcionar similitud entre los cálculos usando un valor promedio simple de la radiación solar y los cálculos usando los promedios de los valores de cada hora de  $FL$
- $f$  = Fracción de las horas luminosas del día
- $FL_1$  = Factor de restricción de crecimiento por luz, con base en la intensidad de la luz promedio durante el día iluminado
- $\lambda$  = Coeficiente de extinción de la luz,  $ft^{-1}$
- $d$  = Profundidad media de la corriente, ft
- $K_{LM}$  = Coeficiente de saturación media, por la luz,  $Btu/ft^2-h$
- $I_{alg}$  = Intensidad promedio de luz fotosintéticamente activa,  $Btu/ft^2-h$
- $TFACT$  = Fracción de radiación solar que es activa fotosintéticamente, calculada a la temperatura del balance de calor.
- $I_{temp}$  = Intensidad de luz promedio durante el día iluminado, calculada a la temperatura del balance de calor,  $Btu/ft^2-h$ .

Opción 2 -  $FL$  se calcula a partir de un valor de radiación solar promedio durante la luz del día, suministrado externamente por el usuario. Los cálculos requeridos para obtener  $FL$  en la opción 2, son los mismos que para la opción 1, excepto que el valor de  $I_{alg}$  se calcula directamente del dato de la radiación solar fotosintéticamente activa proporcionado por el usuario:

$$I_{alg} = I_{tot} / N \quad (2.36)$$

donde

- $I_{tot}$  = Radiación solar fotosintéticamente activa diaria total,  $Btu/ft^2$ .
- $N$  = Número de horas luminosas del día, h

Tanto  $I_{tot}$  y  $N$  son proporcionadas por el usuario como datos de entrada. Las ecuaciones (2.36), (2.34) y (2.33) se utilizan para encontrar el valor de  $FL$ . Se considera el valor de  $I_{tot}$  como la radiación fotosintéticamente activa, por lo que el factor  $IFACT$  no se usa en la opción 2.

Opción 3.  $FL$  se obtiene promediando los valores de  $FL$  de cada hora durante el día iluminado que son calculados de los valores de cada hora de radiación solar, a la temperatura del balance de energía en estado estacionario:

$$FL = f * FL_2 \quad (2.37)$$

$$FL_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\lambda d} \left[ \frac{K_i + I_{alg,i} i}{K_i + I_{alg,i} e^{-\lambda d}} \right] \quad (2.38)$$

$$I_{alg,i} = IFACT * I_{temp,i} \quad (2.39)$$

donde

- $FL_2$  = Promedio de  $N$  valores de  $FL$  de cada hora, con base en los valores de cada hora de la intensidad de luz ( $I_{alg,i}$ ).
- $I_{alg,i}$  = Valores de cada hora de la intensidad de la luz fotosintéticamente activa, Btu/ft<sup>2</sup>-h
- $I_{temp,i}$  = Valores de cada hora de la intensidad de luz calculada a la temperatura del balance de energía en estado estacionario, Btu/ft<sup>2</sup>-h.

Los demás términos se definen igual a los definidos en las ecuaciones (2.33), (2.34), (2.35) y (2.36).

Como  $FL$  promedio, calculado en la opción 3, es un promedio de los valores variables, diurnos, de  $FL$ , el factor  $AFACT$  no se utiliza en los cálculos.

Opción 3.  $FL$  se obtiene promediando los valores de  $FL$  de cada hora, durante la luz del día, que son calculados de los valores de la radiación solar de cada hora, calculados de un solo valor total de la radiación solar, fotosintéticamente activa y de una función coseno. Los cálculos requeridos para obtener  $FL$  son los mismos de la opción 3, excepto que los valores de  $I_{alg,i}$  se calculan de una función coseno especificada internamente:

$$I_{alg,i} = I_{tot} / N \left( 1 - \frac{\cos 2\pi i}{N+1} \right), \quad i = 1, N \quad (2.40)$$

Como en el caso de la opción 2, tanto  $I_{tot}$  y  $N$  son datos proporcionados por el usuario. Las ecuaciones 2.40, 2.38, y 2.37, se usan para calcular el valor de  $FL$ . Como el valor de  $I_{tot}$  especificado por el usuario se considera fotosintéticamente activo, el factor  $TFACT$  no se usa en la opción 4.

Se utilizan tres factores empíricos en la formulación de las cuatro opciones para promediar el efecto de la luz, la función coseno diurna,  $AFACT$  y  $TFACT$ .

$AFACT$  es el factor de ajuste para considerar el promedio no lineal inherente en el cálculo del valor promedio diario de  $FL$ . Para las simulaciones descritas, un valor razonable de  $AFACT$  es 0.92, con un intervalo de 0.85 a 0.98.

$TFACT$  es la fracción de la radiación solar total fotosintéticamente activa. Cuando se realiza la simulación de algas, es importante que el valor de la intensidad de la luz y el coeficiente de saturación de luz,  $K_L$ , estén en unidades de radiación fotosintéticamente activa, PAR. Como en el balance de energía se calcula la radiación total sobre un amplio espectro, este valor debe ser ajustado a PAR si se va a utilizar en la simulación de algas. La razón de energía en la banda visible (PAR) a la energía en el espectro completo (estándar) es aproximadamente 0.43 a 0.45.  $TFACT$  es una variable de entrada del usuario; así puede usarse un valor para mantener las condiciones específicas del sitio.

En la simulación de algas a régimen no permanente, la radiación fotosintéticamente activa se calcula cada hora, usando la ecuación 2.39, a menos que la temperatura no sea simulada, en cuyo caso, los datos de radiación solar fotosintéticamente activa deben proporcionarse con los datos climatológicos locales.

**Disminución de la iluminación por la densidad de algas.-** Se usa la siguiente ecuación para considerar la densidad de algas y ajustar el coeficiente de extinción de luz,  $\lambda$ , en las ecuaciones 2.30, 2.31 y 2.32.

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 \alpha_0 A + \lambda_2 (\alpha_0 A)^2 \quad (2.41)$$

donde

- $\lambda_0$  = Porción del coeficiente de extinción de luz que no se debe al efecto del aumento de algas,  $\text{ft}^{-1}$
- $\lambda_1$  = Coeficiente lineal para considerar la disminución de la iluminación por la densidad de algas,  $\text{ft}^{-1} (\mu\text{g-Chla/L})^{-1}$ .
- $\lambda_2$  = Coeficiente no lineal para considerar la disminución de la iluminación por la densidad de algas,  $\text{ft}^{-1} (\mu\text{g-Chla/L})^{-2/3}$
- $\alpha_0$  = Factor de conversión,  $\mu\text{g-Chla/mg A}$ .
- $A$  = Concentración de biomasa de algas,  $\text{mg-A/L}$ .

La selección apropiada de los valores de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  permite el modelado de una variedad de situaciones de disminución de la iluminación por la densidad de las algas:

- No hay disminución de la iluminación por la densidad de las algas

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 0$$

- Disminución lineal de la iluminación por la densidad de las algas

$$\lambda_1 \neq 0 \quad \lambda_2 = 0$$

- Disminución no lineal de la iluminación por la densidad de las algas

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.00268, & \text{ft-1} & (\mu\text{g-Chla/L})^{-1} \\ \lambda_2 &= 0.0165, & \text{ft-1} & (\mu\text{g-Chla/L})^{-2/3} \end{aligned}$$

ó

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.0088, & \text{ft-1} & (\mu\text{g-Chla/L})^{-1} \\ \lambda_2 &= 0.054, & \text{ft-1} & (\mu\text{g-Chla/L})^{-2/3} \end{aligned}$$

**Relaciones entre nutrientes y algas.** Los factores que limitan el crecimiento de algas por efecto de nitrógeno, ( $FN$ ) y por fósforo ( $FP$ ) están definidos por la expresión de Monod:

$$FN = \frac{N_c}{N_c + K_N} \quad (2.42)$$

y

$$FP = \frac{P_2}{P_2 + K_P} \quad (2.43)$$

donde

- $N_c$  = Concentración efectiva de nitrógeno inorgánico disponible, mg-N/L.
- $K_N$  = Constante de saturación media de Michaelis-Menton por efecto de nitrógeno, mg-N/L.
- $P_2$  = Concentración local de fósforo disuelto, mg-P/L.
- $K_P$  = Constante de saturación media de Michaelis-Menton por efecto de fósforo, mg-P/L.

Se considera que las algas usan nitrógeno amoniacal y/o nitrato como una fuente de nitrógeno orgánico. La concentración efectiva de nitrógeno disponible está dada por:

$$N_c = N_1 + N_3 \quad (2.44)$$

donde

- $N_1$  = Concentración de nitrógeno amoniacal, mg-N/L.
- $N_3$  = Concentración de nitratos, mg-N/L.

Las constantes empíricas de saturación media para nitrógeno,  $K_N$ , y fósforo,  $K_P$ , se usan para ajustar la velocidad de crecimiento de algas tomando en cuenta los factores que pueden limitar su crecimiento. Cada constante es el nivel en el cual el factor particular limita el crecimiento de algas a la mitad de la velocidad máxima o "saturada". En la tabla 2.3 se enlistan los valores típicos de las constantes de saturación media para nitrógeno y fósforo. En la simulación de la concentración de algas, el modelo considera que si el nitrógeno o el fósforo, o ambos, no son simulados, o no son limitantes.

**Ciclo del Nitrógeno.-** En aguas naturales, en condiciones aeróbicas, hay una transformación por etapas de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal, a nitritos y finalmente a nitratos. Las ecuaciones diferenciales de las transformaciones de nitrógeno de una forma a otra son:

#### Nitrógeno orgánico

$$\frac{dN_4}{dt} = \alpha_1 \rho A - \beta_3 N_4 - \sigma_4 N_4 \quad (2.45)$$

donde

- $N_4$  = Concentración de nitrógeno orgánico, mg-N/L.
- $\beta_3$  = Coeficiente de velocidad para la hidrólisis de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal, en función de la temperatura,  $d^{-1}$
- $\alpha_1$  = Fracción de nitrógeno en algas, mg-N/mg-A
- $\rho$  = Coeficiente de velocidad de respiración de algas,  $d^{-1}$ .
- $A$  = Concentración de biomasa de algas, mg-A/L.
- $\sigma_4$  = Coeficiente de velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico, en función de la temperatura,  $d^{-1}$

#### Nitrógeno amoniacal

$$\frac{dN_1}{dt} = \beta_3 N_4 - \beta_1 N_1 + \sigma_3 / d - F_1 \alpha_1 \mu A \quad (2.46)$$

donde

$$F_1 = P_N N_1 / (P_N N_1 + (1 - P_N) N_3) \quad (2.47)$$



$N_1$	=	Concentración de nitrógeno amoniacal, mg-N/L.
$N_3$	=	Concentración de nitratos, mg-N/L.
$N_4$	=	Concentración de nitrógeno orgánico, mg-N/L.
$\beta_1$	=	Coefficiente de velocidad para la oxidación biológica de nitrógeno amoniacal, en función de la temperatura, $d^{-1}$ .
$\beta_3$	=	Coefficiente de velocidad para la hidrólisis de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal, en función de la temperatura, $d^{-1}$ .
$\alpha_1$	=	Fracción de nitrógeno en algas, mg-N/ mg-A.
$\sigma_3$	=	Coefficiente de velocidad de captación de nitrógeno amoniacal de la fuente béntica, mg-N/ft <sup>2</sup> -d.
$d$	=	Profundidad media de flujo, ft.
$F_1$	=	Fracción de nitrógeno de algas que se capta de la fuente de amonio.
$\mu$	=	Velocidad de crecimiento específico de algas, $d^{-1}$ .
$A$	=	Concentración de biomasa de algas, mg-A/L.
$P_N$	=	Factor de selectividad para nitrógeno amoniacal (0 a 1.0).

El modelo incluye un factor de selectividad de algas para nitrógeno amoniacal,  $P_A$ .

### Nitritos

$$\frac{dN_2}{dt} = \beta_1 N_1 - \beta_2 N_2 \quad (2.48)$$

donde

$N_1$	=	Concentración de nitrógeno amoniacal, mg-N/L.
$N_2$	=	Concentración de nitritos, mg-N/L.
$\beta_1$	=	Coefficiente de velocidad para la oxidación biológica de nitrógeno amoniacal, en función de la temperatura, $d^{-1}$ .
$\beta_2$	=	Coefficiente de velocidad para la oxidación de nitritos, en función de la temperatura, $d^{-1}$ .

### Nitratos

$$\frac{dN_3}{dt} = \beta_2 N_2 - (1 - F_1) \alpha_1 \mu A \quad (2.49)$$

donde

$F_1$	=	Fracción de nitrógeno de algas tomado de la fuente de amonio, mg-N/L.
$\alpha_1$	=	Contenido de nitrógeno en algas, mg-N/mg-A.
$\mu$	=	Velocidad específica de crecimiento de algas, dependiente de la temperatura, $d^{-1}$ .

**Inhibición de la nitrificación a baja concentración de oxígeno disuelto.**- El modelo tiene la capacidad para incluir la inhibición de la velocidad de nitrificación a bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Las velocidades de nitrificación son modificadas en el modelo, calculando un factor de corrección por inhibición y aplicando este factor a los valores de los coeficientes de velocidad de nitrificación,  $\beta_1$ , y  $\beta_2$ . El factor de corrección de la velocidad de nitrificación se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

donde

$$CORDO = 1.0 - \exp(-KNITRF * DO) \quad (2.50)$$

$CORDO$  = Factor de corrección de la velocidad de nitrificación.  
 $KNITRF$  = Coeficiente de inhibición de nitrificación de primer orden,  $\text{mg/L}^{-1}$ .  
 $DO$  = Concentración de oxígeno disuelto,  $\text{mg/L}$ .

El factor de corrección se aplica a las velocidades de oxidación de amonio y nitratos como:

$$\text{Amonio:} \quad (\beta_1)_{\text{inhib}} = CORDO * (\beta_1)_{\text{entrada}} \quad (2.51)$$

$$\text{Nitrato:} \quad (\beta_2)_{\text{inhib}} = CORDO * (\beta_2)_{\text{entrada}} \quad (2.52)$$

**Ciclo del fósforo.**- El ciclo de fósforo es similar al ciclo de nitrógeno en muchos aspectos. Las formas orgánicas de fósforo que se generan por la muerte de algas se convierten al estado inorgánico disuelto, disponible para la producción primaria de algas. El fósforo presente en las descargas de las plantas de tratamiento de aguas negras se encuentra en forma inorgánica disuelta y es consumido rápidamente por las algas. A continuación se presentan las ecuaciones diferenciales de la transformación de fósforo de una forma a otra:

**Fósforo orgánico -**

$$\frac{dP_1}{dt} = \alpha_2 \rho A - \beta_1 P_1 - \sigma_5 P_1 \quad (2.53)$$

donde

$P_1$  = Concentración de fósforo orgánico,  $\text{mg-P/L}$ .  
 $\alpha_2$  = Contenido de fósforo de algas,  $\text{mg P/mg-A}$ .  
 $\rho$  = Velocidad de respiración de algas,  $\text{d}^{-1}$ .  
 $A$  = Concentración de biomasa de algas,  $\text{mg-A/L}$ .

- $\beta_4$  = Velocidad de consumo de fósforo orgánico, en función de la temperatura,  $d^{-1}$
- $\sigma_5$  = coeficiente de velocidad de sedimentación de fósforo orgánico, en función de la temperatura,  $d^{-1}$

### Fósforo disuelto

$$\frac{dP_2}{dt} = \beta_4 P_1 + \sigma_2 / d - \alpha_2 \mu A \quad (2.54)$$

donde

- $P_2$  = Concentración de fósforo inorgánico o disuelto, mg-P/L.
- $\sigma_2$  = Velocidad de la fuente béntica para fósforo disuelto, en función de la temperatura, mg-P/ft<sup>2</sup>-d.
- $d$  = Profundidad media de la corriente, ft.
- $\mu$  = Velocidad específica de crecimiento de algas, dependiente de la temperatura,  $d^{-1}$ .
- $A$  = Concentración de biomasa de algas, mg-A/L

**Demanda Bioquímica de Oxígeno.**- El modelo considera una reacción de primer orden para describir la desoxigenación de DBO última,  $DBO_{U_s}$ , en la corriente. La función DBO como está expresado en el modelo, también toma en cuenta la remoción de DBO adicional debido a los procesos de sedimentación, arrastre y floculación, los cuales no ejercen una demanda de oxígeno

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L - K_3 L \quad (2.55)$$

donde

- $L$  = Concentración de DBO última, mg/L.
- $K_1$  = Coeficiente de velocidad de desoxigenación, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .
- $K_3$  = Velocidad de pérdida de DBO debido a sedimentación, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .

El modelo simula la DBO última, sin embargo, el usuario puede decidir usar los valores de  $DBO_5$  para la entrada y la salida. En este caso, el modelo realizará las conversiones necesarias de  $DBO_5$  a DBO última. La ecuación de conversión es:

$$DBO_5 = DBO_U (1 - \exp(-5 * K DBO)) \quad (2.56)$$

donde

$DBO_5$  = DBO de 5 días, mg/L.

$DBO_U$  = DBO última, mg/L.

$K_{DBO}$  = Coeficiente de velocidad de conversión de DBO,  $d^{-1}$

**Oxígeno disuelto.**- El balance de oxígeno depende de la capacidad de la corriente para reaerarse a sí misma. Esta capacidad es función de los procesos de convección y difusión que ocurren dentro del sistema y de las fuentes y sumideros de oxígeno internos. Las mayores fuentes de oxígeno, además de la reaeración atmosférica, son el oxígeno producido por la fotosíntesis y el oxígeno contenido en el flujo entrante. Los sumideros de oxígeno disuelto incluyen oxidación bioquímica de materia orgánica carbonosa o nitrogenosa, demanda béntica de oxígeno y oxígeno utilizado por la respiración de algas.

A continuación se muestra la ecuación diferencial que describe la velocidad de cambio de oxígeno. Cada término representa una fuente o un sumidero de oxígeno.

$$\frac{dO}{dt} = K_2(O^* - O) + (\alpha_3\mu - \alpha_4\rho)A - K_1L - K_1/d - \alpha_5\beta_1N_1 - \alpha_6\beta_2N_2 \quad (2.57)$$

donde

$O$  = Concentración de oxígeno disuelto, mg/L.

$O^*$  = Concentración de saturación de oxígeno disuelto a presión y temperatura locales, mg/L.

$\alpha_3$  = Velocidad de producción de oxígeno en el proceso de fotosíntesis en algas, mg-O/mg-A.

$\alpha_4$  = Velocidad de consumo de oxígeno en el proceso de respiración de algas, mg-O/mg-A.

$\alpha_5$  = Velocidad de consumo de oxígeno en el proceso de oxidación de nitrógeno amoniacal, mg-O/mg-N.

$\alpha_6$  = Velocidad de consumo de oxígeno en el proceso de oxidación de nitritos, mg-O/mg-N.

$\mu$  = Velocidad de crecimiento de algas, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .

$\rho$  = Velocidad de respiración de algas, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .

$A$  = Concentración de biomasa de algas, mg-A/L.

$L$  = Concentración de DBO carbonosa última, mg/L.

$d$  = Profundidad media de la corriente, ft.

$K_1$  = Velocidad de desoxigenación de DBO carbonosa, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .

$K_2$  = Velocidad de reaeración, análoga a la difusión de Fick, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .

- $K_d$  = Velocidad de demanda de oxígeno de sedimentos, en función de la temperatura,  $\text{mg}/\text{ft}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ .  
 $\beta_1$  = Coeficiente de velocidad de oxidación de amonio, en función de la temperatura,  $\text{d}^{-1}$ .  
 $\beta_2$  = Coeficiente de velocidad de oxidación de nitritos, en función de la temperatura,  $\text{d}^{-1}$ .  
 $N_1$  = Concentración de nitrógeno amoniacal,  $\text{mg-N}/\text{L}$ .  
 $N_2$  = Concentración de nitrógeno de nitritos,  $\text{mg-N}/\text{L}$ .

**Concentración de saturación de oxígeno disuelto.**- La solubilidad del oxígeno en agua disminuye cuando aumenta la temperatura, aumenta la concentración de sólidos disueltos y disminuye la presión atmosférica. El modelo usa una ecuación predictiva para la concentración de saturación de oxígeno disuelto

$$\ln O^* = -139.34410 + (1.575701 \times 10^5/T) - (6.642308 \times 10^7/T^2) + (1.243800 \times 10^{10}/T^3) - (8.621949 \times 10^{11}/T^4) \quad (2.58)$$

donde

- $O^*$  = Concentración de equilibrio de oxígeno a una atmósfera,  $\text{mg}/\text{L}$ .  
 $T$  = Temperatura, ( $^{\circ}\text{K}$ ) = ( $^{\circ}\text{C} + 273.15$ ) y  $^{\circ}\text{C}$  dentro del intervalo de 0.0 a 40.0  $^{\circ}\text{C}$ .

Para otras condiciones de presión, la concentración de equilibrio de oxígeno disuelto se corrige con la ecuación 2.59:

$$O_p = O^* P \left[ \frac{(1 - P_{wv} / P)(1 - \phi P)}{(1 - P_{wv})(1 - \phi)} \right] \quad (2.59)$$

donde

- $O_p$  = Concentración de equilibrio de oxígeno a presión no estándar,  $\text{mg}/\text{L}$ .  
 $O^*$  = Concentración de equilibrio de oxígeno a una atmósfera,  $\text{mg}/\text{L}$ .  
 $P$  = Presión (atm), entre 0.0 y 2.0 atmósferas  
 $P_{wv}$  = Presión parcial de vapor de agua (atm), se calcula como:

$$\ln P_{wv} = 11.8571 - (3840.70/T) - (216961/T^2) \quad (2.60)$$

y

$$\phi = 0.000975 - (1.426 \times 10^{-5} t^{\circ}) + (6.436 \times 10^{-8} t^{\circ 2}) \quad (2.61)$$

donde

- $t^{\circ}$  = Temperatura,  $^{\circ}\text{C}$

Las ecuaciones en los Métodos Estandarizados<sup>14</sup> para calcular las concentraciones de saturación de oxígeno disuelto también incluyen correcciones para salinidad y cloruros. La salinidad y los cloruros no están modelados explícitamente, por lo que el modelo no corrige  $O^*$  por estos efectos. Más aún, la corrección por presión para  $O^*$  (ecuación 2.59), se hace sólo cuando se modela la temperatura, ya que la presión barométrica es un requerimiento primario de las ecuaciones del balance de energía.

**Estimación del coeficiente de reaeración atmosférica.**- El coeficiente de reaeración ( $K_2$ ) se expresa frecuentemente como una función de la profundidad de la corriente y la velocidad. El modelo proporciona ocho opciones para estimar o leer valores de  $K_2$ .

Caso 1. Se permite al usuario leer los valores de  $K_2$  que han sido seleccionados previamente por el modelador. Esta opción es útil para modelar situaciones poco comunes.

Caso 2. Usando mediciones en campo de la reaeración de la corriente, Churchill, Elmore, y Buckingham<sup>15</sup> desarrollaron la siguiente expresión para  $K_2$  a 20 °C.

$$K_2^{20} = 5.026 \bar{u}^{0.969} d^{-1.673} \times 2.31 \quad (2.62)$$

donde

- $\bar{u}$  = Velocidad promedio en la corriente, ft/s.
- $d$  = Profundidad promedio de la corriente, ft.
- $K_2$  = Coeficiente de reaeración,  $d^{-1}$ .

Caso 3. O'Connor y Dobbins (1958) propusieron ecuaciones con base en las características de turbulencia de la corriente. Para corrientes que tienen bajas velocidades y condiciones isoentrópicas, desarrollaron la siguiente ecuación:

$$K_2^{20} = \frac{(D_m \bar{u})^{0.5}}{d^{1.5}} \quad (2.63)$$

Para corrientes con altas velocidades y condiciones no isoentrópicas la relación es:

$$K_2^{20} = \frac{480 D_m^{0.5} S_0^{0.25}}{d^{1.25}} \times 2.31 \quad (2.64)$$

donde

- $S_0$  = Pendiente del lecho de la corriente, ft/ft.
- $d$  = Profundidad media de la corriente, ft.
- $\bar{u}$  = Velocidad media de la corriente, ft/d
- $K_2$  = Coeficiente de reaeración,  $d^{-1}$ .

y  $D_m$  es el coeficiente de difusión molecular ( $\text{ft}^2/\text{d}$ ), dado por:

$$D_m = 1.91 \times 10^3 (1.037)^{T-20} \quad (2.65)$$

La ecuación 2.63, es aplicable para muchos casos y es la ecuación usada en este modelo para el caso 3. La ecuación 2.64 puede usarse para calcular  $K_2$  fuera del modelo y alimentarla como dato directamente bajo el primer caso.

Caso 4. Owens y Churchill (1964) estimaron la reaeración para corrientes poco profundas con movimiento rápido y desarrollaron una ecuación para corrientes que exhiben profundidades de 0.4 a 11.0 pies y velocidades de 0.1 a 5.0 ft/s:

$$K_2^{20} = 9.4 \bar{u}^{0.67} / d^{1.85} \times 2.31 \quad (2.66)$$

$\bar{u}$  = Velocidad media, ft/s  
 $d$  = Profundidad media, ft

Caso 5. Thackston y Krenkel (1966) propusieron la siguiente ecuación basada en investigaciones de varios ríos en América del Norte.

$$K_2^{20} = 10.8 (1 + F^{0.5}) \frac{u^*}{d} \times 2.31 \quad (2.67)$$

donde  $F$  es el número de Froude, dado por:

$$F = \frac{u^*}{\sqrt{gd}} \quad (2.68)$$

y  $u^*$  es la velocidad cortante, ft/s:

$$u^* = \sqrt{d S_e g} = \frac{\bar{u} n \sqrt{g}}{1.49 d^{1/67}} \quad (2.69)$$

donde

$d$  = Profundidad media, ft.  
 $g$  = Aceleración de la gravedad,  $\text{ft}/\text{s}^2$   
 $S_e$  = Pendiente del gradiente de energía.  
 $u$  = Velocidad media, ft/s.  
 $n$  = Coeficiente de Manning.

Caso 6. Langbien y Durum (1967) desarrollaron una fórmula para  $K_2$  a 20°C:

$$K_2^{20} = 3.3\bar{u} / d^{1.33} \times 2.31 \quad (2.70)$$

donde

$\bar{u}$  = Velocidad media, ft/s.  
 $d$  = Profundidad media, ft.

Caso 7 En este caso se calcula el coeficiente de reaeración a partir de una función potencial de flujo. La relación empírica es similar a las correlaciones de velocidad y profundidad con el flujo, usadas en la sección de hidráulica del modelo, esto es:

$$K_2 = aQ^b \quad (2.71)$$

donde

$a$  = Coeficiente de flujo para  $K_2$   
 $Q$  = Flujo, ft<sup>3</sup>/s  
 $b$  = Exponente del flujo para  $K_2$

Caso 8. El método de Tsvolglou y Wallace<sup>16</sup> considera que el coeficiente de reaeración para un tramo es proporcional al cambio en la elevación de la superficie de agua en el tramo e inversamente proporcional al tiempo de flujo a través del tramo, la ecuación es:

$$K_2^{20} = c \frac{\Delta h}{t_f} \quad (2.72)$$

donde

$c$  = Coeficiente de escape, ft<sup>-1</sup>  
 $\Delta h$  = Cambio en la elevación de la superficie del agua en el tramo, ft.  
 $t_f$  = Tiempo de flujo dentro del tramo, d.

Considerando flujo uniforme, el cambio de la elevación de la superficie del agua es

$$\Delta h = S_e \Delta x \quad (2.73)$$

donde

$S_e$  = Pendiente del gradiente de energía, ft/ft.  
 $\Delta x$  = Longitud del tramo, ft.



y el tiempo de paso a través de un tramo es

$$t_j = \frac{\Delta x}{\bar{u}} \quad (2.74)$$

donde

$\bar{u}$  = Velocidad media en el tramo, ft/s.

Sustituyendo en la ecuación 2.72, se tiene

$$K_2^{20} = (3600 \times 24)cS_c \bar{u} \quad (2.75)$$

La ecuación 2.75, es la forma de la opción ocho. La pendiente puede ser directamente introducida para calcular  $K_2$  con esta opción, o puede calcularse de la ecuación de Manning como sigue:

$$S_c = \frac{\bar{u}^2 n^2}{(1.49)^2 d^{4/3}} \quad (2.76)$$

donde

$d$  = Profundidad media, ft

$n$  = Coeficiente de Manning.

El coeficiente de escape es generalmente tratado como una variable y determinado empíricamente. TenEch (1978) recomendó la siguiente guía para determinar los valores de  $c$ :

$$c = 0.054 \text{ ft}^{-1} \quad (\text{a } 20^\circ\text{C}) \quad \text{para } 15 \leq Q \leq 300 \text{ ft}^3/\text{s} \quad (2.77)$$

$$c = 0.110 \text{ ft}^{-1} \quad (\text{a } 20^\circ\text{C}) \quad \text{para } 1 \leq Q \leq 15 \text{ ft}^3/\text{s} \quad (2.78)$$

**Reaeración por embalses.** - El modelo tiene la capacidad para incluir entradas de oxígeno al sistema a través de la reaeración del agua en presas o embalses. Para calcular la entrada de oxígeno por este concepto se usa la ecuación desarrollada por Gameson, Buttom y Evans<sup>16</sup>:

$$D_a - D_b = \left[ 1 - \frac{1}{1 + 0.116abH(1 - 0.034H)(1 + 0.467T)} \right] D_a \quad (2.79)$$

donde

- $D_a$  = Déficit de oxígeno antes del embalse, mg/L.  
 $D_b$  = Déficit de oxígeno después del embalse, mg/L.  
 $T$  = Temperatura, °C.  
 $H$  = Altura de la caída del agua, ft.  
 $a$  = Factor empírico de la calidad del agua.  
     = 1.80 para agua limpia.  
     = 1.60 para agua ligeramente contaminada.  
     = 1.0 para agua moderadamente contaminada.  
     = 0.65 para agua muy contaminada.  
 $b$  = Coeficiente empírico de aeración en embalses.  
     = 0.70 a 0.90 para vertedor ancho, plano y encrestado.  
     1.05 para vertedor encrestado con cara de pendiente recta.  
     0.80 para vertedor encrestado con cara vertical.  
     0.05 para compuertas con descarga sumergida.

El modelo incluye la facilidad para derivar una parte, o bien todo el flujo de la presa (por ejemplo a través de generadores de electricidad). La fracción del flujo total que se deriva se suministra como una variable de entrada.

**Coliformes** - Los coliformes se usan como un indicador de contaminación por microorganismos patógenos en aguas superficiales. Las expresiones para estimar la concentración de coliformes son generalmente funciones de decaimiento de primer orden, las cuales solo toman en cuenta la muerte de coliformes. En el modelo se usa la expresión<sup>18</sup>:

$$\frac{dE}{dt} = -K_5 E \quad (2.80)$$

donde

- $E$  = Concentración de coliformes, colonias/100 ml.  
 $K_5$  = Velocidad de decaimiento de coliformes, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .

**Componente no conservativo adicional** - El modelo tiene la opción para modelar un componente no conservativo adicional (ANC). Además del mecanismo de decaimiento de primer orden, en el balance de masa se incluyen los términos de fuente y sumidero del componente. La ecuación diferencial que describe las interacciones para un componente no conservativo es:

$$\frac{dR}{dt} = -K_6 R - \sigma_6 R + \sigma_7 / d \quad (2.81)$$

donde

- $R$  = Concentración del componente no conservativo, mg-ANC/L  
 $K_6$  = Velocidad de consumo del componente, en función de la temp,  $d^{-1}$

- $\sigma_6$  = Coeficiente de velocidad para la sedimentación del componente, en función de la temperatura,  $d^{-1}$ .  
 $\sigma_7$  = Fuente béntica del componente, en función de la temp.,  $mg\text{-ANC}/ft^2\text{-d}$ .  
 $d$  = Profundidad media de la corriente, ft

**Temperatura.**- La temperatura se modela realizando un balance de energía sobre cada elemento computacional en el sistema. El balance de energía toma en cuenta las entradas y pérdidas de temperatura a partir de las funciones de forzamiento, así como el intercambio de calor entre la superficie del agua y la atmósfera. Los términos del balance de calor aire-agua incluyen radiación por ondas largas y cortas, convección y evaporación, esto es:

$$H_n = H_{sn} + H_{an} - H_b - H_c - H_e \quad (2.82)$$

donde

- $H_n$  = Flujo de calor neto pasando a través de la superficie aire agua,  $Btu/ft^2\text{-d}$   
 $H_{sn}$  = Radiación solar neta de onda corta, después de pérdidas por absorción y diseminación en la atmósfera y por reflexión en la interfase,  $Btu/ft^2\text{-d}$   
 $H_{an}$  = Radiación atmosférica neta de onda larga, después de reflexión,  $Btu/ft^2\text{-d}$ .  
 $H_b$  = Contra-radiación de salida de onda larga,  $Btu/ft^2\text{-d}$ .  
 $H_c$  = Flujo de calor conductivo,  $Btu/ft^2\text{-d}$   
 $H_e$  = Pérdidas de calor por evaporación, excluyendo pérdidas de calor sensible,  $Btu/ft^2\text{-d}$

Para que el programa ejecute los cálculos del balance de energía, el usuario debe proporcionar una variedad de datos, incluyendo la latitud y la longitud de la cuenca, la época del año, coeficientes de evaporación, y un coeficiente de atenuación por polvo. La información climatológica local, las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco del aire, la presión atmosférica y la velocidad del viento.

En régimen no permanente, los datos climatológicos deben ser suministrados a intervalos regulares (típicamente tres horas). De esta manera el término de fuente/sumidero, en el balance de calor, es actualizado en el tiempo para simular la respuesta diurna del sistema hidráulico estacional para los cambios en las condiciones de temperatura.

En el modo a régimen permanente, el usuario debe proporcionar los datos climatológicos locales promedio. El programa usa aproximaciones lineales para los términos de evaporación y contra-radiación de onda larga para la solución del balance de energía en estado estacionario.

En el modo a régimen no permanente los datos climatológicos locales son suministrados uniformemente sobre la cuenca entera del río, esto es, no hay

variaciones espaciales. En régimen permanente los datos climatológicos locales pueden variar, espacialmente en cada tramo.

**Corrección de coeficientes de velocidad** - Los valores de temperatura calculados en el modelo se usan para corregir los coeficientes de velocidad en los términos de fuente/sumidero para las otras variables de calidad del agua. Estos coeficientes son alimentados a 20°C y luego corregidos a la temperatura usando ecuaciones del tipo Streeter-Phelps:

$$X_T = X_{20} \theta^{(T-20)} \quad (2.83)$$

donde

- $X_T$  = Valor del coeficiente a la temperatura local.
- $X_{20}$  = Valor del coeficiente a la temperatura estándar.
- $\phi$  = Constante empírica para cada coeficiente de reacción.

El usuario puede especificar los valores de los factores de corrección de temperatura,  $\phi$ . En ausencia de dichos valores, se utilizan los valores por defecto de la Tabla 2.2.

Si no se simula la temperatura en forma explícita, se asume que la temperatura de simulación es la especificada para la condición inicial.

**Velocidades de reacción y constantes físicas** - Las reacciones químicas y biológicas están representadas por un grupo de ecuaciones que contienen muchos parámetros del sistema; algunos son constantes, otros son variables espaciales, y algunos son dependientes de la temperatura. En la Tabla 2.3 se enlistan estos parámetros y se dan sus intervalos generales, unidades y tipos de variación. Kramer<sup>19</sup>, Chen y Orlob<sup>20</sup>, y Browie<sup>21</sup>, exponen detalladamente las fuentes básicas de datos, intervalos y confiabilidad de cada uno de estos parámetros. La selección final de los valores para muchos de estos parámetros del sistema o mediciones de sensibilidad deberán de hacerse durante la calibración y verificación del modelo.

Tabla 2.2 Valores  $\phi$ . para la corrección de coeficientes de velocidad por temperatura

<b>Coefficiente de velocidad</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor por defecto</b>
Consumo de DBO	$K_1$	1.047
Sedimentación de DBO	$K_3$	1.024
Reaeración	$K_2$	1.024
Consumo de SOD	$K_4$	1.060
Consumo de nitrógeno orgánico	$\beta_3$	1.047
Sedimentación de nitrógeno orgánico	$\sigma_4$	1.024
Consumo de amonio	$\beta_1$	1.083
Generación de amonio	$\sigma_3$	1.074
Consumo de nitritos	$\beta_2$	1.047
Consumo de fósforo orgánico	$\beta_4$	1.047
Sedimentación de fósforo orgánico	$\sigma_5$	1.024
Generación de fósforo disuelto	$\sigma_2$	1.074
Crecimiento de algas	$\mu$	1.047
Respiración de algas	$\rho$	1.047
Sedimentación de algas	$\sigma_1$	1.024
Decaimiento de coliformes	$K_5$	1.047
ANC	$K_6$	1.000
ANC	$\sigma_6$	1.024
ANC	$\sigma_7$	1.000

ANC = Componente no conservativo arbitrario

Tabla 2.3 Intervalos típicos para los coeficientes de reacción\*

Variable	Descripción	Unidades	Intervalo
$\alpha_0$	Contenido de clorofila en algas	$\mu\text{g-Chl}_a/\text{mg A}$	10-100
$\alpha_1$	Contenido de nitrógeno en algas	$\text{mg-N}/\text{mg-A}$	0.07-0.09
$\alpha_2$	Contenido de fósforo en algas	$\text{mg-P}/\text{mg-A}$	0.01-0.02
$\alpha_3$	Producción de $\text{O}_2$ por crecimiento de algas	$\text{mg-O}/\text{mg-A}$	1.4-1.8
$\alpha_4$	Consumo de $\text{O}_2$ por respiración de algas	$\text{mg-O}/\text{mg-A}$	1.6-2.3
$\alpha_5$	Consumo de $\text{O}_2$ por oxidación de $\text{NH}_3$	$\text{mg-O}/\text{mg-N}$	3.0-4.0
$\alpha_6$	Consumo de $\text{O}_2$ por oxidación de $\text{NO}_2$	$\text{mg-O}/\text{mg-N}$	1.0-1.14
$\mu_{\text{max}}$	Velocidad máxima de crecimiento de algas	$\text{d}^{-1}$	1.0-3.0
$P$	Velocidad de respiración de algas	$\text{d}^{-1}$	0.05-0.5
$K_L$	Constante de Michaelis-Menton de semisaturación por efecto de luz	$\text{Btu}/\text{ft}^2\text{-min}$	0.02-0.10
$K_N$	Constante de Michaelis-Menton de semisaturación por efecto de nitrógeno	$\text{mg-N}/\text{L}$	0.01-0.30
$K_P$	Constante de Michaelis-Menton de semisaturación por efecto de fósforo	$\text{mg-P}/\text{L}$	0.001-0.05
$\lambda_0$	Coefficiente de extinción de luz por causas diferentes a la densidad de algas	$\text{ft}^{-1}$	Variable
$\lambda_1$	Coefficiente lineal de autoensombrecimiento por algas	$1/\text{ft}/\mu\text{g-Chl}_a/\text{l}$	0.002-0.02
$\lambda_2$	Coefficiente no lineal de autoensombrecimiento por algas	$1/\text{ft}/(\mu\text{g-Chl}_a/\text{l})^{2/3}$	0.0165
$P_N$	Factor de preferencia de algas por nitrógeno amoniacal		0.0-1.0

\* Coeficientes constantes para cada tramo. No dependen de la temperatura.

Tabla 2.3 Intervalos típicos para los coeficientes de reacción\*\* (continuación)

Variable	Descripción	Unidades	Intervalo
$\sigma_1$	Velocidad de sedimentación de algas	ft/d	0.5-6.0
$\sigma_2$	Velocidad de aportación de fósforo disuelto del bentos	mg-P/ft <sup>2</sup> -d	variable
$\sigma_3$	Velocidad de aportación de nitrógeno amoniacal del bentos	mg-N/ft <sup>2</sup> -d	variable
$\sigma_4$	Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	d <sup>-1</sup>	0.001-0.1
$\sigma_5$	Velocidad de sedimentación de fósforo orgánico	d <sup>-1</sup>	0.001-0.1
$\sigma_6$	Velocidad de sedimentación de un componente no conservativo adicional	d <sup>-1</sup>	variable
$\sigma_7$	Velocidad de aportación de un componente no-conservativo adicional, del bentos	mg-ANC/ft <sup>2</sup> -d	variable
$K_1$	Constante de velocidad de desoxigenación carbonosa	d <sup>-1</sup>	0.02-3.4
$K_2$	Constante de velocidad de reaeración	d <sup>-1</sup>	0.0-100
$K_3$	Constante de velocidad de sedimentación de DBO	d <sup>-1</sup>	-0.36-0.36
$K_4$	Consumo de oxígeno del sedimento	mg-O/ft <sup>2</sup> -d	variable
$K_5$	Velocidad de decaimiento de coliformes	d <sup>-1</sup>	0.05-4.0
$K_6$	Velocidad de decaimiento de un componente no conservativo adicional	d <sup>-1</sup>	variable
$\beta_1$	Constante de velocidad para la oxidación de NH <sub>3</sub> a NO <sub>2</sub>	d <sup>-1</sup>	0.10-1.00
$\beta_2$	Constante de velocidad para la oxidación de NO <sub>2</sub> a NO <sub>3</sub>	d <sup>-1</sup>	0.20-2.0
$\beta_3$	Constante de velocidad para la hidrólisis de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal	d <sup>-1</sup>	0.02-0.4
$\beta_4$	Constante de velocidad para la transformación de P-orgánico a P-disuelto	d <sup>-1</sup>	0.01-0.7

\*\* Coeficientes que dependen de la temperatura y son variables para cada tramo.

**Temperatura.** - La ecuación básica del transporte de masa es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left( A_v D_l \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{A_v} - \frac{\partial (A_v \bar{u} C)}{A_v \partial x} + \frac{dC}{dt} + \frac{s}{V} \quad (2.84)$$

Cuando se modela la temperatura, la concentración de calor  $C$  ( $\text{HL}^{-3}$ ) puede igualarse a la temperatura, a través de la relación:

$$C = \rho c (T - T_0) \quad (2.85)$$

donde

- $\rho$  = Densidad del agua ( $\text{ML}^{-3}$ ).
- $c$  = Capacidad calorífica del agua ( $\text{HM}^{-1}\text{D}^{-1}$ )
- $T$  = Temperatura del agua.
- $T_0$  = Temperatura base, arbitraria.
- $M$  = Masa
- $H$  = Flujo de energía calorífica.
- $D$  = Grados.

Los parámetros  $\rho$  y  $c$  pueden considerarse constantes para propósitos prácticos. También, la generación interna de calor  $dC/dt$ , que resulta de la disipación viscosa de energía y fricción en la frontera es muy pequeña, por lo que se considera despreciable. Así, estableciendo  $dC/dt = 0$ , en la ecuación 2.84 y sustituyendo en la ecuación 2.85, se obtiene C:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left( A_v D_l \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{A_v} - \frac{\partial (A_v \bar{u} T)}{A_v \partial x} + \frac{1}{\rho c} + \frac{s}{V} \quad (2.86)$$

El término de fuente  $s/V$  toma en cuenta todo el calor transferido a través de las fronteras del sistema, esto es, el calor transferido a través de la interfase aire-agua y el conducido a través de la interfase lodo-agua. La transferencia de calor a través de la interfase lodo-agua generalmente es insignificante; por lo tanto,  $s/V$  toma la identidad de la velocidad neta de entrada de calor por unidad del volumen de la corriente a través de la interfase aire-agua.

Es conveniente representar la velocidad de transferencia de calor interfacial como un flujo ( $H_N$ ) con unidades de  $\text{HL}^{-2}\text{T}^{-1}$ . A continuación se muestra la relación entre  $H_N$  y  $s/V$ , para un elemento de la corriente con longitud  $dx$  y ancho superficial medio  $W$



La velocidad total de entrada de calor a través de la interfase aire-agua es  $H_N dx W$ . Este calor está distribuido uniformemente a al volumen subyacente,  $\bar{A}_v dx$ , donde  $\bar{A}_v$  es el área de la sección transversal media del elemento.

Así, la velocidad de calor ganado por unidad de volumen de agua,  $s/V$ , se calcula como:

$$\frac{s}{V} = \frac{s}{\bar{A}_v dx} = \frac{H_N(Wdx)}{\bar{A}_v dx} = \frac{H_N}{d} \quad (2.87)$$

donde,  $d = \bar{A}_v / W$ , es la profundidad hidráulica de la corriente. Sustituyendo la ecuación 2.87 en la ecuación 2.86 se obtiene la forma generalizada de la ecuación de temperatura:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left( \bar{A}_v D_l \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\bar{A}_v} - \frac{\partial (\bar{A}_v \bar{u} T)}{\bar{A}_v} + \frac{H_N}{\rho c d} \quad (2.88)$$

El calor se transfiere a través de la interfase aire-agua, por tres diferentes caminos: radiación, evaporación, y conducción. Los términos de calor individual asociados con estos procesos se muestran en la figura 2.7 y están definidos en la Tabla 2.4, con los intervalos típicos de sus magnitudes.

Las expresiones que resultan de la suma de estos flujos de energía son:

$$H_N = H_{sn} + H_{am} - (H_b + H_c + H_e) \quad (2.89)$$

donde

- $H_N$  = Flujo neto de energía, pasando a través de la interfase aire-agua, Btu/ft<sup>2</sup>/d
- $H_{sn}$  = Flujo neto de radiación solar de onda corta, pasando a través de la interfase, después de pérdidas por absorción y dispersión en la atmósfera, así como por reflexión en la interfase, Btu/ft<sup>2</sup>/d.
- $H_{am}$  = Flujo neto de radiación atmosférica de onda larga pasando a través de la interfase, después de reflexión, Btu/ft<sup>2</sup>/d.
- $H_b$  = Flujo externo de contra-radiación, Btu/ft<sup>2</sup>/d.
- $H_c$  = Flujo de energía conductiva entre la interfase y la atmósfera, Btu/ft<sup>2</sup>/d.
- $H_e$  = Pérdidas de energía por evaporación, Btu/ft<sup>2</sup>/d.

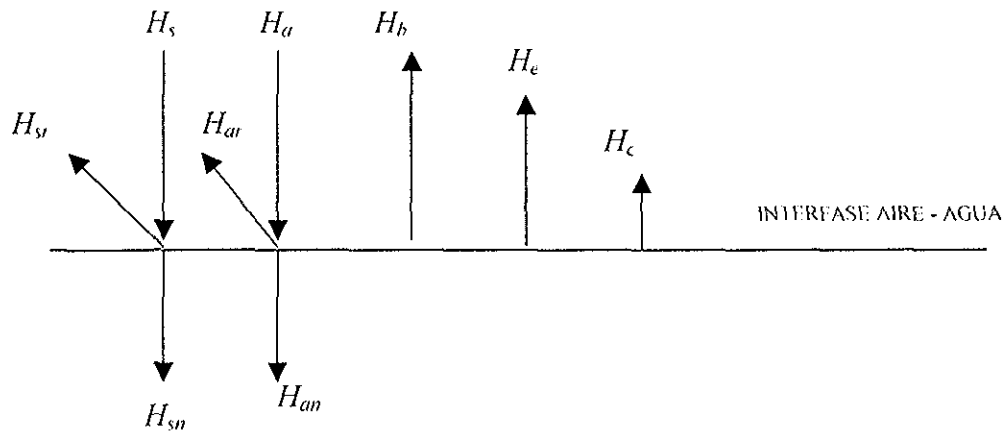


Figura 2.7 Términos de transferencia de calor asociada a la transferencia de calor interfacial.

Tabla 2.4 Definición de los términos de transferencia de calor ilustrados en la figura 2.7

Variable	Descripción	Unidades	Intervalo (Btu/ft <sup>2</sup> /d)
$H_s$	Radiación solar o de onda corta	HL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	400-2800
$H_{sr}$	Radiación de onda corta	HL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	40-200
$H_a$	Radiación atmosférica	HL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	2400-3200
$H_{ar}$	Radiación atmosférica reflejada	HL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	70-120
$H_b$	Radiación desde la superficie de agua	HL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	2400-3600
$H_e$	Pérdidas de calor por evaporación	HL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	150-3000
$H_c$	Pérdidas de calor por conducción	HL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	-320- a +400

**Radiación solar neta de onda corta ( $h_{sn}$ ).**-La radiación solar neta es una radiación de onda corta que pasa directamente del sol a la superficie del agua. Su magnitud depende de la altitud del sol, que cambia diaria y estacionalmente, el efecto de dispersión y absorción en la atmósfera debido a la nubosidad y la reflexión en la superficie terrestre.

La cantidad neta de radiación solar que llega a la superficie de la corriente puede representarse por hora de la siguiente manera:

$$H_{SN} = H_0 a_t (1 - R_s) (1 - 0.65 C_t^2) \quad (2.90)$$

donde:

$H_{sn}$	=	Radiación solar neta de onda corta, Btu/ft <sup>2</sup> -h.
$H_o$	=	Cantidad de radiación que llega a la corriente, Btu/ft <sup>2</sup> -h.
$a_t$	=	Término de transmisión atmosférica.
$R_s$	=	Coefficiente de reflexión.
$C_l$	=	Nubosidad como una fracción de cobertura del cielo.

La ecuación anterior se compone de cuatro elementos diferentes, radiación solar absorción y dispersión de la radiación, reflexividad y nubosidad.

**Radiación atmosférica de onda larga ( $H_{an}$ ).**- La radiación de onda larga emitida por la atmósfera cambia directamente con respecto al contenido de humedad en la atmósfera. Aunque depende principalmente de la temperatura y humedad, también puede afectarse por el ozono, bióxido de carbono y otros materiales de la atmósfera.

El flujo neto de radiación atmosférica se expresa como:

$$H_{an} = [2.89 * 10^{-6}] \sigma (T_s + 460)^6 (1.0 + 0.17 C_l^2) (1 - R_s) \quad (2.91)$$

donde:

$H_{an}$	=	Radiación atmosférica neta de onda larga, Btu/ft <sup>2</sup> -h.
$\sigma$	=	Constante de Stefan - Boltzman, $1.73 \times 10^{-9}$ Btu/ft <sup>2</sup> /h/°R <sup>4</sup> .
$T_s$	=	Temperatura del aire a 6 pies por arriba de la superficie del agua, °F
$R_s$	=	Reflexividad de la superficie del agua por radiación atmosférica = 0.03
$C_l$	=	Nubosidad, expresada como una fracción de cobertura del cielo.

**Salida de radiación de la superficie de agua ( $H_b$ ).**- La tercera fuente de transferencia de radiación de la superficie del agua,  $H_b$ , representa una porción sustancial de la pérdida de calor de un cuerpo de agua, y se expresa por la ley de la cuarta potencia de Stefan - Boltzman como:

$$H_b = 0.97 \sigma (T_s + 460)^4 \quad (2.92)$$

donde:

$H_b$	=	Salida de radiación de la superficie del agua, Btu/ft <sup>2</sup> -h.
$T_s$	=	Temperatura de la superficie del agua, °F

Esta ecuación se puede linearizar en un intervalo de temperatura para dar:

$$H_b = \alpha_2 + \beta_2 T_v \quad (2.93)$$

donde:

$\alpha_2$  y  $\beta_2$  = Constantes definidas en el intervalo de 35 a 135 °F.

esta ecuación se usa en el modelo para condiciones en estado estacionario.

**Evaporación.-** Un cuerpo de agua también cede calor a la atmósfera por evaporación. Cada libra de agua que se evapora desprende su calor latente de evaporación (aproximadamente 1050 Btu a 60 °F), además de su calor sensible. Esta pérdida de calor puede expresarse con la ecuación:

$$H_c = \gamma H_l E + H_s \quad (2.94)$$

donde:

$\gamma$  = Peso específico del agua, lb/ft<sup>3</sup>.

$H_l$  = Calor latente de evaporación, Btu/lb, dado por:  $H_l = 1084 - 0.5 T_s$ .

$E$  = Velocidad de evaporación, ft/h.

$H_s$  = Pérdida de calor sensible, Btu/ft<sup>2</sup>-h

La velocidad de evaporación se expresa como:

$$E = (a + bW)(e_s - e_a) \quad (2.95)$$

donde:

$a$  y  $b$  = Constantes

$W$  = Velocidad del viento, en mph, medida 6 ft por arriba de la superficie del agua.

$e_s$  = Presión de vapor de saturación del aire, en pulg de Hg, a la temperatura de la superficie del agua, dada por:

$$e_s = 0.1001 \exp(0.03T_s) - 0.0837 \quad (2.96)$$

$e_a$  = Presión de vapor del agua, en pulg de Hg, a una altura de 6 pies por arriba de la superficie del agua, dada por:

$$e_a = e_{u,b} - 0.000367 P_a (T_a - T_{u,b}) \left( 1.0 + \frac{T_{u,b} - 32}{1571} \right) \quad (2.97)$$

donde:

$e_{wb}$  = Presión de vapor de saturación, en pulg. de Hg. a la temperatura de bulbo húmedo obtenida de la expresión:

$$e_{wb} = 0.1001 \exp(0.03T_{wb}) - 0.0837 \quad (2.98)$$

donde

$P_a$  = Presión barométrica local, pulg. de Hg.

$T_{wb}$  = Temperatura de bulbo húmedo, °F.

$T_a$  = Temperatura de bulbo seco, °F.

En la simulación en estado estacionario, la velocidad de evaporación se lineariza con respecto a la temperatura de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$e_s = \alpha_1 + \beta_1 T_s \quad (2.99)$$

La pérdida de calor sensible en la evaporación es muy pequeña comparada con los otros componentes, por lo que el modelo no la utiliza en sus cálculos.

**Conducción ( $H_c$ ).**- La transferencia de calor a través del agua y de la atmósfera debido a la diferencia de temperaturas entre las dos fases se conoce como conducción. Debido a que la transferencia por conducción es función de las mismas variables que la evaporación, se puede llegar a una proporcionalidad entre la conducción de calor y la pérdida de calor por evaporación. Esta proporcionalidad se conoce con el nombre de razón de Bowen, y se expresa como:

$$B = \frac{H_s}{H_e} = C_B \left( \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \right) \frac{P_a}{29.92} \quad (2.100)$$

donde:

$$C_B = 0.01$$

Usando la ecuación de Bowen, la razón de pérdida de calor a la atmósfera por conducción,  $H_c$ , se define como:

$$H_c = \gamma H_e (a + b_w) \left( 0.01 \frac{P_a}{29.92} \right) (T_s - T_a) \quad (2.101)$$

Para propósitos prácticos  $P_a/29.92$  se toma igual a 1

## 2.2 Estaciones de muestreo y aforo

Los sitios de muestreo y aforo se seleccionan bajo los siguientes requerimientos de información:

- Para contar con la información necesaria para realizar el balance de materiales en la corriente a modelar, se incluye una estación de muestreo y aforo en cada una de las entradas de materiales, esto es, en las descargas de aguas residuales municipales e industriales, en drenes agrícolas, ríos y arroyos que confluyan en la corriente a modelar, así como en el punto considerado como inicio de la corriente. Con el mismo propósito se incluye una estación de muestreo y aforo en cada una de las salidas de materiales, es decir, en canales para riego, tomas de abastecimiento a plantas potabilizadoras, y otros aprovechamientos significativos incluyendo también una estación sobre la corriente, en el punto considerado como el final de la corriente
- Se incluye una estación de muestreo y aforo sobre la corriente, aguas arriba de las aportaciones de descargas, drenes, ríos, arroyos, y aguas arriba de los aprovechamientos como canales de riego, tomas para plantas potabilizadoras, entre otros. En estos sitios, es indispensable el muestreo ya que es necesario conocer las concentraciones de los distintos contaminantes en la corriente. Este perfil de concentraciones a lo largo del río es la base para la calibración del modelo de calidad del agua. Por otro lado, en estos sitios también es indispensable el aforo, porque a lo largo de la corriente hay entradas y salidas no identificadas, como pueden ser descargas y arroyos pequeños o intermitentes, aportaciones del acuífero y lluvia, o bien, aprovechamientos pequeños, intermitentes o clandestinos e infiltraciones. Todas estas entradas y salidas adicionales se toman en cuenta determinando los incrementos de gasto cuantificados con los datos de aforo obtenidos en estas estaciones.
- Es necesario localizar estaciones de monitoreo antes y después de obras hidráulicas como presas, zonas de explotación de materiales pétreos, cascadas, remansos y lagunas, ya que en estos casos se presentan modificaciones significativas en los procesos de calidad del agua.
- Asimismo, debe incluirse una estación de muestreo y aforo en tramos de características hidráulicas uniformes a cada 15 ó 20 km, distancia en la cual se ha observado que existen posibles cambios significativos en la calidad del agua.
- Adicionalmente a las anteriores, deben incluirse las estaciones de muestreo y aforo que sean requeridas por el modelo seleccionado.

- Con el propósito de generar una primera propuesta de localización de estaciones de muestreo y aforo, en un mapa se señala lo siguiente:
  - Corriente a clasificar
  - Afluentes (ríos, arroyos, drenes, etc.)
  - Aprovechamientos (canales, tomas de plantas potabilizadoras, tomas de grandes usuarios, etc.)
  - Descargas a la corriente (descargas de aguas residuales municipales, industriales y de retorno agrícola)
  - Presas, lagos, lagunas, estuarios, bahías.
  - Zonas revestidas, entubadas y embovedadas, en la corriente
  - Zonas de explotación de materiales, en la corriente
  - Remansos y rápidos, en la corriente.
  - Tramos de la corriente sin flujo.

Con este señalamiento, y tomando en cuenta los criterios para la división de la corriente, se hace una primera propuesta de seccionamiento

A continuación se hace la propuesta de localización de estaciones de muestreo y aforo, con base en los criterios para la localización antes indicados.

Se completa la propuesta con lo siguiente:

- Clave y nombre de las estaciones de muestreo y aforo.
- Clave y nombre de las secciones de la corriente.

**Recorrido de campo.**- La primera propuesta sirve de base para realizar eficientemente el recorrido de campo de la corriente a clasificar.

El recorrido de campo tiene como objetivo verificar la existencia y la magnitud de todo lo señalado en la primera propuesta (corrientes, descargas, infraestructura hidráulica, etc.), y decidir el seccionamiento final de la corriente y la ubicación definitiva de las estaciones de muestreo y aforo, sitios que deben de cumplir con los objetivos señalados y además con los siguientes:

- Presentan accesibilidad adecuada
- Se puede realizar el muestreo y aforo con la repetibilidad necesaria.
- Presentan condiciones seguras para los muestreadores y aforadores.
- Son representativas de las condiciones de calidad de agua que prevalecen en el lugar.
- En estaciones sobre la corriente, existe una mezcla adecuada de agua para asegurar la homogeneidad de la corriente.

- En estaciones sobre la corriente, antes de afluentes y descargas, el sitio de muestreo y aforo se localiza a una distancia corta, pero suficiente, para que no exista influencia de dichas aportaciones.
- En estaciones en afluentes y descargas, el sitio se localiza a una distancia cercana, pero suficiente, para que la medición sea tomada correctamente de la aportación, sin la influencia de la corriente receptora.
- Se evitan sitios de estancamiento y depósito de sólidos, como remansos y lugares de acumulación de natas y sólidos.

La localización definitiva de estaciones de muestreo y aforo, es el resultado del ajuste y validación de la propuesta inicial a través del recorrido de campo.

En el recorrido, se determinan las coordenadas, latitud y longitud, de las estaciones de muestreo y aforo definitivas.

### **2.3 Selección de parámetros a evaluar**

La selección de los parámetros a evaluar en el estudio se hace bajo las siguientes consideraciones:

- Fuentes de contaminación existentes en la zona de estudio, tanto de fuentes antropogénicas como de origen natural.
- Usos actuales y potenciales de la corriente.
- Evaluaciones precedentes de la calidad del agua, tanto de la Red Nacional de Monitoreo, como de estudios de calidad o de clasificación, realizados en el ámbito central, regional y estatal.
- Los requerimientos de información del modelo seleccionado para la simulación de la calidad del agua. Por ejemplo, para simular algunos parámetros, como nitrógenos, generalmente es necesario incluir, entre los parámetros a determinar, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos, que están ligados al ciclo del nitrógeno.

### **2.4 Programa de monitoreo y aforo**

El programa de muestreo y aforo de la corriente a clasificar, tiene los siguientes objetivos:

- Determinar los parámetros fisicoquímicos y biológicos previamente seleccionados por su importancia para el caso en estudio, en las estaciones de muestreo y aforo establecidas, tanto en la corriente a clasificar como en las confluencias de sus principales afluentes y descargas de aguas residuales.



- Obtener los valores de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que permitan identificar la importancia relativa de cada fuente de contaminación con base en la magnitud y características de sus aportaciones y el efecto que producen en la calidad del agua de la corriente
- Obtener los valores de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que se utilizarán en la calibración del modelo de calidad del agua seleccionado, para cada uno de los tramos en que se dividió la corriente para su estudio

Todas las actividades de muestreo y aforo deberán cumplir con el marco normativo, siguiendo los protocolos de muestreo vigentes.

#### Campañas de monitoreo y aforo

La toma de muestras, el aforo de la corriente y la determinación de los parámetros de los muestreos en campo y en laboratorio, deben realizarse conforme a lo que se establece en la normatividad vigente. Los aforos se realizarán utilizando la metodología recomendada para el volumen a medir en las corrientes, descargas, obras de derivación y toma.

Se requiere cinco campañas de monitoreo y aforo como mínimo, cubriendo todas las estaciones establecidas en el estudio, tanto en la corriente a clasificar como en los afluentes, descargas, aprovechamientos, etc.

Las campañas de muestreo y aforo deben realizarse durante la época de estiaje, ya que en este periodo de escasez de agua, la concentración de contaminantes es mayor, por lo que se presentan las condiciones más críticas.

### **2.5 Evaluación de la calidad del agua**

Antes de iniciar las campañas de muestreo, se realiza una evaluación de la evolución de la calidad del agua, con la información histórica disponible y utilizando el Índice de Calidad del Agua, ICA, y, adicionalmente, se identifican los parámetros que exceden los criterios de calidad para cada uso de la corriente.

Con los resultados de las campañas de monitoreo realizadas durante el estudio, se evalúa la calidad del agua actual de la corriente, con respecto a sus usos actuales y potenciales. Se determinan los parámetros que exceden los criterios de calidad para cada uso de la corriente y la problemática ocasionada por los principales contaminantes.

Con respecto a las descargas de aguas residuales, se evalúa el nivel de cumplimiento de los límites máximos establecidos en la NOM-001 y en su caso, de sus condiciones particulares de descarga.

Se determina la carga de contaminantes, como base para establecer la importancia relativa de cada fuente de contaminación.

## **2.6 Calibración del modelo de calidad del agua**

La calibración del modelo consiste en determinar las constantes y variables de una serie de ecuaciones que representan reacciones químicas y biológicas y cambios físicos, en los parámetros de calidad del agua, para que el modelo reproduzca satisfactoriamente los perfiles de concentración de cada parámetro a lo largo de la corriente, bajo la situación actual de descargas de aguas residuales municipales, industriales y agrícolas.

Para calibrar el modelo se utilizan los promedios de los resultados de los muestreos realizados, ponderados con gasto.

El proceso de calibración del modelo implica la generación de un esquema o prototipo del sistema, que involucra una idealización gráfica a través de la descripción de las propiedades geométricas que se van a modelar y la identificación de las condiciones a la frontera y las interrelaciones entre las diversas partes del prototipo.

Este prototipo del sistema va a permitir la comunicación con el programa del modelo, esto es, la entrada y salida de datos.

Los requerimientos específicos del prototipo del sistema dependen del modelo seleccionado.

El modelo deberá reproducir satisfactoriamente el perfil de concentraciones de cada parámetro a lo largo de la corriente, bajo las condiciones actuales en cuanto a gastos y concentraciones de contaminantes, tanto de afluentes como de efluentes.

## **2.7 Capacidad de asimilación y dilución de contaminantes**

Una vez que el modelo se ha calibrado, éste reproducirá satisfactoriamente las concentraciones de los parámetros bajo las condiciones actuales del sistema. Las gráficas generadas como resultado del proceso de calibración del modelo, muestran

estas concentraciones y son la herramienta que permite calcular la capacidad de asimilación y dilución de la corriente en estudio.

Asimilación: Es la cantidad de materia orgánica biodegradable, en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO, en mg/L, que es asimilada por los microorganismos presentes en el agua.

De lo anterior, la Capacidad de Asimilación se define como la diferencia entre el valor máximo del contaminante en una determinada sección del río y el valor límite máximo permisible de ese contaminante de acuerdo al uso del recurso establecido.

$$n = C_1 - C_m \quad (2.102)$$

donde:

- n = Capacidad de asimilación de la corriente, mg/L.  
 $C_1$  = Concentración máxima permisible del contaminante en la corriente de acuerdo al uso (CE-CCA o valor normativo)  
 $C_m$  = Concentración máxima del contaminante en la corriente.

Dilución.- La dilución de contaminantes se estima con base en el balance de masa, de la siguiente manera:

$$D = \frac{(Q_d * C_d) + (Q_a * C_a)}{(Q_d + Q_a)} \quad (2.103)$$

donde:

- D = Dilución de los contaminantes de un afluente o descarga, en la corriente principal, mg/L.  
 $Q_d$  = Gasto del afluente del río o descarga, L/s.  
 $C_d$  = Concentración del contaminante del afluente o descarga, mg/L.  
 $Q_a$  = Flujo de la corriente principal inmediatamente antes de la entrada del afluente o descarga, L/s.  
 $C_a$  = Concentración del contaminante en la corriente principal, inmediatamente antes del afluente o descarga, mg/L.

Capacidad de dilución.- Es la carga de un contaminante, en kg/h, adicional a las aportaciones provenientes de las descargas de aguas residuales que actualmente tiene, que puede recibir un cuerpo receptor, en forma tal que no exceda en ningún lugar la

concentración máxima permisible del contaminante, calculada con base en el Gasto de Estiaje

## 2.8 Gasto de Conservación Ecológica

La determinación del Gasto de Conservación Ecológica se realiza con base en una versión modificada del Método de Tennant o de Montana

Para determinar el Gasto de Conservación Ecológica, se considera los registros diarios promedio del gasto original de los años que se tenga información (periodo de cálculo) de la sección de la corriente considerada.

Con los registros de los caudales promedios diarios se determina el gasto promedio mensual. Los valores promedio mensuales se toman como base para determinar el gasto promedio mensual que deberá escurrir en el cauce, o Gasto de Conservación Ecológica, que se obtiene de multiplicar el valor del gasto promedio mensual por 0.10.

$$Q_{ECOi} = 0.1 (Q_{PROMi}) \quad (2.104)$$

donde:

$$\begin{aligned} Q_{ECOi} &= \text{Gasto de Conservación Ecológica, m}^3/\text{s. en el mes } i. \\ Q_{PROMi} &= \text{Gasto promedio del mes } i, \text{ m}^3/\text{s.} \end{aligned}$$

Para analizar el comportamiento de los contaminantes en el cuerpo de agua, a través de la simulación de los escenarios en que se involucra la medida de conservar el gasto ecológico en la corriente, se tomará como base de cálculo, el Gasto Ecológico del mes más seco.

## 2.9 Simulación de la calidad del agua

Los resultados de la simulación van a diferir, en cierta medida, de las condiciones reales; sin embargo, el empleo de modelos para la simulación es la mejor manera de predecir los efectos en la calidad de un cuerpo de agua que se van a presentar a causa de ejercer acciones de regulación y control de la contaminación, como es eliminar o reducir la carga de contaminantes en las descargas, o aumentar el gasto actual de la corriente para mantener el Gasto de Conservación Ecológica

La simulación de la calidad del agua se realiza con el objeto de predecir los cambios en los perfiles de concentración de los parámetros a lo largo de la corriente, bajo distintos escenarios, como son la aplicación y cumplimiento de la NOM-001

ECOL/1996 a las descargas de aguas residuales para los diferentes usos que tiene el cuerpo de agua, y el cumplimiento del gasto de conservación ecológica en la corriente

Los escenarios planteados para simular la aplicación y cumplimiento de la NOM-001 deben incluir los principales usos del cuerpo de agua. Para el caso de corrientes superficiales, estos son: Uso en riego agrícola (A), Uso público urbano (B), y Protección de vida acuática (C).

Si la aplicación de la NOM-001 a las descargas es insuficiente para alcanzar las metas de calidad propuestas, se realizan corridas de simulación adicionales. Estas corridas se llevan bajo el supuesto de que las descargas cumplen con límites de concentración de contaminantes más estrictos que los establecidos en la NOM-001. En tales casos, estas concentraciones más estrictas, pero indispensables para alcanzar las metas de calidad, serán los límites máximos permisibles para las descargas de aguas residuales.

Todos los escenarios de regulación de las descargas deben considerar que se regula también el gasto, esto es, se mantiene en la corriente el Gasto de Conservación Ecológica.

Un grupo adicional de escenarios se plantean con los mismos límites de regulación de descargas pero asumiendo que no se mantiene el Gasto de Conservación Ecológica, esto es, considerando las condiciones de gasto promedio, durante las campañas de monitoreo que, como ya se dijo, se realizan durante la época de estiaje.

Los resultados de la simulación de escenarios se presentan en forma gráfica para facilitar su interpretación y análisis.

En la simulación, se analiza el cambio de la calidad del agua de la corriente en estudio, por efecto de disminuir la concentración de contaminantes en las descargas de aguas residuales. Se determina cual debe ser el nivel de contaminantes presentes en las descargas, de tal forma que se mantenga la concentración de contaminantes en la corriente por debajo del criterio de calidad, para el uso que se analiza.

Se establece como límite máximo permisible en las descargas de aguas residuales, la concentración máxima del contaminante en las descargas, que durante las respectivas corridas de simulación, no provoca incumplimiento del criterio de calidad, para el uso analizado, siempre que este valor sea inferior al especificado en la NOM-001.

Si de la corrida de simulación correspondiente se determina que el valor establecido en la NOM-001 es suficiente para que el cuerpo de agua cumpla con el criterio de calidad, se establece dicho valor como límite máximo permisible en las descargas de aguas residuales del tramo considerado.

Los criterios de calidad que se utilizan como referencia en la simulación son los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, de acuerdo al uso que se considere, según el caso, y se determinan para cada sección o secciones de la corriente, en que se dividió para su estudio, y considerando

- La calidad actual del agua de la corriente.
- Los usos actuales y las prioridades de uso, y
- Los proyectos de uso de la corriente, en el corto, mediano y largo plazo

## 3.

### **Aplicación a la simulación de la calidad del agua del río San Juan**

#### **3.1 Descripción de la cuenca del río San Juan**

La subcuenca del río San Juan forma parte de la cuenca del Alto río Pánuco y tiene una superficie de 5,427 km<sup>2</sup> que comparten el Estado de México, Querétaro e Hidalgo. Se localiza al noroeste del Valle de México, colinda con la subcuenca del río Tula, que también forma parte del Alto río Pánuco y con el parteaguas continental entre las cuencas del Golfo de México y el Océano Pacífico

El río San Juan nace en el Estado de México, aguas arriba de la presa Huapango, toma una dirección de sur a norte a partir del arroyo Zarco, recibe aportaciones de los arroyos Prieto, Galindo, El Caracol, Escolásticas y La "D"; pasa por el Distrito de Riego No. 023, San Juan del Río, y las ciudades de San Juan del Río y Tequisquiapan y concluye en la confluencia con el río Tula en la presa Zimapán, para formar el río Moctezuma.

La infraestructura existente actual para el tratamiento de aguas residuales es de 18 plantas para descargas de tipo industrial con una capacidad instalada de 770 L/s, una planta municipal en San Juan del Río con 125 L/s, y tres plantas rurales. De acuerdo a la organización política del país, la cuenca del río San Juan está conformada por parte del Estado de México, Hidalgo y Querétaro, con 1,154, 1,367 y 2,906 km<sup>2</sup> de superficie, respectivamente.

Los municipios que conforman la cuenca del río San Juan son Huichapan, Nopala y Tecozautla, en Hidalgo; Polotitlán, Aculco y San Andrés Timilpan, en el Estado de México y San Juan del Río, Pedro Escobedo, Tequisquiapan, Ezequiel Montes y Amealco, en Querétaro.

La cuenca se encuentra en la parte norte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, el cual atraviesa la República del Océano Pacífico al Golfo de México. El parteaguas norte está sobre la Sierra Gorda, mientras que el parteaguas occidental se encuentra sobre la Sierra Queretana, la cual limita las vertientes del Pacífico y del Golfo. En ella nacen algunos de los principales formadores del río San Juan, tales como el río Arroyo Zarco, el río Galindo y el arroyo La H, entre otros. Las mayores elevaciones son los cerros Huamango con 2,900 msnm y del Astillero, San Nicolás y la Virgen con 2,850 msnm.

El colector principal es el río San Juan. Con el nombre de río Arroyozarco nace en el cerro San Nicolás, en la porción sur de la cuenca, a una altitud de 2.750 msnm. Después de la unión del río Arroyozarco con el río Prieto, el colector principal recibe el nombre de río San Juan. Los principales afluentes se encuentran por margen izquierda, sobresaliendo el mencionado río Prieto, los ríos Galindo, La "H" y el arroyo la "D", los cuales confluyen al colector principal mediante los dienes el Caracol y la Culebra. Otros aportadores por la misma margen son los arroyos Ajuchitlán y Cadereyta. Los afluentes por margen derecha son menos importantes y sólo sobresalen el río San Sebastián, que descarga sus aguas al colector cuando éste aún se conoce como río Arroyozarco y el río Hondo, que aporta sus aguas y las del río Tecozautla, unos 17 km aguas arriba de la unión del río San Juan con el río Tula, la cual se encuentra a la elevación 1.600 msnm. El río San Juan tiene desde sus orígenes hasta este punto una longitud aproximada de 174 km.

La cuenca presenta dos climas predominantes, el semiseco templado y el templado subhúmedo. El primero comprende desde el centro al norte de la cuenca, mientras que el segundo corresponde a la parte sur.

La cuenca presenta un régimen de lluvias de verano, abarcando los meses de junio a octubre. La precipitación media anual varía de la zona alta con 800 mm a la zona baja con 500 mm. La precipitación media anual de la cuenca es de 617 mm.

Las temperaturas medias anuales varían entre 14 y 18 °C, con un valor medio de 16.4 °C, aunque se han registrado puntualmente temperaturas extremas cercanas a los 5 y 40 °C.

La evaporación media en la cuenca es de casi 1.950 mm, pero se han registrado valores anuales extremos de 1.474 y 2.887 mm.

La infraestructura hidráulica de almacenamiento en la subcuenca tiene una capacidad de 277.3 Mm<sup>3</sup>. Las principales obras de almacenamiento de la cuenca son las presas Huapango, el Molino, San Ildefonso, Constitución de 1917 y la presa Madero, y en menor medida las presas Centenario, la Llave, La Venta, San Juanico, San Lucas, Huaracha y San Antonio.



Tabla 3.1 Infraestructura hidráulica de almacenamiento en la cuenca del río San Juan

Presa	Corriente	Estado	Capacidad total (Mm <sup>3</sup> )	Capacidad útil (Mm <sup>3</sup> )
Huapango	río Arroyozarco	Edo. Méx.	121.3	119.3
Constitución de 1917	río Galindo y la H	Querétaro	69.8	66.5
San Ildefonso	río Prieto	Querétaro	52.7	50.9
Madero	río Hondo	Hidalgo	25.0	24.9
Ñadó	río Ñadó	Edo. Méx.	16.8	14.9
Centenario	río San Juan	Querétaro	16.0	16.0
La Llave	Dren Caracol	Querétaro	9.3	9.3
Molino	río Arroyo Zarco	Edo. Méx.	7.6	7.1
San Antonio	río Arroyo Zarco	Edo. Méx.	3.0	3.0
La Venta	a. Ajuchitlancito	Querétaro	2.5	2.5

Existen además varias presas derivadoras con diferentes fines, entre las que sobresalen San José que deriva agua del río San Juan a la presa Constitución de 1917, Lomo de Toro, para alimentar los canales del Distrito de Riego 023 y Paso de Tablas, para alimentar la planta hidroeléctrica Las Rosas.

En la cuenca se han identificado cinco acuíferos, que en total cubren una extensión de 1.925 km<sup>2</sup>, representando un 35% de la superficie total de la cuenca. Los acuíferos de San Juan del Río, Tequisquiapan y Cadereyta se localizan en Querétaro y tienen una extensión de 1.363 km<sup>2</sup>. El acuífero Huichapan-Tecozautla se encuentra bajo una superficie de 295 km<sup>2</sup> de Hidalgo y el acuífero de Polotitlán ocupa una extensión de 267 km<sup>2</sup> en el Estado de México.

Se estima que la demanda actual de los sectores usuarios de las aguas superficiales de la cuenca del río San Juan es de 216 Mm<sup>3</sup>, siendo el principal demandante el sector agrícola con 210 Mm<sup>3</sup>, lo que representa 96% de la demanda total en la cuenca. El resto es demandado para el abastecimiento de agua a centros de población.

Dentro de la cuenca del río San Juan se localiza la central hidroeléctrica Las Rosas, situada aguas abajo de la presa derivadora Paso de Tablas, en la cual se origina el canal que alimenta la planta. La presa Centenario es la fuente de abastecimiento de este sistema. La hidroeléctrica tiene una demanda anual de 18 Mm<sup>3</sup>, volumen que luego es descargado al cauce del río unos 50 km antes de la confluencia del río San Juan con el río Tula, sitio donde actualmente se localiza la presa hidroeléctrica Zimapán.

En la actualidad la central hidroeléctrica de Las Rosas funciona sólo esporádicamente dada la disminución de volúmenes aprovechables de la presa Centenario, los cuales se emplean para riego de unidades de los estados de Hidalgo y Querétaro

En la región existen actualmente cinco acuíferos que cubren una superficie de 1,925 km<sup>2</sup> y representan 35% de la superficie total de la cuenca. En la cuenca se ha detectado la existencia de 1,289 aprovechamientos de aguas subterráneas que en conjunto extraen un volumen anual de 580 98 Mm<sup>3</sup>. El uso principal de las aguas del subsuelo en la cuenca es para fines agrícola y pecuario con 87.8%, le sigue el uso público urbano y doméstico con 7.3% y finalmente el uso industrial con 4.9%

El Distrito de Riego 096, río Arroyozarco tiene una superficie regable total de 19,050 ha, de las cuales 9% de ubican en Hidalgo y el resto en el Estado de México. Sus fuentes de abastecimiento son nueve almacenamientos con una capacidad útil total de 146.3 Mm<sup>3</sup>, destacan: Huapango, El Molino, Ñadó y San Antonio. Existen además siete derivadoras.

El Distrito de Riego 023, San Juan del Río, se ubica en el estado de Querétaro y cuenta con una superficie de 11,324 ha. Sus fuentes de abastecimiento son cuatro almacenamientos con una capacidad útil total de 129.2 Mm<sup>3</sup>: San Ildefonso, Constitución de 1917, la Llave y la Venta. Cuenta además con dos derivadoras y varios pozos profundos. Internamente los usuarios del distrito se han agrupado en tres módulos que se denominan módulos I y II y el ejido La Palma.

La cuenca del río San Juan ha tenido un gran desarrollo sobre todo en su porción del estado de Querétaro. Esto ha influido grandemente en la disponibilidad de las aguas, tanto superficial como subterránea. Basta señalar que hasta 1970, año en que entró en operación la presa de almacenamiento Constitución de 1917, se contabilizaban entradas a la presa Centenario del orden 80 Mm<sup>3</sup> anuales y actualmente estas han disminuido a 14 Mm<sup>3</sup>, los cuales incluyen 8 Mm<sup>3</sup> de aguas residuales urbano-industriales de la ciudad de San Juan, por lo que la cuenca sólo aporta 6 Mm<sup>3</sup> en promedio.

Considerando que la cuenca tiene una extensión de 5,427 km<sup>2</sup> y que la lámina de precipitación media anual es de 617 mm, el volumen precipitado sobre la cuenca asciende a 3,347 Mm<sup>3</sup>. Se estima que de este volumen sólo 11% conforma el escurrimiento superficial. Así, la cuenca del río San Juan genera un escurrimiento virgen del orden de 350 Mm<sup>3</sup>, de los cuales 37% se genera en la porción del Estado de México, 48 % en Querétaro y 15 % en Hidalgo. En condiciones originales y todavía hasta la década de 1970 existían aportaciones de manantiales, las cuales se estimaban en unos 40 Mm<sup>3</sup> anuales. Actualmente se considera que debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos estas aportaciones se han reducido a un 25%

En los últimos treinta años se ha intensificado la extracción de aguas subterráneas localizadas en la cuenca del río San Juan, este hecho está asociado al creciente desarrollo de los sectores agrícola, pecuario, industrial y de servicios de la región. La extracción de 580 98 Mm<sup>3</sup> de aguas del subsuelo que se realiza en la cuenca, representa 2.4% del volumen total de la extracción en el ámbito nacional.

### 3.2 Monitoreo de la calidad del agua y aforo del río San Juan

Los trabajos de monitoreo y aforo fueron realizados por las gerencias estatales de la Comisión Nacional del Agua, en el Estado de México, Querétaro e Hidalgo.

Los parámetros de campo incluidos son conductividad, oxígeno disuelto, potencial de hidrógeno, temperatura ambiente y temperatura del agua. Los parámetros de laboratorio son, acidez total, alcalinidad total, cloruros, coliformes fecales, coliformes totales, color, DBO, DQO, dureza de calcio, dureza de magnesio, dureza total, fósforo total, fósforo total disuelto, grasas y aceites, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitrógeno total, ortofosfatos, sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales, sulfatos, y sustancias activas al azul de metileno.

Las estaciones de monitoreo y aforo localizadas sobre la corriente principal, el río San Juan, son las siguientes:

Tabla 3.2 Estaciones de monitoreo y aforo localizadas sobre el río San Juan

Estado de México:

Clave	Descripción	km
RM1	Aguas arriba de Sta. María Nativitas	133
RM2	Aguas arriba de CONFECSA	128
RM3	Aguas abajo de CONFECSA	128
RM4	Aguas arriba de la presa Cofradía	125
RM5	Aguas abajo de la presa Cofradía	123
RM6	Aguas arriba de la confluencia del arroyo Ñadó	119
RM7	Aguas abajo de confluencia arroyo Ñadó	118
RM8	Aguas arriba de la presa San Ildefonso	116

Tabla 3.2 Estaciones de monitoreo y aforo localizadas sobre el río San Juan (continuación)

Querétaro:

Clave	Descripción	km
RQ9	Aguas abajo de la presa San Ildefonso	106
RQ10	Aguas abajo de la confluencia del arroyo Zarco	96
RQ11	Aguas arriba de la presa Constitución de 1857	91
RQ12	Aguas abajo de la presa Constitución de 1857	82
RQ13	Aguas abajo de la presa Lomo de Toro	81
RQ14	Aguas abajo de la descarga municipal de San Juan del Río (IV)	70
RQ15	Aguas arriba del dren La Culebra	61
RQ16	Aguas abajo del dren La Culebra	60
RQ17	Aguas arriba de la presa Centenario	56
RQ18	Aguas abajo de la presa Centenario	48
RQ19	Aguas abajo de la descarga del Club de Golf Tequisquiapan	41

Hidalgo:

Clave	Descripción	km
RH20	Aguas abajo de la presa Paso de Tablas	37
RH21	Aguas arriba de la descarga del geiser	19
RH22	Aguas abajo de la descarga del geiser	12
RH23	Aguas arriba de la presa Zimapán	1

De las 23 estaciones localizadas sobre el río San Juan, se incluyeron 8 estaciones en el Estado de México, 11 en Querétaro y 4 en Hidalgo. Las estaciones para monitorear las descargas de aguas residuales localizadas sobre el río San Juan, así como de los afluentes, el arroyo Ñadó y el arroyo Zarco, son:

Tabla 3.3 Estaciones de monitoreo y aforo localizadas sobre las descargas y afluentes del río San Juan

en el Estado de México:

Clave	Descarga	Tipo	km
DM1	CONFECSA	Industrial	127
DM2	Descarga Municipal Aculco I	Municipal	127
DM3	Ojo de agua	Manantial	127
DM4	Descarga Municipal Aculco II	Municipal	126
AM1	Arroyo Ñadó	Afluente natural	118

Tabla 3.3 Estaciones de monitoreo y aforo localizadas sobre las descargas y afluentes del río San Juan (continuación)

En Querétaro:

Clave	Descarga	Tipo	km
AQ2	Arroyo Zarco	Afluente natural	96
DQ5	Kimberly Clark	Industrial	82
DQ6	Descarga Municipal San Juan del Río I	Municipal	77
DQ7	Descarga Municipal San Juan del Río II	Municipal	77
DQ8	PITSA	Industrial	76
DQ9	Rastro	Industrial	73
DQ10	QUIMPRO	Industrial	71
DQ11	Ponderosa	Industrial	70
DQ12	Descarga Municipal San Juan del Río III	Municipal	70
DQ13	Descarga Municipal San Pedro Ahuacatlán I	Municipal	67
DQ14	Descarga Municipal San Pedro Ahuacatlán II	Municipal	64
DQ15	CERESO	Municipal	63
DQ16	Dren La Culebra	Agrícola	61
DQ17	Descarga Municipal San Nicolás	Municipal	57
DQ18	Descarga Municipal Tequisquiapan I	Municipal	47
DQ19	Descarga Municipal Tequisquiapan II	Municipal	45
DQ20	Descarga Municipal Tequisquiapan III	Municipal	45

En Hidalgo:

Clave	Descarga	Tipo	km
DH22	Descarga del balneario y géiser	Recreativo	19

De las estaciones localizadas en las descargas de aguas residuales se tienen 4 en el Estado de México, 17 en Querétaro y 1 en Hidalgo. Finalmente se incluyeron dos estaciones en afluentes de las cuales una está en el arroyo Ñadó, en el Estado de México y la otra en el arroyo Zarco, en Querétaro

En total se incluyeron 47 estaciones de monitoreo y aforo, tanto en la corriente principal, como en descargas y afluentes

### 3.3 Resultados de los parámetros de calidad del agua del río San Juan

Los resultados promedio en las estaciones localizadas en la corriente principal, el río San Juan, se presentan en la tabla 3.4 y los resultados correspondientes a las descargas de aguas residuales y afluentes del río San Juan, se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.4 Resultados promedio de las estaciones localizadas sobre la corriente del río San Juan

SECCIONAMIENTO	TRAMO I				TRAMO II				TRAMO III	TRAMO IV	
	AA. Sra. Mirta Navias	AA. CONFESA	aa. CONFESA	AA. Presa Contrada	aa. Presa Contrada	AA. Contluencia Arroyo Nudo	aa. Contluencia Arroyo Nudo	AA. Presa San Ildefonso	aa. Presa San Ildefonso	aa. Contluencia Arroyo Zareo	AA. Presa Constitución de 1857
PARAMETROS	128	127	125	123	119	118	106	96	91		
DESCRIPCION DE LA ESTACION	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6	RM7	RM8	RM9	RO10	RO11
KILOMETRAJE											
NUMERO DE ESTACION											
PARAMETROS DE CAMPO											
Conductividad	125	427	496	455	97	191	204	177	nd	102	101
Oxigeno Disuelto	5.3	1.1	0.2	0.1	7.2	6.3	5.1	10.0	nd	3.2	1.5
Potencial de Hidrogeno	7.6	7.1	7.2	7.2	7.7	7.5	7.7	8.3	nd	8.1	8.3
Temperatura ambiente	21.2	22.4	22.3	16.5	23.4	20.4	20.2	24.2	nd	17.9	15.7
PARAMETROS DE LABORATORIO											
Acidez Total	3.2	19.6	16.1	28.6	3.6	4.8	5.4	0.0	nd	nd	nd
Alcalinidad Total	42.3	130.6	122.6	148.0	28.0	60.4	52.1	51.4	nd	23.8	34.9
Cloruros	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	4
Coliformes fecales	1.38E+03	3.25E+06	1.98E+05	1.10E+04	5.01E+02	2.63E+04	4.33E+02	5.65E+01	nd	nd	nd
Coliformes totales	3.09E+04	4.85E+06	1.62E+06	2.40E+04	9.00E+03	1.44E+03	1.00E+03	9.30E+02	nd	nd	nd
Color	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	202.3	179.9
DBO5	27.0	402.7	433.3	308.9	90.9	75.5	91.2	69.8	nd	7.2	0.9
DQO	41.1	601.0	460.0	350.0	149.0	85.0	95.0	89.0	nd	25.3	15.5
Dureza de Calcio	44.4	56.3	73.0	77.0	22.6	40.3	37.9	32.7	nd	25.8	26.7
Dureza de Magnesio	35.9	64.2	50.4	38.0	28.1	31.4	38.0	38.0	nd	nd	nd
Dureza Total	80.4	120.5	123.3	115.0	50.7	71.7	75.9	70.7	nd	36.0	36.0
Fosforo total	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.8651	0.6195
Fosforo total disuelto	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Grasas y aceites	nd	0.0	57.5	36.0	22.0	23.3	0.0	0.0	nd	3.7	4.7
Nitratos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.38	0.37
Nitritos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Nitrogeno Amomaco	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Nitrogeno Organico	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.07	0.04
Nitrogeno Total	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.47	0.34
Orto-Fosforos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Solidos Disueltos Totales	229.2	286.6	376.2	412.0	155.5	177.1	119.0	131.7	nd	276.7	269.6
Solidos Suspendidos Totales	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	nd	0.1	0.1
Solidos Totales	226.6	31.3	378.8	42.0	155.5	177.1	119.0	131.7	nd	276.7	269.6
Sulfatos	251.8	317.8	414.3	354.0	168.4	185.4	126.6	150.0	nd	293.1	284.8
SAAM	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	31.095	39.487
Flujo	1.17	14.1	17.3	23.7	nd	3.5	37.0	34.5	2000.0	2041.7	2017.0

nd = No se determino  
 AA. Aguas arriba  
 aa. Aguas abajo

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.4 Resultados promedio de las estaciones localizadas sobre la corriente del río San Juan (continuación)

SECCIONAMIENTO	TRAMO V				TRAMO VI			TRAMO VII		TRAMO VIII		TRAMO IX
	aa Presa Constitución de 1847	aa Presa Lomb de Toro	aa Descarga Municipio IV San Juan del Río	AA. Dren La Culebra	aa Dren La Culebra	AA. Presa Canelarino	aa Presa Centenario	aa Presa Club Golf Tequis	aa Presa Paso de Tablas	AA. Desc. del sector	aa Desc. del sector	AA. Presa Zimapan
PARAMETROS	82	81	70	61	60.5	56	48	41	37	19	12	1
DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN	KILOMETRAJE											
UNIDADES	NUMERO DE ESTACIÓN											
<b>PARAMETROS DE CAMPO</b>												
Conductividad	322	634	2356	2175	2357	2423	2148	1861	1834	1826	1440	863
Oxígeno Disuelto	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	10.7	3.9	7.1
Potencial de Hidrogeno	8.5	8.3	8.7	8.5	8.5	8.5	8.5	8.7	8.0	8.0	8.8	8.1
Temperatura ambiente	18.9	20.6	26.4	21.0	22.4	22.6	19.4	18.1	22.0	22.8	31.9	28.0
<b>PARAMETROS DE LABORATORIO</b>												
Acidez Total	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.9	0.9	0.9	0.9
Alcalinidad Total	77.6	161.6	978.3	1050.0	1069.7	1088.4	837.3	679.8	595.2	541.7	295.9	243.9
Cloruros	14	20	87	74	84	89	98	85	78	90	127	51
Coliformes fecales	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Coliformes totales	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Color	200.0	22.4	243.1	250.0	222.9	411.9	250.0	246.9	nd	1.07E+05	5.10E+05	1.59E+04
DBO5	1.5	2.5	402.9	131.0	163.8	106.3	54.6	74.2	23.5	nd	4.1	2.4
DQO	11.9	15.7	785.4	557.0	615.7	579.1	313.5	160.6	264.9	85.5	35.7	24.2
Dureza de Calcio	79.5	190.7	145.5	139.0	195.0	164.0	196.1	178.4	125.8	211.6	45.0	96.8
Dureza de Magnesio	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	68.1	102.7	30.9	44.3
Dureza Total	40.0	85.0	109.0	nd	149.0	173.0	194.0	177.0	183.8	314.4	65.9	141.1
Fosforo total	0.4183	0.3795	9.2259	7.3400	7.5174	6.5534	7.5182	6.9920	7.3661	3.9912	1.3056	0.7176
Fósforo total disuelto	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Grasas v aceites	7.3	7.6	51.2	31.9	29.2	23.1	19.1	18.9	10.6	6.3	7.5	15.9
Nitratos	0.70	0.08	0.22	0.19	0.38	0.33	0.38	5.34	0.14	0.33	0.15	0.48
Nitritos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.016	0.007	0.031	0.005
Nitrogeno Amoniacal	0.14	0.10	38.05	27.20	25.07	47.93	8.94	30.92	5.87	0.06	0.17	0.06
Nitrogeno Organico	0.94	0.61	13.15	4.69	11.77	7.17	10.39	9.21	7.00	1.94	1.23	0.69
Nitrogeno Total	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	12.89	1.94	1.56	0.69
Orto-Fosfatos	0.104	0.147	6.293	6.270	6.021	5.050	3.358	3.742	6.046	3.637	1.150	0.677
Sólidos Disueltos Totales	384.3	455.4	1701.5	1350.0	1676.6	1766.4	1544.3	1358.5	1335.3	1321.1	1080.2	679.0
Sólidos Sedimentables	0.1	0.1	2.7	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
Sólidos Suspendedos Totales	33.9	11.5	207.9	130.0	94.8	116.5	74.1	61.0	67.2	13.3	6.5	8.3
Sólidos Totales	408.4	467.0	1909.2	1670.0	1771.4	1883.0	1618.4	1419.5	1402.5	1334.4	1086.6	687.4
Sulfatos	76.997	149.087	225.271	58.000	125.382	158.419	286.143	248.649	265.705	298.120	176.932	100.183
SAAM	0.01	1.13	2.61	0.01	4.21	5.99	0.44	0.74	0.63	0.22	0.81	0.12
Flujo	231.5	11.5	396.7	337.0	380.0	210.0	422.0	454.3	451.7	33.3	22.0	115.7

nd = No se determino

AA. Aguas arriba

aa. Aguas abajo

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.5 Resultados promedio de las estaciones localizadas sobre las descargas de aguas residuales y afluentes del río San Juan

SECCIONAMIENTO	PARAMETROS	CONFECSA	Acuabo I	Ojo de Agua	Acuabo II	Kimbelt's Clark	San Juan del Rio I	San Juan del Rio II	PD SA	Rastro	QUEMPRO	Powdersa	San Juan del Rio III	
	DESCRIPCION DE LA ESTACION	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9	DM10	DM11	DM12	
	KILOMETRAJE	127	127	127	126	82	77	77	76	75	71	70	70	
	NUMERO DE ESTACION													
PARAMETROS DE CAMPO	UNIDADES													
	Conductividad	nd	684	185	856	1783	761	768	nd	794	712	743	953	
	Oxígeno Disuelto	nd	0.5	6.7	0.4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Potencial de Hidrogeno	nd	6.7	7.6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	7.1	nd	
	Temperatura ambiente	nd	23.0	23.3	23.8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Temperatura del agua	nd	16.2	17.3	16.1	29.0	nd	nd	nd	26.0	nd	nd	26.5	nd
PARAMETROS DE LABORATORIO	Acidez Total	nd		3.1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Alcalinidad Total	nd	263.2	69.6	272.4	424.2	nd	nd	nd	nd	nd	166.3	nd	
	Cloruros	nd	nd	nd	nd	132	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Cáliformes fcsales	nd	2.36E+06	9.00E+01	9.58E+06	nd	9.10E+07	7.33E+06	3.99E+03	5.00E+07	5.00E+06	1.88E+01	5.00E+07	
	Cáliformes totales	nd	6.88E+06	1.97E+03	4.30E+07	nd	1.60E+08	9.89E+07	nd	2.50E+07	5.00E+06	9.45E+01	1.60E+08	
	Color	nd	nd	nd	nd	30.0	266.5	164.4	nd	nd	nd	nd	180.0	
	DBO5	116.7	302.7	2.0	306.6	69.0	288.0	284.0	41.3	1633.5	384.0	12.0	466.0	
	DOO	233.9	559.2	9.8	521.2	257.6	586.4	700.0	nd	9013.5	2095.0	33.3	1116.0	
	Dureza de Calcio	nd	103.7	35.0	84.2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Dureza de Magnesio	nd	88.8	30.7	143.7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Dureza Total	nd	192.5	65.7	227.8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	181.3	
	Fósforo total	nd	nd	nd	nd	nd	8.4600	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Fósforo total disuelto	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Grasas y aceites	nd	111.1	nd	58.1	nd	nd	93.3	63.2	nd	201.3	14.2	2.1	
	Nitratos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Nitritos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Nitrogeno Amoniacal	nd	nd	nd	nd	nd	4.78	24.81	19.44	nd	11.22	1.52	2.38	
	Nitrogeno Organico	nd	nd	nd	nd	nd	10.21	nd	nd	nd	321.50	nd	nd	
	Nitrogeno Total	nd	nd	nd	nd	nd	nd	30.28	21.13	nd	332.71	1.52	4.55	
	Otro-Fosforos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Sólidos Disueltos Totales	nd	841.8	130.0	555.1	1382.3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	Sólidos Sedimentables	nd	0.2	0.1	0.2	1.8	nd	1.8	1.2	nd	20.9	0.1	0.0	
	Sólidos Suspendedos Totales	nd	164.4	5.3	114.3	45.7	251.0	191.7	43.0	1974.0	9.0	6.8	321.0	
Sólidos Totales	nd	1006.0	133.3	1029.8	nd	401.760	nd	nd	nd	nd	nd	nd		
Sulfatos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	47.000		
Sust. Act. Azul Met.	nd	nd	nd	nd	0.17	0.17	0.76	3.80	nd	0.58	0.53	0.15		
Flujo	L/s	3.2	1.8	0.6	1.7	170.0	69.0	27.0	150.0	15.0	0.4	47.5	300.0	

nd = No se determinó  
 A.A. Aguas arriba  
 aa. Aguas abajo

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



SECCIONAMIENTO		DESCRIPCION DE LA ESTACION	San Pedro Abasco II	CERESO	Don La Culebra	San Nicolas	Tequisq. I	Tequisq. II	Tequisq. III	Club Golf Tequisq.	Balneario Góiser	Arroyo Nado	Arroyo Lanco
PARAMETROS			San Pedro Abasco II	CERESO	Don La Culebra	San Nicolas	Tequisq. I	Tequisq. II	Tequisq. III	Club Golf Tequisq.	Balneario Góiser	Arroyo Nado	Arroyo Lanco
<b>PARAMETROS DE CAMPO</b>													
Conductividad	µmhos/cm	850	788	nd	nd	1127	1108	623	776	nd	1257	203	nd
Oxígeno Disuelto	mg/L	nd	nd	0.5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.4	6.8	nd
Potencial de Hidrógeno	Unid. de pH	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	7.2	8.9	7.7	nd
Temperatura ambiente	°C	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	41.8	20.3	nd
Temperatura del agua	°C	nd	nd	18.0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	15.7	nd
<b>PARAMETROS DE LABORATORIO</b>													
Acidez Total	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.9	1.1	nd
Alcalinidad Total	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	209.6	57.0	nd
Cloruros	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	145	nd	nd
Coliformes fecales	NMP/100ml.	nd	nd	4.00E+06	2.40E+06	2.05E+07	1.60E+08	9.00E+07	1.60E+08	nd	1.89E+04	2.31E+02	nd
Coliformes totales	NMP/100ml.	9.00E+07	3.00E+07	4.40E+06	nd	2.05E+07	1.60E+08	9.00E+07	1.60E+08	5.00E+06	2.23E+04	1.66E+03	nd
Color	Unid. Pt.-Co.	200.0	175.0	nd	nd	nd	200.0	140.0	200.0	30.0	4.8	nd	nd
DBO5	mg/L	211.0	273.0	121.0	21.0	143.0	502.0	293.0	200.0	52.0	2.4	71.0	nd
DQO	mg/L	470.0	618.0	398.0	98.6	350.0	1954.0	558.0	547.0	149.0	62.9	46.6	nd
Dureza de Calcio	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.9	40.3	nd
Dureza de Magnesio	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	9.2	30.3	nd
Dureza Total	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	49.6	70.7	nd
Fósforo total	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.4874	nd	nd
Fósforo total disuelto	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Grasas y aceites	mg/L	nd	55.0	nd	nd	39.2	126.4	99.7	72.3	14.1	13.2	23.3	nd
Nitratos	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.12	nd	nd
Nitritos	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.012	nd	nd
Nitrógeno Amomiacal	mg/L	25.87	19.02	13.86	nd	49.08	27.39	15.22	15.22	nd	0.09	nd	nd
Nitrógeno Orgánico	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.67	nd	nd
Nitrógeno Total	mg/L	25.87	19.02	25.30	nd	63.54	39.56	18.26	19.78	nd	0.70	nd	nd
Oro-Fosfatos	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.391	nd	nd
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	992.3	178.0	nd
Sólidos Sedimentables	mg/L	0.5	0.7	0.6	nd	0.8	0.8	0.7	0.5	0.1	0.1	0.1	nd
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	194.0	147.0	64.0	170.0	108.0	328.0	427.0	102.0	40.0	4.5	6.0	nd
Sólidos Totales	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	996.7	184.0	nd
Sulfatos	mg/L	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	9.000	112.297	nd	nd
Sust. Act. Azul Met.	mg/L	4.30	4.31	0.68	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	2.38	nd	nd
Flujo	L/s	13.0	2.0	0.2	20.0	0.9	0.8	20.0	2.0	18.0	16.5	33.3	41.5

nd = No se determinó  
AA - Aguas arriba  
aa - Aguas abajo

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

En la figura 3.1 se representa el sistema de estudio de manera esquemática, que es como se abundará más adelante, la base para la modelación del sistema. Se incluye la corriente principal, el río San Juan, y el kilometraje sobre la corriente, lo que permite localizar las principales descargas de aguas residuales municipales, industriales y de retorno agrícola, así como las estaciones de monitoreo y aforo.

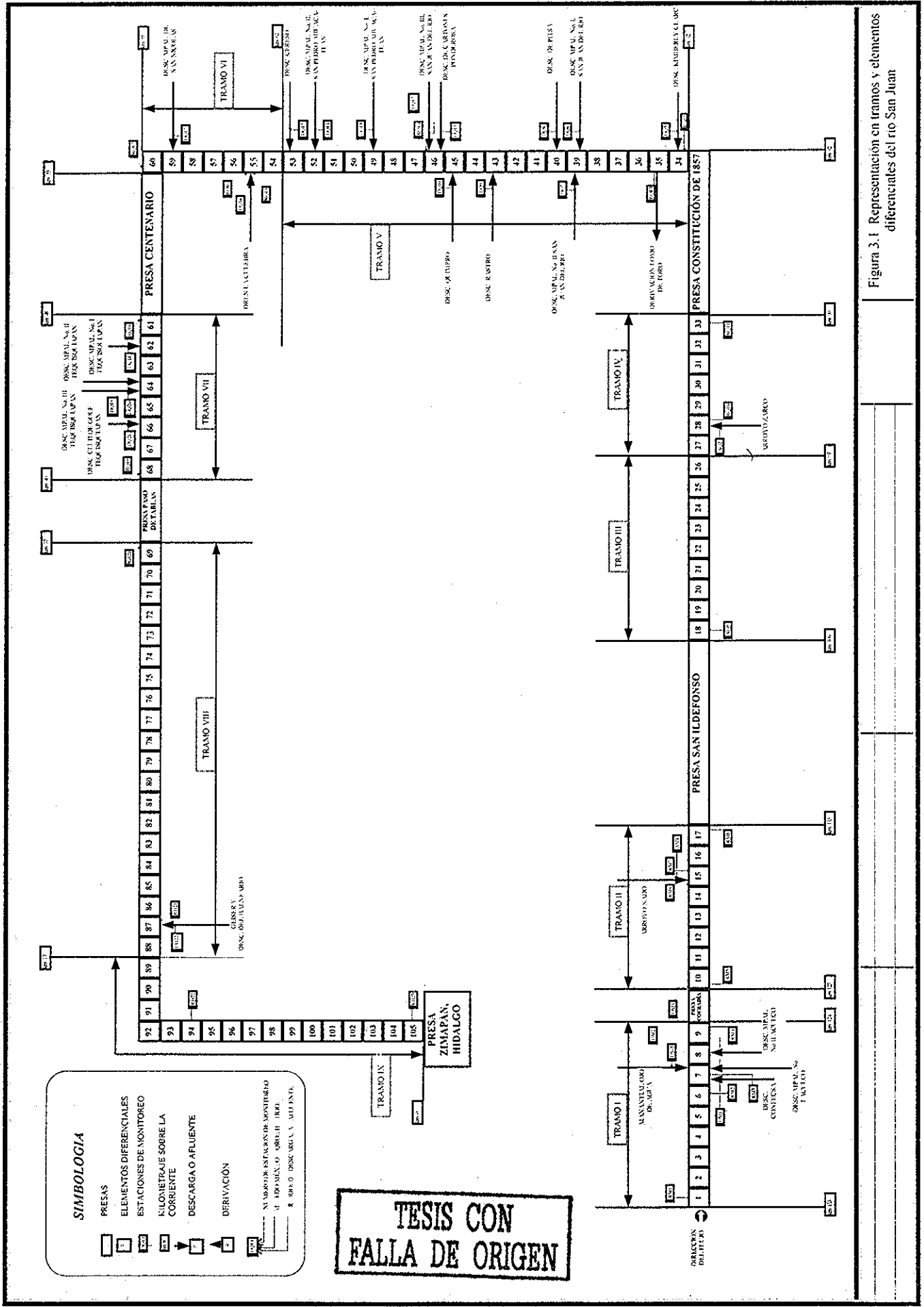


Figura 3.1 Representación en tramos y elementos diferenciales del río San Juan

Los resultados se muestran a continuación en forma gráfica, en donde se puede apreciar la situación actual de contaminación que se tiene en el río San Juan, así como la cantidad de contaminantes presentes en las descargas de aguas residuales.

### **3.4 Situación actual de la calidad del agua en el río San Juan**

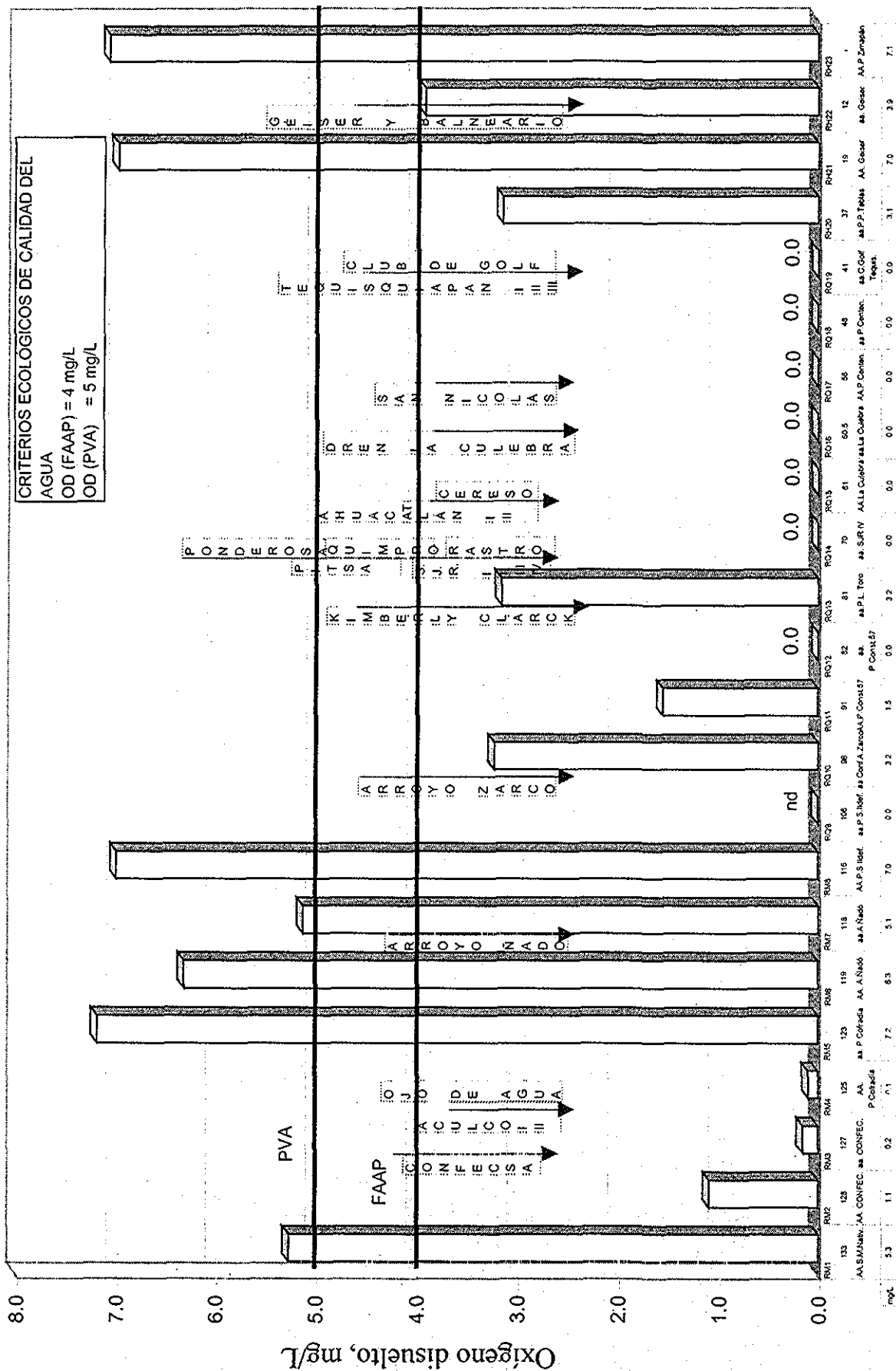
En las gráficas 3.1 y 3.2 se muestran el oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno, respectivamente, medidos en las estaciones de monitoreo localizadas a lo largo del río San Juan. En las gráficas 3.3 y 3.4 se presentan, respectivamente, la concentración y la carga de DBO medidas en las descargas de aguas residuales vertidas a la corriente.

Adicionalmente, en el Anexo 1 se incluyen las siguientes gráficas de concentración de contaminantes medidos a lo largo del río San Juan: A1.1 Coliformes fecales, A1.2 Grasas y aceites, A1.3 Sólidos suspendidos totales, A1.4 Sólidos disueltos totales, A1.5 Sólidos sedimentables, A1.6 Sólidos totales, A1.7 Conductividad y A1.8 Demanda química de oxígeno.

En el Anexo 2 se incluyen también las siguiente gráficas de concentración de contaminantes medidos en las descargas de aguas residuales vertidas al río San Juan: A2.1 Coliformes fecales, A2.2 Nitrógeno total, A2.3 Nitrógeno amoniacal, A2.4 Sustancias activas al azul de metileno, A2.5 Sólidos suspendidos, A2.6 Sólidos sedimentables y A2.7 Conductividad.

En el Anexo 3 se incluyen las siguientes gráficas, correspondientes a la carga de contaminantes medidos en las descargas vertidas al río San Juan: A3.1 Demanda química de oxígeno, A3.2 Coliformes fecales, A3.3 Nitrógeno total, A3.4 Sustancias activas al azul de metileno y A3.5 Sólidos suspendidos totales, así como la gráfica A3.6 en donde se muestra el gasto medido en las descargas vertidas a la corriente

Gráfica 3.1. Oxígeno disuelto medido en el río San Juan

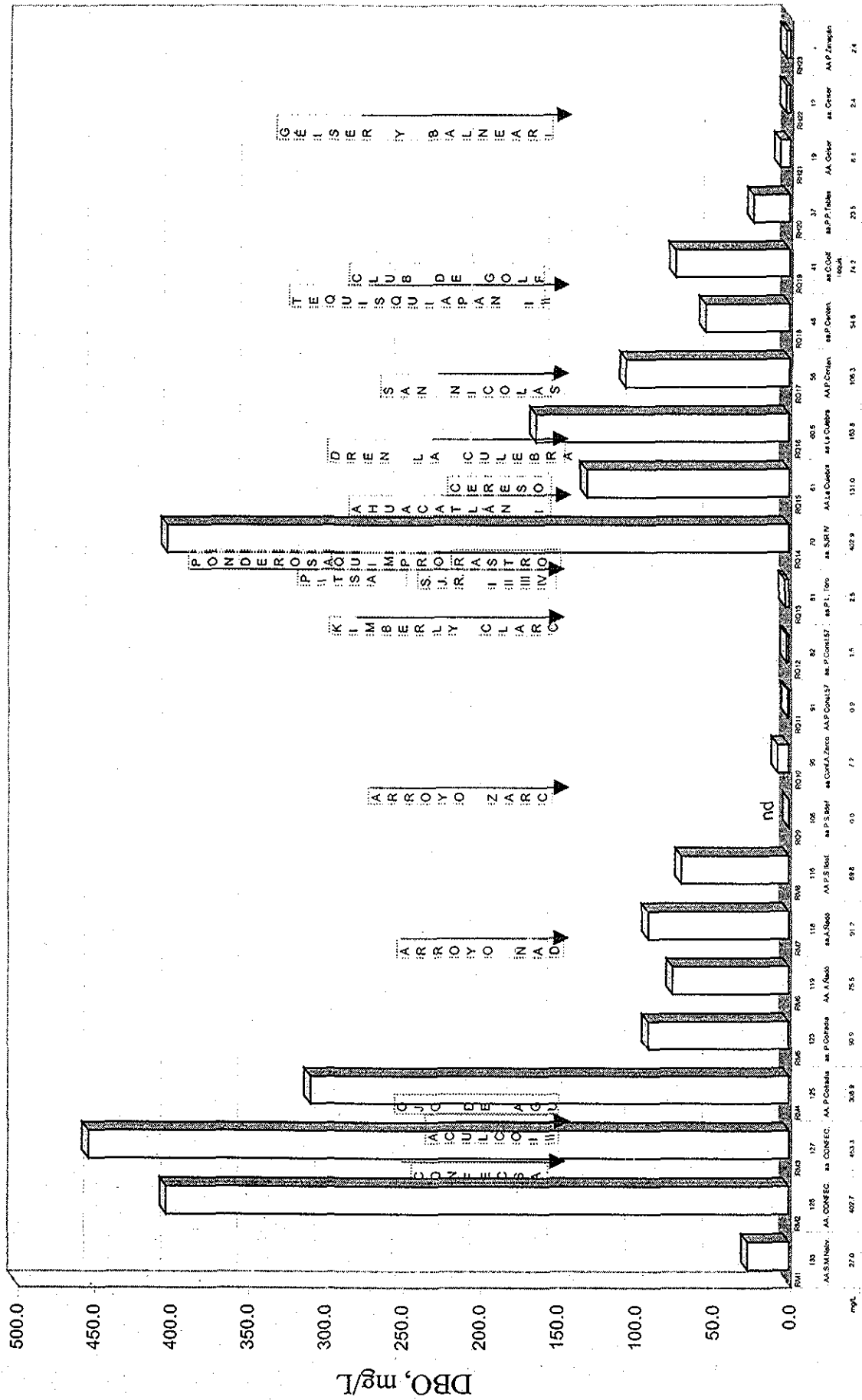


Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determino

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Gráfica 3.2. Demanda bioquímica de oxígeno medida en el río San Juan

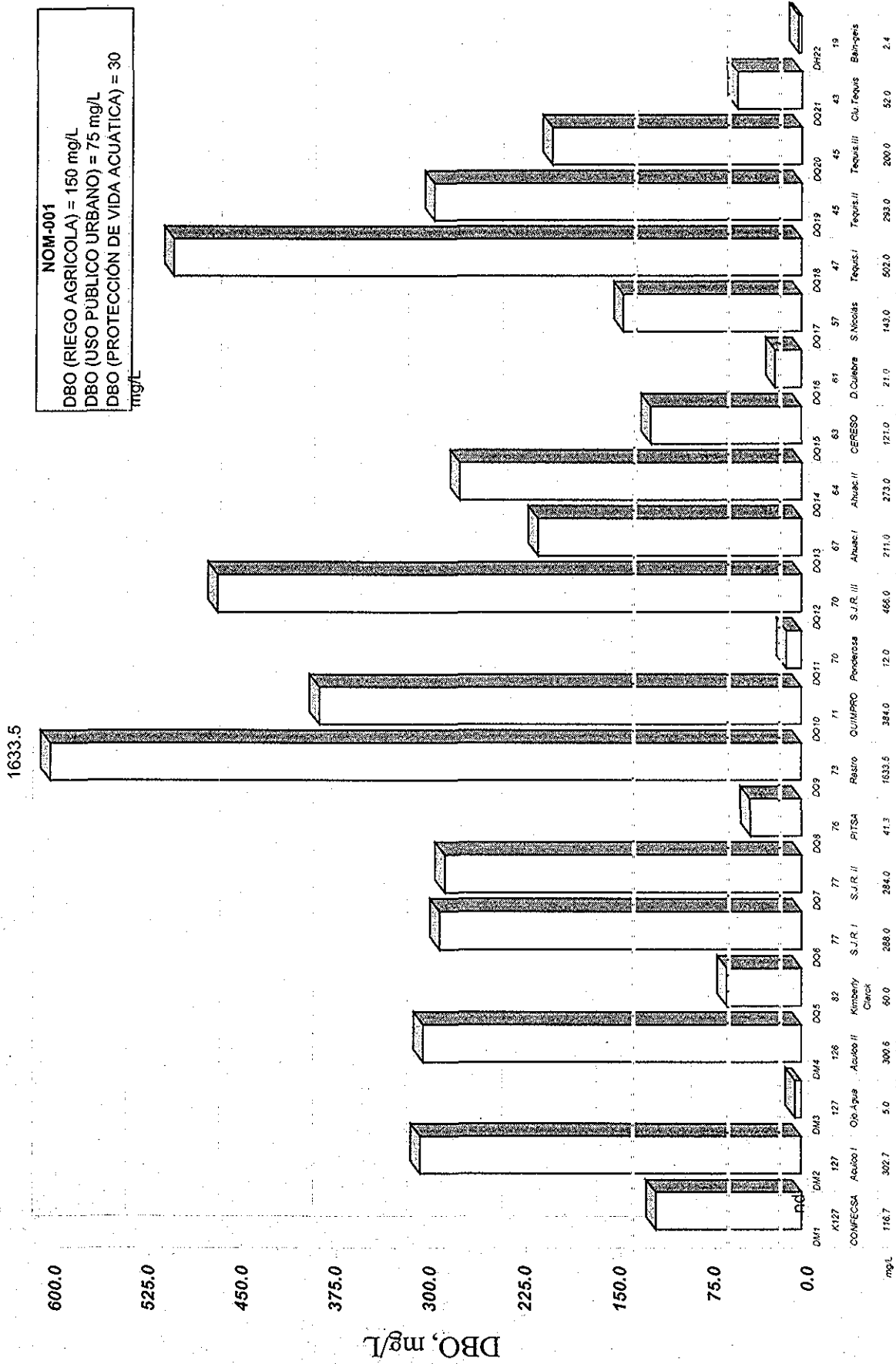


Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfica 3.3 Demanda bioquímica de oxígeno medida en las descargas al río San Juan

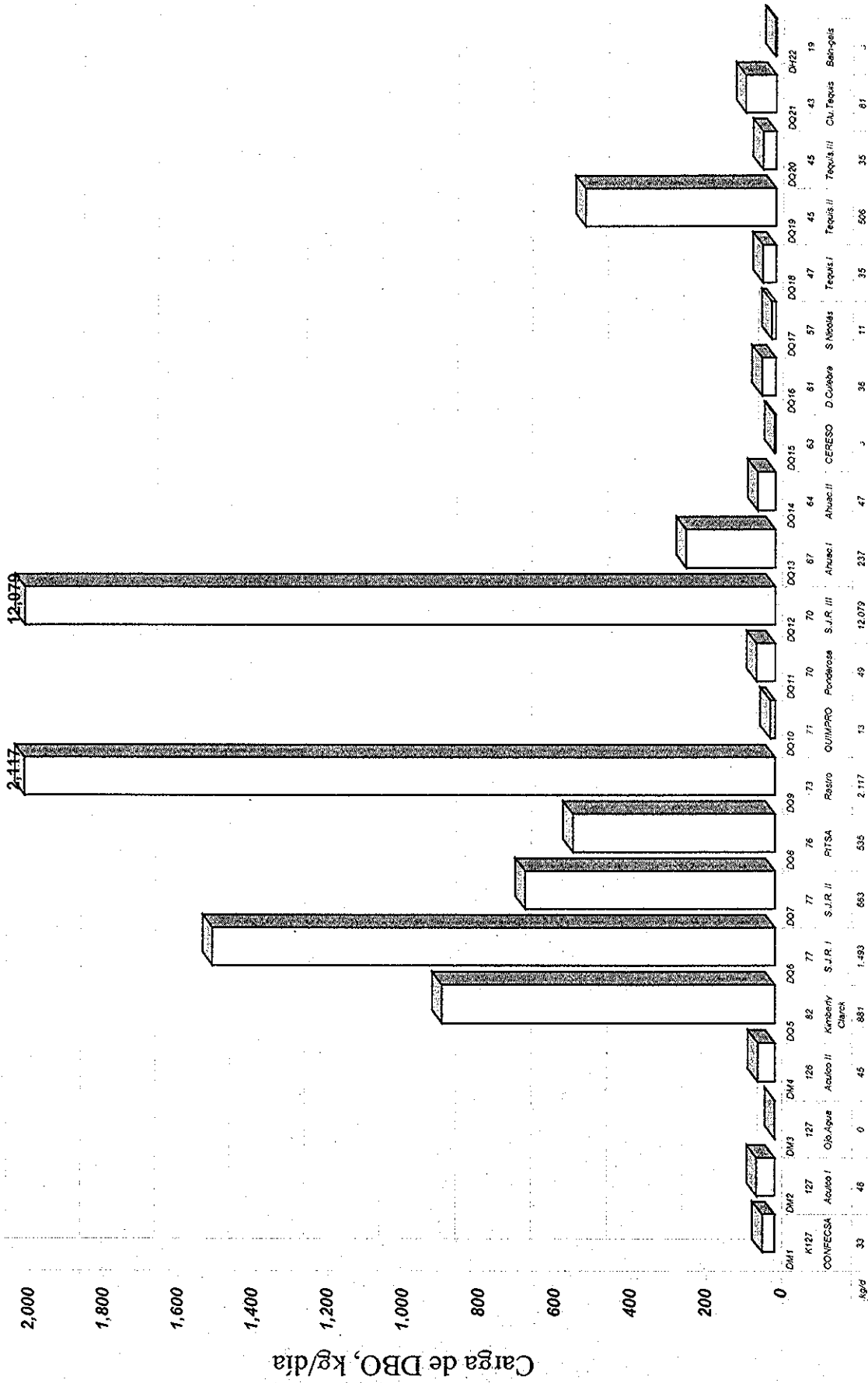


Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

# Gráfica 3.4 Carga de Demanda bioquímica de oxígeno medida en las descargas al río

## San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



Los valores establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua son: para Riego Agrícola: coliformes fecales, 1000 NMP/100 mL; sólidos suspendidos totales, 50 mg/L; y sólidos disueltos totales, 500 mg/L; para Fuente de Abastecimiento de Agua Potable: oxígeno disuelto, 4 mg/L; coliformes fecales, 1000 NMP/100 mL; sólidos suspendidos totales, 500 mg/L; sólidos disueltos totales, 500 mg/L; sólidos totales, 1000 mg/L; y ausencia de grasas y aceites; y, para la Protección de la Vida Acuática: oxígeno disuelto, 5 mg/L; y coliformes fecales, 200 NMP/100 mL.

Tramo I. Desde aguas arriba de Santa María Nativitas hasta la presa Cofradía - En este tramo de 9 kilómetros del río San Juan se encuentran las descargas municipales de la población de Aculco, 3.5 L/s, la descarga de la empresa CONFECSA, 3.2 L/s, y el manantial Ojo de Agua, 0.6 L/s

El gasto medido en este tramo de la corriente es muy bajo, inferior a 20 L/s, del cual, al menos 35% corresponde a las aguas residuales

En este tramo de la corriente, los parámetros que no cumplen con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua son: oxígeno disuelto, que se abate con las descargas de la mencionada empresa y de Aculco, hasta valores inferiores a 0.2 mg/L; coliformes fecales, que en los alrededores de la descarga de la empresa CONFECSA rebasa más de 200.000 NMP/100 mL, lo que constituye un foco de infección importante y en los alrededores de Santa María Nativitas la concentración del indicador biológico es superior a los 1000 NMP/100 mL; y grasas y aceites, que alcanza un valor de 57.5 mg/L después de recibir la descarga de la empresa

Con respecto a la concentración de materia orgánica, se determinó que en la corriente se sobrepasa los 400 mg/L de DBO, después de las aportaciones de la empresa y del poblado y disminuye ligeramente con la incorporación del manantial

Tramo II. Desde la presa Cofradía hasta la presa San Ildefonso.- En este tramo de 8 kilómetros del río San Juan no se tiene ninguna descarga de agua residual, únicamente se encuentra la incorporación del arroyo Ñadó

Prácticamente no hay flujo de agua después de la presa Cofradía. En la segunda estación de monitoreo, a cuatro kilómetros de la presa, se determinó sólo 3.5 L/s, que aumenta hasta llegar a 37 L/s, después de la incorporación del arroyo

Se encontró la presencia de grasas y aceites en los primeros cuatro kilómetros de este tramo, no siendo detectable, después de la incorporación del arroyo.

A pesar del nivel satisfactorio de oxígeno disuelto en el tramo, se determinó la presencia de materia orgánica en cantidades importantes, alrededor de 90 mg/L.

Tramos III y IV Desde la presa San Ildefonso hasta la presa Constitución de 1857.- En estos tramos del río San Juan, que suman 16 kilómetros, no hay descargas de aguas residuales; solamente se tiene la aportación de 41.5 L/s del arroyo Zarco, por el margen derecho.

Los parámetros que no cumplen con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, en esta sección, son: oxígeno disuelto, que se abate a lo largo del tramo, llegando a 1.5 mg/L; y grasas y aceites, cuya presencia se determinó desde la confluencia del arroyo hasta la presa

No se puede concluir sobre la presencia de coliformes fecales en esta sección ya que este parámetro no se determinó en el estado de Querétaro

La concentración de materia orgánica en esta sección es inferior a 10 mg/L de DBO.

Tramos V y VI Desde la presa Constitución de 1857 hasta la presa Centenario.- Se incluyen dos tramos del río San Juan en esta sección, que suman 27 kilómetros. En ella se encuentra el mayor número de descargas y las más importantes, desde el punto de vista de la carga de contaminantes, estas son: Kimberly Clark, 170 L/s; PITSA, 150 L/s; Rastro, 15 L/s; QUIMPRO, 0.4 L/s; Ponderosa, 47.5 L/s; CERESO, 0.3 L/s; y el dren La Culebra, 20 L/s; y las de las poblaciones de San Juan del Río, 387 L/s; San Pedro Ahuacatlán, 15 L/s; y San Nicolás con 0.9 L/s.

En esta sección de la corriente, los parámetros que no cumplen con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua son:

Oxígeno disuelto, que se determinó ausente en toda esta sección, con excepción de la estación localizada aguas abajo de la derivadora Lomo de Toro, con 3.2 mg/L.

La concentración de materia orgánica es elevada en esta sección del río, llegando a un máximo de 400 mg/L, después de las descargas de la población de San Juan del Río, 288, 284 y 466 mg/L, y de las descargas del Rastro, 1633 mg/L, Kimberly Clark, 60 mg/L, y PITSA, 41.3 mg/L, principalmente

No se puede concluir sobre la presencia de coliformes fecales en esta sección, ya que este parámetro no se determinó en el estado de Querétaro; sin embargo, se considera que hay una fuerte contaminación bacteriológica debido a las elevadas concentraciones de DBO

Se determinó que a lo largo de esta sección se encuentran presentes elevadas concentraciones de grasas y aceites, alcanzando su máximo nivel después de las descargas residuales de San Juan del Río, 51.2 mg/L.

La concentración de sólidos suspendidos totales en al corriente está por encima del criterio de calidad establecido para Riego Agrícola que es de 50 mg/L, alcanzando un máximo de 208 mg/L después de las descargas de San Juan del Río, quienes aportan 251, 191 y 321 mg/L respectivamente, el Rastro, 1974 mg/L y PITSA, 43 mg/L. Otras descargas que aportan sólidos, en esta sección, son: Kimberly Clark, 45.7 mg/L, Ahuacatlán, 194 y 147 mg/L, CERESO, 64 mg/L, y San Nicolás, 108 mg/L, asimismo se tiene la aportación del dren La Culebra, 170 mg/L.

En esta sección se tiene muy altas concentraciones de sólidos disueltos, sobrepasando el criterio de 500 mg/L para Riego Agrícola y Fuente de Abastecimiento de Agua Potable. Después de las descargas de San Juan del Río, PITSA, Ponderosa, QUIMPRO y el Rastro, se tiene un incremento muy importante de este parámetro, 1,700 mg/L, que se mantiene por arriba de 1,500 mg/L por el resto de la sección. No se cuenta con los valores de sólidos disueltos presentes en cada una de las descargas, por lo que no se tiene elementos para establecer cuales son las mayores aportadoras de este contaminante.

Tramo VII. Desde la presa Centenario hasta la presa Paso de Tablas.- En este tramo del río San Juan de 8 kilómetros se encuentran las descargas de Tequisquiapan, 22 8 L/s, y la del club de golf con 18 L/s.

Se determinó que no hay oxígeno disuelto en toda esta sección, esto es atribuible a las descargas de aguas residuales de Tequisquiapan.

La concentración de materia orgánica en esta sección del río es de alrededor de 70 mg/L, como consecuencia de las descargas de Tequisquiapan, 502 y 293 mg/L respectivamente, y del club de golf, 52 mg/L.

Aunque no se dispone de información de coliformes fecales en este tramo del río, por las altas concentraciones de DBO, es razonable suponer que hay una fuerte contaminación bacteriológica.

En este tramo del río se encuentran presentes elevadas concentraciones de grasas y aceites, alrededor de 20 mg/L. Esto se debe a las aportaciones de las descargas de Tequisquiapan, 126, 100 y 72 mg/L, respectivamente, y del club de golf, 14 mg/L.

La concentración de sólidos suspendidos totales en al corriente está por encima del criterio de calidad establecido para Riego Agrícola que es de 50 mg/L. Esto es atribuible a las aportaciones de las descargas de Tequisquiapan, 328, 427 y 102 mg/L, respectivamente, y del club de golf, 40 mg/L.

La concentración de sólidos disueltos en este tramo es muy elevada, por arriba del criterio de 500 mg/L para Riego Agrícola y Fuente de Abastecimiento de Agua

Potable No se cuenta con los valores de sólidos disueltos presentes en cada una de las descargas, por lo que no se tiene elementos para establecer cuales son las mayores aportadoras de este contaminante

Tramos VIII y IX Desde la presa Paso de Tablas hasta la presa Zimapán.- En esta sección del río San Juan, cuyos tramos suman 37 km, únicamente se tienen las aportaciones del géiser y el balneario, 16.5 L/s.

En la estación de monitoreo localizada aguas debajo de la presa Paso de Tablas se encontró el nivel más bajo de oxígeno disuelto en este tramo, 3.1 mg/L; después de esta zona el nivel de oxígeno aumenta cumpliendo satisfactoriamente con los criterios de calidad del agua tanto para Fuente de Abastecimiento de Agua Potable como para Protección de Vida Acuática, de 4 y 5 mg/L, respectivamente

La concentración de materia orgánica en esta sección del río es baja. El valor más alto se encontró al inicio, aguas debajo de la presa Paso de Tablas, de 23.5 mg/L, para disminuir posteriormente hasta valores generalmente menores de 5 mg/L.

La concentración de coliformes fecales, sin embargo, sobrepasa los criterios de calidad de 1000 NMP/100 mL, para Riego Agrícola y Fuente de Abastecimiento de Agua Potable, así como de 200 NMP/100 mL, para Protección de Vida Acuática.

En este tramo del río se encuentran presentes grasas y aceites, en un intervalo de 5 a 16 mg/L, debido a la aportación de la descarga del balneario de 13.2 mg/L.

La concentración de sólidos suspendidos totales en el corriente se encuentra por encima del criterio de calidad establecido para Riego Agrícola que es de 50 mg/L, solamente en la estación que se encuentra aguas debajo de la presa Paso de Tablas

La concentración de sólidos disueltos en este tramo es muy elevada, por arriba del criterio de 500 mg/L para Riego Agrícola y Fuente de Abastecimiento de Agua Potable

Descargas de aguas residuales.- En la gráfica 3.4 se presenta la carga de demanda bioquímica de oxígeno en kg/d que llega al río San Juan, proveniente de las descargas de aguas residuales.

La mayor aportación de DBO es la de San Juan del Río, que descarga un total de 14,234 kg/d. Le siguen, en orden decreciente, el Rastro, 2,117 kg/d, Kimberly Clark, 881 kg/d, PITSA, 535 kg/d, Tequisquiapan, 540 kg/d, y Ahuacatlán, con 284 kg/d

Las descargas con concentración de DBO mayor a la permitida por la NOM-001, de 30 mg/L para Protección de Vida Acuática, 75 para Uso Público Urbano y 150 para

Riego Agrícola, son: Rastro, 1633 mg/L, Aculco, 559 y 521 mg/L en sus dos descargas, respectivamente; San Juan del Río, 288, 284 y 466 mg/L, para sus tres descargas, respectivamente; Tequisquiapan, con 502, 293 y 200 mg/L, respectivamente; QUIMPRO, 384 mg/L; y Ahuacatlán, 211 y 273 mg/L, en sus respectivas descargas

Con menores concentraciones de DBO que las anteriores, pero aún por encima de los límites máximos permisibles que establece la NOM-001 para Protección de Vida Acuática y Uso Público Urbano, se tiene: San Nicolás, 143 mg/L, CERESO, 121 mg/L, CONFECSA, 116.7 mg/L, Kimberly Clark, 60 mg/L, Club de Golf, 52 mg/L, y PITSA, con 41.3 mg/L.

En relación con las aportaciones de DQO, en orden decreciente, las descargas más importantes son: San Juan del Río, 33,600 kg/d, Rastro, 11,681 kg/d, Kimberly Clark, 3,783 kg/d, Tequisquiapan, 1,099 kg/d, Ahuacatlán, 635 kg/d, y Club de Golf, 232 kg/d.

En cuanto a la contaminación bacteriológica, medida a través de los coliformes fecales, los principales aportadores son: San Juan del Río,  $1.79 \times 10^{10}$  NMP/d, Rastro,  $6.48 \times 10^8$ , Tequisquiapan,  $1.94 \times 10^9$ , dren La Culebra,  $4.15 \times 10^7$ , San Nicolás,  $1.59 \times 10^7$ , Aculco,  $1.8 \times 10^7$ , QUIMPRO,  $1.73 \times 10^6$ , CERESO,  $1.04 \times 10^6$ , PITSA,  $5.17 \times 10^5$ , y Balneario y Geiser,  $2.7 \times 10^5$ .

La NOM-001, establece el límite de 1000 NMP/100 mL, como límite máximo permisible de coliformes fecales en las descargas de aguas residuales, para los tres usos considerados. Las descargas en las que se determinó este parámetro y que no cumplen con la norma son: San Juan del Río,  $9.1 \times 10^7$ ,  $7.3 \times 10^6$ , y  $5 \times 10^7$  NMP/100 mL, respectivamente; Tequisquiapan,  $1.6 \times 10^8$ ,  $9 \times 10^7$ , y  $1.6 \times 10^8$  NMP/100 mL, respectivamente; Rastro,  $5 \times 10^7$  NMP/100 mL; San Nicolás,  $2 \times 10^7$  NMP/100 mL; Aculco,  $2.36 \times 10^6$  y  $9.5 \times 10^6$  NMP/100 mL; QUIMPRO,  $5 \times 10^6$  NMP/100 mL, CERESO,  $4 \times 10^6$  NMP/100 mL, dren La Culebra,  $2.4 \times 10^6$ ; PITSA,  $4 \times 10^3$ , y Balneario y Geiser,  $1.9 \times 10^4$  NMP/100 mL.

Las descargas con mayores aportaciones de nitrógeno total, en el orden acostumbrado, son: San Juan del Río, 1,074 kg/d, Rastro, 431.19 kg/d, Tequisquiapan, 34.28 kg/d, Ahuacatlán, 32.35 kg/d, y Ponderosa, 18.67 kg/d.

Las descargas con concentración de nitrógeno total mayor a la permitida por la NOM-001, de 40 mg/L para Uso Público Urbano y Riego Agrícola, son: Rastro, 332.7 mg/L, y San Nicolás con 65.5 mg/L.

Aún por arriba de lo que establece la multicitada norma, de 15 mg/L para nitrógeno total presente en descargas a cuerpos receptores con uso en la Protección de la Vida

Acuática, se tiene: Tequisquiapan, con 39.5, 18.2 y 19.7 mg/L, respectivamente; San Juan del Río, 30.2, 21.1 y 33.4 mg/L, para sus tres descargas, respectivamente; Ahuacatlán, 25.8 y 19 mg/L, en sus respectivas descargas, y CERESO, con 25.3 mg/L.

La contaminación provocada por los detergentes presentes en las descargas se cuantificó como sigue: San Juan del Río, 133.47 kg/d, Club de Golf, 6.88 kg/d, Ahuacatlán, 5.58 kg/d, Balneario y Geiser, 3.39 kg/d y Kimberly Clark, con 2.5 kg/d.

En lo propio para sólidos suspendidos totales, las principales descargas que lo aportan son: San Juan del Río, 10.068 kg/d; Rastro, 2.558 kg/d; Tequisquiapan, 758 kg/d; Kimberly Clark, con 671 kg/d; PITSA, 557 kg/d, dren La Culebra, 293 kg/d, y Ahuacatlán, con 243 kg/d.

La NOM-001 establece el valor de 40, 75 y 150 mg/L como límites máximos permisibles para Protección de Vida Acuática, Uso Público Urbano y Riego Agrícola, respectivamente. Las descargas que no cumplen en los tres casos son: Rastro, 1.974 mg/L, Tequisquiapan, 328 y 427 mg/L, en dos de sus tres descargas; San Juan del Río, 251, 191 y 321 mg/L, respectivamente en sus tres descargas; Ahuacatlán, 194 mg/L, en una de sus descargas; Aculco, 164 mg/L, en una de sus dos descargas; y dren La Culebra, con 170 mg/L.

Incumpliendo aun con lo normalizado para sólidos suspendidos, para uso en Protección de Vida Acuática y Uso Público Urbano, se encuentran las descargas siguientes: Aculco, en su segunda descarga; Ahuacatlán, 147 mg/L, en su segunda descarga, San Nicolás, 108 mg/L, y Tequisquiapan, 102 mg/L, en su tercera descarga.

En un nivel de concentración de sólidos suspendidos más bajo que las anteriores, pero incumpliendo aun con el límite establecido para Protección de Vida Acuática, se tiene: CONFECSA, 59 mg/L, Kimberly Clark, 45.7 mg/L, PITSA, 43 mg/L, y CERESO, con 64 mg/L.

Finalmente, resalta la alta conductividad de la descarga de Kimberly Clark, 1,783  $\mu$ mhos/cm, y en general, las descargas en las que se determinó este parámetro tienen conductividades elevadas, en el orden de 800  $\mu$ mhos/cm.

**3.5 Calibración del modelo de calidad del agua del río San Juan** - En la figura 3.1 se representa el sistema de estudio de manera esquemática. Este prototipo del río San Juan contiene la corriente principal, dividida en 9 tramos, y 105 elementos diferenciales de un kilómetro de longitud.

Se incluyen en el esquema las principales descargas de aguas residuales municipales, industriales y de retorno agrícola, que recibe el río San Juan. Las descargas están

trazadas como flechas que apuntan a un elemento diferencial de la corriente principal, con lo que se identifica el número del elemento que recibe la aportación. El kilometraje está señalado con banderas colocadas en el inicio y fin de cada tramo

En el esquema se encuentran localizadas 23 estaciones de monitoreo en la corriente principal, 22 estaciones de monitoreo y aforo de las descargas, y 2 estaciones de monitoreo y aforo de los arroyos Ñadó y Zarco, respectivamente.

Este prototipo del sistema va a permitir la comunicación con el programa del modelo, esto es, la entrada y salida de datos. Los requerimientos específicos del prototipo del sistema dependen del modelo seleccionado.

Enseguida se determinan las constantes de las ecuaciones paramétricas que describen los fenómenos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el sistema y que se describen en el Capítulo III.

El modelo queda calibrado cuando, para un sistema en particular, en este caso el río San Juan, quedan determinadas las constantes de las ecuaciones paramétricas señaladas, y con ello se logra reproducir satisfactoriamente el perfil de concentraciones de los parámetros modelados, a lo largo de la corriente, bajo las condiciones actuales en cuanto a gastos y concentraciones de contaminantes, tanto de afluentes como de efluentes. Se procede como sigue:

- 1) Se representan los perfiles de concentraciones de cada parámetro en forma gráfica, tomando como ordenada la concentración del contaminante, y como abscisa, el kilometraje sobre la corriente principal.
- 2) Se construye el prototipo del sistema a modelar, siguiendo las restricciones del programa del modelo, esto es, se traslada el esquema del sistema a una representación virtual entendible por el programa de cómputo
- 3) Se alimenta al programa del modelo, a través del prototipo del sistema, las concentraciones de cada parámetro ponderados con flujo, determinados en las campañas de monitoreo, tanto en la corriente principal como en las descargas y otras aportaciones y extracciones.
- 4) Se indican al programa del modelo, características adicionales, por ejemplo, el número máximo de iteraciones de los procedimientos de convergencia para la solución de las ecuaciones involucradas en los balances de materiales y energía, o bien, características propias del flujo, como los coeficientes de rugosidad del río.
- 5) Se proporciona al programa los valores de las constantes de velocidad de reacción de la demanda bioquímica de oxígeno y del oxígeno disuelto, como una primera aproximación, son útiles los valores centrales de los intervalos típicos en que se presentan, y que se encuentran disponibles en la literatura, o en su caso, se determinan previamente en laboratorio.

- 6) Se indica al modelo, el método de cálculo seleccionado para la reoxigenación de la corriente, de acuerdo a las características de flujo presente.
- 7) También como una primera aproximación, se proporciona al programa los valores de las constantes de las ecuaciones de decaimiento, generación y sedimentación, de cada uno de los parámetros a modelar, los cuales se toman como los valores centrales de los intervalos típicos en que se presentan. Estos intervalos se encuentra disponibles en la literatura, o en su caso, se determinan previamente en laboratorio.
- 8) Se indica al programa los valores iniciales de cada parámetro para usarse como punto de partida en los procedimientos de convergencia de las ecuaciones del modelo.
- 9) Se realiza un balance de gastos en cada tramo de la corriente. Se indican al programa la magnitud de las aportaciones y extracciones no consideradas explícitamente en el prototipo, a través de incrementos o decrementos de flujo adicionales.
- 10) Se asume que la concentración de cada parámetro en las aportaciones y extracciones no consideradas explícitamente, pero consideradas a través de incrementos o decrementos de flujo adicionales, son las concentraciones promedio presentes en cada tramo.

Una vez alimentado el programa, se está en posibilidad de hacer la primera corrida, y obtener un primer perfil de concentraciones de cada parámetro. Este perfil, desde luego estará distante del perfil de concentraciones realmente presente en la corriente principal. Para ajustarlo se modifican los valores propuestos para las constantes de las ecuaciones de generación, decaimiento y sedimentación del modelo, moviéndose siempre dentro del intervalo típico, y tomando en cuenta las interrelaciones entre los contaminantes presentes, así como las interrelaciones entre los contaminantes y el oxígeno. Los datos de entrada y salida del modelo calibrado se dan en el anexo A1.

En el Anexo 4, se incluyen las siguientes gráficas, que muestran los resultados de la calibración del modelo: A4.1 Gasto en el río San Juan, A4.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno, A4.3 Demanda Química de Oxígeno, A4.4 Oxígeno Disuelto, A4.5 Sólidos Suspendidos Totales, A4.6 Sólidos Sedimentables y A4.7 Grasas y Aceites.

En cada gráfica, los puntos representan los datos medidos en las campañas de monitoreo, es decir, la situación real prevaleciente en la corriente principal. La curva continua muestra el perfil de concentraciones arrojado por el modelo y que se ajustó, a través del proceso de calibración, para que reproduzca las condiciones reales medidas. La tolerancia de error entre las condiciones predichas por el modelo y las condiciones reales medidas en las campañas de monitoreo es generalmente menor de 10%.

En esta etapa se aprecia la importancia de la calidad de los datos obtenidos en los monitoreos. En este tipo de gráficas, frecuentemente se observa que algunos datos



medidos sobre la corriente no corresponden a las tendencias o a los efectos esperados por la presencia de descargas. Por ello, durante las campañas de monitoreo y aforo, además de cumplir con la normatividad en la materia, se deben atender los siguientes aspectos:

1. Las muestras sobre la corriente principal deben ser representativas de su calidad, por lo que deben tomarse en una zona bien mezclada, esto es, en donde no existan estancamientos
2. Después de una descarga, se debe tener cuidado de tomar la muestra a una distancia suficiente para que su efecto se haya distribuido uniformemente en el seno de la corriente.
3. En muestras que se han de tomar en los afluentes a la corriente principal, es necesario determinar la calidad del agua del afluente, por lo que el punto de muestreo se sitúa sobre el afluente, a una distancia suficiente de la corriente principal para que no exista influencia de ella.

Una vez que el modelo reproduce satisfactoriamente el perfil de concentraciones reales de cada parámetro, el modelo ha quedado calibrado. Entonces se han encontrado y se establecen como fijas las constantes de generación, decaimiento y sedimentación de las ecuaciones que describen al sistema.

Para el modelo de calidad del agua de río San Juan, los datos de entrada y las constantes determinadas en el proceso de calibración del modelo se resumen en el Anexo 5.

### **3.6 Capacidad de Asimilación y Dilución de Contaminantes del Río San Juan**

Con base en la gráfica 3.5, se determinó la capacidad de asimilación y dilución de materia orgánica biodegradable, medida como Demanda bioquímica de oxígeno. En condiciones actuales, se determinó que en algunos tramos, el río está tan contaminado que ya no tiene capacidad de asimilación y dilución de más contaminantes. Tal es el caso del tramo comprendido entre Santa María Nativitas y la presa Cofradía, así como el tramo comprendido entre la presa Constitución de 1857 y la presa Centenario, para uso en Riego Agrícola.

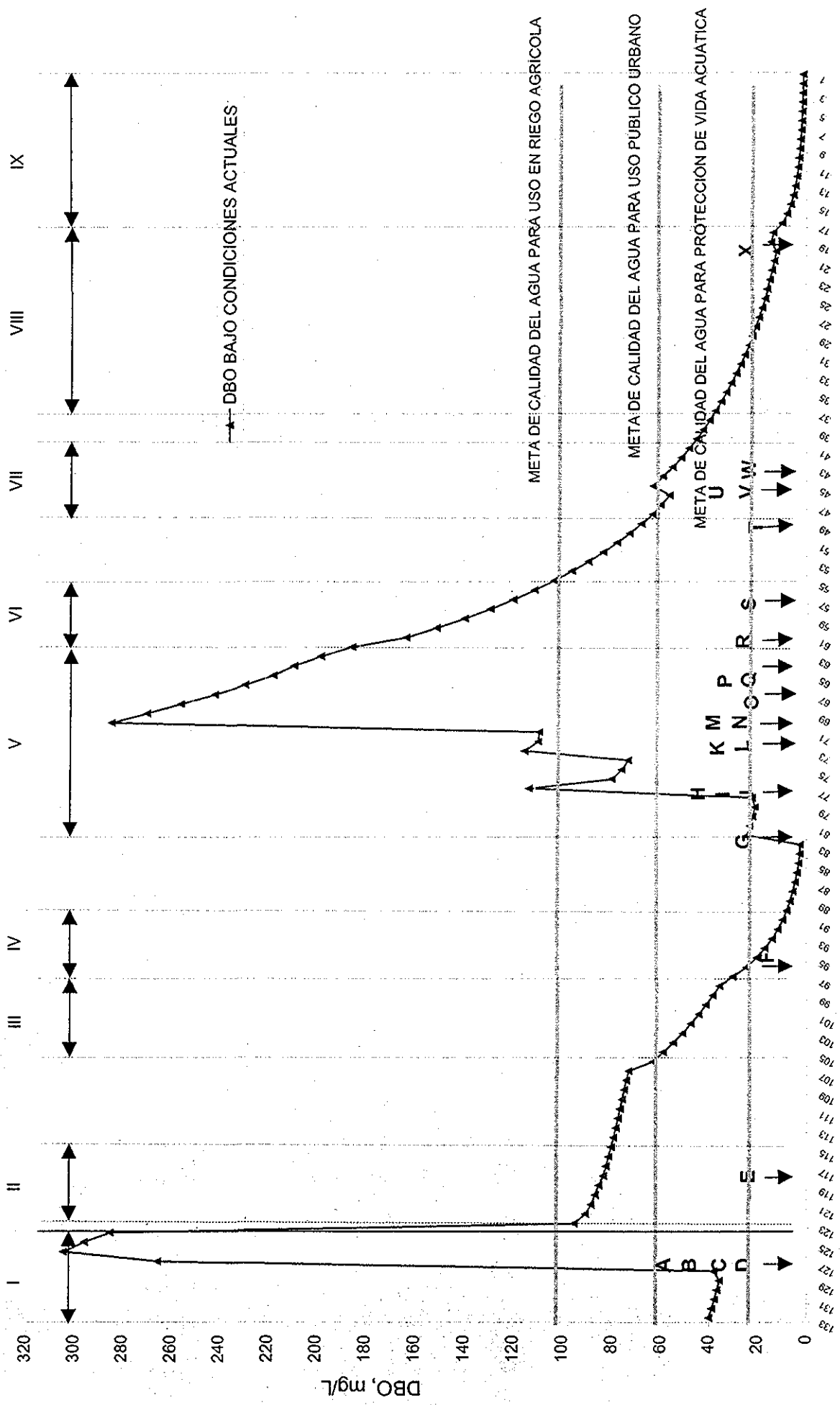
Para Uso Público Urbano, los tramos que actualmente ya no cuentan con capacidad de asimilación y dilución de más contaminantes son de Santa María Nativitas al arroyo Zarco, así como de la presa Constitución de 1857 a la presa Paso de Tablas.

Con relación al uso de la corriente para la Protección de Vida Acuática, el extenso tramo sin capacidad de asimilación y dilución de contaminantes es de Santa María Nativitas hasta el Geíser y Balneario, en Hidalgo.

En la tabla 3.6 se resume la Capacidad de Asimilación de materia orgánica biodegradable, DBO, evaluada en cada uno de los tramos del río San Juan, en que fue dividido para su estudio.

La Capacidad de Dilución de los tramos del río San Juan, se muestran en la tabla 3.7.

Gráfica 3.5. Demanda bioquímica de oxígeno medida en los tramos en que se dividió el río San Juan, para su estudio



KILOMETRAJE SOBRE LA CORRIENTE DEL RIO SAN JUAN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

**Tabla 3.6. Capacidad de asimilación del río San Juan, de acuerdo al uso**

**Capacidad de Asimilación de DBO en el río San Juan, para Uso en Riego Agrícola**

<b>Tramo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Término</b>	<b>Capacidad de Asimilación de DBO, mg/L</b>
I	Sta. María Nativitas	Presa Cofradía	0
II	Presa Cofradía	Presa San Ildefonso	5
III	Presa San Ildefonso	Arroyo Zarco	27
IV	Arroyo Zarco	Presa Constitución	64
V	Presa Constitución	San Pedro Ahuacatlán	0
VI	San Pedro Ahuacatlán	Presa Centenario	0
VII	Presa Centenario	Presa Paso de Tablas	37
VIII	Presa Paso de Tablas	Géiser y Balneario	63
IX	Géiser y Balneario	Presa Zimapán	87

**Capacidad de Asimilación de DBO en el río San Juan, para Uso Público Urbano**

<b>Tramo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Término</b>	<b>Capacidad de Asimilación de DBO, mg/L</b>
I	Sta. María Nativitas	Presa Cofradía	0
II	Presa Cofradía	Presa San Ildefonso	0
III	Presa San Ildefonso	Arroyo Zarco	0
IV	Arroyo Zarco	Presa Constitución	24
V	Presa Constitución	San Pedro Ahuacatlán	0
VI	San Pedro Ahuacatlán	Presa Centenario	0
VII	Presa Centenario	Presa Paso de Tablas	0
VIII	Presa Paso de Tablas	Géiser y Balneario	23
IX	Géiser y Balneario	Presa Zimapán	47

**Capacidad de Asimilación de DBO en el río San Juan, para Protección de Vida Acuática**

<b>Tramo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Término</b>	<b>Capacidad de Asimilación de DBO, mg/L</b>
I	Sta. María Nativitas	Presa Cofradía	0
II	Presa Cofradía	Presa San Ildefonso	0
III	Presa San Ildefonso	Arroyo Zarco	0
IV	Arroyo Zarco	Presa Constitución	0
V	Presa Constitución	San Pedro Ahuacatlán	0
VI	San Pedro Ahuacatlán	Presa Centenario	0
VII	Presa Centenario	Presa Paso de Tablas	0
VIII	Presa Paso de Tablas	Géiser y Balneario	0
IX	Géiser y Balneario	Presa Zimapán	12

**Tabla 3.7 Capacidad de dilución del río San Juan, de acuerdo al uso**

**Capacidad de Dilución de DBO en el río San Juan, para Uso en Riego Agrícola**

<b>Tramo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Término</b>	<b>Capacidad de Dilución de DBO, kg/d</b>
I	Sta. María Nativitas	Presa Cofradía	0
II	Presa Cofradía	Presa San Ildefonso	131
III	Presa San Ildefonso	Arroyo Zarco	139
IV	Arroyo Zarco	Presa Constitución	709
V	Presa Constitución	San Pedro Ahuacatlán	0
VI	San Pedro Ahuacatlán	Presa Centenario	0
VII	Presa Centenario	Presa Paso de Tablas	991
VIII	Presa Paso de Tablas	Géiser y Balneario	2,463
IX	Géiser y Balneario	Presa Zimapán	224

**Capacidad de Dilución de DBO en el río San Juan, para Uso Público Urbano**

<b>Tramo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Término</b>	<b>Capacidad de Dilución de DBO, kg/d</b>
I	Sta. María Nativitas	Presa Cofradía	0
II	Presa Cofradía	Presa San Ildefonso	0
III	Presa San Ildefonso	Arroyo Zarco	0
IV	Arroyo Zarco	Presa Constitución	261
V	Presa Constitución	San Pedro Ahuacatlán	0
VI	San Pedro Ahuacatlán	Presa Centenario	0
VII	Presa Centenario	Presa Paso de Tablas	0
VIII	Presa Paso de Tablas	Géiser y Balneario	920
IX	Géiser y Balneario	Presa Zimapán	121

**Capacidad de Dilución de DBO en el río San Juan, para Protección de Vida Acuática**

<b>tramo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Término</b>	<b>Capacidad de Dilución de DBO, kg/d</b>
I	Sta. María Nativitas	Presa Cofradía	0
II	Presa Cofradía	Presa San Ildefonso	0
III	Presa San Ildefonso	Arroyo Zarco	0
IV	Arroyo Zarco	Presa Constitución	0
V	Presa Constitución	San Pedro Ahuacatlán	0
VI	San Pedro Ahuacatlán	Presa Centenario	0
VII	Presa Centenario	Presa Paso de Tablas	0
VIII	Presa Paso de Tablas	Géiser y Balneario	0
IX	Géiser y Balneario	Presa Zimapán	30

### **3.7 Simulación de la calidad del agua del río San Juan bajo diferentes escenarios**

Para evaluar la capacidad de asimilación, dilución y remoción de contaminantes de la corriente, y con ello determinar los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes presentes en las aguas residuales que se descargan al río San Juan, se llevó a cabo la simulación, bajo diferentes escenarios, de los principales parámetros de calidad del agua de la corriente

La simulación permite conocer de manera anticipada, el mejoramiento que se alcanzará en la calidad del agua del río San Juan, si se toman las medidas necesarias para asegurar el Gasto de Conservación Ecológica en la corriente y, adicionalmente, se llevan a cabo acciones concretas de regulación de las descargas de agua residuales, como es el establecimiento de la NOM-001 o el establecimiento de condiciones aun más estrictas de ser necesario.

Las metas de calidad del agua, y los plazos propuestas en el seno de la Comisión de Cuencas del Río San Juan, son las siguientes:

#### **Metas**

- En el corto plazo, agua apta para su uso en Riego Agrícola
- En el mediano plazo, agua apta para Uso Público Urbano
- A largo plazo, agua apta para la Protección de la Vida Acuática.

#### **Plazos**

- El plazo de cumplimiento de las condiciones de descargas para el uso del río en Riego Agrícola es inmediato.
- El plazo de cumplimiento de las condiciones de descargas para el uso del río en Público-Urbano es el año 2003.
- El plazo de cumplimiento de las condiciones de descargas para el uso del río en Protección de la Vida Acuática es año 2006

Los escenarios simulados, con base en las medidas propuestas para la regulación de las descargas se describen a continuación

Tabla 3.8 Descripción de los escenarios simulados

Escenario No.	Escenarios Simulados
1	El modelo reproduce las condiciones actuales de la corriente (calibración del modelo).
2	El modelo predice las condiciones de calidad del agua si se cumplen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 para cuerpo receptor tipo A (Riego Agrícola), y se toman las medidas necesarias para mantener como mínimo, el Gasto de Conservación Ecológica en la corriente.
3	El modelo predice las condiciones de calidad del agua si se cumplen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 para cuerpo receptor tipo B (Uso Público Urbano), y se toman las medidas necesarias para mantener, como mínimo, el Gasto de Conservación Ecológica en la corriente.
4	El modelo predice las condiciones de calidad del agua si se cumplen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 para cuerpo receptor tipo C (Protección de Vida Acuática), y se toman las medidas necesarias para mantener como mínimo, el Gasto de Conservación Ecológica en la corriente.
5	En el caso de que no sean suficientes las medidas de regulación planteadas en los escenarios 2, 3 y 4, se plantearán escenarios adicionales, con valores más estrictos a los establecidos en la norma, para alcanzar las metas propuestas en cada caso, Riego Agrícola, Uso Público Urbano, y Protección de Vida Acuática.

Para determinar si se alcanzan las metas de calidad del agua con las medidas de regulación de las descargas y con la dilución de los contaminantes al mantener en la corriente, el gasto de conservación ecológica, se utilizaron los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, CE-CCA-001/89.

## 4.

### Análisis de resultados

#### 4.1 Resultados de la simulación de la calidad del agua del río San Juan.

Las gráficas de simulación, gráficas 41 a 49, tienen las siguientes características comunes:

- En cada gráfica se presentan dos curvas, la primera corresponde al parámetro que se está analizando, y sus valores se leen en el eje principal de ordenadas, del lado izquierdo de la gráfica; la segunda curva representa el gasto en la corriente, determinado como el 10% del caudal promedio mensual, o gasto ecológico, que sumado a las descargas producen el gasto total que se lee en el eje secundario de las ordenadas, en el lado derecho de la gráfica.
- En el eje de las abscisas se muestra el kilometraje en la corriente. El tramo del río que se modeló inicia aproximadamente a 5 km aguas arriba de la población de Aculco, y termina en la entrada a la presa Zimapán. La numeración del kilometraje se hizo en sentido inverso al flujo de la corriente, por restricciones del modelo, por ello, se inicia en el kilómetro 133 y termina en el cero; el kilómetro cero corresponde a la entrada de la presa.
- En el eje de las abscisas se muestran las descargas de aguas residuales que se incorporan a la corriente. Las descargas se representan con letras y flechas con dirección vertical y sentido inferior, estas son: (A) CONFECSA, (B) Descarga municipal Aculco I, (C) Ojo de agua, (D) Descarga municipal Aculco II, (E) Arroyo Ñadó, (F) Arroyo Zarco, (G) Kimberly Clark, (H) Descarga municipal San Juan del Río I, (I) Descarga municipal San Juan del Río II, (J) PITSA, (K) Rastro, (L) QUIMPRO, (M) Ponderosa, (N) Descarga municipal San Juan del Río III, (O) Descarga municipal San Pedro Ahuacatlán I, (P) Descarga municipal San Pedro Ahuacatlán II, (Q) CERESO, (R) Dren La Culebra, (S) Descarga municipal San Nicolás, (T) Descarga municipal Tequisquiapan I, (U) Descarga municipal Tequisquiapan II, y (V) Descarga municipal Tequisquiapan III.
- La meta de calidad del agua que se propone alcanzar, se muestra con una línea horizontal. El plazo propuesto para alcanzar la meta se indica en la parte inferior del título de la gráfica.
- Cada gráfica muestra la concentración del parámetro analizado, que se alcanzaría a lo largo de la corriente, bajo el supuesto de que las descargas cumplieran rigurosamente con los límites máximos permisibles de contaminantes, determinados con el modelo, de acuerdo al uso del cuerpo receptor y además bajo el supuesto de que se cumpliera con el Gasto Ecológico en la corriente.



## 4.

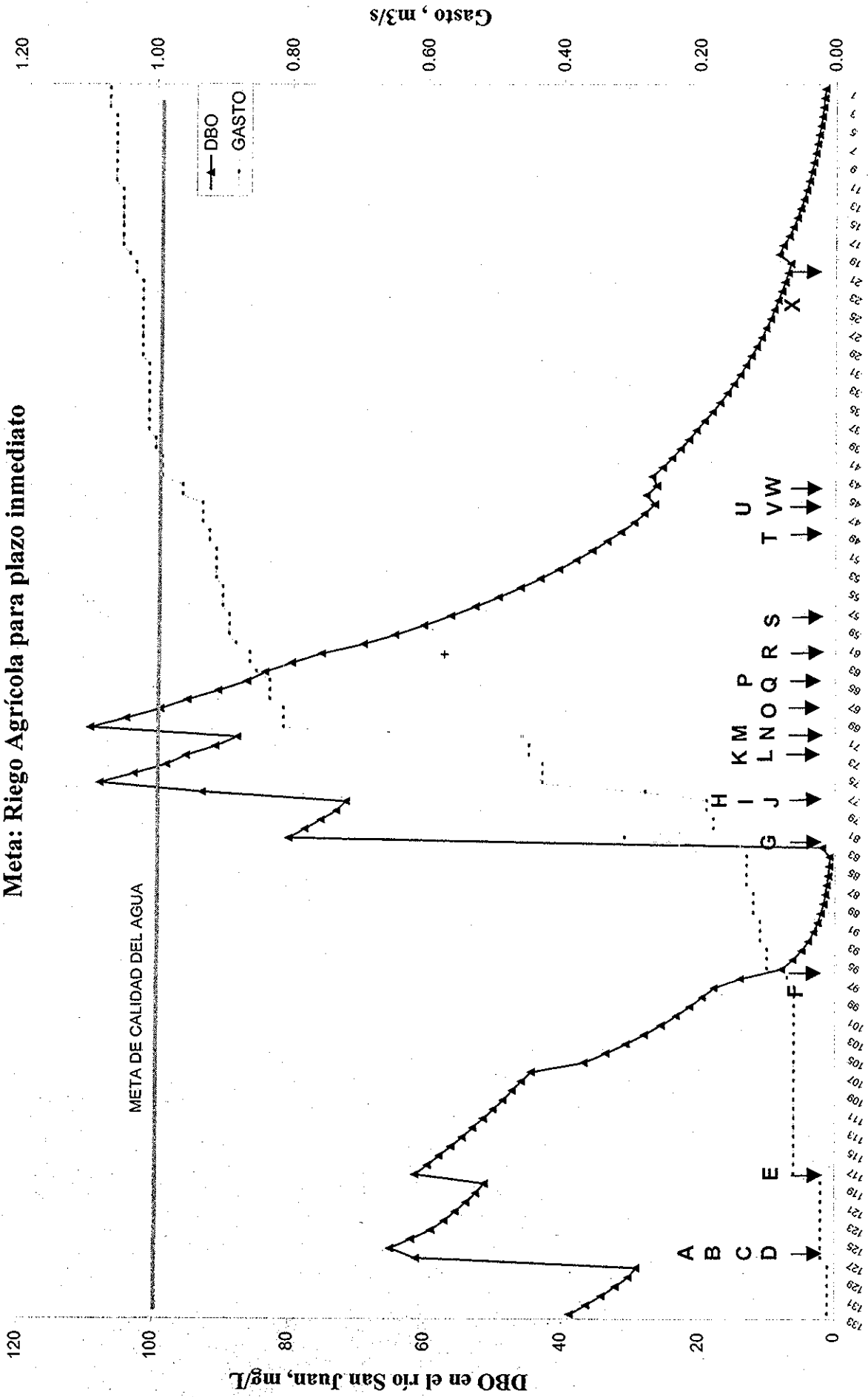
### Análisis de resultados

#### 4.1 Resultados de la simulación de la calidad del agua del río San Juan.

Las gráficas de simulación, gráficas 41 a 49, tienen las siguientes características comunes:

- En cada gráfica se presentan dos curvas, la primera corresponde al parámetro que se está analizando, y sus valores se leen en el eje principal de ordenadas, del lado izquierdo de la gráfica; la segunda curva representa el gasto en la corriente, determinado como el 10% del caudal promedio mensual, o gasto ecológico, que sumado a las descargas producen el gasto total que se lee en el eje secundario de las ordenadas, en el lado derecho de la gráfica.
- En el eje de las abscisas se muestra el kilometraje en la corriente. El tramo del río que se modeló inicia aproximadamente a 5 km aguas arriba de la población de Aculco, y termina en la entrada a la presa Zimapán. La numeración del kilometraje se hizo en sentido inverso al flujo de la corriente, por restricciones del modelo, por ello, se inicia en el kilómetro 133 y termina en el cero; el kilómetro cero corresponde a la entrada de la presa.
- En el eje de las abscisas se muestran las descargas de aguas residuales que se incorporan a la corriente. Las descargas se representan con letras y flechas con dirección vertical y sentido inferior, estas son: (A) CONFECSA, (B) Descarga municipal Aculco I, (C) Ojo de agua, (D) Descarga municipal Aculco II, (E) Arroyo Ñadó, (F) Arroyo Zarco, (G) Kimberly Clark, (H) Descarga municipal San Juan del Río I, (I) Descarga municipal San Juan del Río II, (J) PITSA, (K) Rastro, (L) QUIMPRO, (M) Ponderosa, (N) Descarga municipal San Juan del Río III, (O) Descarga municipal San Pedro Ahuacatlán I, (P) Descarga municipal San Pedro Ahuacatlán II, (Q) CERESO, (R) Dren La Culebra, (S) Descarga municipal San Nicolás, (T) Descarga municipal Tequisquiapan I, (U) Descarga municipal Tequisquiapan II, y (V) Descarga municipal Tequisquiapan III.
- La meta de calidad del agua que se propone alcanzar, se muestra con una línea horizontal. El plazo propuesto para alcanzar la meta se indica en la parte inferior del título de la gráfica.
- Cada gráfica muestra la concentración del parámetro analizado, que se alcanzaría a lo largo de la corriente, bajo el supuesto de que las descargas cumplieran rigurosamente con los límites máximos permisibles de contaminantes, determinados con el modelo, de acuerdo al uso del cuerpo receptor y además bajo el supuesto de que se cumpliera con el Gasto Ecológico en la corriente.

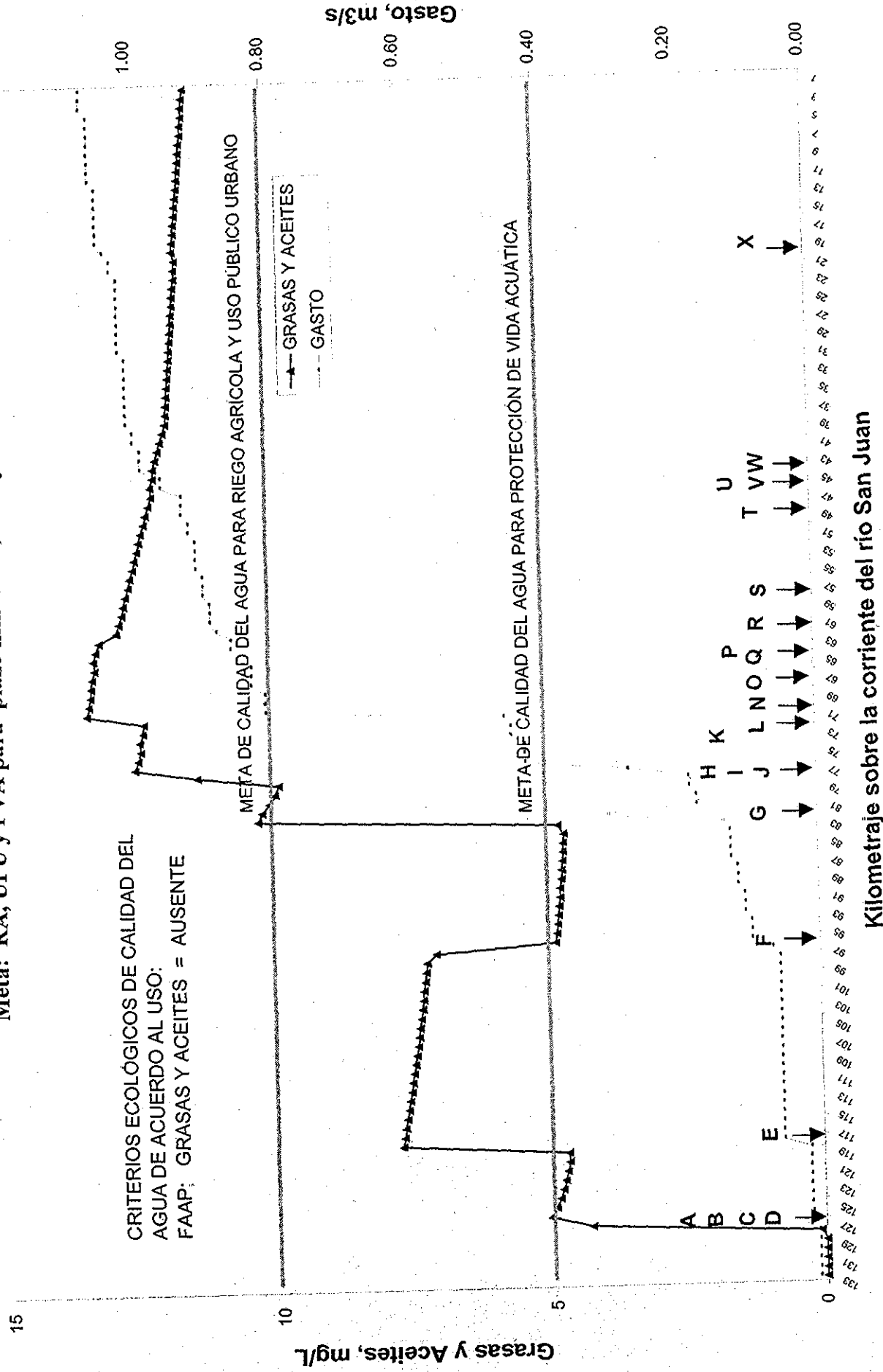
**Gráfica 4.1. DBO Que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 150 mg/L, y Gasto Ecológico**  
**Meta: Riego Agrícola para plazo inmediato**



Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

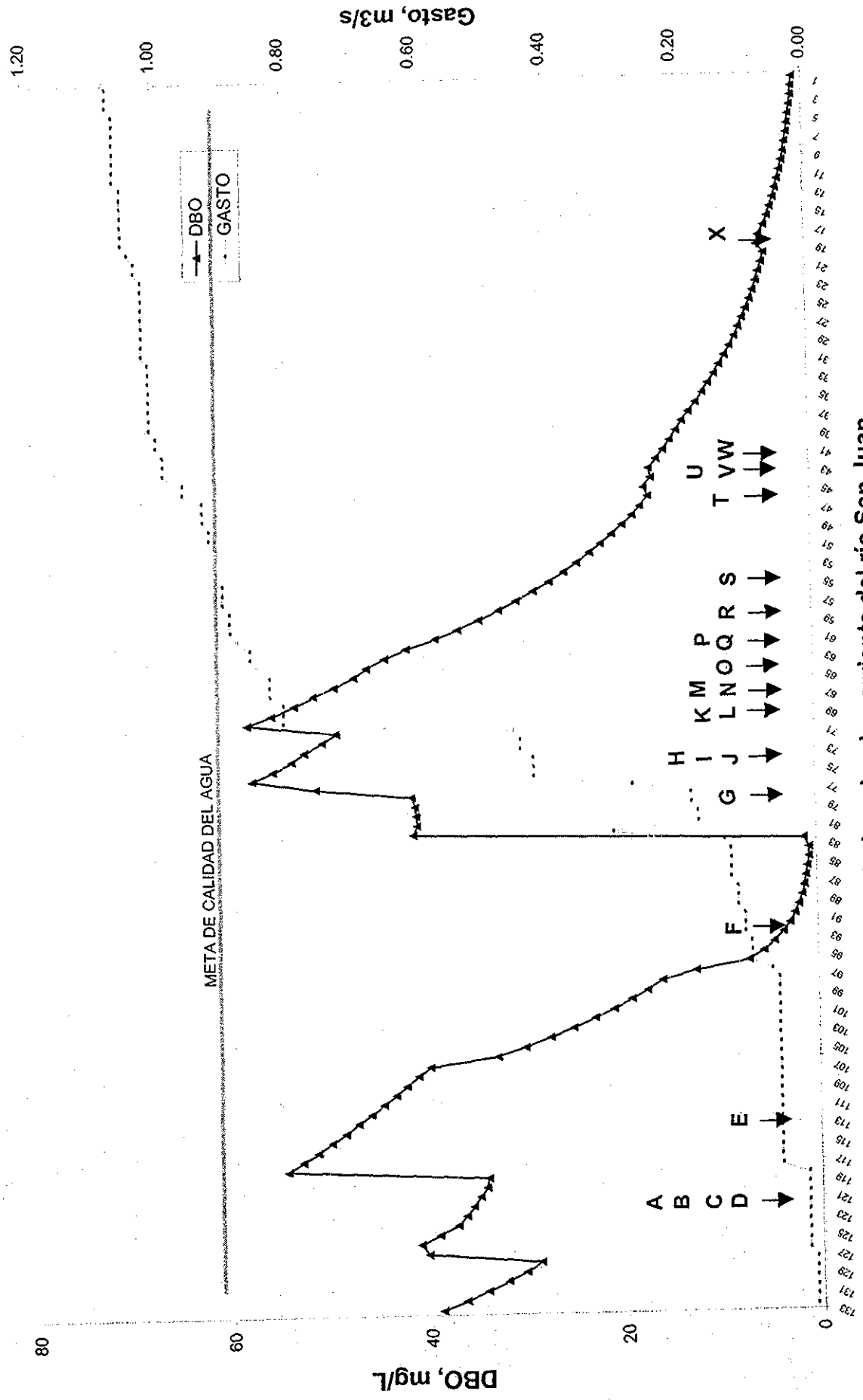
**Gráfica 4.2 Grasas y aceites que se alcanzarían en el río San Juan si las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, GYA = 15 mg/L y Gasto Ecológico**  
**Meta: RA, UPU y PVA para plazo inmediato, 2003 y 2006, respectivamente**



Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

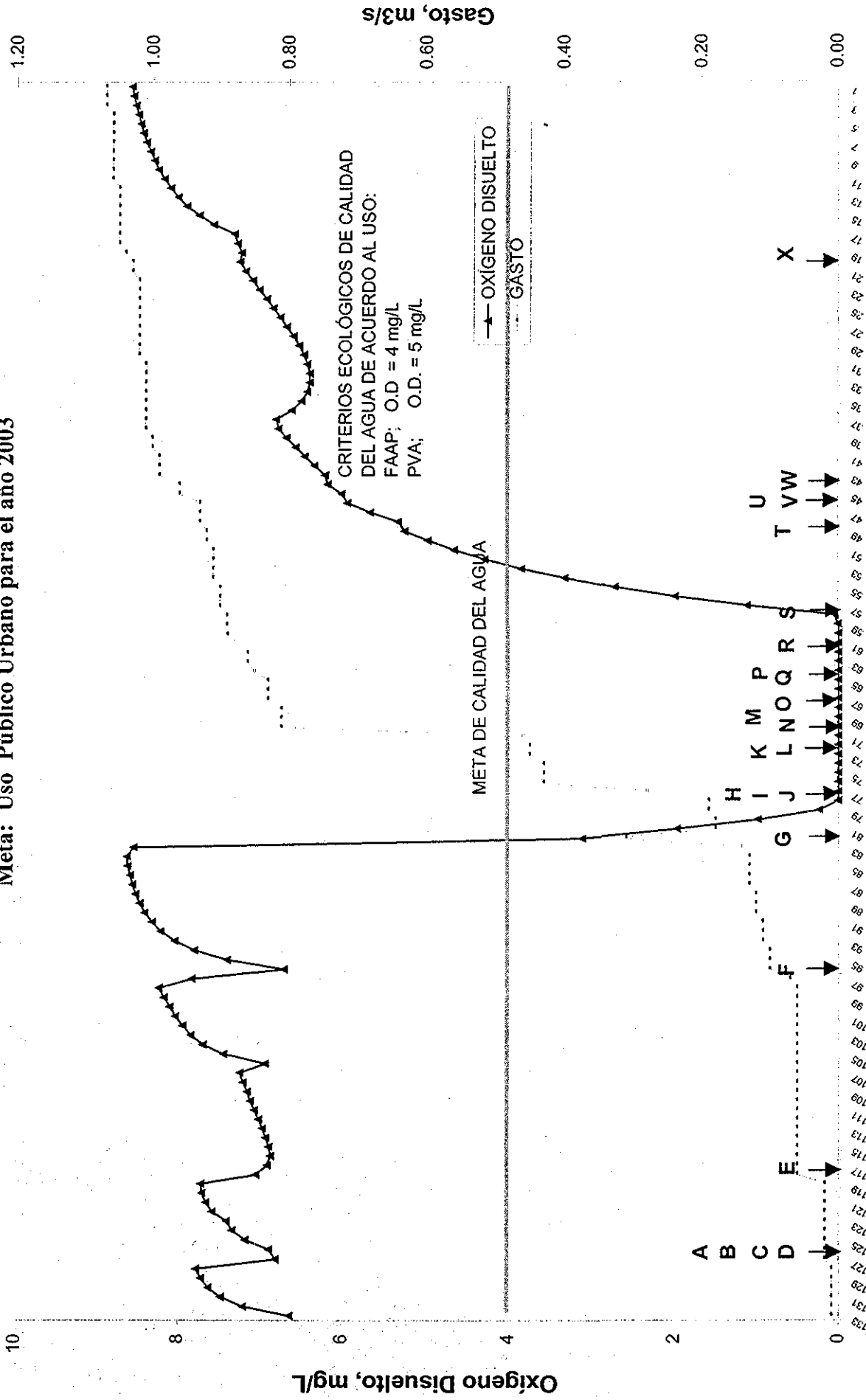
**Gráfica 4.3 DBO Que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 75 mg/L, y Gasto Ecológico**  
**Meta: Uso Público Urbano para el año 2003**



Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

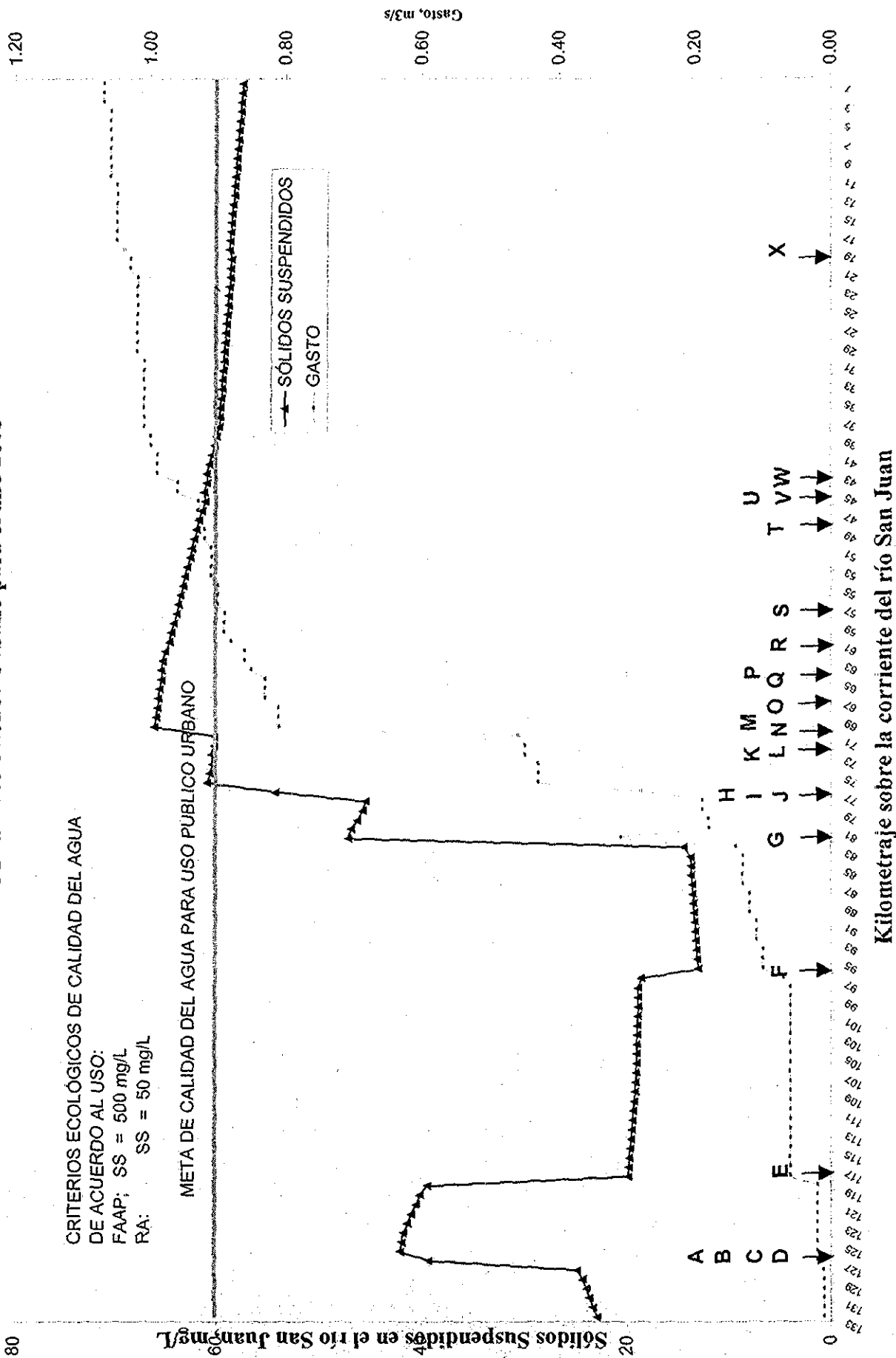
**Gráfica 4.4 Oxígeno disuelto en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 75 mg/L y Gasto Ecológico**  
**Meta: Uso Público Urbano para el año 2003**



Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

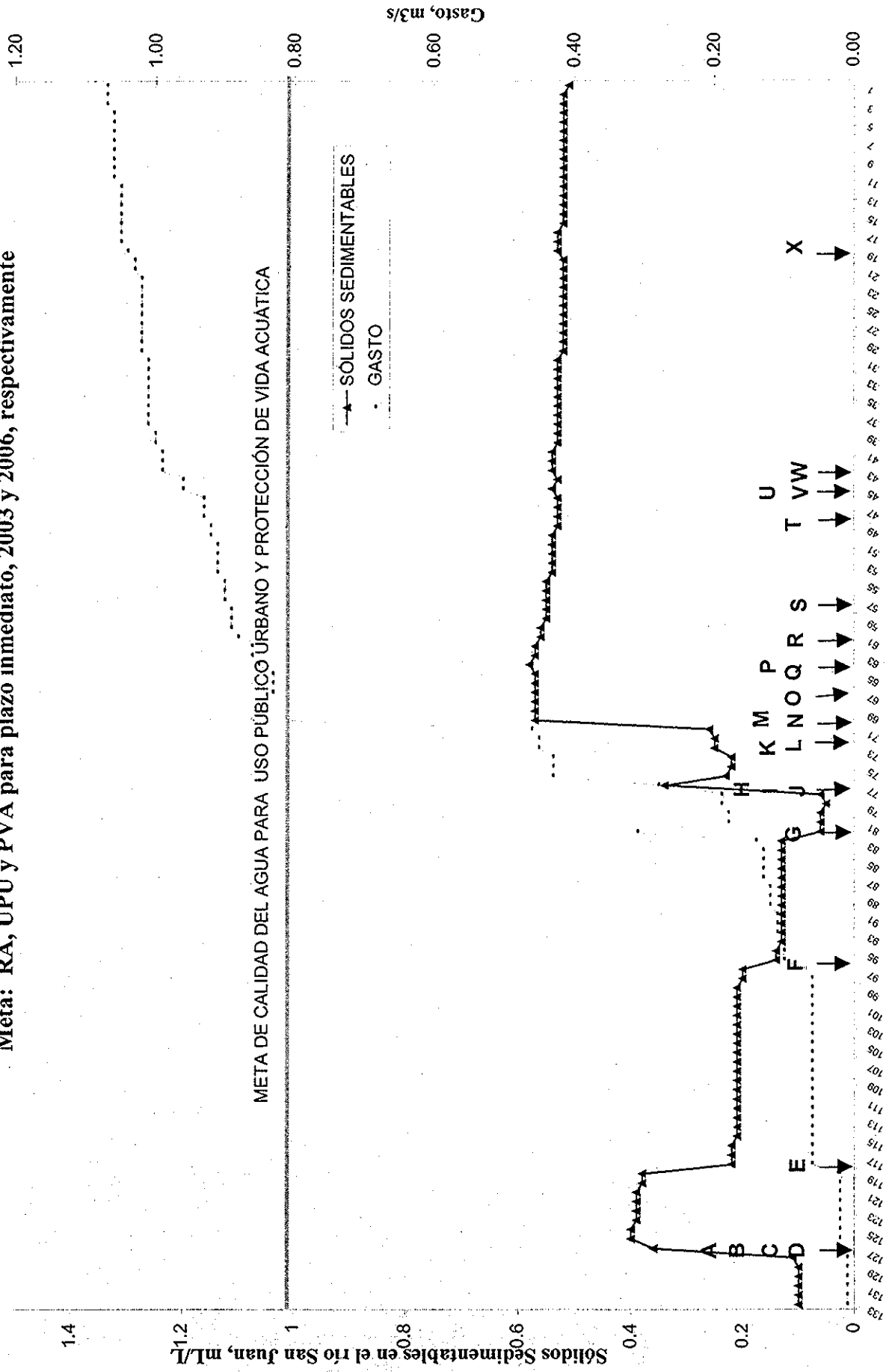
**Gráfica 4.5 Sólidos suspendidos que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, SS= 75 mg/L y Gasto Ecológico**  
**Meta: Uso Público Urbano para el año 2003**



Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

**Gráfica 4.6 Sólidos sedimentables que se alcanzarían en el río San Juan si todas cumplirían con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, S.SED. = 1 mL/L y Gasto Ecológico**  
**Meta: RA, UPU y PVA para plazo inmediato, 2003 y 2006, respectivamente**



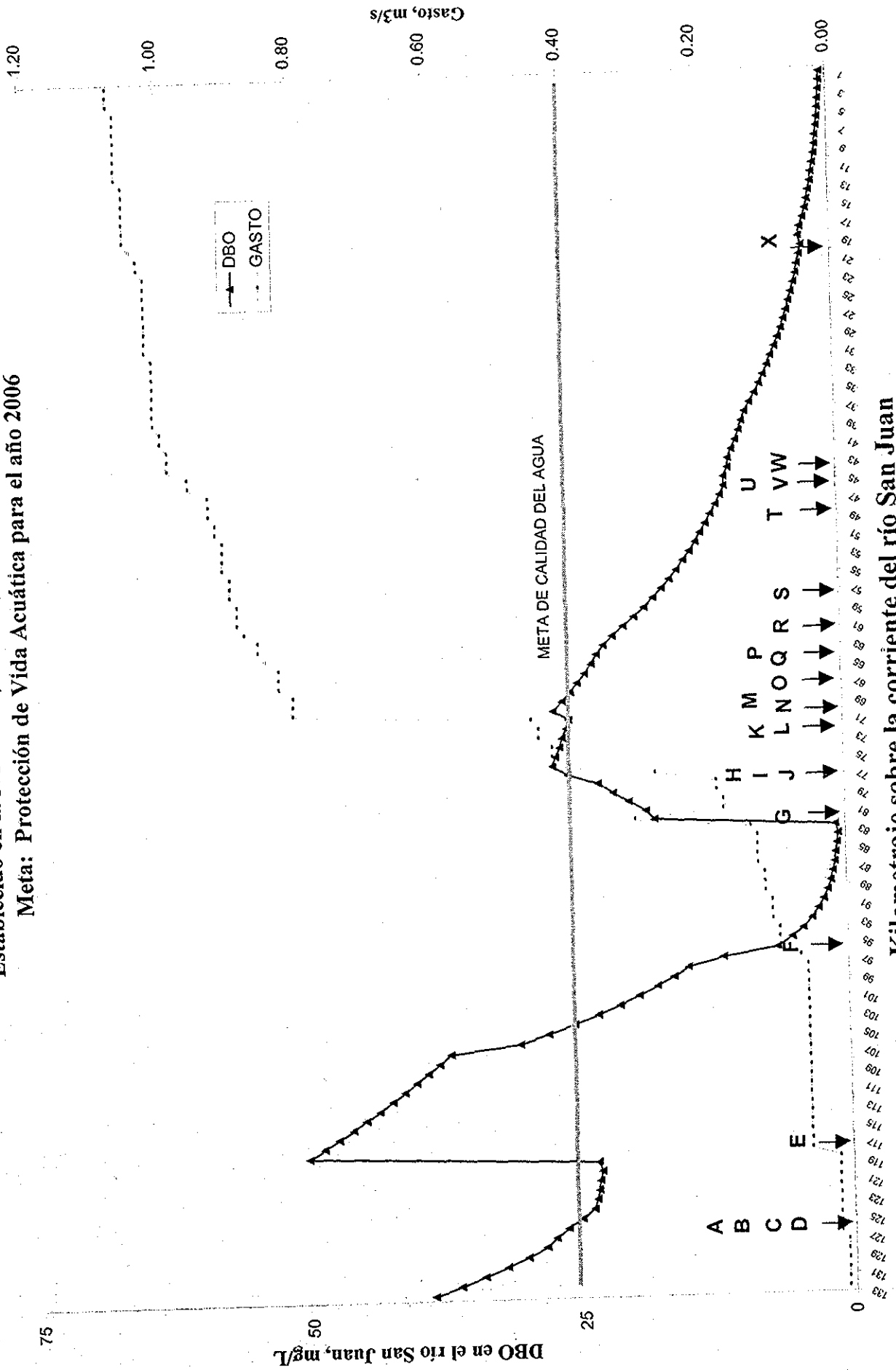
META DE CALIDAD DEL AGUA PARA USO PÚBLICO ÚRBANO Y PROTECCIÓN DE VIDA ACUÁTICA

—▲— SÓLIDOS SEDIMENTABLES  
 · GASTO

Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

**Gráfica 4.7 DBO que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo Establecido en la NOM-001, DBO = 30 mg/L, y Gasto Ecológico**  
**Meta: Protección de Vida Acuática para el año 2006**

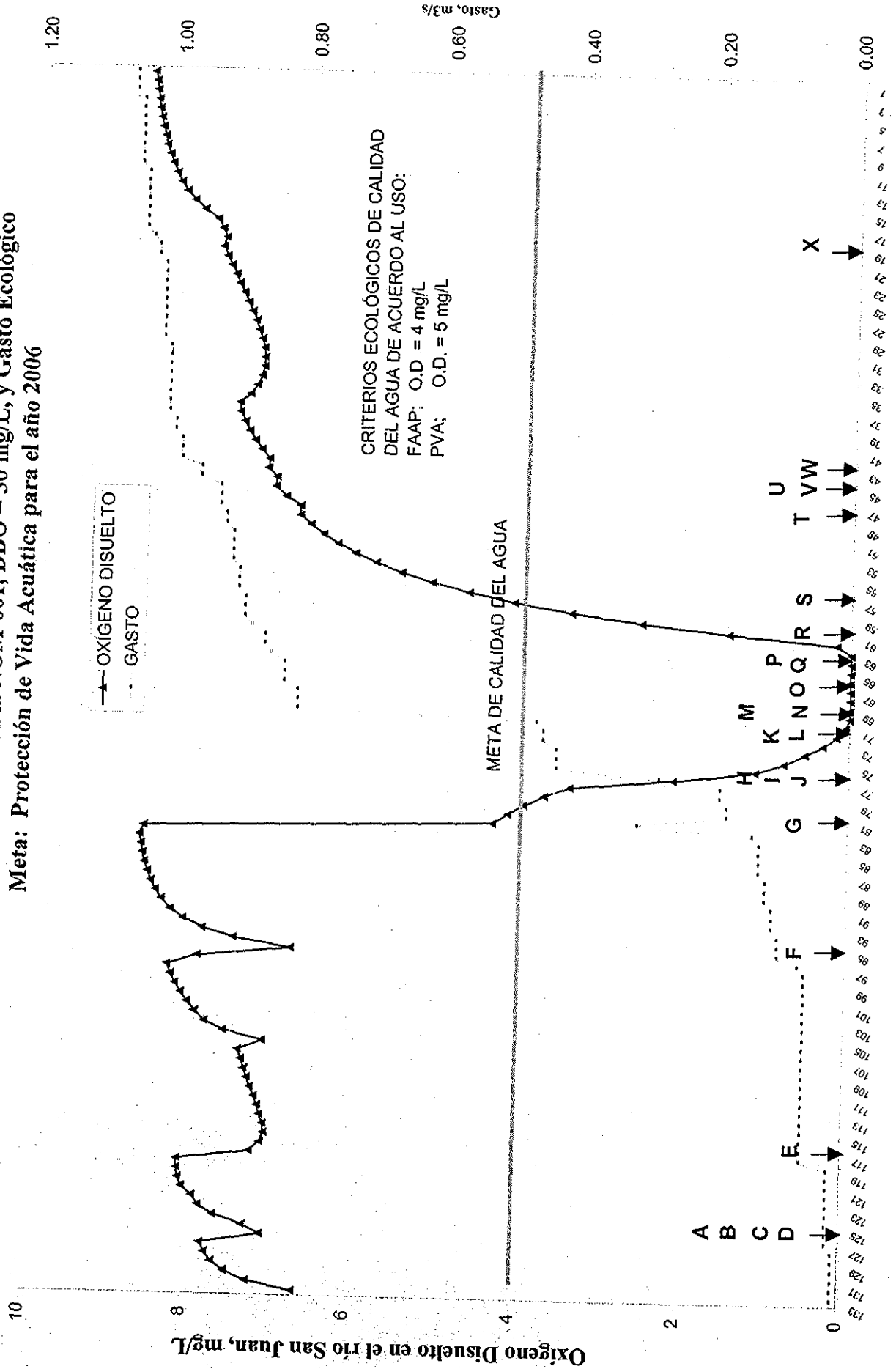


Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



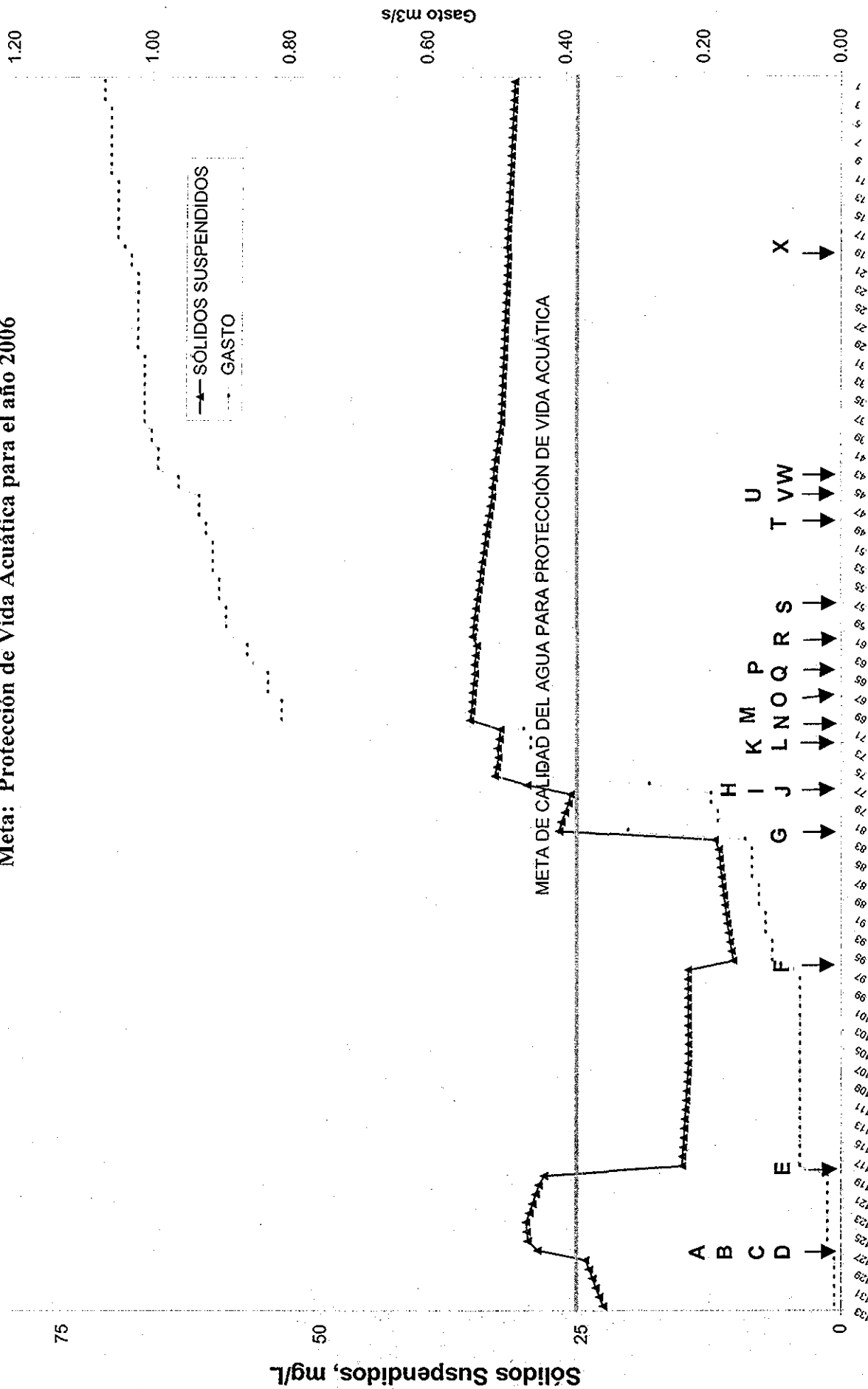
**Gráfica 4.8** Oxígeno disuelto que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 30 mg/L, y Gasto Ecológico  
 Meta: Protección de Vida Acuática para el año 2006



Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

**Gráfica 4.9** Sólidos suspendidos que se alcanzarían en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, SS= 40 mg/L, y Gasto Ecológico  
**Meta: Protección de Vida Acuática para el año 2006**



Kilometraje sobre la corriente del río San Juan

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

**Escenario 1.- El modelo reproduce las condiciones actuales de la corriente (calibración del modelo)**

En las gráficas A4.1 a A4.7, que se incluyen en el Anexo 4, "Gráficas de la calibración del modelo de calidad del agua para el río San Juan", se presentan los resultados de la calibración del modelo. Como ya se anotó, la curva continua de cada gráfica muestra el perfil de concentraciones arrojado por el modelo calibrado, el cual reproduce las condiciones reales medidas.

En la gráfica A4 2 se muestra el perfil de concentraciones de la Demanda bioquímica de oxígeno, arrojado por el modelo calibrado, y que reproduce las condiciones reales que se tienen en la corriente.

La gráfica 3.5, tiene como base la gráfica A4 2, incluyendo, adicionalmente, la división de la corriente en tramos y las metas de calidad propuestas. Esta gráfica se usó para determinar la capacidad de asimilación y dilución de la corriente.

La capacidad de asimilación y dilución de materia orgánica del río San Juan, para Riego agrícola, Uso público urbano y Protección de vida acuática, se presentan en las tablas 3.6 y 3.7, respectivamente.

**Escenario 2. El modelo predice las condiciones de calidad del agua asumiendo que las descargas de aguas residuales cumplieran con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 para cuerpo receptor tipo A (Riego Agrícola), y se tomaran las medidas necesarias para mantener como mínimo, el Gasto Ecológico en el río.**

En la gráfica 4.1, se muestra la concentración de la materia orgánica biodegradable, expresada como DBO, en mg/L, a lo largo de la corriente del río San Juan, que se presentaría si todas las descargas de aguas residuales cumplieran con el límite máximo permisible de DBO de 150 mg/L para uso en Riego agrícola

El cumplimiento riguroso del límite máximo de DBO en las descargas y, al mismo tiempo, el sostenimiento del Gasto Ecológico en la corriente, son medidas necesarias y suficientes para alcanzar la meta de 100 mg/L de DBO en río San Juan para uso en Riego agrícola.

En este escenario, el perfil de concentraciones tendría la siguiente tendencia: Se inicia en 39 mg/L de DBO, aguas arriba de Aculco, donde el gasto es apenas de 10 L/s. En este lugar aún no hay descargas de aguas residuales, sin embargo, la presencia de materia orgánica revela que existe contaminación, posiblemente por descargas de algún poblado pequeño.

5 km más adelante, se incorpora a la corriente las descargas municipales de Aculco, y otras descargas menores, lo que incrementa tanto la DBO, como el gasto, llegando a 67 mg/L y 20 L/s, respectivamente.

7 km después se incorpora a la corriente el arroyo Ñadó, con un contenido de materia orgánica ligeramente mayor al que lleva el río. Después de esta aportación, se alcanza en la corriente 61.4 mg/L, con 60 L/s.

A partir de esta confluencia, la DBO tiene una tendencia uniforme a disminuir. En el kilómetro 96, el río San Juan recibe la confluencia del arroyo Zarco. En este lugar se tiene una concentración baja de DBO, 8 mg/L, con un gasto de 100 L/s.

Aguas arriba de la descarga de Kimberly Clark, 13 km después de la confluencia del arroyo Zarco, prácticamente se ha consumido toda la materia orgánica biodegradable y el gasto, en este lugar, es de 140 L/s. Después de la descarga de Kimberly Clark (170 L/s) se alcanza una DBO de 80 mg/L y un flujo de 310 L/s.

5 km más adelante y durante los siguientes 22 kilómetros, la corriente recibe las descargas de las aguas residuales de San Juan del Río I (60 L/s), San Juan del Río II (27 L/s), PITSA (150 L/s), Rastro (15 L/s), QUIMPRO (0.4 L/s), Ponderosa (47.5 L/s), San Juan del Río III (300 L/s), San Pedro Ahuacatlán I (13 L/s), San Pedro Ahuacatlán II (2 L/s), CERESO (0.3 L/s), Dren La Culebra (20 L/s) y San Nicolás (0.9 L/s), en este orden.

La concentración de DBO alcanza dos máximos en los kilómetros 76 y 70, llegando a 108 y 109 mg/L, respectivamente, ligeramente por arriba de la meta de 100 mg/L. Estos máximos son provocados por las principales descargas al río, que son en orden decreciente a su carga orgánica actual: San Juan del Río III (12,070 kg/d), Rastro (2,117 kg/d), San Juan del Río I (1,493 kg/d), Kimberly Clark (881 kg/d), San Juan del Río II (663 kg/d) y PITSA (535 kg/d); todas ellas en esta sección del río, que se localiza entre las presas Constitución y Centenario.

Después de la presa Centenario se tienen las descargas de Tequisquiapan I, II y III, y la descarga del Club de Golf. En este tramo la concentración máxima de materia orgánica biodegradable es de 27 mg/L, con un gasto de 960 L/s.

Después de la presa Paso de Tablas, la concentración de materia orgánica biodegradable continua disminuyendo, y aunque se tiene las descargas del géiser y del balneario, éstas no modifican esta tendencia. Después de estas aportaciones la DBO es apenas de 8 mg/L, en el km 19, y llega a 1.6 mg/L en el kilómetro cero, en la entrada a la presa Zimapán, con un gasto de 1.07 m<sup>3</sup>/s.

Las condiciones descritas en este escenario no corresponden a las que actualmente se tienen en el río, sino a las condiciones que se alcanzarían si la concentración de DBO, en todas las descargas de aguas residuales, fuera menor a 150 mg/L, es decir, cumplieran

con el límite máximo permisible de este contaminante, establecido en la NOM-001, para Riego agrícola y, además, se conservara el Gasto Ecológico en toda la corriente.

En la gráfica 4.2, se muestra la concentración de Grasas y aceites, a lo largo de la corriente del río San Juan, que se presentaría si todas las descargas de aguas residuales cumplieran con el límite máximo establecido en la NOM-001, es decir, si ninguna de las descargas directas a la corriente tuviera una concentración de Grasas y aceites mayor a 15 mg/L, para uso en Riego agrícola

La aplicación y el cumplimiento riguroso del límite máximo y, al mismo tiempo, el cumplimiento del Gasto Ecológico, son medidas necesarias pero no son suficientes para alcanzar, en toda la corriente, la meta de calidad del agua para uso en Riego agrícola, con respecto a Grasas y aceites, ya que como se muestra en la gráfica 4.2, con estas medidas, la concentración que se alcanza desde aguas arriba de Aculco hasta la presa Constitución, se mantiene por debajo de la meta de 10 mg/L, para el uso del agua en Riego agrícola; sin embargo, después de la presa Constitución y hasta la presa Zimapán se mantiene un nivel ligeramente superior a la meta, con un máximo de 13.5 mg/L de Grasas y aceites, en el kilómetro 70, después de la descargas de San Juan del Río. A pesar de que, en este escenario, se consideró el supuesto de que ninguna de las descargas rebasa 15 mg/L, la concentración resultante en la corriente es, en el máximo, 3.5 mg/L superior al especificado. Esto pone de manifiesto que existen fuentes de contaminación no consideradas explícitamente en el modelo, como son descargas pequeñas y clandestinas que deben identificarse para su reglamentación.

Bajo este escenario, la concentración de Grasas y aceites a lo largo de la corriente, es la siguiente: Se inicia en 0.0 mg/L, aguas arriba de Aculco, donde el gasto es de 10 L/s. Este valor es congruente con el hecho de que en este lugar aún no hay descargas de aguas residuales.

Más adelante, se incorpora a la corriente las descargas municipales de Aculco, y otras descargas menores, lo que incrementa tanto las Grasas y aceites, como el gasto, llegando a 5 mg/L y 20 L/s, respectivamente.

Posteriormente, 7 km aguas abajo, se incorpora a la corriente el arroyo Ñadó, con un contenido de Grasas y aceites ligeramente mayor a la que lleva el río San Juan. Después de esta aportación, se alcanza en la corriente 7.8 mg/L, con 60 L/s.

A partir de esta confluencia la concentración de Grasas y aceites disminuye uniformemente hasta el kilómetro 96, donde se tiene 7.1 mg/L. En este lugar el río San Juan recibe la confluencia del arroyo Zarco, diluyendo sensiblemente este contaminante para llegar a 4.9 mg/L, y 100 L/s.

En el kilómetro 82, se tiene la descarga de Kimberly Clark, (170 L/s. aprox.), por lo que se alcanza un flujo de 310 L/s, y una concentración de 10 mg/L, valor que se encuentra dentro de la meta a alcanzar

Después del kilómetro 77 y hasta la presa Zimapán, la concentración de Grasas y aceites se mantiene por arriba de la meta de 10 mg/L. La corriente recibe, consecutivamente, las descargas de las aguas residuales de San Juan del Río I (60 L/s), San Juan del Río II (27 L/s), PITSA (150 L/s), Rastro (15 L/s), QUIMPRO (0.4 L/s), Ponderosa (47.5 L/s), San Juan del Río III (300 L/s), San Pedro Ahuacatlán I (13 L/s), San Pedro Ahuacatlán II (2 L/s), CERESO (0.3 L/s), dren La Culebra (20 L/s) y San Nicolás (0.9 L/s); y posteriormente, después de la presa Centenario, las descargas de Tequisquiapan I, II y III, y la descarga del Club de Golf; después de la presa Paso de Tablas, la concentración de Grasas y aceites continua disminuyendo y, aunque se tiene las descargas del géiser y el balneario, éstas no modifican la tendencia, concentración que, sin embargo, está por arriba de la meta fijada, con un máximo de 13.5 mg/L en el kilómetro 70.

Nuevamente se hace hincapié en que las condiciones descritas en este escenario no corresponden a las condiciones que actualmente se tienen en el río, sino a las que se alcanzarían si la concentración de Grasas y aceites, en todas las descargas de aguas residuales, es menor a 15 mg/L, es decir, cumplieran con el límite máximo permisible de este contaminante, establecidos en la NOM-001-ECOL-1996, para Riego Agrícola y, además, se conservara el Gasto Ecológico en toda la corriente.

**Escenario 3. El modelo predice las condiciones de calidad del agua si se cumplieran los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 para cuerpo receptor tipo B (Uso Público Urbano), y se tomaran las medidas necesarias para mantener como mínimo, el Gasto Ecológico en la corriente.**

En las gráficas 4.3 y 4.4, se muestran las concentraciones a lo largo de la corriente del río San Juan, de la materia orgánica biodegradable, expresada como DBO, y del Oxígeno disuelto, respectivamente, ambos parámetros en mg/L, que se presentarían si todas las descargas de aguas residuales cumplieran con el límite máximo permisible de DBO establecido en la NOM-001, de 75 mg/L, para Uso Público Urbano.

La aplicación del límite máximo y, al mismo tiempo, el cumplimiento con el Gasto Ecológico, son medidas necesarias y suficientes para alcanzar la meta de calidad del agua del río San Juan para Uso público urbano, con respecto a la materia orgánica biodegradable, ya que como se muestra en la gráfica 4.3, con estas medidas, la concentración de la materia orgánica biodegradable que se alcanza en toda la corriente es inferior 60 mg/L, que es la meta de calidad del agua para este uso, propuesta para alcanzarse en el año 2003.

Sin embargo, estas medidas no son suficientes para alcanzar la meta de 4 mg/L de Oxígeno disuelto en toda la corriente. Si bien, esta meta se cumple satisfactoriamente desde aguas arriba de Aculco hasta aguas arriba de la descarga de Kimberly Clark en donde, aunque hay materia orgánica biodegradable principalmente por las descargas de Aculco y del arroyo Ñadó, se tiene una rápida oxigenación de la corriente en aproximadamente 18 kilómetros, hasta llegar a la presa San Ildefonso, en donde se abate

significativamente la DBO. Después de la presa San Ildefonso y hasta la presa Constitución de 1857 ya no se tienen descargas de aguas residuales, únicamente se incorpora el arroyo Zarco, pero se cuenta con 24 kilómetros de recorrido en donde se tiene una buena recuperación de la calidad de la corriente. Otro factor que ayuda a la rápida oxigenación es una amplia superficie de transferencia de oxígeno desde la atmósfera hacia el agua. En este tramo se tendrían niveles satisfactorios de Oxígeno disuelto por arriba de 7 mg/L.

Después de la presa Constitución y hasta la presa Centenario, en donde se tienen las descargas con mayor aportación de materia orgánica, no hay Oxígeno disuelto detectable, a pesar del cumplimiento del límite máximo calculado y del Gasto Ecológico.

En este tramo, de aproximadamente 27 kilómetros, la concentración de DBO no es superior a 60 mg/L y, sin embargo, no hay Oxígeno disuelto detectable en la corriente. Esta ausencia es consecuencia de las numerosas descargas de aguas residuales con elevada carga orgánica, por lo que el poco oxígeno que se transfiere de la atmósfera a la corriente, es consumido inmediatamente en la superficie del agua. Antes de que se manifieste una recuperación significativa de la corriente se presentan sucesivas descargas.

Bajo las condiciones planteadas en este escenario, la concentración de DBO, es la siguiente: se inicia en 39 mg/L, aguas arriba de Aculco, donde el gasto es apenas de 10 L/s. Ya se señaló que en este lugar aún no hay descargas de aguas residuales, sin embargo, la presencia de materia orgánica revela que existe desde aquí contaminación diseminada, posiblemente por descargas de algún poblado pequeño y fecalismo al aire libre.

5 km después, se incorpora a la corriente las descargas municipales de Aculco, y otras descargas menores, lo que incrementa tanto la DBO, como el gasto, llegando a 41 mg/L y 20 L/s, respectivamente

7 km adelante, el arroyo Ñadó se incorpora a la corriente, con un contenido de materia orgánica ligeramente mayor a la que lleva el río San Juan. Después de esta aportación, se alcanza en la corriente 54.3 mg/L, con 60 L/s. A partir de esta confluencia, la DBO tiene una tendencia uniforme a disminuir. En el kilómetro 96, el río San Juan recibe la confluencia del arroyo Zarco. En este lugar se tiene una concentración baja de DBO, aproximadamente 3 mg/L, con 100 L/s.

13 km después, aguas arriba de la descarga de Kimberly Clark, prácticamente se ha consumido toda la materia orgánica biodegradable y el gasto, en este lugar, es de 140 L/s. Después de la descarga de Kimberly Clark (170 L/s, aprox), se alcanza una DBO de 41 mg/L y un flujo de 310 L/s.

5 km más adelante y durante los siguientes 22 kilómetros, la corriente recibe las descargas de las aguas residuales de San Juan del Río I (60 L/s), San Juan del Río II

(27 L/s), PITSA (150 L/s), Rastro (15 L/s), QUIMPRO (0.4 L/s), Ponderosa (47.5 L/s), San Juan del Río III (300 L/s), San Pedro Ahuacatlán I (13 L/s), San Pedro Ahuacatlán II (2 L/s), y CERESO (0.3 L/s), dren La Culebra (20 L/s) y San Nicolás (0.9 L/s).

La concentración de DBO alcanza dos máximos en los kilómetros 76 y 70, llegando a 57 mg/L, en ambos casos, cumpliendo, aún en estos puntos máximos con la meta de 60 mg/L. Estos máximos son provocados por las principales descargas al río, que son en orden decreciente a su carga orgánica actual: San Juan del Río III (12,070 kg/d), Rastro (2,117 kg/d), San Juan del Río I (1,493 kg/d), Kimberly Clark (881 kg/d), San Juan del Río II (663 kg/d) y PITSA (535 kg/d), todas ellas se localiza entre las presas Constitución de 1857 y Centenario.

Después de la presa Centenario se tienen las descargas de Tequisquiapan I, II y III, y la descarga del Club de Golf. En este tramo el máximo alcanzado es de 17 mg/L con un gasto de 960 L/s.

En el kilómetro 37, después de la presa Paso de Tablas, la concentración de materia orgánica biodegradable continua disminuyendo, y aunque se tiene las descargas del géiser y del balneario, no modifican esta tendencia. Después de estas aportaciones la DBO es apenas de 5 mg/L, en el km 19 y llega a 1 mg/L con un gasto de 107 m<sup>3</sup>/s, en el kilómetro cero, en la entrada a la presa Zimapán.

Como se muestra en la gráfica 4.4, la meta de Oxígeno disuelto, de 4 mg/L, se cumple satisfactoriamente desde aguas arriba de Aculco hasta la presa Constitución de 1857 y desde la presa Centenario y hasta la presa Zimapán, esto, desde luego, asumiendo el cabal cumplimiento del límite máximo calculado con el modelo, para Uso público urbano y conservando en la corriente el Gasto Ecológico.

Entre la presa Constitución de 1857 y la presa Centenario, no solamente no se logra cumplir con la meta de Oxígeno disuelto, a pesar de que las descargas cumplieran con el límite máximo y el Gasto Ecológico, sino que, en este tramo del río, habría total ausencia de Oxígeno disuelto.

En la gráfica 4.5, se muestra que, en general se cumple con la meta de 60 mg/L de Sólidos suspendidos con la aplicación del límite máximo establecido en la NOM-001, para Uso público urbano, esto es, si todas las descargas tuvieran una concentración de Sólidos suspendidos inferior a 75 mg/L y además, se conservara el Gasto Ecológico en la corriente.

En la gráfica 4.6, se muestra que se cumple con la meta de 1 mL/L de Sólidos sedimentables para Uso público urbano, si se estableciera 1 mL/L como límite máximo permisible de Sólidos sedimentables en las descargas de aguas residuales y, adicionalmente, se conservara en toda la corriente el Gasto Ecológico.



**Escenario 4.- El modelo predice las condiciones de calidad del agua asumiendo que se cumplieran los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 para cuerpo receptor tipo C (Protección de vida acuática), y se tomaran las medidas necesarias para mantener como mínimo, el Gasto Ecológico en la corriente.**

En las gráficas 4.7 y 4.8, se muestran las concentraciones de la materia orgánica biodegradable a lo largo del río San Juan, expresada como DBO, y el Oxígeno disuelto, respectivamente, ambos parámetros en mg/L, que se presentarían si todas las descargas de aguas residuales cumplieran con el límite máximo establecido en la NOM-001, es decir, si ninguna de las descargas directas a la corriente tuvieran una concentración de DBO mayor a 30 mg/L, para Protección de vida acuática.

El cumplimiento riguroso del límite máximo y del Gasto Ecológico, son medidas necesarias y suficientes para alcanzar la meta con respecto a la materia orgánica biodegradable en el río San Juan para Protección de vida acuática. Con estas medidas, la mayor concentración de la materia orgánica biodegradable que se alcanza en la corriente es inferior a 25 mg/L, gráfica 4.7.

Sin embargo, estas acciones no son suficientes para alcanzar 4 mg/L de Oxígeno disuelto en toda la corriente, que es la meta de calidad a alcanzar para el año 2006 para Protección de vida acuática. Si bien, se cumple satisfactoriamente desde aguas arriba de Aculco hasta aguas arriba de la descarga de Kimberly Clark, en donde aunque hay materia orgánica biodegradable, principalmente de las descargas de Aculco y del arroyo Nádó, se tiene una rápida oxigenación de la corriente en aproximadamente 18 kilómetros, hasta llegar a la presa San Ildefonso, en donde se abate significativamente este parámetro a 30 mg/L. Después de la presa San Ildefonso y hasta la presa Constitución de 1857 ya no se tienen descargas de aguas residuales, únicamente se incorpora el arroyo Zarco, pero se cuenta con 24 kilómetros de recorrido en donde se tiene una buena recuperación de la calidad de la corriente. Otro factor que ayuda a la rápida oxigenación es una amplia superficie de transferencia de oxígeno desde la atmósfera hacia el agua. En este tramo se tendrían niveles satisfactorios de Oxígeno disuelto, por arriba de 7 mg/L.

A pesar de tomar las medidas para el cumplimiento del límite máximo permisible y del Gasto Ecológico en la corriente, no hay Oxígeno disuelto detectable en el tramo comprendido entre la última descarga de San Juan del Río y el dren La Culebra.

En este tramo, de aproximadamente 8 kilómetros, la concentración de DBO no es superior a 27 mg/L y sin embargo no hay Oxígeno disuelto detectable en la corriente. Esta ausencia de Oxígeno disuelto es consecuencia de numerosas descargas de aguas residuales con elevada carga orgánica, por lo que el poco oxígeno que se transfiere de la atmósfera a la corriente, es consumido inmediatamente en la superficie del agua y antes de que se manifieste una recuperación significativa de la corriente se presentan nuevas descargas.

En este escenario, la concentración de DBO a lo largo de la corriente, representada en la gráfica 4.7, es la siguiente: se inicia en 39 mg/L., aguas arriba de Aculco, donde el gasto es pequeño, de 10 L/s. En este lugar aun no hay descargas de aguas residuales, sin embargo, la presencia de materia orgánica revela que existe ya, desde aquí, contaminación, posiblemente por descargas de algún poblado pequeño, basura y fecalismo al aire libre.

A pesar de las aportaciones de las descargas municipales de Aculco, y otras descargas menores, la concentración de materia orgánica biodegradable continua disminuyendo y llega a 24 mg/L con un gasto de 20 L/s.

Después de la aportación del arroyo Ñadó, 7 km adelante, con un contenido de materia orgánica mayor a la que lleva el río San Juan, se alcanza en la corriente 50 mg/L, y 60 L/s.

A partir de esta confluencia la DBO tiene una tendencia uniforme a disminuir. En el kilómetro 96, el río San Juan recibe la confluencia del arroyo Zarco. En este lugar se tiene una concentración baja de DBO, 5 mg/L, y un gasto de 100 L/s.

Aguas arriba de la descarga de Kimberly Clark, prácticamente se ha consumido toda la materia orgánica biodegradable y el gasto es de 140 L/s. Después de la descarga de Kimberly Clark (170 L/s, aprox.), se alcanza una DBO de 18 mg/L y un flujo de 310 L/s.

5 km después de la descarga de Kimberly Clark, y durante los siguientes 22 kilómetros, la corriente recibe las descargas de las aguas residuales de San Juan del Río I (60 L/s), San Juan del Río II (27 L/s), PITSA (150 L/s), Rastro (15 L/s), QUIMPRO (0.4 L/s), Ponderosa (47.5 L/s), San Juan del Río III (300 L/s), San Pedro Ahuacatlán I (13 L/s), San Pedro Ahuacatlán II (2 L/s), y CERESO (0.3 L/s), dren La Culebra (20 L/s) y San Nicolás (0.9 L/s).

La concentración de DBO alcanza dos máximos en los kilómetros 76 y 70, alcanzando 26 mg/L, en ambos casos, cumpliendo, aun en estos puntos máximos con la meta a alcanzar, de 25 mg/L. Estos máximos son provocados por las principales descargas al río, que son en orden decreciente a su carga orgánica actual: San Juan del Río III (12,070 kg/d), Rastro (2,117 kg/d), San Juan del Río I (1,493 kg/d), Kimberly Clark (881 kg/d), San Juan del Río II (663 kg/d) y PITSA (535 kg/d), todas ellas en este tramo del río, que se localiza entre las presas Constitución de 1857 y Centenario.

Después de la presa Centenario se tienen las descargas de Tequisquiapan I, II y III, y la descarga del Club de Golf. En este tramo, el máximo alcanzado es de 10 mg/L con un gasto de 960 L/s.

Después de la presa Paso de Tablas, la concentración de materia orgánica biodegradable continua disminuyendo, aun con las descargas del géiser y del balneario. Después de esta

aportación, la DBO es apenas de 2.4 mg/L, en el km 19 y llega a 0.5 mg/L y 1.07 m<sup>3</sup>/s, en el kilómetro cero, en la entrada a la presa Zimapán.

Como se muestra en la gráfica 4.8, la meta de Oxígeno disuelto, de 4 mg/L, se cumple satisfactoriamente desde aguas arriba de Aculco hasta la presa Constitución de 1857, y desde la presa Centenario hasta la presa Zimapán, esto, desde luego, asumiendo el cabal cumplimiento del límite máximo, para Protección de vida acuática y conservando en la corriente el Gasto Ecológico.

Entre la presa Constitución y la presa Centenario, no solamente no se cumple con la meta de Oxígeno disuelto, a pesar del cumplimiento del límite máximo y el Gasto Ecológico, sino que aún habría 8 km del río con una ausencia total.

En la gráfica 4.9, se muestra que, en general, se cumple con la meta de 25 mg/L de Sólidos suspendidos con el cumplimiento del límite máximo establecido en la NOM-001, para Protección de vida acuática, de 40 mg/L de Sólidos suspendidos en las descargas de aguas residuales y, adicionalmente, la conservación del Gasto Ecológico en la corriente, que se mantiene por debajo de 35 mg/L de Sólidos suspendidos, aunque se rebasa ligeramente la meta en 10 mg/L, para Protección de vida acuática.

En la gráfica 4.6, se muestra que se alcanza la meta de 1 mL/L de Sólidos sedimentables, si se cumpliera con el límite máximo para Protección de vida acuática, de 1 mL/L de Sólidos sedimentables en las descargas de aguas residuales y, adicionalmente, se respetara el Gasto Ecológico.

#### 4.2 Límites Máximos Permisibles en las descargas de aguas residuales al río San Juan

Con base en los resultados de la simulación, en la tabla 4.1 se resume los límites máximos permisibles de contaminantes presentes en las descargas de aguas residuales al río San Juan.

Tabla 4.1 Límites Máximos Permisibles en las descargas de aguas residuales al río San Juan

Desde Santa María Nativitas hasta la presa Zimapán

Parámetro	Unidades	Uso agrícola		Uso público-urbano		Uso protección de la vida acuática	
		PM	PD	PM	PD	PM	PD
DBO	mg/L	150	200	75	150	30	60
G y A	mg/L	15	25	15	25	15	25
SST	mg/L	150	200	75	125	40	60
SSed	mL/L	1	2	1	2	1	2

Nota: PM = Promedio mensual, PD = Promedio diario

Para alcanzar las metas de calidad propuestas es necesario, además del riguroso cumplimiento de los límites máximos de la tabla anterior, respetar el Gasto Ecológico en todos los casos.

A partir del modelo se detectaron zonas en donde existen importantes fuentes de contaminación diseminada hacia el río, principalmente en el tramo comprendido entre las presas Constitución de 1857 y Paso de Tablas, incluyendo las poblaciones de San Juan del Río, San Pedro Ahuacatlán, San Nicolás y Tequisquiapan

Esta contaminación diseminada cobra especial relevancia si se desea disminuir en la corriente la concentración de DBO a menos de 25 mg/L, por lo que paralelamente a la regulación de las descargas, es necesario establecer medidas para el control de este tipo de contaminación, generada principalmente por el crecimiento desordenado de las ciudades.

Para alcanzar, en el largo plazo, una concentración adecuada de oxígeno disuelto en el agua, conveniente para la vida acuática, es necesario el control de la contaminación dispersa.

El modelo de calidad del agua no está diseñado para modelar parámetros que en este caso tienen importancia relevante, como es el caso de químicos tóxicos, cianuros, y huevos de helminto.

Para estos parámetros se propone que se realice un programa complementario de aforo, muestreos y análisis de la calidad del agua del río y de las descargas con el propósito de identificar compuestos tóxicos, y para contar con mayores elementos para establecer los límites máximos permisibles de estos contaminantes.

## Conclusiones y Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, tomando como estudio de caso, el río San Juan, se concluye que queda comprobada la hipótesis originalmente planteada, ya que la simulación de la calidad del agua resultó adecuada para verificar que los valores establecidos en la NOM-001, como límites máximos de concentración de contaminantes básicos admisibles en descargas de aguas residuales, permiten alcanzar las metas de calidad de esta corriente receptora.

Para otras corrientes receptoras, estudios similares pueden concluir que la norma resulta insuficiente, por lo que se deberán establecer límites más estrictos a través de la simulación de escenarios adicionales.

La investigación está sustentada en el monitoreo de la calidad del agua del cuerpo receptor y de las descargas de aguas residuales, la determinación de los parámetros en campo y en laboratorio, la representación gráfica de las condiciones actuales de calidad de la corriente y las descargas, la representación conceptual del sistema a modelar, la calibración del modelo de calidad del agua, el planteamiento de escenarios para la regulación de las descargas, las corridas de simulación para cada escenario planteado, y el análisis de los resultados obtenidos, lo que en su conjunto conforman la metodología para evaluar los valores máximos de concentración de contaminantes en aguas residuales, contenidos en las descargas a corrientes superficiales, para alcanzar las metas de calidad del agua del cuerpo receptor, a través de la aplicación de un modelo de calidad del agua.

Para obtener un modelo capaz de reproducir las condiciones presentes en una corriente de agua es necesario contar con datos confiables para su calibración. Estos datos son los parámetros de calidad del agua medidos en las campañas de monitoreo, tanto de la corriente como de las descargas de aguas residuales. Por ello, es muy importante la supervisión estrecha del cumplimiento de los protocolos de muestreo, aforo, determinación de parámetros en campo, manejo y preservación de muestras y determinación de parámetros de laboratorio. Esto conlleva a disponer de una base de datos confiable y por lo mismo, congruente con los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el sistema, evitando discrepancias abruptas en las tendencias de los datos medidos, y facilitando el proceso de calibración.

En cuanto a la situación de la calidad del agua del río San Juan y la determinación de sus principales fuentes de contaminación, se concluye que las descargas de aguas residuales al río han afectado la calidad de sus aguas. El tramo más impactado es de la presa Constitución de 1857 a la presa Centenario, en donde se encuentran concentradas la mayor parte de las descargas, incluyendo las de las poblaciones de San Juan del Río, San Pedro Ahuacatlán y San Nicolás, así como las descargas de Kimberly Clark, PITSA, Rastro, QUIMPRO, Cartones Ponderosa, y el Dren La Culebra.

La mayor aportación de materia orgánica biodegradable, medida como DBO, es la de San Juan del Río, que descarga un total de 14,234 kg/d. Le siguen, en orden decreciente, el Rastro, 2,117 kg/d, Kimberly Clark, 881 kg/d, PITSA, 535 kg/d, y las descargas municipales de Tequisquiapan, 540 kg/d, y Ahuacatlán, con 284 kg/d

En relación con las aportaciones de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, medidas como DQO, en orden decreciente, las descargas más importantes son: San Juan del Río, 33,600 kg/d, Rastro, 11,681 kg/d, Kimberly Clark, 3,783 kg/d, Tequisquiapan, 1,099 kg/d, Ahuacatlán, 635 kg/d, y Club de Golf, 232 kg/d

En cuanto a la contaminación bacteriológica, medida a través de los coliformes fecales, los principales aportadores son: San Juan del Río,  $1.79 \times 10^{10}$ , Rastro,  $6.48 \times 10^8$ , Tequisquiapan,  $1.94 \times 10^9$ , dren La Culebra,  $4.15 \times 10^7$ , San Nicolás,  $1.59 \times 10^7$ , Aculco,  $1.8 \times 10^7$ , QUIMPRO,  $1.73 \times 10^6$ , CERESO,  $1.04 \times 10^6$ , PITSA,  $5.17 \times 10^5$ , y Balneario y Geiser,  $2.7 \times 10^5$ , NMP/d

Las descargas con mayores aportaciones de nitrógeno total, en el orden acostumbrado, son: San Juan del Río, 1,074 kg/d, Rastro, 431.19 kg/d, Tequisquiapan, 34.28 kg/d, Ahuacatlán, 32.35 kg/d, y Ponderosa, 18.67 kg/d

La contaminación provocada por los detergentes presentes en las descargas se cuantificó como sigue: San Juan del Río, 133.47 kg/d, Club de Golf, 6.88 kg/d, Ahuacatlán, 5.58 kg/d, Balneario y Geiser, 3.39 kg/d y Kimberly Clark, con 2.5 kg/d

En lo propio para sólidos suspendidos totales, las principales descargas que lo aportan son: San Juan del Río, 10,068 kg/d; Rastro, 2,558 kg/d; Tequisquiapan, 758 kg/d; Kimberly Clark, con 671 kg/d; PITSA, 557 kg/d, dren La Culebra, 293 kg/d, y Ahuacatlán, con 243 kg/d

Resalta la alta conductividad de la descarga de Kimberly Clark, 1,783  $\mu\text{mhos/cm}$ , y en general las descargas en las que se determinó este parámetro tienen conductividades elevadas, en el orden de 800  $\mu\text{mhos/cm}$

En condiciones actuales, se determinó que en algunos tramos, el río está tan contaminado que ya no tiene capacidad de asimilación y dilución de más contaminantes. Tal es el caso del tramo comprendido entre Santa María Nativitas y la presa Cofradía, así como el tramo comprendido entre la presa Constitución de 1857 y la presa Centenario, para uso en Riego Agrícola.

Para Uso Público Urbano, los tramos que actualmente ya no cuentan con capacidad de asimilación y dilución de más contaminantes son de Santa María Nativitas al arroyo Zarco, así como de la presa Constitución de 1857 a la presa Paso de Tablas

Con relación al uso de la corriente para la Protección de Vida Acuática, el extenso tramo sin capacidad de asimilación y dilución de contaminantes es de Santa María Nativitas hasta el Geíser y Balneario, en Hidalgo

Para alcanzar las metas propuestas, que son agua apta para uso en Riego Agrícola, en el plazo inmediato; agua apta para Uso Público Urbano, en el corto plazo, año 2003; y agua apta para la Protección de Vida Acuática, en el mediano plazo, año 2006; es necesario, además del cumplimiento estricto de los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, respetar el Gasto Ecológico en todos los casos

A partir de los resultados simulados, se detectaron zonas en donde existen importantes fuentes de contaminación diseminada, generada por el crecimiento desordenado de las ciudades y por la actividad primaria formal y no formal, que aportan una carga orgánica significativa, y que será necesario eliminar, para alcanzar concentraciones de DBO inferiores a 25 mg/L, que es la meta de uso de la corriente, para la Protección de Vida Acuática, en el mediano plazo.

Los parámetros que no se monitorearon, como son cianuros, metales pesados, huevos de helminto, pH, material flotante, temperatura, y coliformes fecales, se proponen que se cumpla con lo establecido en la NOM-001-ECOL-1996, de acuerdo a las metas de uso del cuerpo de agua, respetando los plazos de cumplimiento

Con relación a nitrógeno y fósforo, se propone un límite máximo permisible de 1.5 mg/L, valor inferior al establecido en la NOM-001, que se puede obtener de un tratamiento secundario por lagunas de estabilización, con lo que se disminuirá de manera importante el riesgo de proliferación de malezas acuáticas

Adicionalmente, es necesario normar los detergentes, medidos como sustancias activas al azul de metileno, así como los sólidos disueltos totales, que limitan el uso del agua, principalmente para la vida acuática y la agricultura, respectivamente.

Como resultado de la simulación, se determinó en este estudio, que es necesario, para alcanzar las metas de calidad del agua en el río, que todas las descargas de aguas residuales cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-001, por lo que todas las poblaciones y las industrias deberán tratar la totalidad de sus aguas residuales.

Es necesario que se promueva el uso eficiente del agua en las zonas de riego, así como el uso controlado de agroquímicos, con lo que se disminuirá la contaminación provocada por esta actividad

Para que las descargas de aguas residuales municipales cumplan con la NOM-001, es necesario que paralelamente, las empresas que descargan al alcantarillado, cumplan con

los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM 002-ECOL-1997

El problema del río San Juan no es solamente de calidad el agua, sino también de cantidad, por lo que es también importante que se promueva el uso eficiente del agua en las ciudades y en la industria. Para disminuir el consumo del agua deberá tomarse en cuenta su reuso, lo que adicionalmente se traduce en menores costos del tratamiento

Es conveniente continuar con estudios complementarios indicativos de la evolución de la calidad del agua y de la presencia de químicos tóxicos.

Se debe establecer medidas de vigilancia del cumplimiento de los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en las normas oficiales mexicanas NOM-001 y NOM-002, para los contaminantes presentes en las descargas directas a los cuerpos de agua y para las descargas al alcantarillado, respectivamente, para alcanzar las metas de calidad del agua para el Río San Juan.



## Bibliografía

1. American Public Health Association, Inc., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1985
2. Browie, G. L., Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, Environmental Protection Agency, Athens GA, 1985.
3. Brown, L:C., Barnwell, I. O. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E UNCAS: Documentation and User Manual. EPA-600/3-87/007. U.S. Environmental Protection Agency, 1987. Athens, Georgia.
4. Butts, t A., y Evans, R. L., "Small Stream Chanel Dam Aeration Characteristics", Journal Environmental Engineering Division, ASCE, Vol 109, No. 3, 1983.
5. Comisión Nacional del Agua, Conferencia: "Agua Limpia en México" Memorias del VIII Congreso Internacional de la Industria del Medio Ambiente 2000, CONIECO.
6. Comisión Nacional del Agua "Declaratoria de Clasificación del Río Lerma", Diario Oficial de la Federación el 1 de abril de 1996.
7. Comisión Nacional del Agua. El Agua en México, Retos y Avances, México. 2000
8. Comisión Nacional del Agua. Estudio de Clasificación del Río Culiacán en el Estado de Sinaloa, 1996.
9. Comisión Nacional del Agua. Informe de Calidad del Agua 1974 - 1995
10. Comisión Nacional del Agua. Ley de Aguas Nacionales. 1992.
11. Comisión Nacional del Agua. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, Enero 2001.
12. Comisión Nacional del Agua. Programa Hidráulico 1995 – 2000.
13. Comisión Nacional del Agua. Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, 1994.
14. Comisión Nacional del Agua. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento a Diciembre de 1999. Décima edición.
15. Consejo Nacional de Industriales Ecologistas. Conferencias. 2000 Memorias del Octavo Congreso Internacional de CONIECO.
16. Chen, C. W., y Orlob, G. I., Final Report, Ecologic Simulation of Aquatic Environments, Water Resources Engineers, Inc. , U. S. Departament of the Interior, Washington DC, 1972

17. Churchil, M.A., Elmore, H.L., y Buckingham, R.A., "The Prediction of Stream Reaeration Rates", International Journal of Air and Water Pollution, Vol. 6, 1962
18. Droste, R.L. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment, (John Wiley & Sons, 1997)
19. Elder J. M., "The Dispersion of a Marked Fluid in Turbulent Shear Flow", Jour. Fluid Mech., Vol. 5, Parte 4, 1959
20. Environmental Protection Agency. QUAL2E Windows Interface User's Guide, EPA/823/B/95/003. U.S., 1995. Athens, Georgia.
21. Fisher, H. B., "Time of Travel of Soluble Contaminants in Streams", Proc. Sanitary Eng. Div., ASCE, v. 6, 1964.
22. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua Subdirección General Técnica. "Plano de Calidad del Agua Superficial a Nivel Nacional, en 2000", CNA.
23. Henderson, F. M., Open Channel Flow, Mcmillan Co. N. Y., 1966.
24. Instituto Nacional de Estadística. Geografía e Informática, Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa. Edición 1994.
25. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1997-1998, Estadísticas del Medio Ambiente, México. 1999.
26. Interhemispheric Resource Center. "Una Presa Financiada Por El BID Suscita Una Disputa Sobre Derechos Acuíferos" BorderLines 22 (Volumen 4, Número 3, Marzo 1996, Albuquerque, NM, USA).
27. Jiménez, B. y Ramos, J., Estudio de Disponibilidad de Agua en México en Función del Uso, Calidad y Cantidad, Vol. 1 y 2. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua, proyecto 3320 Instituto de Ingeniería, UNAM, 1995.
28. Kramer, R. H., A Search of the Literature for Data Pertaining to Bioenergetics and Population Dynamics of Freshwater Fishes, Desert Biome Aquatic Program, Utha State University, 1970.
29. Metcalf & Eddy, Ingeniería Sanitaria, Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales, Editorial Labor. 3a edición, Madrid, España.
30. National Council for Air and Stream Improvement, Inc QUAL2E User Manual, NCASI Technical Bulletin No. 457, 1985.
31. Organización Mundial de la Salud. Guías para la Calidad del Agua Potable, Segunda Edición. Vol. 1. Recomendaciones, OMS, Ginebra, Suiza, 1995.

32. Organización Mundial de la Salud. Guías para la Calidad del Agua Potable, Segunda Edición. Vol. 3. Vigilancia y Control de los Abastecimientos de Agua a la Comunidad, OMS, Ginebra, Suiza, 1998.
33. Scavia, D., y Park, R. A., "Documentation of Selected Constructs and Parameter Values in the Aquatic Model CLEANER", Ecological Modeling, Vol. 2, 1976.
34. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, CE-CCA-001/89. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989.
35. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua. Programa Nacional Hidráulico 2001 – 2006.
36. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Delitos Ambientales, México, 1997.
37. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Norma Oficial Mexicana, NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
38. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio 1998.
39. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público Publicada en el D.O.F. de fecha 21 de septiembre de 1998.
40. Secretaría de Salud. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, publicada en el DOF, el 22 de noviembre de 2000.
41. Taylor, G. I., "The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe" Proceedings, Royal Society of London, Vol. 234A, No. 1199, 1954.
42. Tsivoglou, E. C., y Wallace, J.R., Characterization of Stream Reaeration Capacity, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1972.
43. Water Quality Analysis Simulation Program, U.S. EPA, [http:// www.scisoftware.com/products/wasp\\_overview/wasp\\_overview.html](http://www.scisoftware.com/products/wasp_overview/wasp_overview.html), 2002.

# Índice de figuras, gráficas y tablas

<b>Figuras</b>		<b>Pág.</b>
Figura 1.1	Calidad del agua superficial en el ámbito nacional, en 2000	5
Figura 2.1	Esquema simplificado del sistema hidrológico y de la interpretación de resultados de la simulación	26
Figura 2.2	Relaciones funcionales entre el programa principal y las subrutinas	30
Figura 2.3	Sistema diferencial de la corriente	31
Figura 2.4	División de la corriente en elementos computacionales y tramos	33
Figura 2.5	Principales interrelaciones de los contaminantes	41
Figura 2.6	Efecto de la luz en el crecimiento de algas	47
Figura 2.7	Términos de transferencia de calor asociada con la transferencia de calor interfacial	70
Figura 3.1	Representación en tramos y elementos diferenciales del río San Juan	95
 <b>Gráficas</b>		
Gráfica 1.1	Disponibilidad promedio de agua por habitante, en las Regiones Hidrológicas de México	2
Gráfica 3.1	Oxígeno disuelto medido en el río San Juan	97
Gráfica 3.2	Demanda bioquímica de oxígeno medida en el río San Juan	98
Gráfica 3.3	Demanda bioquímica de oxígeno medida en las descargas al río San Juan	99
Gráfica 3.4	Carga de Demanda bioquímica de oxígeno medida en las descargas al río San Juan	100
Gráfica 3.5	Demanda bioquímica de oxígeno medida en los tramos en que se dividió el río San Juan, para su estudio.	111
Gráfica 4.1	DBO que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 150 mg/L, y Gasto Ecológico Meta: Riego agrícola para el plazo inmediato	117

Gráfica 4.2	Grasas y aceites que se alcanzarían en el río San Juan si las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, G y A = 15 mg/L y Gasto Ecológico Meta: RA, UPU y PVA para plazo inmediato. 2003 y 2006, respectivamente	118
Gráfica 4.3	DBO Que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 75 mg/L, y Gasto Ecológico Meta: Uso público urbano para el año 2003	119
Gráfica 4.4	Oxígeno disuelto que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 75 mg/L y Gasto Ecológico Meta: Uso público urbano para el año 2003	120
Gráfica 4.5	Sólidos suspendidos que se alcanzarían en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, SS= 75 mg/L y Gasto Ecológico. Meta: Uso público urbano para el año 2003	121
Gráfica 4.6	Sólidos sedimentables que se alcanzarían en el río San Juan si todas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, S.SED = 1 mL/L y Gasto Ecológico. Meta: RA, UPU y PVA para plazo inmediato, 2003 y 2006, respectivamente	122
Gráfica 4.7	DBO que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 30 mg/L, y Gasto Ecológico. Meta: Protección de vida acuática para el año 2006	123
Gráfica 4.8	Oxígeno disuelto que se alcanzaría en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, DBO = 30 mg/L, y Gasto Ecológico. Meta: Protección de vida acuática para el año 2006	124
Gráfica 4.9	Sólidos suspendidos que se alcanzarían en el río San Juan si todas las descargas cumplieran con el Límite Máximo establecido en la NOM-001, SS= 40 mg/L, y Gasto Ecológico. Meta: Protección de vida acuática para el año 2006	125

**Tablas**

Tabla 1.1	Extracciones brutas de agua para los principales usos consuntivos	3
Tabla 1.2	Parámetros más frecuentemente determinados en las muestras de agua	8
Tabla 1.3	Criterios ecológicos de calidad el agua	17

Tabla 1.4	Límites Máximos Permisibles para descargas a ríos (NOM-001-ECOL-1996)	21
Tabla 2.1	Valores del coeficiente de rugosidad de Manning	38
Tabla 2.2	Valores $\phi$ para la corrección de coeficientes de velocidad por efecto de la temperatura	65
Tabla 2.3	Rangos típicos para los coeficientes de reacción.	66
Tabla 2.4	Definición de los términos de transferencia de calor ilustrados en la figura 3.6	70
Tabla 3.1	Infraestructura hidráulica de almacenamiento en la cuenca del río San Juan	85
Tabla 3.2	Estaciones de monitoreo y aforo localizadas sobre el río San Juan	87
Tabla 3.3	Estaciones de monitoreo y aforo localizadas sobre las descargas y afluentes del río San Juan	88
Tabla 3.4	Resultados promedio de las estaciones localizadas sobre la corriente del río San Juan	90
Tabla 3.5	Resultados promedio de las estaciones localizadas sobre las descargas de aguas residuales y afluentes del río San Juan	92
Tabla 3.6	Capacidad de asimilación del río San Juan, de acuerdo al uso	112
Tabla 3.7	Capacidad de dilución del río San Juan, de acuerdo al uso	113
Tabla 3.8	Descripción de los escenarios simulados	115
Tabla 4.1	Límites Máximos Permisibles en las descargas de aguas residuales al río San Juan	134

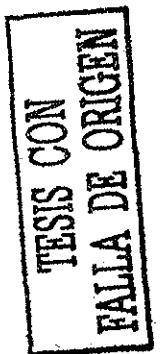
**Anexos**

Gráfica A1.1	Coliformes fecales medidos en el río San Juan	154
Gráfica A1.2	Grasas y aceites medidos en el río San Juan	155
Gráfica A1.3	Sólidos suspendidos totales medidos en el río San Juan	156
Gráfica A1.4	Sólidos disueltos totales medidos en el río San Juan	157
Gráfica A1.5	Sólidos sedimentables medidos en el río San Juan	158
Gráfica A1.6	Sólidos totales medidos en el río San Juan	159
Gráfica A1.7	Conductividad medida en el río San Juan	160
Gráfica A1.8	Demanda química de oxígeno medida en las descargas al río San Juan	161
Gráfica A2.1	Coliformes fecales medidos en las descargas al río San Juan	163
Gráfica A2.2	Nitrógeno total medido en las descargas al río San Juan	164

Gráfica A2.3	Nitrógeno amoniacal medido en las descargas al río San Juan	165
Gráfica A2.4	Sustancias activas al azul de metileno medidas en las descargas al río San Juan	166
Gráfica A2.5	Sólidos suspendidos medidos en las descargas al río San Juan	167
Gráfica A2.6	Sólidos sedimentables medidos en las descargas al río San Juan	168
Gráfica A2.7	Conductividad medida en las descargas al río San Juan	169
Gráfica A3.1	Carga de Demanda química de oxígeno medida en las descargas al río San Juan	171
Gráfica A3.2	Carga de Coliformes fecales medidos en las descargas al río San Juan	172
Gráfica A3.3	Carga de Nitrógeno total medido en las descargas al río San Juan	173
Gráfica A3.4	Carga de Sustancias activas al azul de metileno medido en las descargas al río San Juan	174
Gráfica A3.5	Carga de Sólidos suspendidos totales medidos en las descargas al río San Juan	175
Gráfica A3.6	Gasto medido en las descargas al río San Juan	176
Gráfica A4.1	Calibración de gasto en el río San Juan	178
Gráfica A4.2	Calibración de la Demanda bioquímica de oxígeno	179
Gráfica A4.3	Calibración de la Demanda química de oxígeno	180
Gráfica A4.4	Calibración del Oxígeno disuelto	181
Gráfica A4.5	Calibración de Sólidos suspendidos totales	182
Gráfica A4.6	Calibración de Sólidos sedimentables	183
Gráfica A4.7	Calibración de Grasas y aceites	184

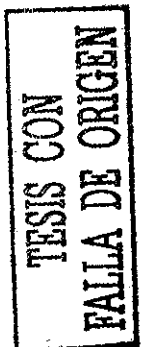
## Nomenclatura general

$A$	=	Concentración de biomasa de algas, mg-A/l.
$a$	=	Coefficiente de flujo para $K_2$ en la ec. 2.71
$\alpha$	=	Constante empírica en la ec. 2.10
$a$	=	Constante en la ec. 2.95
$a$	=	Constante empírica en la ec. 2.8
$a$	=	Factor empírico de la calidad del agua, en la ec. 2.79
$\alpha_0$	=	Factor de conversión, $\mu\text{g-Chl } a / \text{mg} - A$ .
$\alpha_1$	=	Contenido de nitrógeno en algas, mg-N/mg-A
$\alpha_2$	=	Contenido de fósforo en algas, mg P/mg-A
$\alpha_2$	=	Constantes definidas en el rango de 35 a 135 °F, en la ec. 2.93
$\alpha_3$	=	Producción de oxígeno en el proceso de fotosíntesis en algas, mg-O/mg-A
$\alpha_4$	=	Consumo de oxígeno en el proceso de respiración de algas, mg-O/mg-A
$\alpha_5$	=	Consumo de oxígeno en el proceso de oxidación de nitrógeno amoniacal, mg-O/mg-N
$\alpha_6$	=	Consumo de oxígeno en el proceso de oxidación de nitritos, mg-O/mg-N.
$ACT$	=	Factor para proporcionar similitud entre los cálculos usando un valor promedio simple de la radiación solar y los cálculos usando los promedios de los valores de cada hora de $TL$ .
$a_t$	=	Término de transmisión atmosférica
$A_s$	=	Área de sección transversal ( $L^2$ ).
$A_x$	=	Área de sección transversal del canal, $ft^2$
$\beta$	=	Constante empírica, en la ec. 2.10.
$b$	=	Constante en la ec. 2.95.
$b$	=	Constante empírica en la ec. 2.8
$b$	=	Exponente del flujo para $K_2$ , ec. 2.71.
$b$	=	Coefficiente empírico de aeración en embalses, ec. 2.79
$\beta_1$	=	Coefficiente de velocidad para la oxidación biológica de nitrógeno amoniacal en función de la temperatura, $d^{-1}$
$\beta_2$	=	Constantes definidas en el rango de 35 a 135 °F, ec. 2.93
$\beta_2$	=	Coefficiente de velocidad para la oxidación de nitritos, en función de la temperatura, $d^{-1}$
$\beta_3$	=	Coefficiente de velocidad para la hidrólisis de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal, en función de la temperatura, $d^{-1}$ .
$\beta_4$	=	Coefficiente de velocidad de consumo de fósforo orgánico, en función de la temperatura, $d^{-1}$
$C$	=	Concentración ( $ML^{-3}$ )
$C$	=	Coefficiente de Chezy
$c$	=	Coefficiente de escape, $ft^{-1}$
$c$	=	Capacidad calorífica del agua ( $HM^{-1}D^{-1}$ )
$C_a$	=	Concentración del contaminante en la corriente principal, inmediatamente antes del afluente o descarga, mg/L.
$C_H$	=	0.01 en la ec. 2.100
$C_d$	=	Concentración del contaminante del afluente o descarga, mg/L.
$C_f$	=	Nubosidad, expresada como una fracción de cobertura del cielo
$C_1$	=	Concentración máxima permisible del contaminante en la corriente de acuerdo al uso (CE-CCA o valor normativo)
$C_m$	=	Concentración máxima del contaminante en la corriente
$CORDO$	=	Factor de corrección de la velocidad de nitrificación
$Chl a$	=	Concentración de clorofila $a$ , $\mu\text{g-Chl } a / l$ .
$d$	=	Profundidad media de la corriente, ft.
$D$	=	Grados.
$D$	=	Dilución de los contaminantes de un afluente o descarga, en la corriente principal, mg/l.
$d$	=	diám -75 tamaño en pies; = diámetro para el cual, el 75% de las partículas son menores a él.
$D_o$	=	Déficit de oxígeno antes del embalse, mg/L.

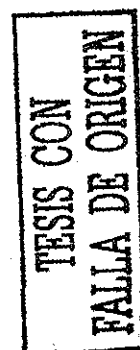




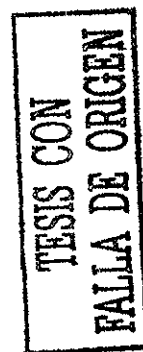
$D_h$	=	Déficit de oxígeno después del embalse, mg/L.
$DBO_5$	=	DBO de 5 días, mg/L.
$DBO_t$	=	DBO última, mg/L.
$\Delta h$	=	Cambio en la elevación de la superficie del agua en el tramo, ft.
$D_L$	=	Coefficiente de dispersión ( $L^2 T^{-1}$ )
$D_L$	=	Coefficiente de dispersión longitudinal, ft <sup>2</sup> /s.
$D_m$	=	Coefficiente de difusión molecular ( $ft^2/d$ ), dado por la ec 2 65
$DO$	=	concentración de oxígeno disuelto, mg/L.
$DO_{min}$	=	Concentración mínima de oxígeno disuelto (nivel crítico) en la curva de consumo de oxígeno, mg/L.
$DO_R$	=	Concentración de oxígeno disuelto requerido para mantener las condiciones objetivo, mg/L.
$DO_T$	=	Nivel objetivo de oxígeno disuelto, mg/L.
$\Delta x$	=	Longitud del tramo, ft.
$E_c$	=	Concentración de coliformes, colonias/100 ml
$E$	=	Velocidad de evaporación, ft/h
$e_a$	=	Presión de vapor del agua, en pulg. de Hg, a una altura de 6 pies por arriba de la superficie del agua, dada por la ec 2 97
$e_s$	=	Presión de vapor de saturación del aire, en pulg. de Hg, a la temperatura de la superficie del agua, dada por la ec 2 96
$e_{vb}$	=	Presión de vapor de saturación, en pulg. de Hg, a la temperatura de bulbo húmedo obtenida de la ec 2 98.
$f$	=	F racción de las horas luminosas del día
$F$	=	Número de froude, definido por la ec 2 68
$\phi$	=	Constante empírica para cada coeficiente de reacción.
$F_N$	=	F racción de nitrógeno de algas que se capta de la fuente de amonio.
$FL$	=	Factor de restricción de crecimiento de algas por efecto de luz
$FL_t$	=	Factor de restricción de crecimiento por luz, con base en la intensidad de la luz promedio durante el día iluminado( $I_{alg}$ )
$FL_z$	=	Promedio de N valores de $FL$ de cada hora, con base en los valores de cada hora de la intensidad de luz ( $I_{alg,t}$ )
$FL_z$	=	Factor de atenuación de crecimiento de algas por efecto de la luz a intensidad $I_z$
$FN$	=	Factor de restricción de crecimiento de algas por efecto de nitrógeno
$FP$	=	Factor de restricción de crecimiento de algas por efecto de fósforo
$g$	=	Aceleración de la gravedad, ft/s <sup>2</sup>
$\gamma$	=	Peso específico del agua, lb/ft <sup>3</sup>
$H$	=	Altura de la caída del agua, ft.
$H$	=	Flujo de energía calorífica
$H_{an}$	=	Flujo neto de radiación atmosférica de onda larga pasando a través de la interfase, después de reflexión, Btu/ft <sup>2</sup> /d.
$H_h$	=	Contra-radiación de onda larga, desde la superficie del agua, Btu/ft <sup>2</sup> -d
$H_c$	=	Flujo de energía conductiva entre la interfase y la atmósfera, Btu/ft <sup>2</sup> /d
$H_e$	=	Pérdidas de calor por evaporación, excluyendo pérdidas de calor sensible, Btu/ft <sup>2</sup> -d.
$H_l$	=	Calor latente de evaporación Btu/lb, dado por: $H_l = 1084 - 0.5 T_s$
$H_n$	=	Flujo de calor neto pasando a través de la superficie aire agua, Btu/ft <sup>2</sup> -d
$H_N$	=	Flujo neto de energía, pasando a través de la interfase aire-agua, Btu/ft <sup>2</sup> /d
$H_s$	=	Cantidad de radiación que llega a la corriente, Btu/ft <sup>2</sup> -h.
$H_{sn}$	=	Flujo neto de radiación solar de onda corta, pasando a través de la interfase, después de pérdidas por absorción y dispersión en la atmósfera, así como por reflexión en la interfase, Btu/ft <sup>2</sup> /d
$H_v$	=	Pérdida de calor sensible, Btu/ft <sup>2</sup> -h
$I$	=	Intensidad de la luz en la superficie, Btu/ft <sup>2</sup> -h
$I_{alg}$	=	Intensidad promedio de luz fotosintéticamente activa, Btu/ft <sup>2</sup> -h
$I_{alg,t}$	=	Valores de cada hora de la intensidad de luz, fotosintéticamente activa, Btu/ft <sup>2</sup> -h



$I_{i,mp}$	=	Intensidad de luz promedio durante el día iluminado, calculada a la temperatura del balance de calor. Btu/ft <sup>2</sup> -h
$I_{i,mp,t}$	=	Valores de cada hora de la intensidad de luz calculada a la temperatura del balance de energía en estado estacionario. Btu/ft <sup>2</sup> -h
$I_{tot}$	=	Radiación solar fotosintéticamente activa diaria total. Btu/ft <sup>2</sup>
$I_z$	=	Intensidad de la luz a profundidad (z). Btu/ft <sup>2</sup> -h
K	=	5.93 en la ec. 2.14
K	=	Constante de dispersión (adimensional)
$K_1$	=	Coefficiente de velocidad de desoxigenación de DBO, en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$K_2$	=	Coefficiente de velocidad de reaeración, análoga a la difusión de Fick, en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$K_3$	=	Coefficiente de velocidad de pérdida de DBO debido a sedimentación, en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$K_4$	=	Coefficiente de velocidad de demanda de oxígeno de sedimentos, en función de la temperatura. mg/ft <sup>2</sup> -d
$K_5$	=	Coefficiente de velocidad de decaimiento de coliformes, en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$K_6$	=	Coefficiente de velocidad de consumo del componente, en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$K_{DBO}$	=	Coefficiente de velocidad de conversión de DBO. d <sup>-1</sup>
$K_L$	=	Coefficiente de saturación por la luz. Btu/ft <sup>2</sup> -h
$K_{LE}$	=	Intensidad de saturación de luz en la cual la velocidad de crecimiento de algas es máxima. Btu/ft <sup>2</sup> -h
$K_{LM}$	=	Intensidad de saturación media, por efecto de la luz. Btu/ft <sup>2</sup> -h
$K_{LS}$	=	Intensidad de la luz en la cual la velocidad de crecimiento es 71% de la velocidad de crecimiento máxima, en la ec. 2.27
$K_N$	=	Constante de saturación media de Michaelis-Menton por efecto de nitrógeno. mg-N/L
$K_{NITRF}$	=	Coefficiente de inhibición de nitrificación de primer orden. mg/L <sup>-1</sup>
$K_P$	=	Constante de saturación media de Michaelis-Menton por efecto de fósforo. mg-P/L
$\lambda$	=	Coefficiente de extinción de la luz. ft <sup>-1</sup>
$I$	=	Concentración de DBO última. mg/L
$\lambda_0$	=	Porción del coeficiente de extinción de luz que no se debe al efecto del aumento de algas. ft <sup>-1</sup>
$\lambda_l$	=	Coefficiente lineal para considerar la disminución de la iluminación por la densidad de algas. ft <sup>-1</sup> ( $\mu\text{g-Chla/L}$ ) <sup>-1</sup>
$\lambda_2$	=	Coefficiente no lineal para considerar la disminución de la iluminación por la densidad de algas. ft <sup>-1</sup> ( $\mu\text{g-Chla/L}$ ) <sup>-2,3</sup>
M	=	Masa (M)
$\mu$	=	Velocidad específica de crecimiento de algas, dependiente de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$\mu_{max}$	=	Máxima velocidad específica de crecimiento de algas. d <sup>-1</sup>
n	=	Coefficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
N	=	Número de horas luminosas del día, h
n	=	Capacidad de asimilación de la corriente. mg/L
$N_1$	=	Concentración de nitrógeno amoniacal. mg-N/L
$N_2$	=	Concentración de nitritos. mg-N/L
$N_3$	=	Concentración de nitratos. mg-N/L
$N_4$	=	Concentración de nitrógeno orgánico. mg-N/L
$N_e$	=	Concentración efectiva de nitrógeno inorgánico disponible. mg-N/L
O	=	Concentración de oxígeno disuelto. mg/L
O*	=	Concentración de saturación de oxígeno disuelto. mg/L
Op	=	Concentración de equilibrio de oxígeno a presión no estándar. mg/L
P	=	Presión atmosférica. atm
$P_1$	=	Concentración de fósforo orgánico. mg-P/L
$P_2$	=	Concentración local de fósforo disuelto. mg-P/L
$P_a$	=	Presión barométrica local. pulg. de Hg
$P_N$	=	Factor de selectividad para nitrógeno amoniacal (0 a 1.0)
$P_{uv}$	=	Presión parcial de vapor de agua (atm)



$Q$	= Flujo. ft <sup>3</sup> /s
$Q_a$	= Flujo de la corriente principal inmediatamente antes de la entrada del afluente o descarga. L/s
$Q_c$	= Flujo en el punto crítico en la curva de consumo de oxígeno. ft <sup>3</sup> /s
$Q_d$	= Flujo del afluente del río o descarga. L/s
$Q_{ECO}$	= Gasto de conservación ecológica. m <sup>3</sup> /s. en el mes i
$Q_{PROM}$	= Gasto promedio del mes i. m <sup>3</sup> /s
$Q_R$	= Aumento de flujo requerido. ft <sup>3</sup> /s
$\rho$	= Densidad del fluido. lb-s <sup>2</sup> /ft <sup>4</sup>
$R$	= Radio hidráulico.
$R$	= Concentración del componente no conservativo. mg-ANC/L.
$\rho$	= Densidad del agua (ML <sup>-3</sup> ).
$\rho$	= Coeficiente de velocidad de respiración de algas. en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$R_L$	= Reflexividad de la superficie del agua por radiación atmosférica = 0.03
$R_s$	= Coeficiente de reflexión
$R_x$	= Radio hidráulico efectivo medio. ft
$s$	= Fuentes externas o sumideros (MT <sup>-1</sup> )
$\sigma$	= Constante de Stefan - Boltzman. 1.73 x 10 <sup>-9</sup> Btu/ft <sup>2</sup> /h/°R <sup>4</sup> .
$S_a$	= Pendiente del lecho de la corriente. ft/ft.
$\sigma_1$	= Coeficiente de velocidad de sedimentación de algas. dependiente de la temperatura. ft/d
$\sigma_2$	= Coeficiente de velocidad de captación de fósforo disuelto de la fuente béntica. en función de la temperatura. mg-P/ft <sup>2</sup> -d
$\sigma_3$	= Coeficiente de velocidad de captación de nitrógeno amoniacal de la fuente béntica. mg-N/ft <sup>2</sup> -d
$\sigma_4$	= Coeficiente de velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico. en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$\sigma_5$	= Coeficiente de velocidad de sedimentación de fósforo orgánico. en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$\sigma_6$	= Coeficiente de velocidad de sedimentación del componente. en función de la temperatura. d <sup>-1</sup>
$\sigma$	= Coeficiente de velocidad de captación del componente no conservativo de la fuente béntica. en función de la temp., mg-ANC/ft <sup>2</sup> -d
$S$	= Pendiente de la línea del gradiente de energía (adimensional)
$t$	= Tiempo (T)
$t$	= Tiempo. d
$T$	= Temperatura. (°K)
$T$	= Temperatura del agua.
$t^\circ$	= Temperatura. °C
$\tau_0$	= Esfuerzo cortante en la frontera. lb/ft <sup>2</sup>
$T_a$	= Temperatura del aire a 6 pies por arriba de la superficie del agua. °F
$T_s$	= Temperatura de bulbo seco. °F
$t_f$	= Tiempo de flujo dentro del tramo. d
$t_f$	= Tiempo de paso a través de un tramo. ec. 2.74
$TFACT$	= Fracción de radiación solar que es activa fotosintéticamente. calculada a la temperatura del balance de calor
$T_0$	= Temperatura base. arbitraria
$T_s$	= Temperatura de la superficie del agua. °F
$T_{wet}$	= Temperatura de bulbo húmedo. °F
$u^*$	= Velocidad cortante. ft/s. en la ec. 2.69
$\bar{u}$	= Velocidad media (LT <sup>-1</sup> ). ft/s
$V$	= $A_x dx$ incremento de volumen (L <sup>3</sup> ).
$W$	= Velocidad del viento. en mph. medida 6 ft por arriba de la superficie del agua
$x$	= Distancia (L)
$X_{20}$	= Valor del coeficiente a la temperatura estándar
$X_T$	= Valor del coeficiente a la temperatura local
$z$	= Profundidad variable. ft.



## Glosario

Acuífero	Formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su uso.
Aguas nacionales	Las aguas propiedad de la nación, en los términos del párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
Aguas residuales	Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.
Bentos	Fauna y flora del fondo del mar y de los ríos y lagos.
Carga contaminante	Cantidad de un contaminante expresada en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada en una descarga de aguas residuales
Cauce de la corriente	El canal natural o artificial que tiene la capacidad necesaria para que las aguas de la crecienta máxima ordinaria escurran sin derramarse.
Coliformes Fecales	Bacterias aerobias Gram.-negativas, no formadoras de esporas, de forma bacilar, y que incubadas a 44.5 °C en un término de 48 horas, fermentan la lactosa con producción de gas, pudiendo ser residentes del tracto digestivo humano y de animales de sangre caliente.
Condiciones de Descarga	El conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos y de sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, determinados por la CNA para los responsables de la descarga o para un cuerpo receptor específico, con el fin de controlar y preservar la calidad de las aguas conforme a la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.
Contaminantes básicos	Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales.
Contaminantes patógenos y parasitarios	Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos, que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna.
Cuerpo receptor	Son las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales

---

Demanda Bioquímica de Oxígeno Total	Cantidad de oxígeno consumido por la actividad metabólica de microorganismos en un periodo de cinco días, a 20 °C, considerando la suma de las concentraciones solubles y en suspensión.
Descarga	Acción de verter, infiltrar, depositar e inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando este es un bien del dominio público de la Nación.
Fitoplancton	Conjunto de organismos vegetales del plancton.
Gasto ecológico	Caudal mínimo necesario que debe mantenerse en una corriente superficial, el cual permita proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico de los elementos bióticos y abióticos interrelacionados con dicha corriente
Límite máximo permisible	Valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.
Parámetro	Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad física, química y biológica del agua
Plancton	Conjunto de los seres pequeñísimos que se hallan en suspensión en el mar o en las aguas dulces.
Uso agrícola	La utilización de agua nacional destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.
Uso doméstico	La utilización de agua nacional destinada al uso particular de las personas y del hogar, riego de jardines incluyendo abrevadero de animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa.
Uso industrial	Agua destinada a procesos industriales
Uso protección de vida acuática	Uso destinado a la protección de la flora y la fauna acuática
Uso público urbano	Agua destinada al consumo humano previa potabilización.
Uso recreativo con contacto directo	La utilización del agua para actividades recreativas tales como natación, pesca deportiva, etc.

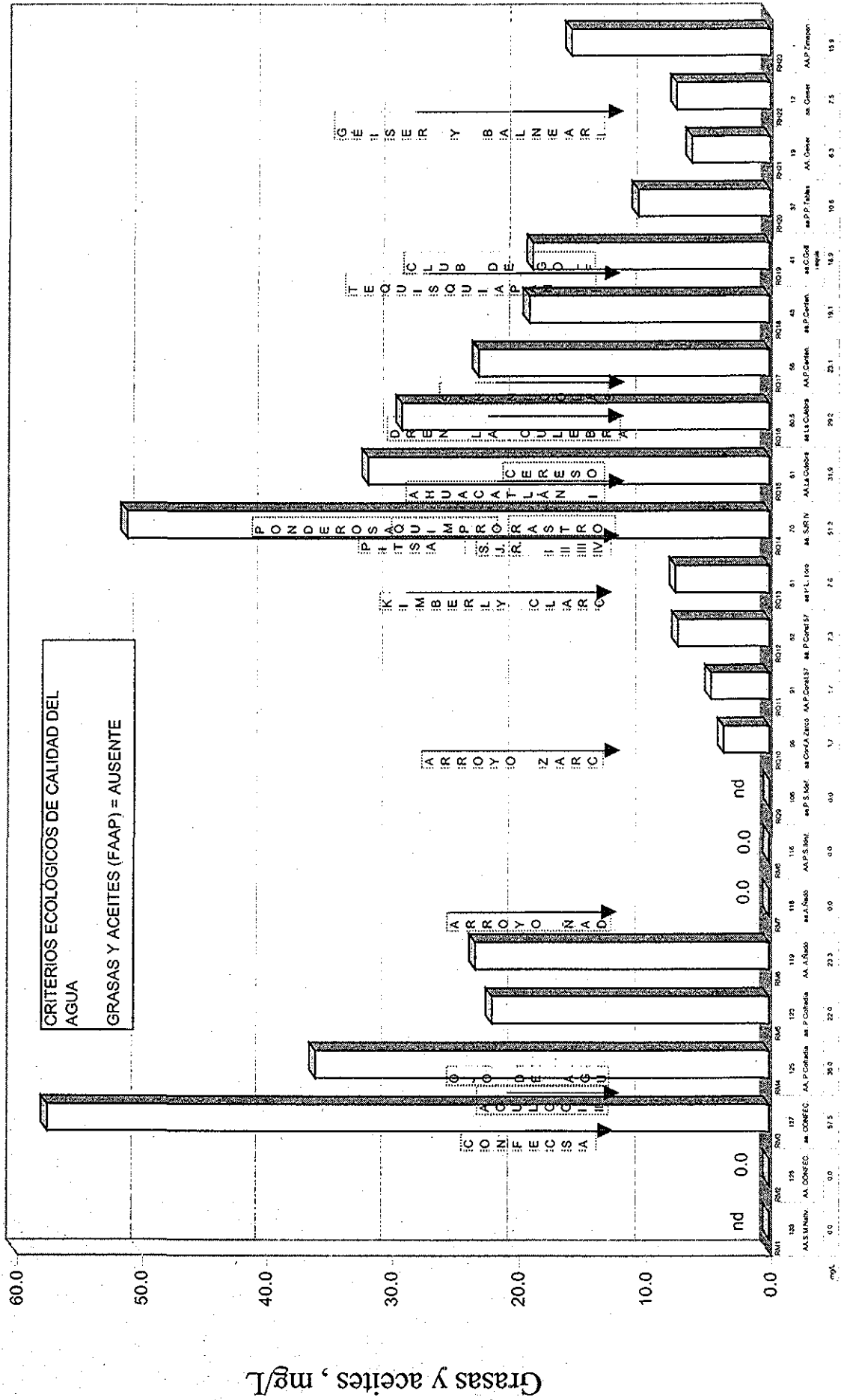
---

# **Anexo 1**

## **Graficas de concentración de contaminantes medidos a lo largo del río San Juan**



Gráfica A1.2 Grasas y aceites medidos en el río San Juan



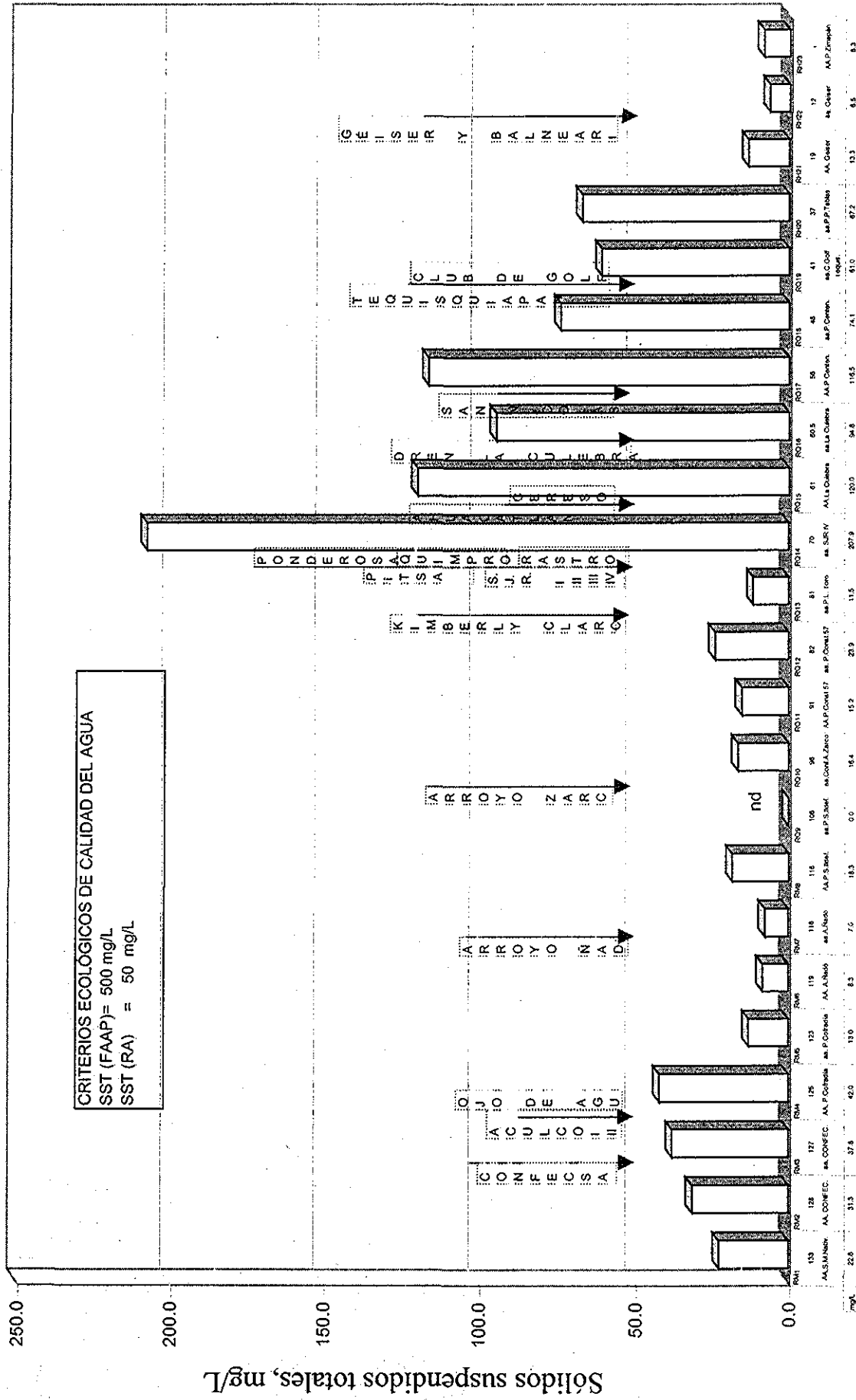
Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Gráfica A1.3 Sólidos suspendidos totales medidos en el río San Juan

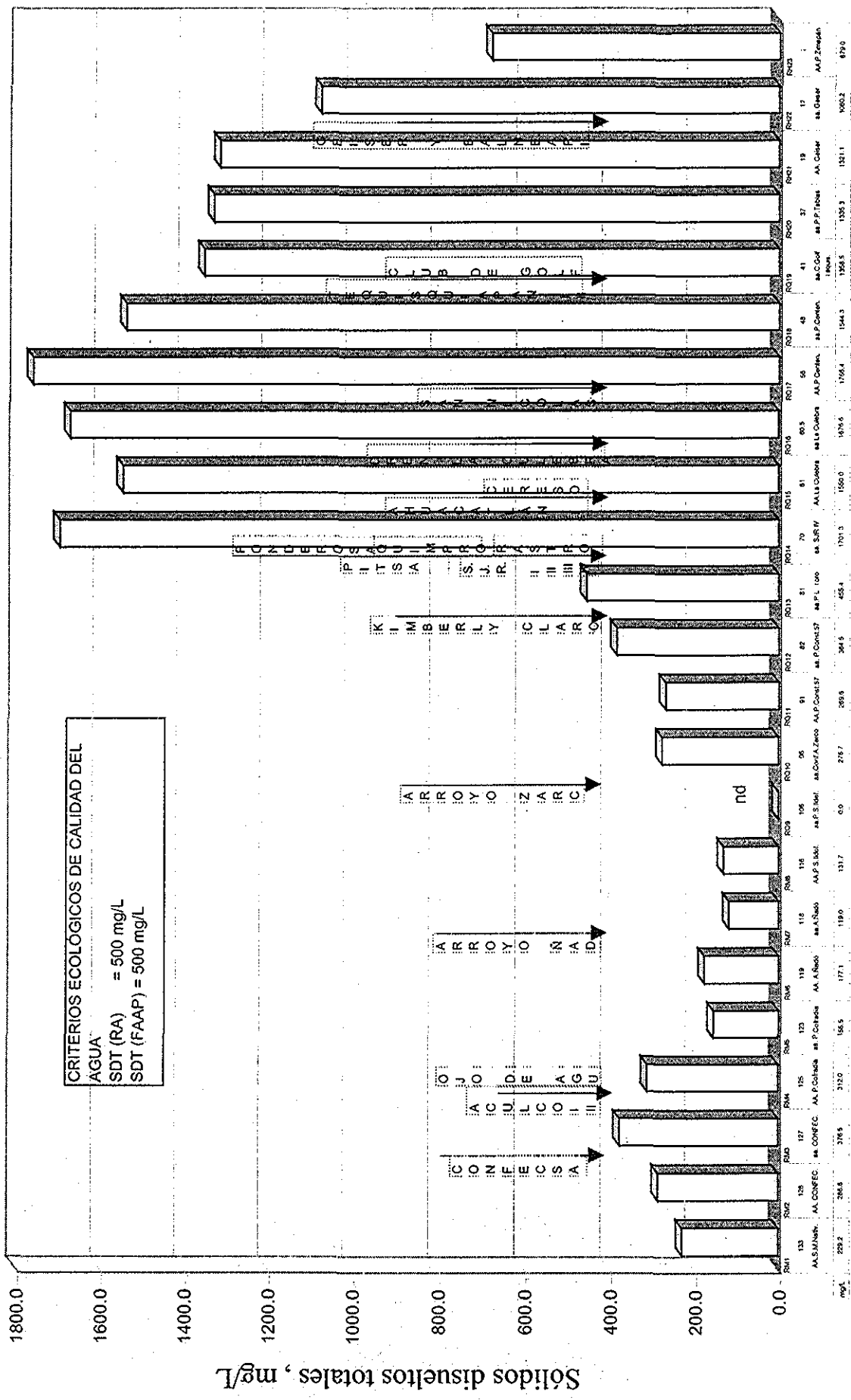


Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfica A1.4 Sólidos disueltos totales medidos en el río San Juan

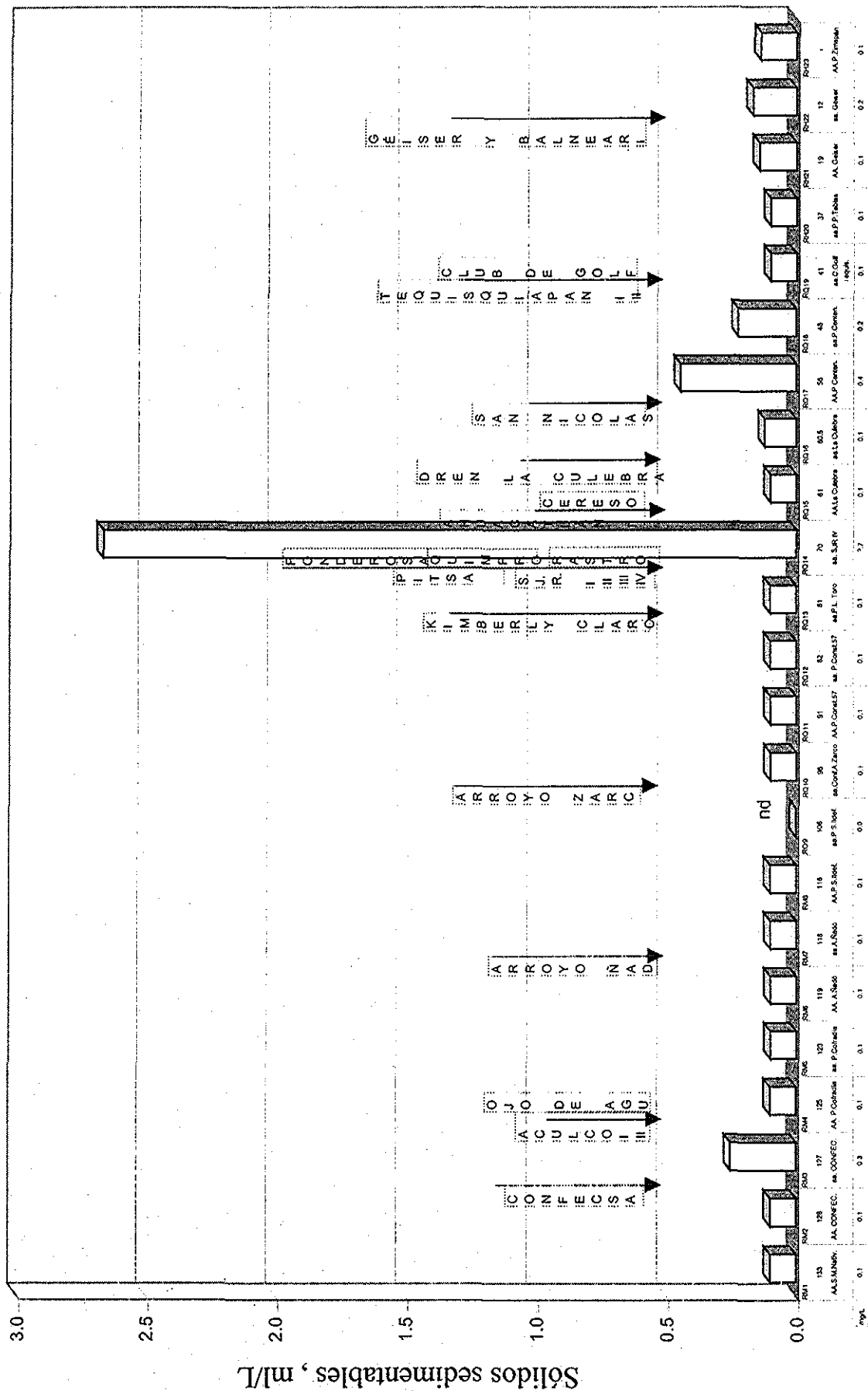


Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

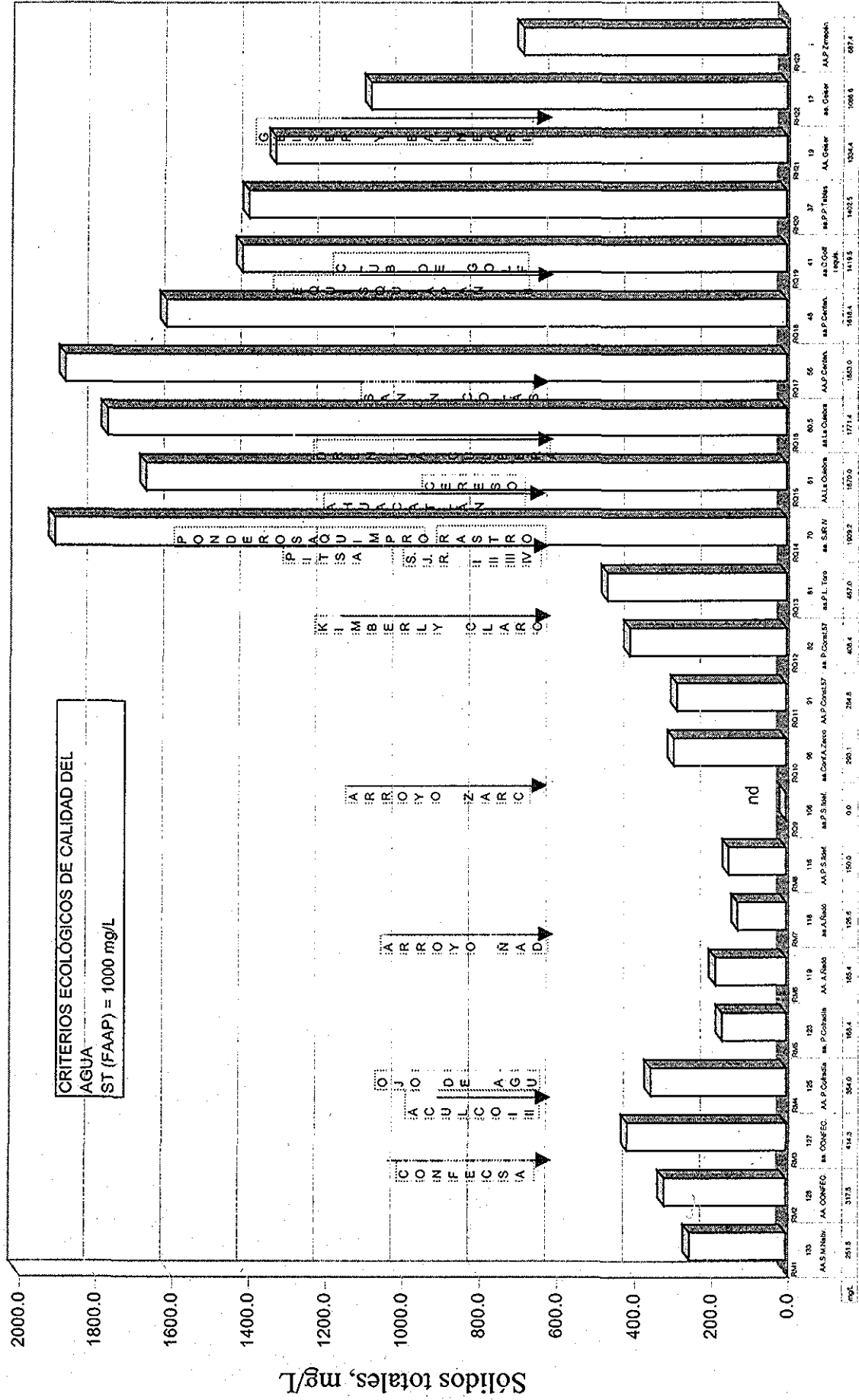
Gráfica A1.5 Sólidos sedimentables medidos en el río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

Gráfica A1.6 Sólidos totales medidos en el río San Juan



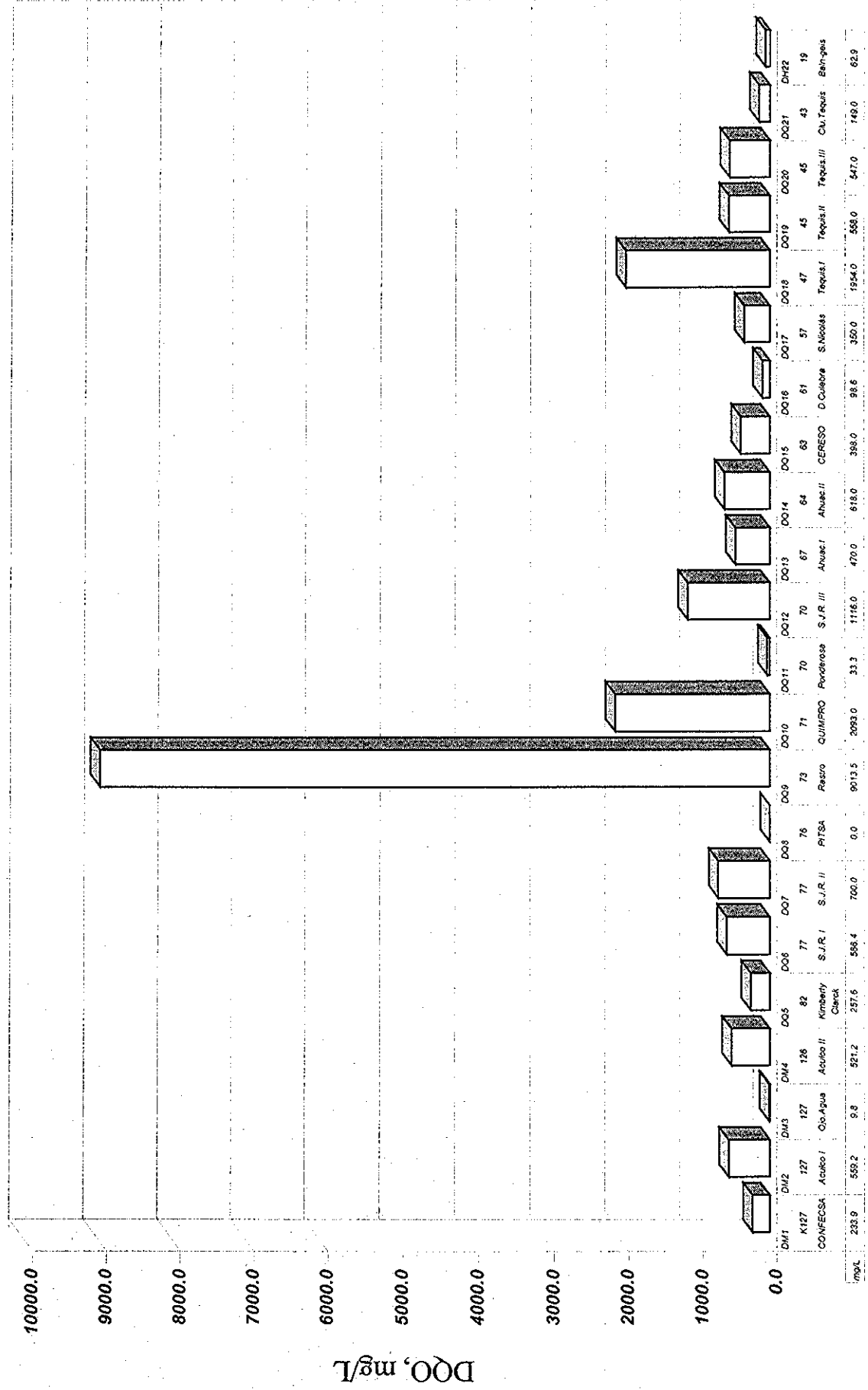
Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Gráfica A1.8 Demanda química de oxígeno medida en las descargas al río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

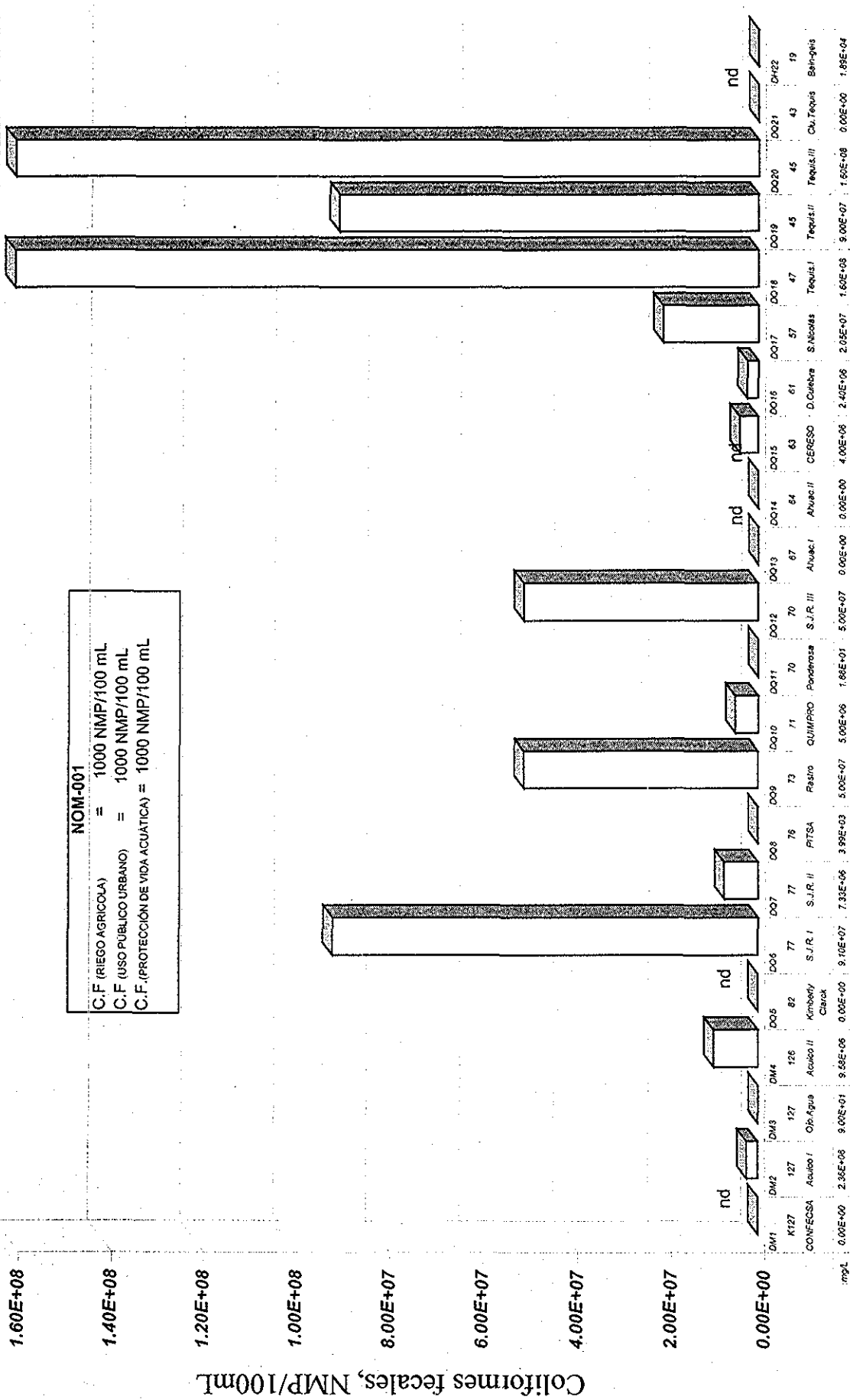
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

---

## **Anexo 2**

**Graficas de concentración de  
contaminantes medidos en las descargas de  
aguas residuales vertidas al río San Juan**

# Gráfica A2.1 Coliformes fecales medidos en las descargas al río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



Gráfica A2.2 Nitrógeno total medido en las descargas al río San Juan

332.71

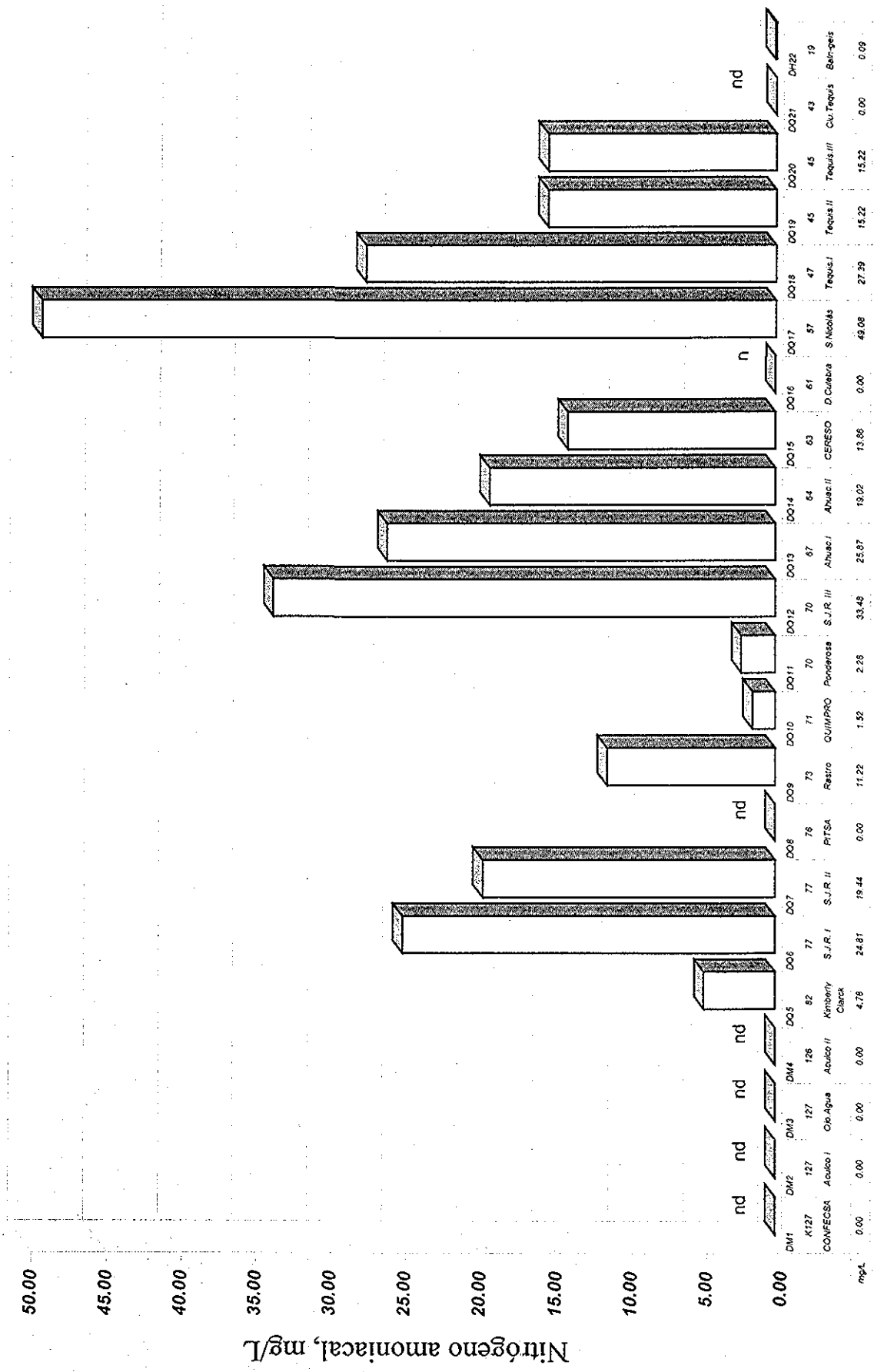


Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd = no se determinó

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfica A2.3 Nitrógeno amoniacal medido en las descargas al río San Juan

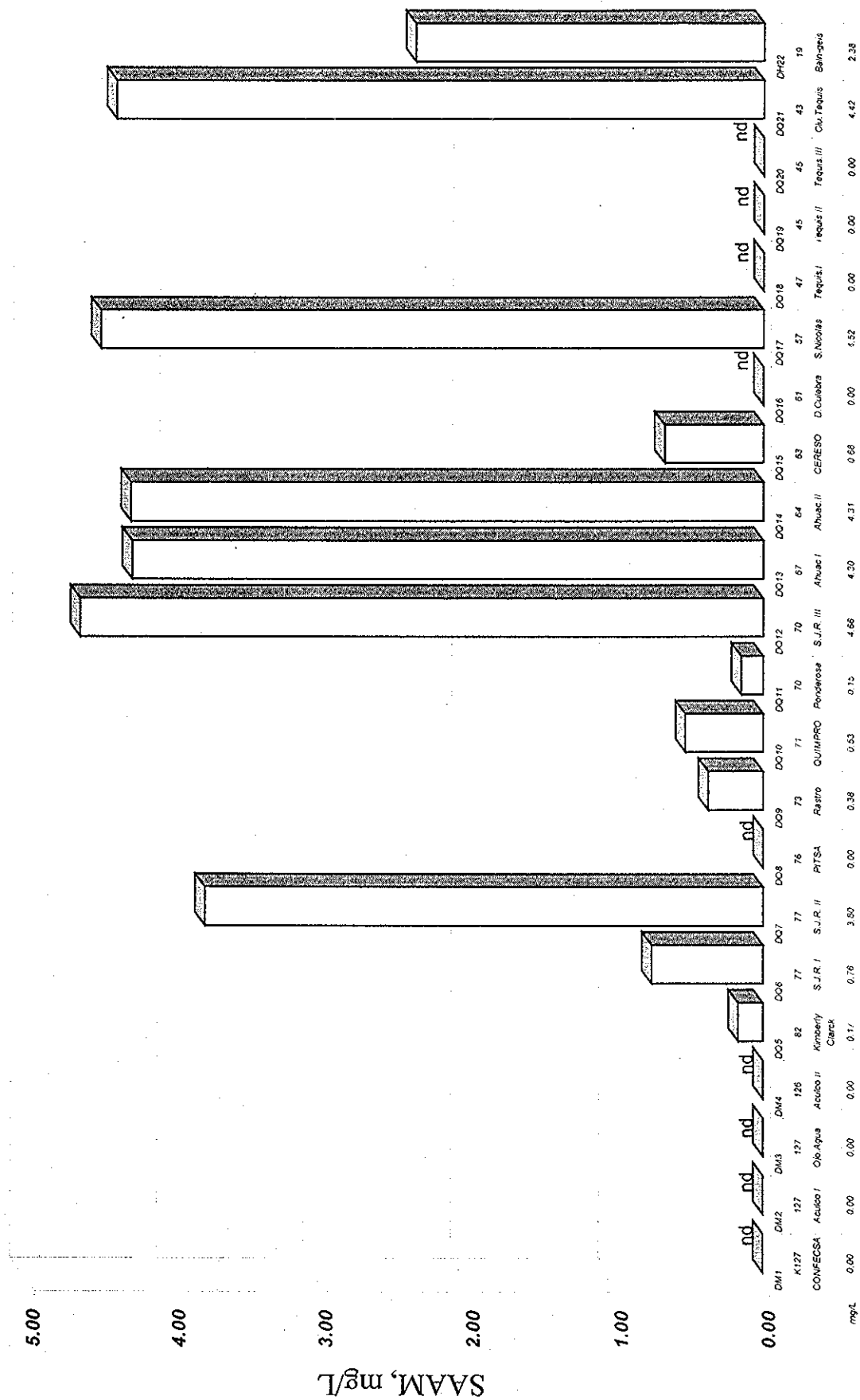


Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

nd= no se determinó

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfica A2.4 Sustancias activas al azul de metileno medidas en las descargas al río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

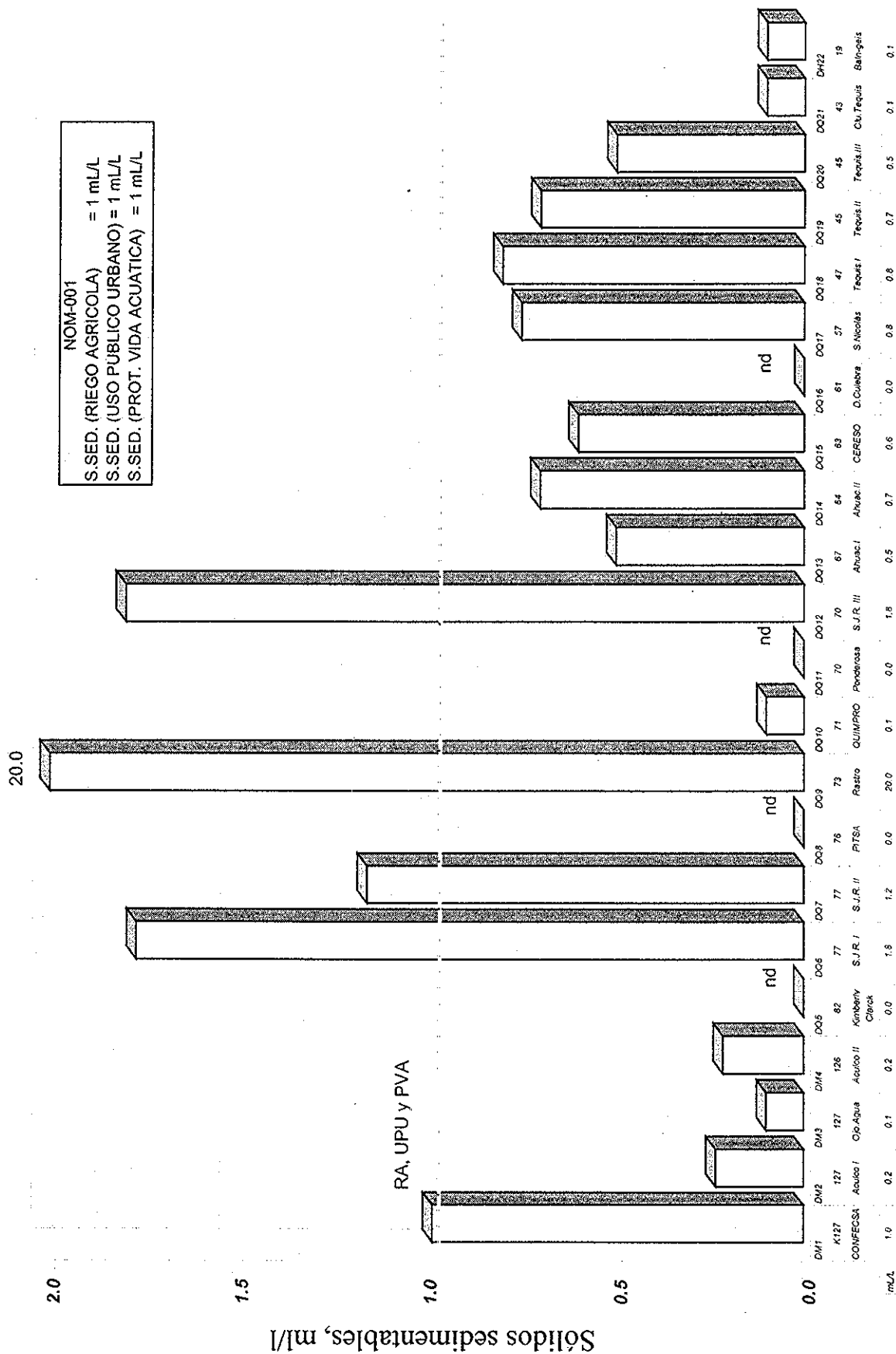
nd = no se determinó

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfica A2.5 Sólidos suspendidos medidos en las descargas al río San Juan



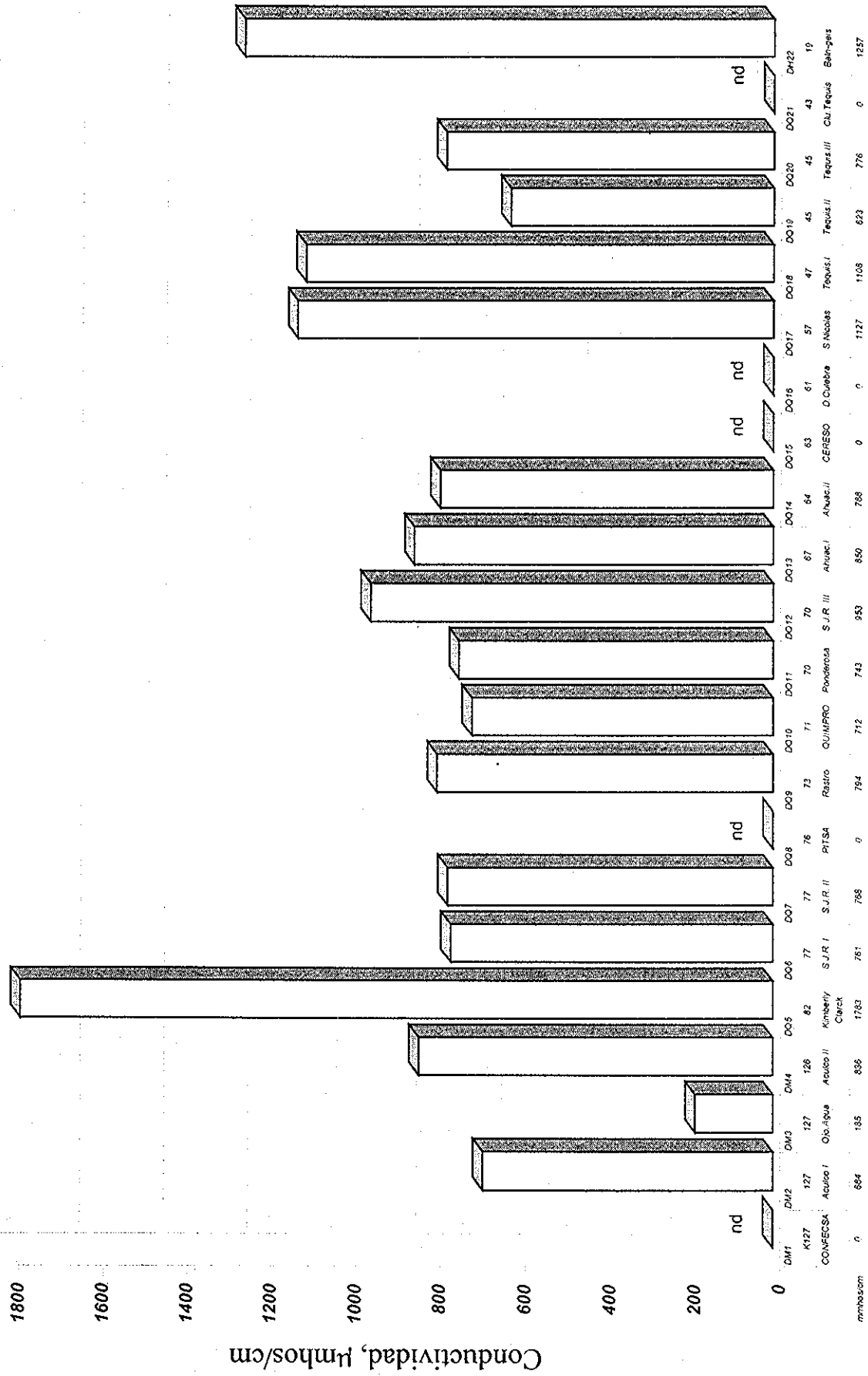
Gráfica A2.6 Sólidos sedimentables medidos en las descargas al río San Juan



nd = no se determinó

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Gráfica A2.7 Conductividad medida en las descargas al río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

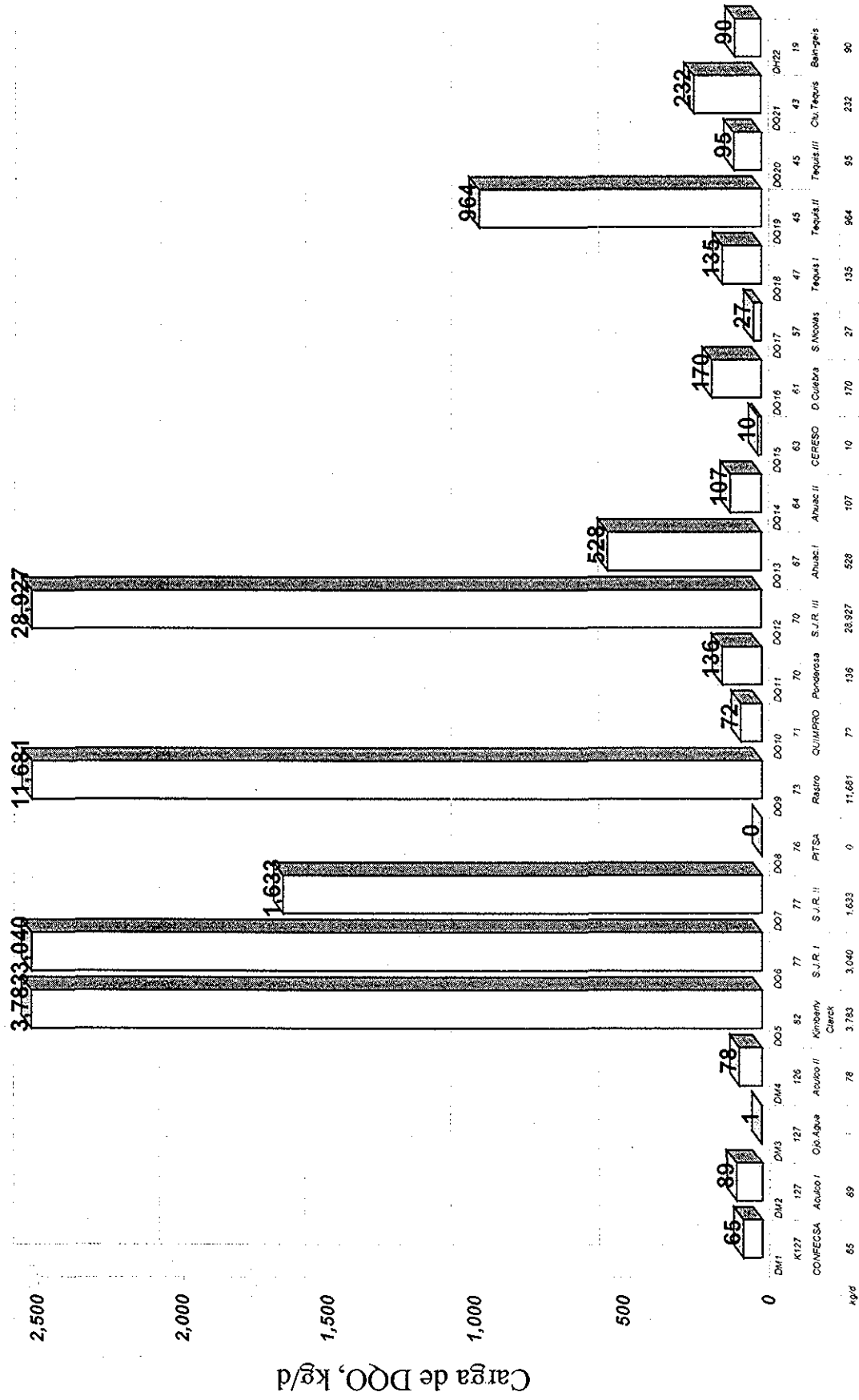
nd = no se determinó

---

## **Anexo 3**

**Gráficas de cargas de contaminantes  
aportados por las descargas al río San Juan**

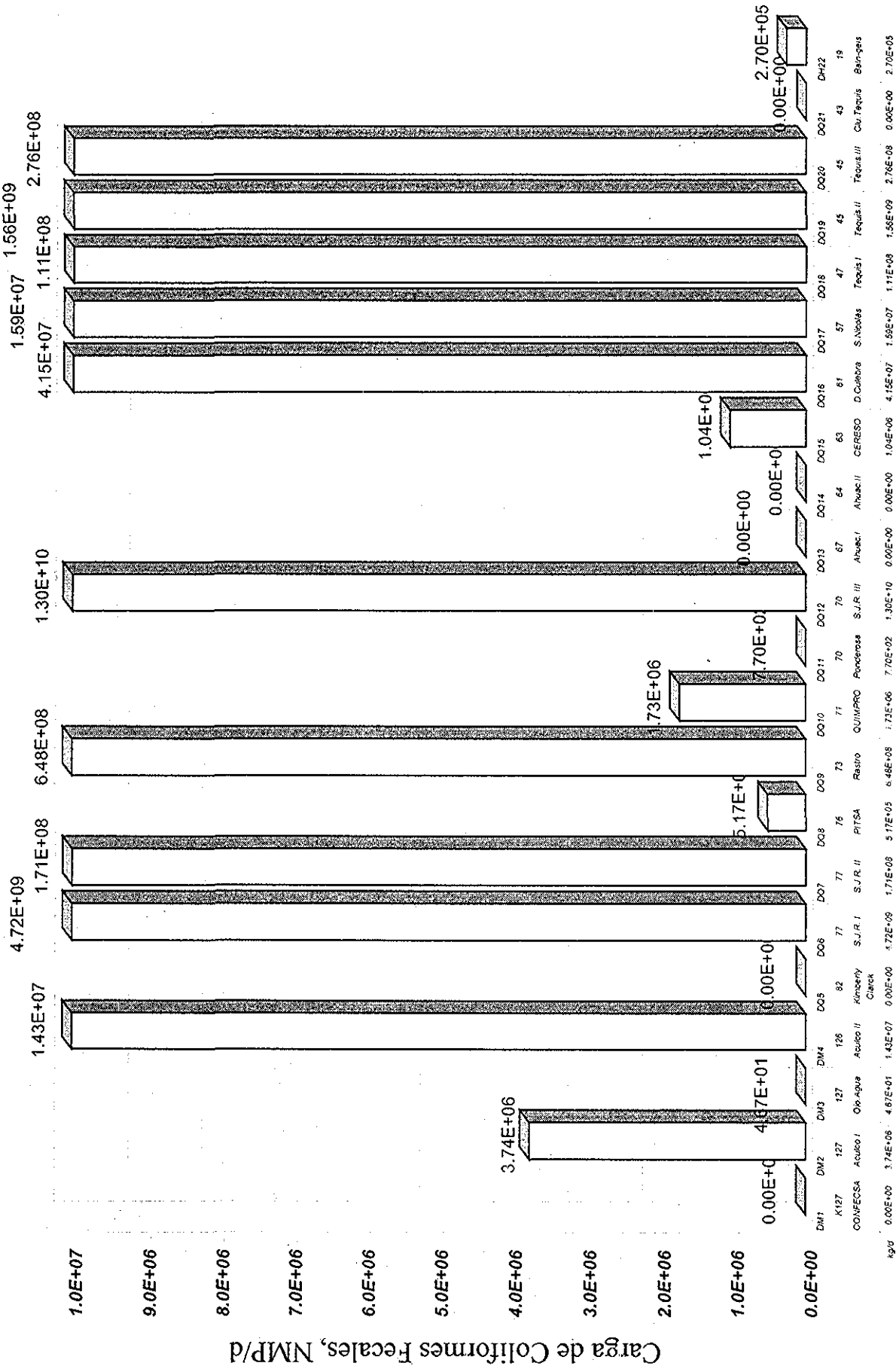
Gráfica A3.1 Carga de demanda química de oxígeno medida en las descargas al río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

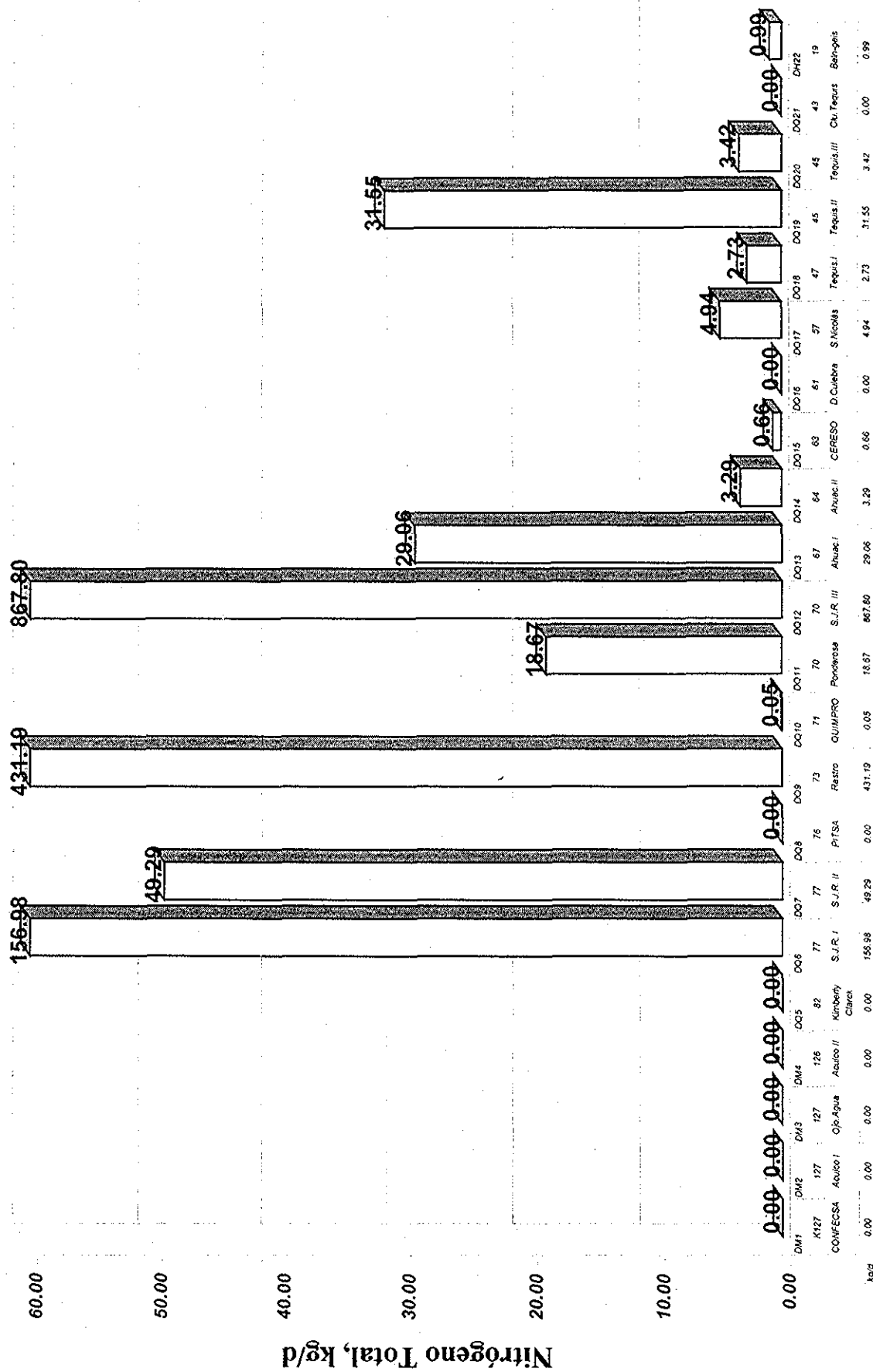


Gráfica A3.2 Carga de Coliformes fecales medidos en las descargas al río San Juan



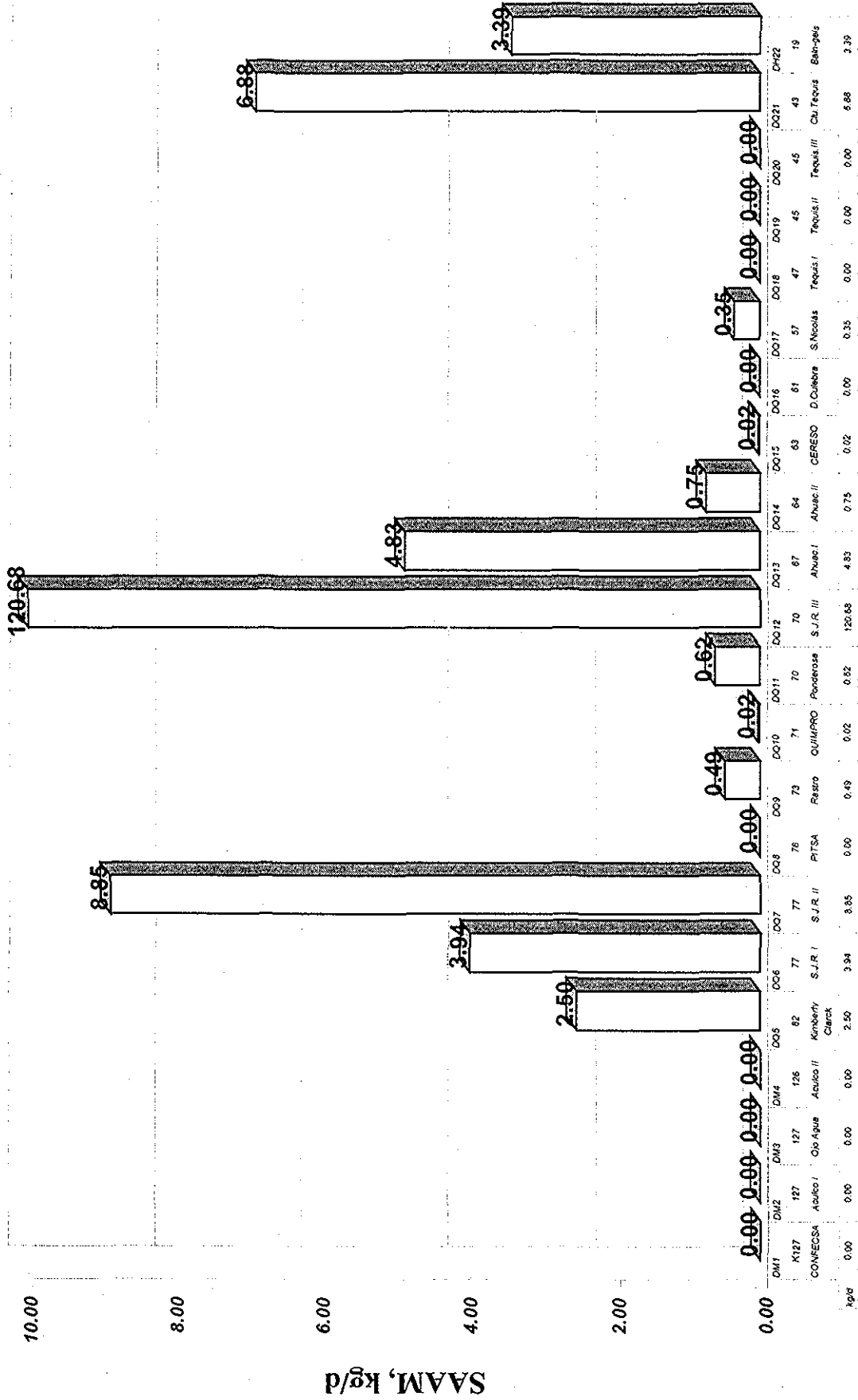
Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

Gráfica A3.3 Carga de Nitrógeno total medido en las descargas al río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

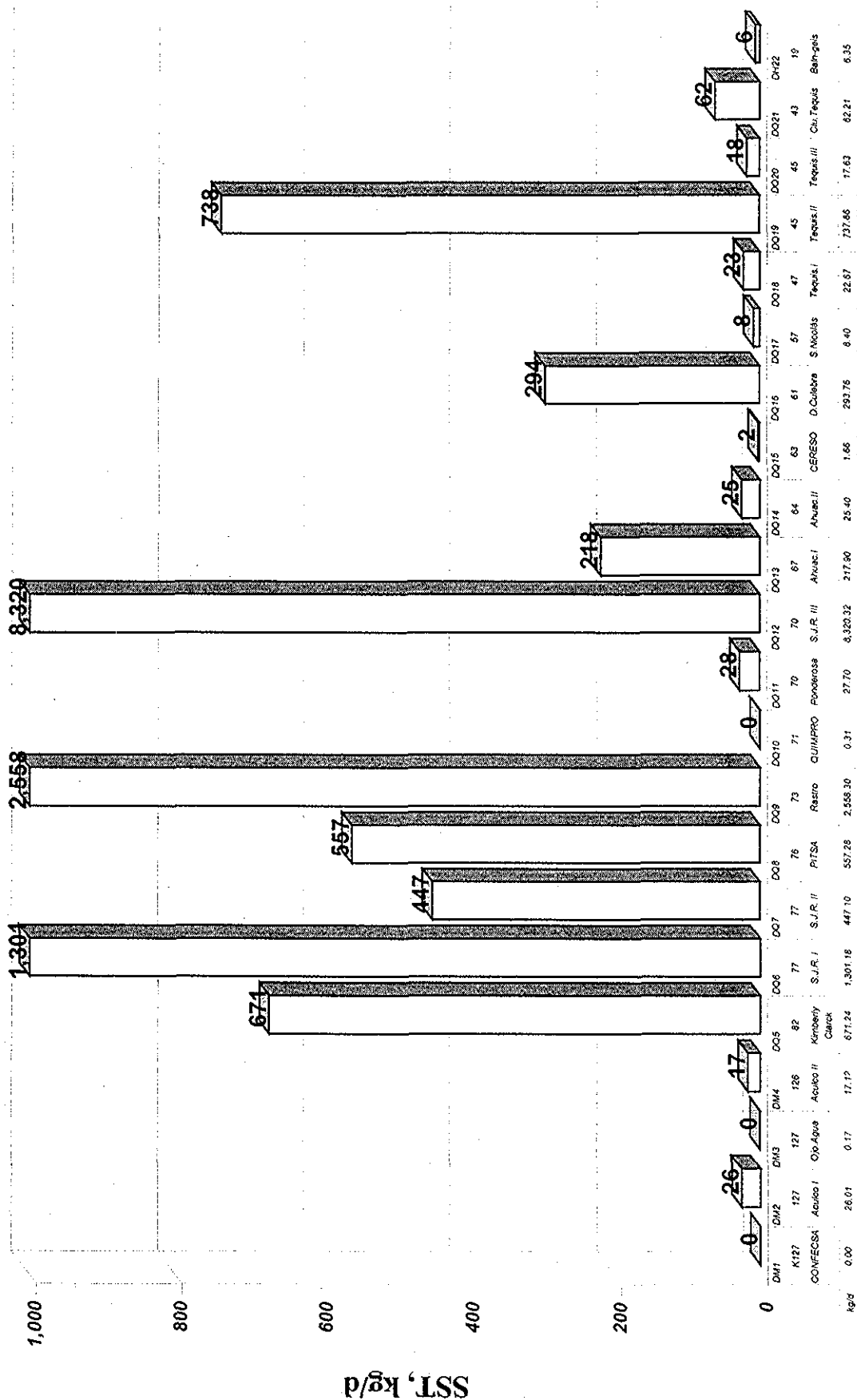
Gráfica A3.4 Carga de Sustancias activas al azul de metileno medido en las descargas al río San Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

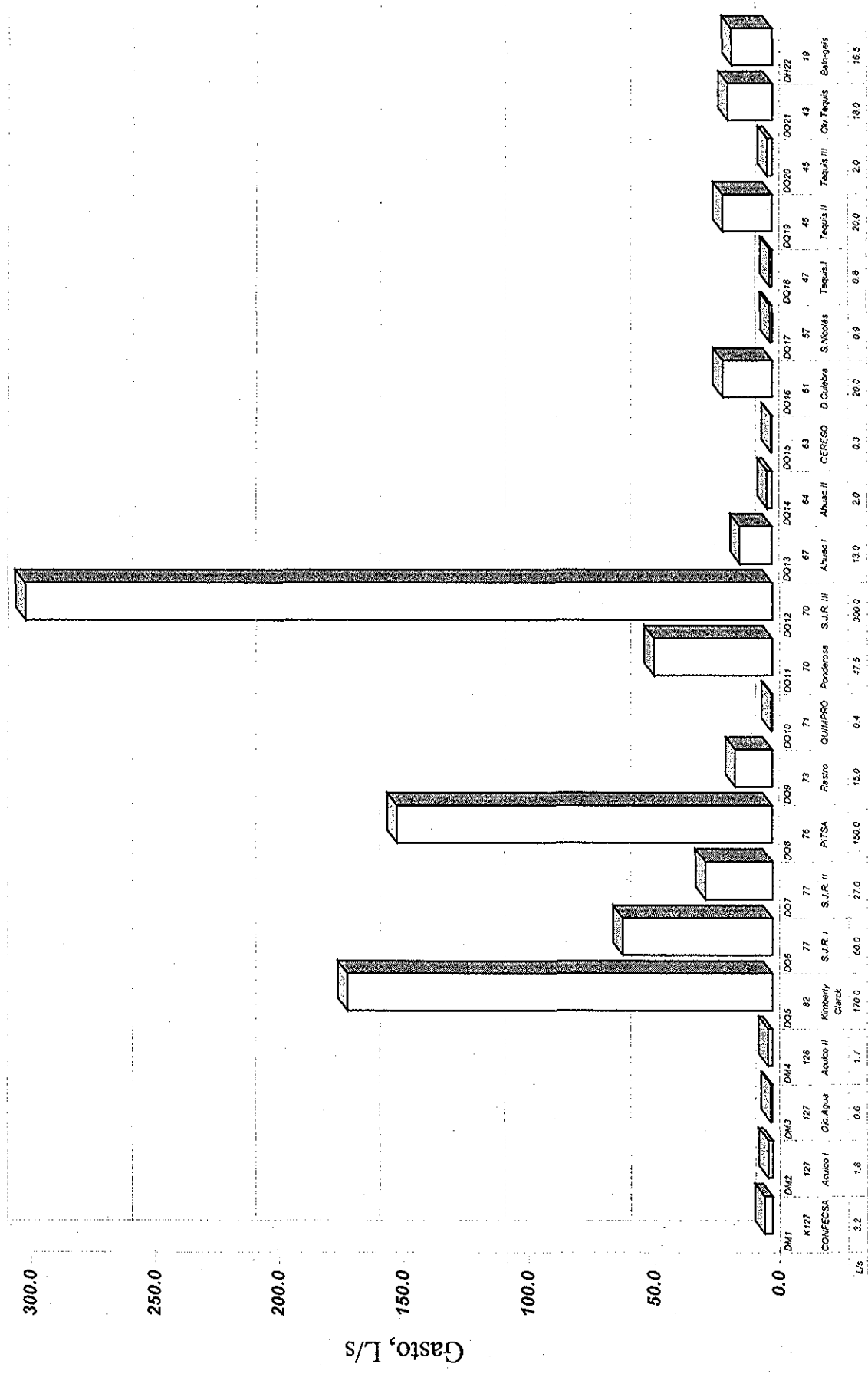
# Gráfica A3.5 Carga de Sólidos suspendidos totales medidos en las descargas al río San Juan

Juan



Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

Gráfica A3.6 Gasto medido en las descargas al río San Juan



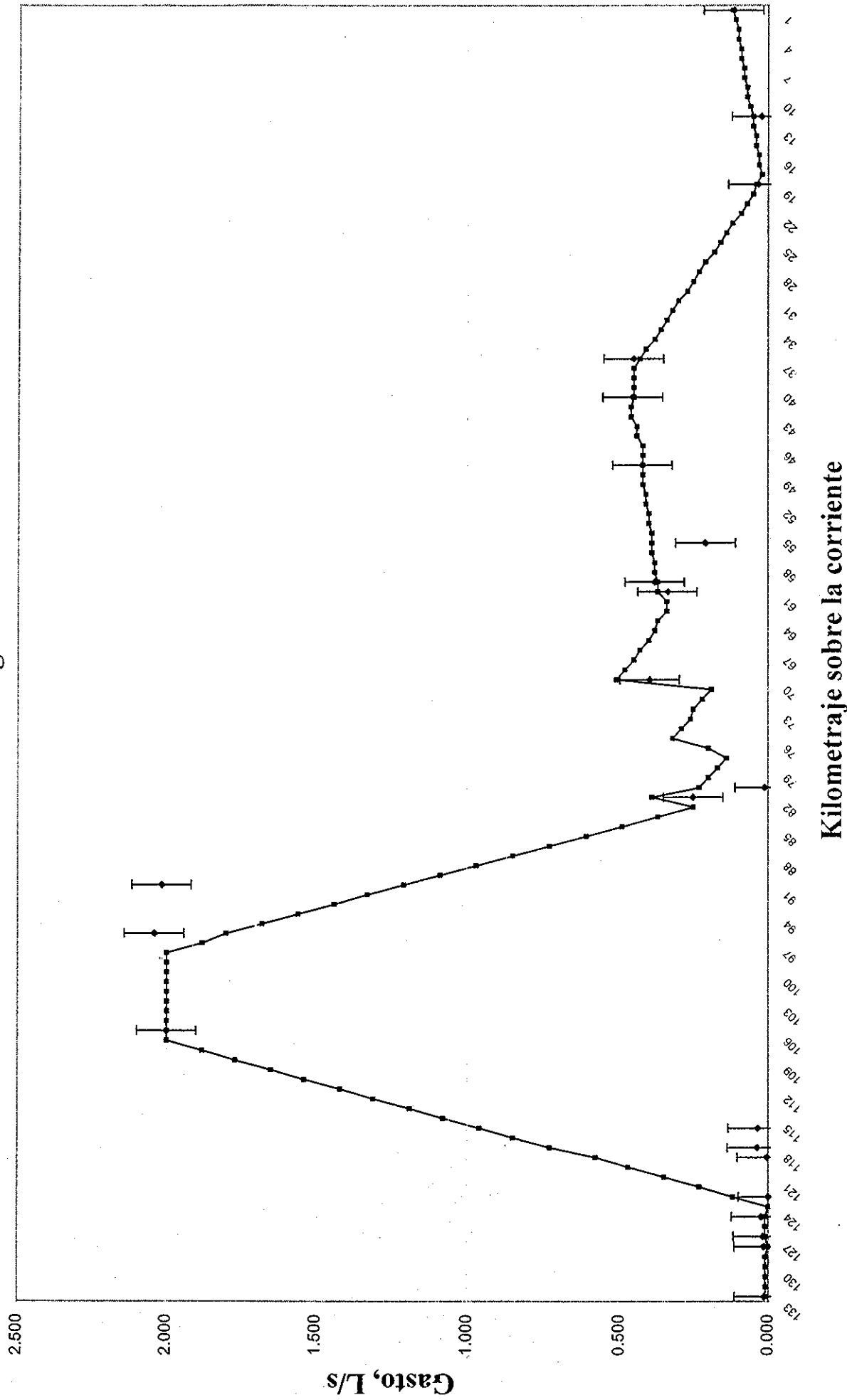
Clave, kilometraje y estaciones de monitoreo y aforo

---

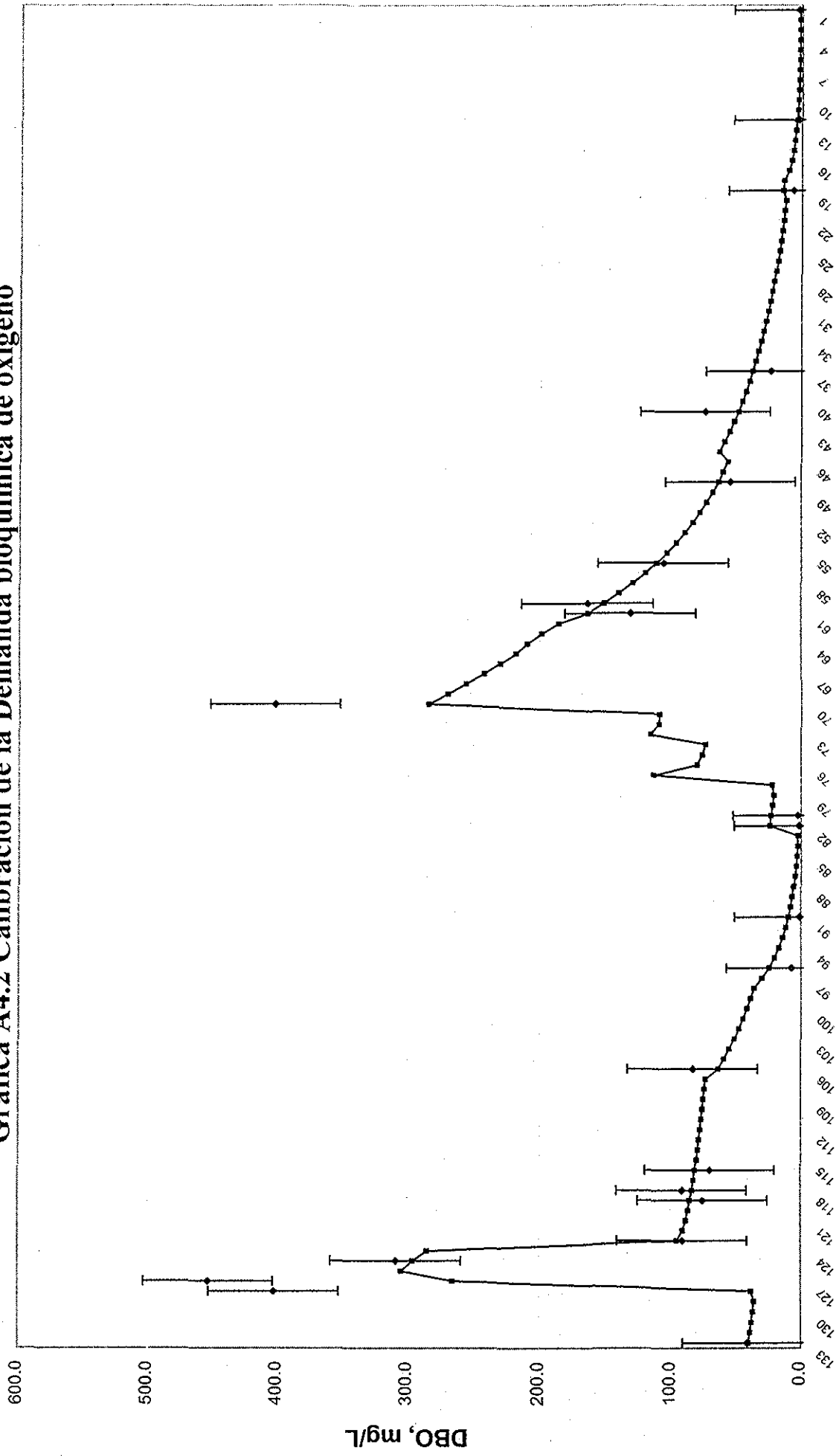
## **Anexo 4**

### **Gráficas de la calibración del modelo de calidad del agua para el río San Juan**

Gráfica A4.1 Calibración de gasto en el río San Juan

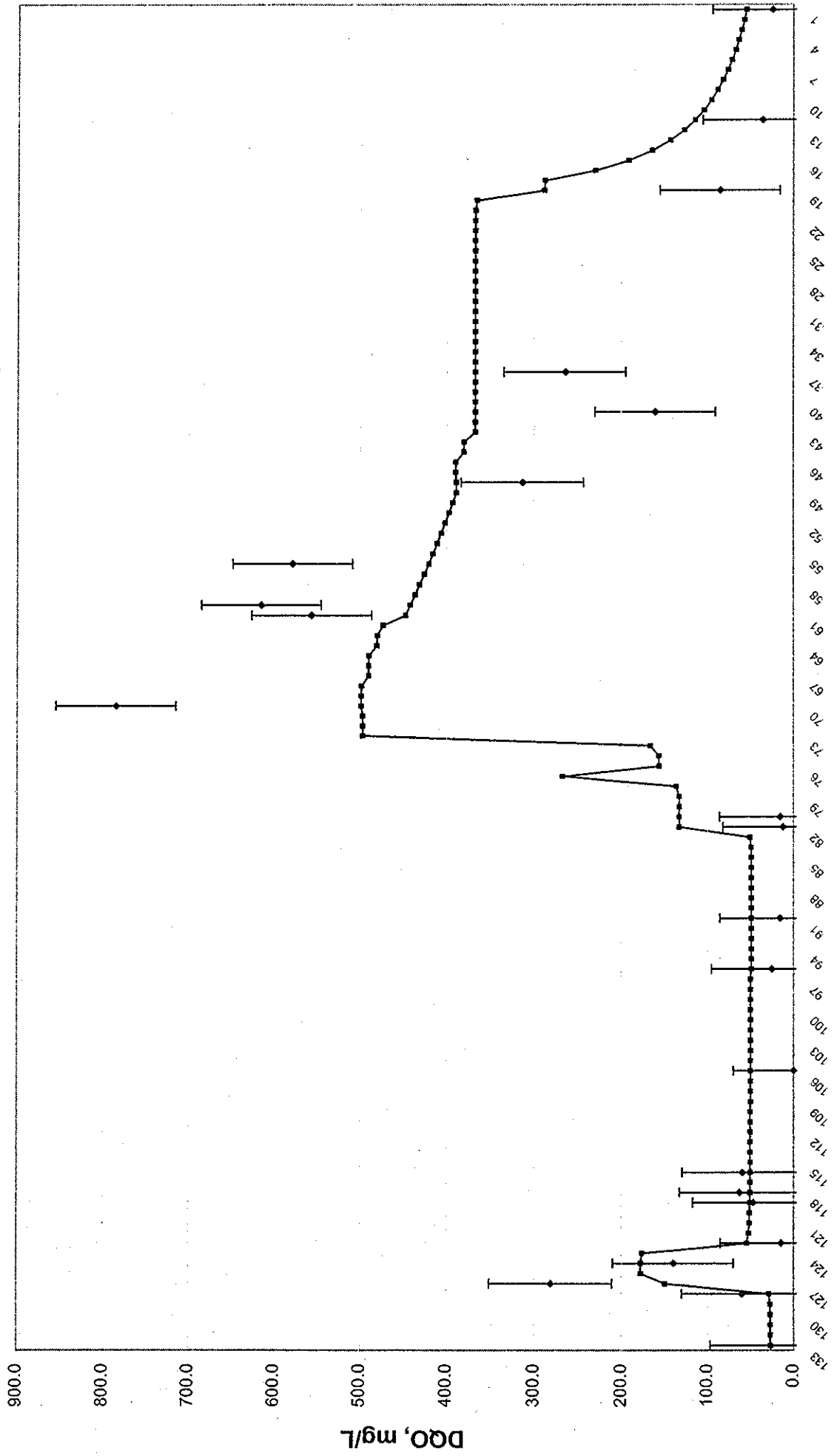


Gráfica A4.2 Calibración de la Demanda bioquímica de oxígeno



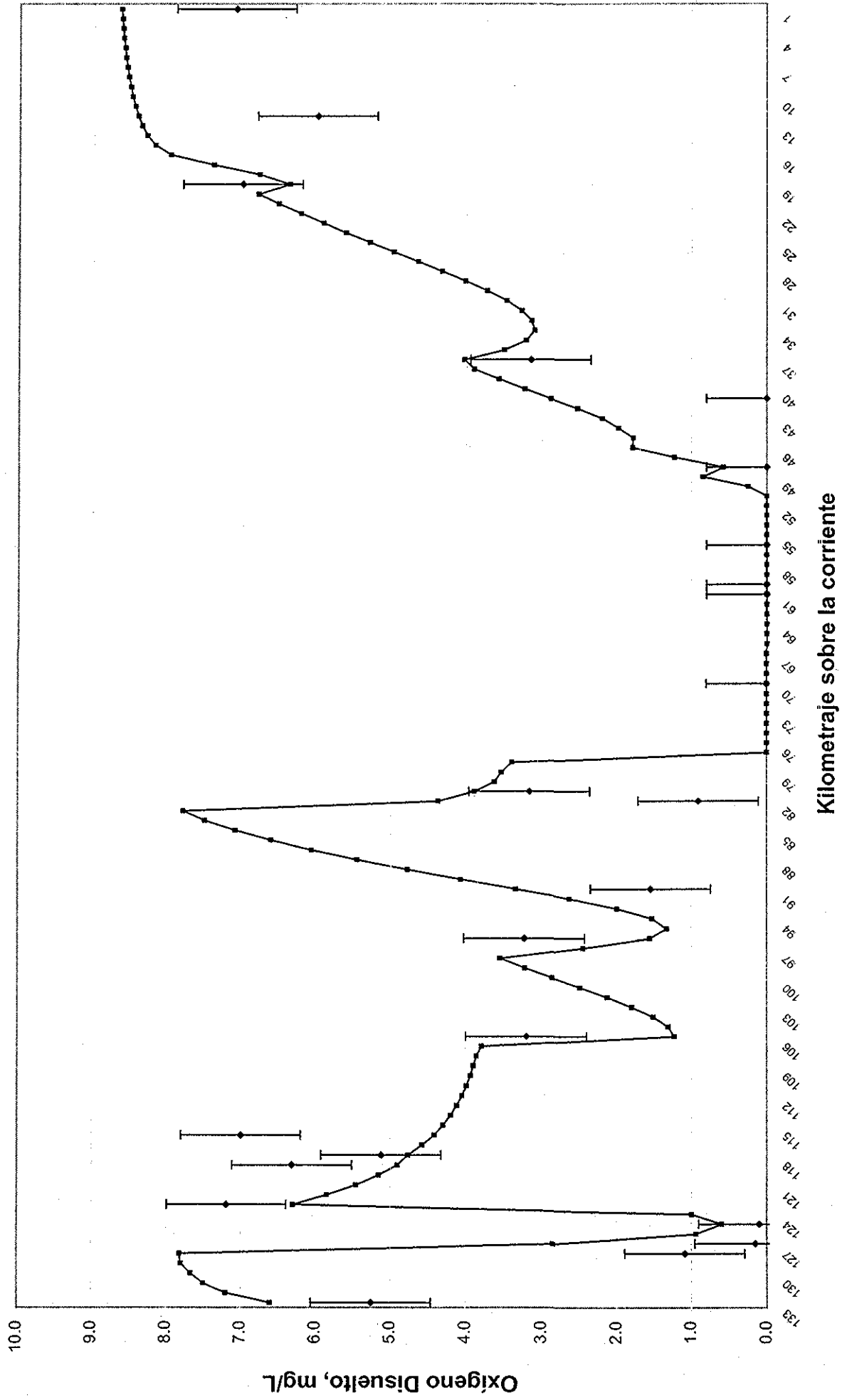


Gráfica A4.3 Calibración de la Demanda química de oxígeno

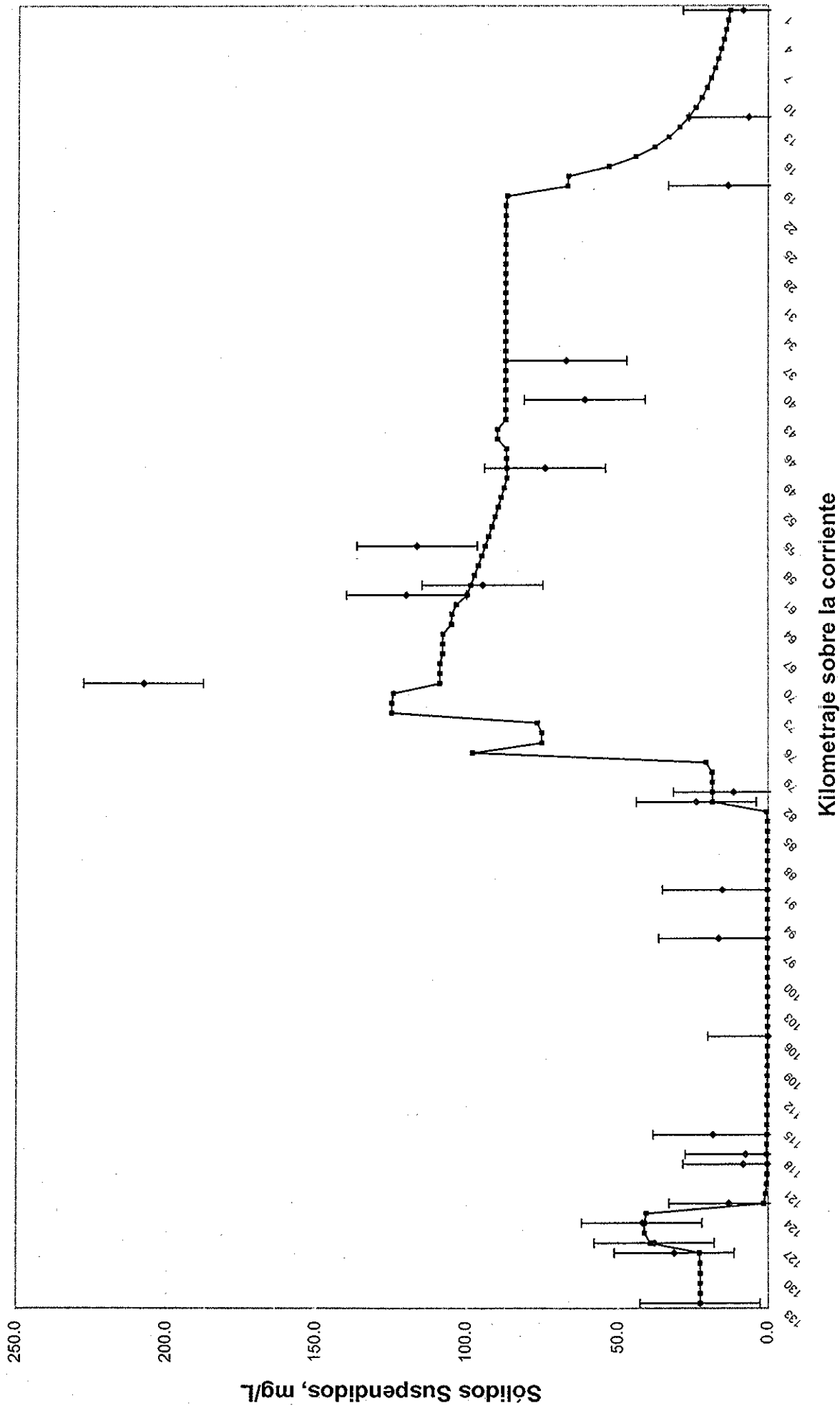


Kilometraje sobre la corriente

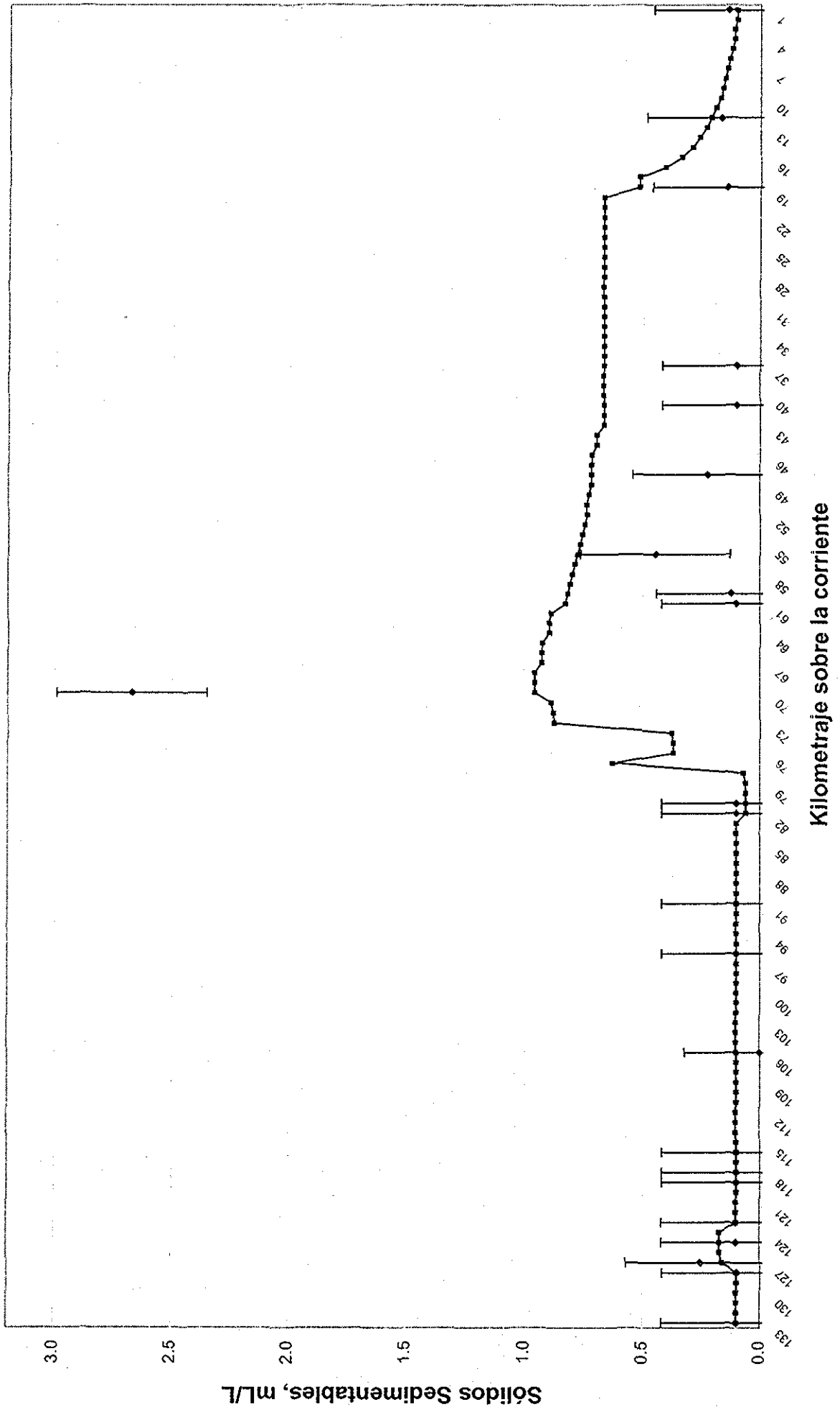
Gráfica A4.4 Calibración del Oxígeno disuelto



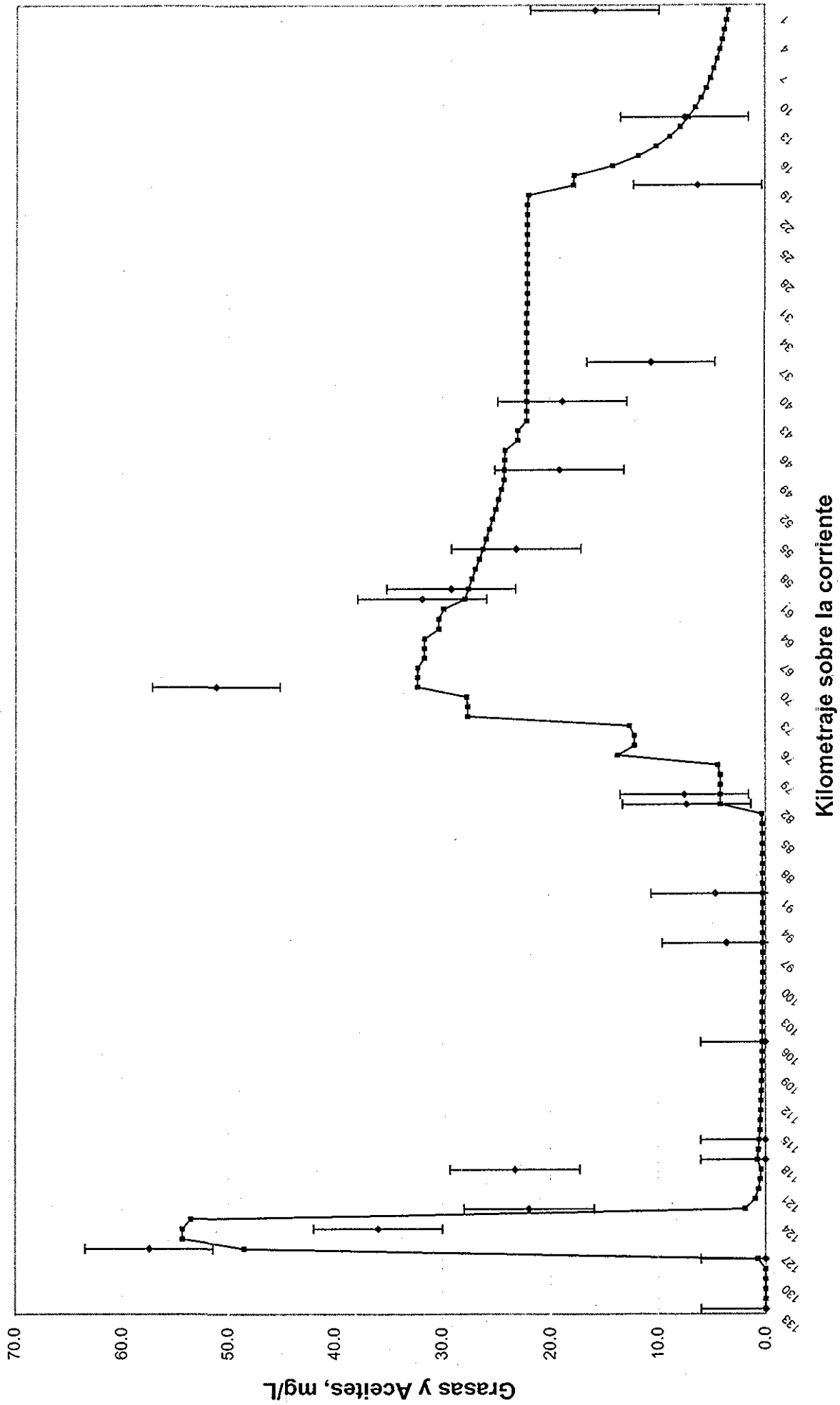
Gráfica A4.5 Calibración de Sólidos suspendidos totales



Gráfica A4.6 Calibración de Sólidos sedimentables



Gráfica A4.7 Calibración de Grasas y aceites



---

## **Anexo 5**

**Listado de datos de entrada y salida de la  
corrida final de calibración del modelo**

# Calibración del modelo de calidad del agua del río San Juan

```

IIILE02
TITILE03 YES          MINERAL CONSERVAIIVO I          SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, mg/l
IIILE04 YES          MINERAL CONSERVAIIVO II         GRASAS Y ACEITES, ml/l
IIILE05 YES          MINERAL CONSERVAIIVO III        SÓLIDOS SEDIMENTABLES, mg/l
IIILE06 NO           TEMPERAIURE
IIILE07 YES          DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, DBO5
IIILE08 NO           ALGAE AS CHL-A IN UG/I
IIILE09 NO           PHOSPHORUS CYCLE AS P IN MG/I
IIILE10              (ORGANIC-P; DISSOLVED-P)
IIILE11 NO           NITROGEN CYCLE AS N IN MG/L
IIILE12              (ORGANIC-N; AMMONIA-N; NIIRIIE-N; NIIRAIIE-N)
IIILE13 YES          OXÍGENO DISUELTO, MG/L
IIILE14 YES          COLIFORMES FECALES EN NO./100 ML/1000
IIILE15 YES          SUSTANCIA NO CONSERVAIIVA, DEM. QUÍM. DE OXÍGENO, DQO, mg/l
ENDTITILE
    
```

\$\$\$ DAIA IYPE 1 (DATOS DE CONTROL) \$\$\$

CARD IYPE		CARD IYPE	
LIST DAIA INPUI	0.00000		0.00000
WRITE OPTIONAL SUMMARY	0.00000		0.00000
NO FLOW AUGMENTAIION	0.00000		0.00000
STEADY STATE	0.00000		0.00000
NO TRAP CHANNELS	0.00000		0.00000
NO PRINI LCD/SOLAR DAIA	0.00000		0.00000
PLOI DO AND BOD DAIA	0.00000		0.00000
FIXED DNSTM CONC (YES=1)=	0.00000	5D-ULT BOD CONV K COEF =	0.23000
INPUT METRIC =	1.00000	OUTPUT METRIC =	1.00000
NUMBER OF REACHES =	9.00000	NUMBER OF JUNCTIONS =	0.00000
NUM OF HEADWATERS =	1.00000	NUMBER OF POINT LOADS =	20.00000
IIME STEP (HOURS) =	1.00000	LNTH. COMP. ELEMENT (DX)=	1.00000
MAXIMUM ROUTE TIME (HRS)=	30.00000	TIME INC. FOR RPT2 (HRS)=	1.00000
LATITUDE OF BASIN (DEG) =	34.00000	LONGITUDE OF BASIN (DEG)=	85.00000
STANDARD MARIDIAN (DEG) =	75.00000	DAY OF YEAR START TIME =	306.00000
EVAP. COEF., (AE) =	0.00001	EVAP. COEF., (BE) =	0.00000
ELEV. OF BASIN (ELEV) =	304.79999	DUST ATTENUATION COEF. =	0.06000
ENDAIAL	0.00000		0.00000

\$\$\$ DAIA IYPE 1A (CONSTANTES DE OXIDACIÓN DE NITRÓGENO PRODUCCIÓN DE ALGAS) \$\$\$

CARD IYPE		CARD IYPE	
ENDAIALA	0.0000		0.0000

\$\$\$ DATA IYPE 1B (CONSTANTES DE CORRECCIÓN DE TEMPERATURA PARA LOS COEFICIENTES DE VELOCIDAD) \$\$\$

CARD IYPE	RAIE CODE	IHEIA VALUE
THETA( 1)	BOD DECA	1.047
THETA( 2)	BOD SETT	1.024
THETA( 3)	OKY TRAN	1.024
THETA( 4)	SOD RATE	1.060
THETA( 5)	ORGN DEC	1.047
THETA( 6)	ORGN SET	1.024
THETA( 7)	NH3 DECA	1.083
THETA( 8)	NH3 SRCE	1.074
THETA( 9)	NO2 DECA	1.047
THETA(10)	PORG DEC	1.047
THETA(11)	PORG SET	1.024
THETA(12)	DISP SRC	1.074
THETA(13)	ALG GROW	1.047
THETA(14)	ALG RESP	1.047
THETA(15)	ALG SETT	1.024

THETA (16)	COLI DEC	1.047
THETA (17)	ANC DECA	1.000
THETA (18)	ANC SEIT	1.024
THETA (19)	ANC SRCE	1.000

\$\$\$ DATA IYPE 2 (IDENTIFICACIÓN DE TRAMOS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ORDER	AND IDENT		R. MI/KM	R. MI/KM
TRAMO	1.0	RCH=	TEST-P. COFR	DE	133.0	123.0
TRAMO	2.0	RCH=	P. COFR-P S. ILDE	DE	123.0	106.0
TRAMO	3.0	RCH=	P. S. ILDE-A. ZARC	DE	106.0	97.0
TRAMO	4.0	RCH=	A. ZARCO-P. CON57	DE	97.0	82.0
TRAMO	5.0	RCH=	P. CON57-CERESO	DE	82.0	62.0
TRAMO	6.0	RCH=	CERESO-P CENTEN	DE	62.0	48.0
TRAMO	7.0	RCH=	P. CENTEN-P. PASO	DE	48.0	37.0
TRAMO	8.0	RCH=	P. PASO-GÉISER	DE	37.0	17.0
TRAMO	9.0	RCH=	GÉISER-P ZIMAPA	DE	17.0	0.0
ENDATA2	0.0				0.0	0.0

\$\$\$ DATA IYPE 4 (ELEMENTOS COMPUTACIONALES) \$\$\$

CARD TYPE	TRAMO	ELEMENTOS	BANDERAS
FLAG FIELD	1	10	1.2.2.2.2.2.6.6.2.2.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.
FLAG FIELD	2	17	2.2.2.2.2.6.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.0.0.0.
FLAG FIELD	3	9	2.0.0.0.
FLAG FIELD	4	15	2.6.2.0.0.0.
FLAG FIELD	5	20	6.7.2.2.2.6.6.2.2.6.2.6.6.2.2.6.2.2.6.2.2.6.6.
FLAG FIELD	6	14	2.6.2.2.2.6.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.0.0.0.
FLAG FIELD	7	11	2.6.2.6.2.6.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.0.0.0.
FLAG FIELD	8	20	2.6.2.
FLAG FIELD	9	17	2.5.0.0.
ENDATA4	0	0	0.

\$\$\$ DATA TYPE 5 (DATOS HIDRÁULICOS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD Y PROFUNDIDAD) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	COEF-DSPN	COEFQV	EXPOQV	COEFQH	EXPOQH	CMANN
HYDRAULICS	1	650.00	0.124	0.027	0.443	0.112	0.030
HYDRAULICS	2	650.00	0.193	0.087	0.418	0.128	0.030
HYDRAULICS	3	650.00	0.625	0.051	0.331	0.203	0.030
HYDRAULICS	4	650.00	0.538	0.062	0.415	0.233	0.030
HYDRAULICS	5	650.00	0.758	0.043	0.627	0.201	0.030
HYDRAULICS	6	650.00	0.479	0.075	0.523	0.256	0.030
HYDRAULICS	7	650.00	0.569	0.097	0.388	0.196	0.030
HYDRAULICS	8	650.00	0.464	0.073	0.586	0.187	0.030
HYDRAULICS	9	650.00	0.750	0.064	0.326	0.200	0.030
ENDATA5	0	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

\$\$\$ DATA TYPE 5A (TEMPERATURA DE ESTADO ESTACIONARIO Y DATOS CLIMATOLÓGICOS) \$\$\$

CARD TYPE	REACH	ELEVATION	DUSI COEF	CLOUD COVER	DRY BULB TEMP	WET BULB TEMP	AIM PRESSURE	WIND	SOLAR RAD ATENUAT.
TEMP/LCD	1	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	2	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	3	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	4	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	5	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	6	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	7	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	8	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
TEMP/LCD	9	92.90	0.06	0.20	25.00	20.00	1000.00	3.00	1.00
ENDATA5A	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



\$\$\$ DATA IYPE 6 (COEFICIENTES DE REACCIÓN PARA DESOXIGENACIÓN Y REAEREACIÓN) \$\$\$

CARD IYPE	REACH	K1	K3	SOD RATE	K2OPT	K2	COEQK2 ISIV COEF FOR OPT 8	OR OR	EXPQK2 SLOPE FOR OPT 8
REACT COEF	1	0 30	0 00	0 000	4	0 00	0 000		0 00000
REACT COEF	2	0 40	0 00	0 000	4	0 50	0 000		0 00000
REACT COEF	3	2 00	2 00	0 000	4	0 00	0 000		0 00000
REACT COEF	4	4 00	6 00	0 000	4	0 00	0 000		0 00000
REACT COEF	5	3 40	0 00	0 000	4	0 00	0 000		0 00000
REACT COEF	6	1 00	2 00	0 000	4	0 00	0 000		0 00000
REACT COEF	7	2 00	1 00	0 000	4	0 00	0 000		0 00000
REACT COEF	8	1 50	1 00	0 500	4	0 00	0 000		0 00000
REACT COEF	9	5 00	1 00	0 500	4	0 00	0 000		0 00000

\$\$\$ DATA IYPE 5A (CONSTANTES PARA NITRÓGENO Y FOSFORO) \$\$\$

CARD IYPE	REACH	CKNH2	SETNH2	CKNH3	SNH3	CKNO2	CKPORG	SETPORG	SE04
-----------	-------	-------	--------	-------	------	-------	--------	---------	------

\$\$\$ DAIA IYPE 6B (COEFICIENTES PARA ALGAS Y OTROS COEFICIENTES)

CARD IYPE	REACH	ALPHA0	ALGSET	EXCOEF	CK5 CKCOLI	CKANC	SETANC	SRCANC
ALG/OIHER COEF	1	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	2	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	3	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	4	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	5	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	6	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	7	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	8	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ALG/OIHER COEF	9	10 00	0 30	0 01	2 00	0 00	0 00	0 00
ENDATA6B	0	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

\$\$\$ DAIA IYPE 7 (CONDICIONES INICIALES) \$\$\$

CARD IYPE	REACH	TEMP	DO	BOI	CM-1	CM-2	CM-3	ANC	COLI
INITIAL COND-1	1	21 00	1 40	307 40	34 70	1 00	0 10	100 00	713 00
INITIAL COND-1	2	21 00	7 20	90 70	13 00	21 60	0 10	50 00	1 00
INITIAL COND-1	3	21 00	2 40	4 10	15 80	4 20	0 10	0 00	0 00
INITIAL COND-1	4	21 00	2 40	4 10	15 80	4 20	0 10	0 00	0 00
INITIAL COND-1	5	21 00	0 10	242 90	134 40	32 70	1 50	477 10	0 00
INITIAL COND-1	6	21 00	0 00	138 80	108 90	28 80	0 20	243 10	0 00
INITIAL COND-1	7	21 00	0 00	64 80	57 30	19 00	0 20	114 30	0 00
INITIAL COND-1	8	21 00	0 10	0 70	2 00	0 30	0 00	0 10	12 60
INITIAL COND-1	9	21 00	6 60	2 40	8 00	11 30	0 10	13 50	53 80
ENDATA7	0	0 00	0 00	0 00	0 00	0 20	0 00	0 00	0 00

DAIA IYPE 7A (CONDICIONES INICIALES PARA CLOROFILA A, NITRÓGENO Y FÓSFORO) \$\$\$

CARD IYPE	REACH	CHI-A	ORG-N	NH3-N	NO2-N	NO3-N	ORG-P	DIS-P
ENDATA7A	0	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

\$\$\$ DATA IYPE 8 (INCREMENTOS DE FLUJO POR FUENTES NO CONSIDERADAS EXPLÍCITAMENTE EN EL MODELO) \$\$\$

CARD IYPE	REACH	FLOW	TEMP	DO	BOI	CM-1	CM-2	CM-3	ANC	COLI
INCR INFLOW-1	1	-0 019	21 00	1 40	0 00	34 70	0 00	0 10	0 00	713 00
INCR INFLOW-1	2	1 963	21 00	7 20	90 00	0 00	0 00	0 10	50 00	1 00
INCR INFLOW-1	3	0 000	21 00	2 40	4 10	15 80	4 20	0 10	0 00	0 00
INCR INFLOW-1	4	-1 790	21 00	2 40	4 10	15 80	4 20	0 10	0 00	0 00
INCR INFLOW-1	5	-0 588	21 00	0 10	242 90	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
INCR INFLOW-1	6	0 064	21 00	0 00	138 80	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
INCR INFLOW-1	7	-0 012	21 00	0 00	64 80	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
INCR INFLOW-1	8	-0 446	21 00	0 10	0 70	0 00	0 00	0 00	0 00	12 60
INCR INFLOW-1	9	0 094	21 00	6 60	2 40	0 00	0 00	0 00	0 00	63 80
ENDATA8	0	0 000	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

\$\$\$ DATA IYPE 8A (CONDICIONES PARA LOS INCREMENTOS DE FLUJO PARA CLOROFILA A, NITRÓGENO, Y FÓSFORO) \$\$\$

CARD IYPE	REACH	CHI-A	ORG-N	NH3-N	NO2-N	NO3-N	ORG-P	DIS-P
ENDATA8A	0	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

\$\$\$ DATA IYPE 9 (CONFLUENCIAS) \$\$\$

CARD IYPE	JUNCTION ORDER AND IDEN1	UPSTRM	JUNCTION	TRIB
ENDATAI9	0	0	0	0

\$\$\$ DATA IYPE 10 (FUENTES DE ORIGEN) \$\$\$

CARD TYPE	HDWTR ORDER	NAME	FLOW	TEMP	D.O.	BOD	CM-1	CM-2	CM-3
HEADWTR-1	1	TESI-P COFR	0 01	21.00	5.30	41.40	22.60	0 00	0 10
ENDATAI0	0		0 00	0.00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

\$\$\$ DATA IYPE 10A (CONDICIONES DE ORIGEN PARA CLOROFILA, NITRÓGENO, FÓSFORO, COLIFORMES Y CONSTITUYENTES NO CONSERVATIVOS) \$\$\$

CARD IYPE	HDWTR ORDER	ANC	COLI	CHI-A	ORG-N	NH3-N	NO2-N	NO3-N	ORG-P	DIS-P
HEADWTR-2	1	27 00	1 38	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
ENDATAI0A	0	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

\$\$\$ DATA IYPE 11 (FUENTES PUNTUALES / CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES PUNTUALES) \$\$\$

CARD IYPE	POINT LOAD ORDER	NAME	EFF	FLOW	TEMP	D.O.	BOD	CM-1	CM-2	CM-3
POINTLD-1	1	ACUL+CONF_I+	0 00	0 01	21 00	1 90	423 70	50 00	80 00	0 20
POINTLD-1	2	MPAL. ACULCO	0 00	0 00	21 00	0 40	521 20	50 00	80 00	0 20
POINTLD-1	3	ARROYO NADO	0 00	0 03	21 00	6 80	71 00	6 00	10 00	0 10
POINTLD-1	4	ARROYO ZARCO	0 00	0 04	21 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-1	5	KIMBERLY CLA	0 00	0 17	21 00	0 00	60 00	45 70	10 00	0 00
POINTLD-1	6	LOMO DE TORO	0 00	-0 13	21 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-1	7	SJ RÍO I+II	0 00	0 09	21 00	0 00	286 80	232 60	30 00	1 60
POINTLD-1	8	PIISA	0 00	0 15	21 00	0 00	41 30	43 00	10 00	0 00
POINTLD-1	9	RASTRO	0 00	0 01	21 00	0 00	1000 00	1000 00	300 00	10 00
POINTLD-1	10	QUIMPRO	0 00	0 00	21 00	0 00	384 00	5 00	10 00	0 10
POINTLD-1	11	SJ RÍO III+	0 00	0 35	21 00	0 00	403 90	100 00	35 00	1 00
POINTLD-1	12	SPEDRO AHUAC	0 00	0 01	21 00	0 00	211 00	75 00	10 00	0 10
POINTLD-1	13	SPEDRO AHUAC	0 00	0 02	21 00	0 00	273 00	50 00	5 00	0 30
POINTLD-1	14	CERESO	0 00	0 00	21 00	0 00	121 00	25 00	0 00	0 20
POINTLD-1	15	DREN LA CULE	0 00	0 02	21 00	0 50	21 00	60 00	0 00	0 00
POINTLD-1	16	MPAL S.NICO	0 00	0 00	21 00	0 00	143 00	40 00	2 00	0 20
POINTLD-1	17	MPAL TEQUIS	0 00	0 00	21 00	0 00	502 00	125 00	0 00	0 20
POINTLD-1	18	MPAL TEQ II+	0 00	0 02	21 00	0 00	284 50	150 00	0 00	0 30
POINTLD-1	19	CLUB GOLF TE	0 00	0 02	21 00	0 00	52 00	20 00	1 00	0 05
POINTLD-1	20	GEISER Y BAI	0 00	0 02	21 00	3 40	24 00	4 50	5 00	0 05
ENDATAI1	0		0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

\$\$\$ DATA IYPE 11A (CARACTERÍSTICAS DE LAS DESCARGAS- CLOROFILA A, NITRÓGENO, FÓSFORO, COLIFORMES Y CONSTITUYENTE NO CONSERVATIVO SELECCIONADO) \$\$\$

CARD IYPE	POINT LOAD ORDER	ANC	COLI	CHI-A	ORG-N	NH3-N	NO2-N	NO3-N	ORG-P	DIS-P
POINTLD-2	1	229 30	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	2	300 60	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	3	46 60	1 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	4	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	5	257 60	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	6	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	7	500 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	8	0 00	4 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	9	6500 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	10	600 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	11	500 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	12	200 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	13	300 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	14	250 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	15	98 60	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	16	250 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	17	800 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	18	200 00	1000 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	19	50 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
POINTLD-2	20	50 00	18 90	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
ENDATAI1A	0	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

\*\*\*\*\* SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*\*  
 \*\* RESUMEN HIDRÁULICO \*\*

ELE ORD	RCH NUM	ELE NUM	BEGIN LOC KILO	END LOC KILO	FLOW CMS	POINT SRCE CMS	INCP FLOW CMS	VEL MPS	TPVL TIME DAY	DEPTH M	WIDTH M	VOLUME K-CU-M	BCITOM AREA K-SQ-M	K-SECT AREA SQ-M	DSFRSN COEF SQ-M/S
1	1	1	133.00	132.00	0.01	0.00	0.00	0.110	0.105	0.272	0.428	0.12	0.97	0.12	2.28
2	1	2	132.00	131.00	0.01	0.00	0.00	0.110	0.105	0.267	0.375	0.10	0.91	0.10	2.23
3	1	3	131.00	130.00	0.01	0.00	0.00	0.109	0.106	0.262	0.320	0.08	0.84	0.08	2.19
4	1	4	130.00	129.00	0.01	0.00	0.00	0.109	0.107	0.255	0.263	0.07	0.77	0.07	2.13
5	1	5	129.00	128.00	0.01	0.00	0.00	0.108	0.107	0.247	0.205	0.03	0.70	0.03	2.05
6	1	6	128.00	127.00	0.00	0.00	0.00	0.107	0.109	0.236	0.143	0.03	0.62	0.03	1.95
7	1	7	127.00	126.00	0.01	0.01	0.00	0.107	0.107	0.235	0.265	0.07	0.78	0.07	2.13
8	1	8	126.00	125.00	0.01	0.00	0.00	0.109	0.107	0.255	0.260	0.07	0.77	0.07	2.12
9	1	9	125.00	124.00	0.01	0.00	0.00	0.108	0.108	0.247	0.202	0.05	0.69	0.05	2.05
10	1	10	124.00	123.00	0.00	0.00	0.00	0.106	0.109	0.235	0.140	0.03	0.61	0.03	1.95
11	2	1	123.00	122.00	0.12	0.00	0.12	0.160	0.072	0.318	2.331	0.74	2.97	0.74	3.78
12	2	2	122.00	121.00	0.23	0.00	0.12	0.170	0.068	0.347	3.970	1.38	4.67	1.38	4.30
13	2	3	121.00	120.00	0.35	0.00	0.12	0.176	0.066	0.365	5.436	1.99	6.17	1.99	4.65
14	2	4	120.00	119.00	0.47	0.00	0.12	0.181	0.064	0.379	6.800	2.58	7.56	2.58	4.92
15	2	5	119.00	118.00	0.58	0.00	0.12	0.184	0.063	0.390	8.093	3.16	8.87	3.16	5.13
16	2	6	118.00	117.00	0.73	0.03	0.12	0.188	0.062	0.401	9.679	3.89	10.48	3.89	5.56
17	2	7	117.00	116.00	0.85	0.00	0.12	0.190	0.061	0.409	10.862	4.44	11.68	4.44	5.52
18	2	8	116.00	115.00	0.96	0.00	0.12	0.192	0.060	0.416	12.011	5.00	12.85	4.99	5.66
19	2	9	115.00	114.00	1.08	0.00	0.12	0.194	0.060	0.422	13.131	5.54	13.98	5.54	5.78
20	2	10	114.00	113.00	1.19	0.00	0.12	0.196	0.059	0.427	14.224	6.09	15.08	6.08	5.90
21	2	11	113.00	112.00	1.31	0.00	0.12	0.198	0.059	0.433	15.296	6.62	16.16	6.62	6.00
22	2	12	112.00	111.00	1.42	0.00	0.12	0.199	0.058	0.437	16.347	7.15	17.23	7.15	6.10
23	2	13	111.00	110.00	1.54	0.00	0.12	0.200	0.058	0.442	17.380	7.68	18.27	7.68	6.20
24	2	14	110.00	109.00	1.65	0.00	0.12	0.202	0.057	0.446	18.396	8.20	19.29	8.20	6.28
25	2	15	109.00	108.00	1.77	0.00	0.12	0.203	0.057	0.450	19.397	8.72	20.30	8.72	6.37
26	2	16	108.00	107.00	1.88	0.00	0.12	0.204	0.057	0.453	20.384	9.24	21.30	9.24	6.44
27	2	17	107.00	106.00	2.00	0.00	0.12	0.205	0.056	0.457	21.359	9.76	22.28	9.76	6.52
28	3	1	106.00	105.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
29	3	2	105.00	104.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
30	3	3	104.00	103.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
31	3	4	103.00	102.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
32	3	5	102.00	101.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
33	3	6	101.00	100.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
34	3	7	100.00	99.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
35	3	8	99.00	98.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
36	3	9	98.00	97.00	2.00	0.00	0.00	0.647	0.018	0.381	8.107	3.09	8.87	3.09	17.70
37	4	1	97.00	96.00	1.89	0.00	-0.13	0.559	0.021	0.481	6.991	3.36	7.95	3.36	18.57
38	4	2	96.00	95.00	1.80	0.04	-0.12	0.558	0.021	0.476	6.786	3.23	7.74	3.23	18.37
39	4	3	95.00	94.00	1.68	0.00	-0.12	0.556	0.021	0.469	6.466	3.03	7.40	3.03	18.05
40	4	4	94.00	93.00	1.56	0.00	-0.12	0.553	0.021	0.461	6.139	2.83	7.06	2.83	17.71
41	4	5	93.00	92.00	1.44	0.00	-0.12	0.550	0.021	0.452	5.805	2.63	6.71	2.63	17.36
42	4	6	92.00	91.00	1.33	0.00	-0.12	0.547	0.021	0.443	5.463	2.42	6.35	2.42	16.98
43	4	7	91.00	90.00	1.21	0.00	-0.12	0.544	0.021	0.434	5.111	2.22	5.98	2.22	16.57
44	4	8	90.00	89.00	1.09	0.00	-0.12	0.541	0.021	0.425	4.749	2.01	5.60	2.01	16.14
45	4	9	89.00	88.00	0.97	0.00	-0.12	0.537	0.022	0.412	4.375	1.80	5.20	1.80	15.66
46	4	10	88.00	87.00	0.85	0.00	-0.12	0.533	0.022	0.399	3.987	1.59	4.79	1.59	15.18
47	4	11	87.00	86.00	0.73	0.00	-0.12	0.528	0.022	0.385	3.593	1.38	4.36	1.38	14.57
48	4	12	86.00	85.00	0.61	0.00	-0.12	0.522	0.022	0.370	3.159	1.17	3.90	1.17	13.91
49	4	13	85.00	84.00	0.49	0.00	-0.12	0.515	0.022	0.351	2.709	0.95	3.41	0.95	13.16
50	4	14	84.00	83.00	0.37	0.00	-0.12	0.506	0.023	0.329	2.225	0.73	2.88	0.73	12.25
51	4	15	83.00	82.00	0.23	0.00	-0.12	0.494	0.023	0.301	1.692	0.51	2.29	0.51	11.09
52	5	1	82.00	81.00	0.39	0.17	-0.03	0.758	0.016	0.513	1.036	0.34	2.08	0.34	25.77
53	5	2	81.00	80.00	0.23	-0.13	-0.03	0.712	0.016	0.468	0.698	0.33	1.63	0.33	23.09
54	5	3	80.00	79.00	0.20	0.00	-0.03	0.708	0.016	0.455	0.631	0.29	1.54	0.29	22.44
55	5	4	79.00	78.00	0.17	0.00	-0.03	0.703	0.016	0.441	0.560	0.25	1.44	0.25	21.72
56	5	5	78.00	77.00	0.14	0.00	-0.03	0.697	0.017	0.425	0.487	0.21	1.34	0.21	20.89
57	5	6	77.00	76.00	0.20	0.09	-0.03	0.708	0.016	0.455	0.628	0.29	1.54	0.29	22.42
58	5	7	76.00	75.00	0.32	0.15	-0.03	0.722	0.016	0.499	0.895	0.45	1.89	0.45	24.74
59	5	8	75.00	74.00	0.29	0.00	-0.03	0.719	0.016	0.490	0.832	0.41	1.81	0.41	24.24
60	5	9	74.00	73.00	0.26	0.00	-0.04	0.716	0.016	0.480	0.768	0.37	1.73	0.37	23.71
61	5	10	73.00	72.00	0.25	0.01	-0.03	0.714	0.016	0.474	0.737	0.35	1.69	0.35	23.43
62	5	11	72.00	71.00	0.22	0.00	-0.03	0.710	0.016	0.463	0.670	0.31	1.60	0.31	22.82
63	5	12	71.00	70.00	0.19	0.00	-0.03	0.706	0.016	0.450	0.602	0.27	1.50	0.27	22.15
64	5	13	70.00	69.00	0.31	0.35	-0.03	0.736	0.016	0.547	1.263	0.69	2.36	0.69	27.23
65	5	14	69.00	68.00	0.48	0.00	-0.03	0.734	0.016	0.541	1.208	0.65	2.29	0.65	26.83
66	5	15	68.00	67.00	0.45	0.00	-0.03	0.732	0.016	0.534	1.151	0.62	2.22	0.62	26.54
67	5	16	67.00	66.00	0.43	0.01	-0.03	0.731	0.016	0.530	1.120	0.59	2.18	0.59	26.33
68	5	17	66.00	65.00	0.40	0.00	-0.03	0.729	0.016	0.523	1.062	0.56	2.11	0.56	25.94
69	5	18	65.00	64.00	0.38	0.00	-0.03	0.727	0.016	0.515	1.003	0.52	2.03	0.52	25.54
70	5	19	64.00	63.00	0.37	0.02	-0.03	0.726	0.016	0.512	0.984	0.50	2.01	0.50	25.40
71	5	20	63.00	62.00	0.34	0.00	-0.03	0.723	0.016	0.504	0.924	0.47	1.93	0.47	24.96
72	6	1	62.00	61.00	0.34	0.00	0.00	0.442	0.026	0.397	1.945	0.77	2.74	0.77	12.51
73	6	2	61.00	60.00	0.37	0.02	0.00	0.444	0.026	0.404	2.037	0.82	2.85	0.82	12.76
74	6	3	60.00	59.00	0.37	0.00	0.00	0.445	0.026	0.406	2.055	0.83	2.87	0.83	12.81
75	6	4	59.00	58.00	0.38	0.00	0.00	0.445	0.026	0.407	2.071	0.84	2.89	0.84	12.85
76	6	5	58.00	57.00	0.38	0.00	0.00	0.445	0.026	0.408	2.089	0.85	2.91	0.85	12.90
77	6	6	57.00	56.00	0.39	0.00	0.00	0.446	0.026	0.410	2.108	0.86	2.93	0.86	12.95
78	6	7	56.00	55.00	0.39	0.00	0.00	0.446	0.026	0.411	2.125	0.87	2.95	0.87	13.00
79	6	8	55.00	54.00	0.39	0.00	0.00	0.447	0.026	0.412	2.142	0.88	2.97	0.88	13.04
80	6	9	54.00	53.00	0.40	0.00	0.00	0.447	0.026	0.413	2.158	0.89	2.99	0.89	13.08
81	6	10	53.00	52.00	0.40	0.00	0.00	0.447							

\*\*\*\*\* SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*\*  
 \*\* RESUMEN HIDRÁULICO \*\*

ELF PRD	RCH NUM	ELE NUM	BEGIN LOC KILO	END LOC KILO	FLOW CMS	POINT SRCE CMS	INCP FLOW CMS	VEL MPS	TRVL TIME DA"	DEPTH M	WIDTH M	VOLUME K-CU-M	BOTTOM AREA K-SQ-M	X-SECT AREA SQ-M	DSFRSN COEF SQ-M/S
86	7	1	48.00	47.00	0.42	0.00	0.00	0.523	0.022	0.327	2.456	0.80	3.11	0.80	12.61
87	7	2	47.00	46.00	0.42	0.00	0.00	0.523	0.022	0.327	2.455	0.80	3.11	0.80	12.61
88	7	3	46.00	45.00	0.42	0.00	0.00	0.523	0.022	0.327	2.451	0.80	3.11	0.80	12.60
89	7	4	45.00	44.00	0.44	0.02	0.00	0.526	0.022	0.330	2.537	0.84	3.20	0.84	12.76
90	7	5	44.00	43.00	0.44	0.00	0.00	0.525	0.022	0.330	2.533	0.84	3.19	0.84	12.75
91	7	6	43.00	42.00	0.46	0.02	0.00	0.527	0.022	0.333	2.602	0.87	3.27	0.87	12.88
92	7	7	42.00	41.00	0.46	0.00	0.00	0.527	0.022	0.333	2.598	0.86	3.26	0.86	12.87
93	7	8	41.00	40.00	0.45	0.00	0.00	0.527	0.022	0.332	2.594	0.86	3.26	0.86	12.87
94	7	9	40.00	39.00	0.45	0.00	0.00	0.527	0.022	0.332	2.590	0.86	3.26	0.86	12.86
95	7	10	39.00	38.00	0.45	0.00	0.00	0.527	0.022	0.332	2.586	0.86	3.25	0.86	12.85
95	7	11	38.00	37.00	0.45	0.00	0.00	0.527	0.022	0.332	2.582	0.86	3.25	0.86	12.84
97	8	1	37.00	36.00	0.43	0.00	-0.02	0.436	0.027	0.500	1.967	0.98	2.97	0.98	14.96
98	8	2	36.00	35.00	0.41	0.00	-0.02	0.435	0.027	0.495	1.891	0.94	2.88	0.94	14.78
99	8	3	35.00	34.00	0.38	0.00	-0.02	0.433	0.027	0.490	1.813	0.89	2.79	0.89	14.59
100	8	4	34.00	33.00	0.36	0.00	-0.02	0.431	0.027	0.485	1.735	0.84	2.70	0.84	14.40
101	8	5	33.00	32.00	0.34	0.00	-0.02	0.429	0.027	0.479	1.655	0.79	2.61	0.79	14.19
102	8	6	32.00	31.00	0.32	0.00	-0.02	0.427	0.027	0.473	1.574	0.74	2.52	0.74	13.97
103	8	7	31.00	30.00	0.30	0.00	-0.02	0.424	0.027	0.466	1.491	0.70	2.43	0.70	13.74
104	8	8	30.00	29.00	0.27	0.00	-0.02	0.422	0.027	0.460	1.407	0.65	2.33	0.65	13.49
105	8	9	29.00	28.00	0.25	0.00	-0.02	0.419	0.028	0.452	1.321	0.60	2.23	0.60	13.23
106	8	10	28.00	27.00	0.23	0.00	-0.02	0.417	0.028	0.445	1.233	0.55	2.12	0.55	12.95
107	8	11	27.00	26.00	0.21	0.00	-0.02	0.413	0.028	0.436	1.143	0.50	2.02	0.50	12.65
108	8	12	26.00	25.00	0.18	0.00	-0.02	0.410	0.028	0.427	1.050	0.45	1.90	0.45	12.33
109	8	13	25.00	24.00	0.16	0.00	-0.02	0.406	0.029	0.417	0.954	0.40	1.79	0.40	11.97
110	8	14	24.00	23.00	0.14	0.00	-0.02	0.402	0.029	0.405	0.855	0.35	1.67	0.35	11.57
111	8	15	23.00	22.00	0.12	0.00	-0.02	0.397	0.029	0.392	0.751	0.29	1.54	0.29	11.11
112	8	16	22.00	21.00	0.09	0.00	-0.02	0.391	0.030	0.377	0.642	0.24	1.40	0.24	10.59
113	8	17	21.00	20.00	0.07	0.00	-0.02	0.383	0.030	0.358	0.526	0.19	1.24	0.19	9.95
114	8	18	20.00	19.00	0.05	0.00	-0.02	0.373	0.031	0.335	0.400	0.13	1.07	0.13	9.15
115	8	19	19.00	18.00	0.04	0.02	-0.02	0.369	0.031	0.327	0.365	0.12	1.02	0.12	8.95
116	8	20	18.00	17.00	0.02	0.00	-0.02	0.351	0.033	0.287	0.217	0.06	0.79	0.06	7.57
117	9	1	17.00	16.00	0.03	0.00	0.01	0.596	0.019	0.159	0.289	0.05	0.61	0.05	7.85
118	9	2	16.00	15.00	0.03	0.00	0.01	0.603	0.019	0.165	0.331	0.05	0.66	0.05	8.19
119	9	3	15.00	14.00	0.04	0.00	0.01	0.609	0.019	0.170	0.371	0.06	0.71	0.06	8.49
120	9	4	14.00	13.00	0.04	0.00	0.01	0.614	0.019	0.174	0.409	0.07	0.76	0.07	8.76
121	9	5	13.00	12.00	0.05	0.00	0.01	0.619	0.019	0.179	0.447	0.08	0.80	0.08	9.00
122	9	6	12.00	11.00	0.05	0.00	0.01	0.623	0.019	0.182	0.483	0.09	0.85	0.09	9.22
123	9	7	11.00	10.00	0.06	0.00	0.01	0.627	0.018	0.186	0.518	0.10	0.89	0.10	9.43
124	9	8	10.00	9.00	0.07	0.00	0.01	0.630	0.018	0.189	0.553	0.10	0.93	0.10	9.62
125	9	9	9.00	8.00	0.07	0.00	0.01	0.633	0.018	0.192	0.586	0.11	0.97	0.11	9.80
126	9	10	8.00	7.00	0.08	0.00	0.01	0.636	0.018	0.195	0.619	0.12	1.01	0.12	9.97
127	9	11	7.00	6.00	0.08	0.00	0.01	0.639	0.018	0.198	0.652	0.13	1.05	0.13	10.13
128	9	12	6.00	5.00	0.09	0.00	0.01	0.642	0.018	0.200	0.683	0.14	1.08	0.14	10.28
129	9	13	5.00	4.00	0.09	0.00	0.01	0.644	0.018	0.203	0.715	0.15	1.12	0.15	10.43
130	9	14	4.00	3.00	0.10	0.00	0.01	0.647	0.018	0.205	0.745	0.15	1.16	0.15	10.56
131	9	15	3.00	2.00	0.10	0.00	0.01	0.649	0.018	0.208	0.776	0.16	1.19	0.16	10.70
132	9	16	2.00	1.00	0.11	0.00	0.01	0.651	0.018	0.210	0.806	0.17	1.23	0.17	10.83
133	9	17	1.00	0.00	0.12	0.00	0.01	0.653	0.018	0.212	0.835	0.18	1.26	0.18	10.95

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

\*\*\*\* SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*  
 \*\* RESUMEN DE COEFICIENTES DE REACCIÓN \*\*

RCH NUM	ELE NUM	DO SAT MG/L	K2 OPT	OXYGN REAIR 1/DAY	BOD DECAY 1/DAY	BOD SETT 1/DAY	SOD RATE G/M2D	DESH DECAY 1/DAY	ORGN SETT 1/DAY	NH3 DECAY 1/DAY	NH3 SRCE MG/M2D	NO2 DECAY 1/DAY	ORGP DECAY 1/DAY	ORGE SETT 1/DAY	DISF SRCE MG/M2D	COLI DECAY 1/DAY	ANC DECAY 1/DAY	ANC SETT 1/DAY	ANC SRCE MG/M2D
1	1	8.91	4	13.84	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	2	8.91	4	14.04	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	3	8.91	4	14.50	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	4	8.91	4	15.08	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	5	8.91	4	15.84	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	6	8.91	4	16.94	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	7	8.91	4	16.49	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	8	8.91	4	15.41	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	9	8.91	4	15.89	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
1	10	8.91	4	17.01	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	1	8.91	4	15.50	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	2	8.91	4	12.54	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	3	8.91	4	11.38	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	4	8.91	4	10.70	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	5	8.91	4	10.22	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	6	8.91	4	9.82	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	7	8.91	4	9.50	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	8	8.91	4	9.27	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	9	8.91	4	9.07	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	10	8.91	4	8.90	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	11	8.91	4	8.74	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	12	8.91	4	8.61	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	13	8.91	4	8.48	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	14	8.91	4	8.37	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	15	8.91	4	8.27	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	16	8.91	4	8.17	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
2	17	8.91	4	8.08	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	1	8.91	4	16.17	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	2	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	3	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	4	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	5	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	6	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	7	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	8	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
3	9	8.91	4	24.29	2.09	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	1	8.91	4	19.31	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	2	8.91	4	14.44	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	3	8.91	4	14.76	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	4	8.91	4	15.17	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	5	8.91	4	15.63	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	6	8.91	4	16.15	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	7	8.91	4	16.72	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	8	8.91	4	17.38	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	9	8.91	4	18.15	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	10	8.91	4	19.05	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	11	8.91	4	20.13	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	12	8.91	4	21.47	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	13	8.91	4	23.20	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	14	8.91	4	25.58	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
4	15	8.91	4	29.17	4.19	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	1	8.91	4	23.09	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	2	8.91	4	16.27	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	3	8.91	4	18.14	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	4	8.91	4	19.07	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	5	8.91	4	20.23	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	6	8.91	4	19.73	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	7	8.91	4	17.22	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	8	8.91	4	16.10	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	9	8.91	4	16.67	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	10	8.91	4	17.13	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	11	8.91	4	17.69	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	12	8.91	4	18.51	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	13	8.91	4	16.25	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	14	8.91	4	13.68	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	15	8.91	4	13.97	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	16	8.91	4	14.21	3.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
5	17																		

\*\*\*\* SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*

\*\* RESUMEN DE COEFICIENTES DE REACCIÓN \*\*

PCH NUM	ELE NUM	DO SAT	K2 OPT	OXIGN REAIR 1/DAY	BOD DECAY 1/DAY	BOD SETT 1/DAY	SOD RATE G/M2D	ORGH DECAY 1/DAY	ORGN SETT 1/DAY	NH3 DECAY 1/DAY	NH3 SRCE MG/M2D	HCZ DECAY 1/DAY	ORGF DECAY 1/DAY	ORGP SETT 1/DAY	DISP SRCE MG/M2D	COLI DECAY 1/DAY	ANC DECAY 1/DAY	ANC SETT 1/DAY	ANC SRCE MG/M2D
7	1	8.91	4	21.90	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	2	8.91	4	27.87	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	3	8.91	4	27.83	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	4	8.91	4	27.70	2.09	1.02	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	5	8.91	4	27.50	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	6	8.91	4	27.36	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	7	8.91	4	27.21	2.09	1.02	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	8	8.91	4	27.23	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	9	8.91	4	27.25	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	10	8.91	4	27.27	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
7	11	8.91	4	27.29	2.09	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	1	8.91	4	19.29	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	2	8.91	4	11.36	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	3	8.91	4	11.54	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	4	8.91	4	11.74	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	5	8.91	4	11.96	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	6	8.91	4	12.20	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	7	8.91	4	12.45	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	8	8.91	4	12.74	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	9	8.91	4	13.05	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	10	8.91	4	13.40	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	11	8.91	4	13.80	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	12	8.91	4	14.25	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	13	8.91	4	14.78	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	14	8.91	4	15.40	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	15	8.91	4	16.16	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	16	8.91	4	17.12	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	17	8.91	4	18.39	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	18	8.91	4	20.24	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	19	8.91	4	21.75	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
8	20	8.91	4	24.72	1.57	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	1	8.91	4	71.73	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	2	8.91	4	112.77	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	3	8.91	4	106.67	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	4	8.91	4	101.73	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	5	8.91	4	97.60	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	6	8.91	4	94.08	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	7	8.91	4	91.03	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	8	8.91	4	88.34	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	9	8.91	4	85.95	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	10	8.91	4	83.80	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	11	8.91	4	81.86	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	12	8.91	4	80.08	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	13	8.91	4	78.46	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	14	8.91	4	76.95	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	15	8.91	4	75.56	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	16	8.91	4	74.27	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00
9	17	8.91	4	73.05	5.24	1.02	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.09	0.00	0.00	0.00

\*\*\*\* SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*  
 \*\* CALIDAD DEL AGUA \*\*

PCH NUM	ELC NUM	TEMP DEG-C	CM-1 SST mg/l	CM-2 GTA ml/l	CM-3 SSED mg/l	DC MG/L	BOC MG/L	ORGH MG/L	HH3N MG/L	NO2N MG/L	NO3N MG/L	SUM-N MG/L	ORGP MG/L	DIS-P MG/L	SUM-P MG/L	COLI #/100MI	ANC DOO mg/l	CHLA UG/L
1	1	21.00	22.60	0.00	0.10	6.61	40.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	27.00	0.00
1	2	21.00	22.60	0.00	0.10	7.20	38.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	27.00	0.00
1	3	21.00	22.60	0.00	0.10	7.50	37.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	27.00	0.00
1	4	21.00	22.60	0.00	0.10	7.47	36.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	27.00	0.00
1	5	21.00	22.60	0.01	0.10	7.80	35.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	27.03	0.00
1	6	21.00	22.85	0.72	0.10	7.82	38.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.17	28.83	0.00
1	7	21.00	39.22	48.53	0.16	2.85	345.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	534.29	149.88	0.00
1	8	21.00	41.22	54.35	0.17	0.94	304.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	526.11	177.75	0.00
1	9	21.00	41.21	54.34	0.17	0.60	295.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	440.36	177.72	0.00
1	10	21.00	40.63	53.57	0.17	1.00	285.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	367.45	173.93	0.00
2	1	21.00	1.43	1.89	0.10	6.30	95.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.93	54.43	0.00
2	2	21.00	0.74	0.97	0.10	5.85	90.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.42	52.28	0.00
2	3	21.00	0.49	0.65	0.10	5.46	88.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.16	51.53	0.00
2	4	21.00	0.37	0.49	0.10	5.16	86.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.03	51.16	0.00
2	5	21.00	0.31	0.41	0.10	4.91	85.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.35	50.92	0.00
2	6	21.00	0.51	0.77	0.10	4.77	83.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86	50.59	0.00
2	7	21.00	0.44	0.66	0.10	4.58	82.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.56	50.51	0.00
2	8	21.00	0.39	0.58	0.10	4.42	81.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	50.45	0.00
2	9	21.00	0.35	0.52	0.10	4.30	80.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	50.40	0.00
2	10	21.00	0.31	0.47	0.10	4.20	79.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	50.36	0.00
2	11	21.00	0.29	0.43	0.10	4.12	78.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	50.33	0.00
2	12	21.00	0.26	0.40	0.10	4.05	77.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	50.30	0.00
2	13	21.00	0.24	0.37	0.10	3.99	76.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	50.28	0.00
2	14	21.00	0.23	0.34	0.10	3.94	75.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	50.26	0.00
2	15	21.00	0.21	0.32	0.10	3.90	75.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	50.24	0.00
2	16	21.00	0.20	0.30	0.10	3.86	74.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	50.23	0.00
2	17	21.00	0.19	0.28	0.10	3.79	73.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	50.22	0.00
3	1	21.00	0.19	0.28	0.10	1.23	63.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	50.22	0.00
3	2	21.00	0.19	0.28	0.10	1.31	59.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	50.22	0.00
3	3	21.00	0.19	0.28	0.10	1.51	55.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	50.22	0.00
3	4	21.00	0.19	0.28	0.10	1.80	51.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	50.22	0.00
3	5	21.00	0.19	0.28	0.10	2.13	47.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	50.22	0.00
3	6	21.00	0.19	0.28	0.10	2.49	44.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	50.22	0.00
3	7	21.00	0.19	0.28	0.10	2.86	41.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	50.22	0.00
3	8	21.00	0.19	0.28	0.10	3.22	38.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	50.22	0.00
3	9	21.00	0.19	0.28	0.10	3.55	35.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	50.21	0.00
4	1	21.00	0.19	0.28	0.10	2.43	29.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	50.18	0.00
4	2	21.00	0.18	0.28	0.10	1.56	24.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	49.13	0.00
4	3	21.00	0.18	0.28	0.10	1.33	20.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	49.13	0.00
4	4	21.00	0.18	0.28	0.10	1.53	16.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	49.13	0.00
4	5	21.00	0.18	0.28	0.10	2.00	13.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	49.13	0.00
4	6	21.00	0.18	0.28	0.10	2.63	11.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	49.13	0.00
4	7	21.00	0.18	0.28	0.10	3.34	9.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	49.13	0.00
4	8	21.00	0.18	0.28	0.10	4.07	7.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	49.13	0.00
4	9	21.00	0.18	0.28	0.10	4.78	6.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	49.13	0.00
4	10	21.00	0.18	0.28	0.10	5.45	5.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	49.13	0.00
4	11	21.00	0.18	0.28	0.10	6.06	4.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	49.13	0.00
4	12	21.00	0.18	0.28	0.10	6.60	3.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	49.13	0.00
4	13	21.00	0.18	0.28	0.10	7.08	3.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	49.13	0.00
4	14	21.00	0.19	0.28	0.10	7.49	2.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	49.17	0.00
4	15	21.00	0.52	0.35	0.10	7.78	2.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	50.56	0.00
5	1	21.00	18.50	4.19	0.06	4.37	24.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	133.03	0.00
5	2	21.00	18.50	4.19	0.06	3.89	23.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	133.03	0.00
5	3	21.00	18.50	4.19	0.06	3.62	21.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	133.03	0.00
5	4	21.00	18.56	4.20	0.06	3.53	20.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	133.13	0.00
5	5	21.00	20.61	4.44	0.07	3.39	22.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	136.61	0.00
5	6	21.00	98.06	13.81	0.63	0.00	113.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	361.08	267.66	0.00
5	7	21.00	75.13	12.22	0.37	0.00	80.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	207.11	156.21	0.00
5	8	21.00	75.18	12.24	0.37	0.00	76.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	200.71	156.53	0.00
5	9	21.00	76.64	12.69	0.38	0.00	73.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	195.69	166.58	0.00
5	10	21.00	124.84	27.69	0.88	0.00	115.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	230.50	497.20	0.00
5	11	21.00	124.82	27.69	0.88	0.00	109.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	223.76	497.20	0.00
5	12	21.00	124.18	27.79	0.89	0.00	104.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	231.30	497.43	0.00
5	13	21.00	108.88	32.35	0.96	0.00	285.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	702.22	499.05	0.00
5	14	21.00	108.88	32.35	0.96	0.00	270.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	680.45	499.05	0.00
5	15	21.00	108.85	32.33	0.96	0.00	256.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	658.80	498.77	0.00
5	16	21.00	107.93	31.73	0.93	0.00	242.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	621.31	490.67	0.00
5	17	21.00	107.93	31.72	0.93	0.00	229.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	602.00	490.66	0.00
5	18	21.00	107.84	31.66	0.93	0.00												

\*\*\*\* SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*

\*\* CALIDAD DEL AGUA \*\*

RCH NUM	ELE NUM	TEMP DEG-C	CM-1 SST mg/l	CM-2 GTA mg/l	CM-3 SSED mg/l	DC MG/L	BOI MG/L	ORGN MG/L	INH3N MG/L	NO2N MG/L	NO3N MG/L	SUM-N MG/L	ORGF MG/L	PIS-I MG/L	SUM-P MG/L	COLI #/100ML	ANC CON mg/l	CHIA UG/L
7	1	21.00	86.76	24.25	0.72	0.58	63.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	216.30	389.08	0.00
7	2	21.00	86.83	24.21	0.72	1.23	60.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	208.16	390.16	0.00
7	3	21.00	86.91	24.18	0.72	1.79	56.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	199.80	389.94	0.00
7	4	21.00	89.98	23.00	0.70	1.78	63.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	228.46	380.39	0.00
7	5	21.00	89.91	22.98	0.70	1.98	59.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	218.23	380.39	0.00
7	6	21.00	87.23	22.14	0.67	2.20	55.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	200.79	367.69	0.00
7	7	21.00	87.23	22.14	0.67	2.53	51.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	191.99	367.69	0.00
7	8	21.00	87.23	22.14	0.67	2.88	48.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	183.56	367.69	0.00
7	9	21.00	87.23	22.14	0.67	3.23	45.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	175.51	367.69	0.00
7	10	21.00	87.23	22.14	0.67	3.57	42.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	167.80	367.69	0.00
7	11	21.00	87.23	22.14	0.67	3.90	39.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	160.43	367.69	0.00
8	1	21.00	87.23	22.14	0.67	4.03	37.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	152.83	367.69	0.00
8	2	21.00	87.23	22.14	0.67	3.50	35.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	144.98	367.69	0.00
8	3	21.00	87.23	22.14	0.67	3.21	32.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	137.52	367.69	0.00
8	4	21.00	87.23	22.14	0.67	3.10	30.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	130.43	367.69	0.00
8	5	21.00	87.23	22.14	0.67	3.14	28.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	123.68	367.69	0.00
8	6	21.00	87.23	22.14	0.67	3.27	27.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	117.27	367.69	0.00
8	7	21.00	87.23	22.14	0.67	3.47	25.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	111.17	367.69	0.00
8	8	21.00	87.23	22.14	0.67	3.73	23.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	105.38	367.69	0.00
8	9	21.00	87.23	22.14	0.67	4.02	22.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.87	367.69	0.00
8	10	21.00	87.23	22.14	0.67	4.33	20.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.64	367.69	0.00
8	11	21.00	87.23	22.14	0.67	4.65	19.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.67	367.69	0.00
8	12	21.00	87.23	22.14	0.67	4.98	18.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.95	367.69	0.00
8	13	21.00	87.23	22.14	0.67	5.30	17.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.47	367.69	0.00
8	14	21.00	87.23	22.14	0.67	5.62	15.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	76.22	367.69	0.00
8	15	21.00	87.23	22.14	0.67	5.92	14.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.20	367.69	0.00
8	16	21.00	87.23	22.14	0.67	6.22	13.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.40	367.69	0.00
8	17	21.00	87.22	22.14	0.67	6.52	13.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.83	367.65	0.00
8	18	21.00	86.81	22.05	0.67	6.79	12.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	61.33	366.11	0.00
8	19	21.00	86.71	17.89	0.52	6.37	14.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.72	288.32	0.00
8	20	21.00	66.51	17.83	0.52	6.78	13.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46.46	288.32	0.00
9	1	21.00	33.15	14.25	0.41	7.39	9.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.67	230.17	0.00
9	2	21.00	44.25	11.87	0.34	7.97	7.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.58	191.54	0.00
9	3	21.00	37.91	10.16	0.29	8.18	6.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.94	164.16	0.00
9	4	21.00	33.15	8.89	0.26	8.29	5.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.99	143.59	0.00
9	5	21.00	29.46	7.90	0.23	8.36	4.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.83	127.59	0.00
9	6	21.00	26.51	7.11	0.21	8.41	3.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.53	114.80	0.00
9	7	21.00	24.09	6.46	0.19	8.45	3.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.14	104.34	0.00
9	8	21.00	22.08	5.92	0.17	8.49	2.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.69	95.63	0.00
9	9	21.00	20.38	5.46	0.16	8.51	2.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.19	86.26	0.00
9	10	21.00	18.92	5.07	0.15	8.54	2.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46.66	81.65	0.00
9	11	21.00	17.66	4.74	0.14	8.56	2.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46.11	76.48	0.00
9	12	21.00	16.55	4.44	0.13	8.58	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.55	71.59	0.00
9	13	21.00	15.58	4.18	0.12	8.59	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.98	67.47	0.00
9	14	21.00	14.71	3.95	0.11	8.61	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.41	63.72	0.00
9	15	21.00	13.94	3.74	0.11	8.62	1.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	43.84	60.35	0.00
9	16	21.00	13.24	3.55	0.10	8.63	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	43.26	57.34	0.00
9	17	21.00	12.63	3.39	0.10	8.64	1.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.71	54.59	0.00



\*\*\*\* SIMULACION EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*  
 \*\* DATOS DE OXIGENO DISUELTO \*\*

ELE ORD	RCH NUM	ELE NUM	TEMP DEG-C	LC SAT MG/L	DO MG/L	DO DEF MG/L	CAM INPUT MG/L	NIT INHIB FACT	COMPONENTS OF DISSOLVED OXYGEN MASS BALANCE (MG/L-DAY)						
									F-ENCTN INPUT	OXYGEN REAIR	C-BOE	SOI	NET P-F	NH3-F	NO2-N
1	1	1	21.00	8.91	6.61	2.31	0.00	0.00	48.68	31.92	-12.62	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	2	21.00	8.91	7.20	1.71	0.00	0.00	-11.49	24.06	-12.24	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	3	21.00	8.91	7.50	1.41	0.00	0.00	-14.31	20.50	-11.88	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1	4	21.00	8.91	7.67	1.24	0.00	0.00	-18.24	18.70	-11.53	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1	5	21.00	8.91	7.80	1.12	0.00	0.00	-24.62	17.73	-11.22	0.00	0.00	0.00	0.00
6	1	6	21.00	8.91	7.82	1.10	0.00	0.00	-36.96	18.39	-11.95	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1	7	21.00	8.91	2.85	6.07	0.00	0.00	6.86	100.09	-83.39	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1	8	21.00	8.91	0.94	7.97	0.00	0.00	-1.38	122.86	-95.67	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1	9	21.00	8.91	0.60	8.32	0.00	0.00	-1.92	132.15	-92.94	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1	10	21.00	8.91	1.00	7.92	0.00	0.00	-4.84	134.74	-89.58	0.00	0.00	0.00	0.00
11	2	1	21.00	8.91	6.30	2.61	0.00	0.00	96.81	40.50	-39.95	0.00	0.00	0.00	0.00
12	2	2	21.00	8.91	5.85	3.07	0.00	0.00	52.11	38.48	-39.02	0.00	0.00	0.00	0.00
13	2	3	21.00	8.91	5.46	3.44	0.00	0.00	36.15	39.28	-37.05	0.00	0.00	0.00	0.00
14	2	4	21.00	8.91	5.16	3.76	0.00	0.00	27.87	40.20	-36.35	0.00	0.00	0.00	0.00
15	2	5	21.00	8.91	4.91	4.00	0.00	0.00	22.75	40.91	-35.71	0.00	0.00	0.00	0.00
16	2	6	21.00	8.91	4.77	4.14	0.00	0.00	23.12	40.68	-34.98	0.00	0.00	0.00	0.00
17	2	7	21.00	8.91	4.38	4.34	0.00	0.00	16.16	41.22	-34.52	0.00	0.00	0.00	0.00
18	2	8	21.00	8.91	4.42	4.49	0.00	0.00	14.38	41.64	-34.09	0.00	0.00	0.00	0.00
19	2	9	21.00	8.91	4.30	4.61	0.00	0.00	12.96	41.86	-33.68	0.00	0.00	0.00	0.00
20	2	10	21.00	8.91	4.20	4.71	0.00	0.00	11.81	41.95	-33.28	0.00	0.00	0.00	0.00
21	2	11	21.00	8.91	4.12	4.80	0.00	0.00	10.85	41.95	-32.90	0.00	0.00	0.00	0.00
22	2	12	21.00	8.91	4.05	4.87	0.00	0.00	10.05	41.89	-32.52	0.00	0.00	0.00	0.00
23	2	13	21.00	8.91	3.99	4.92	0.00	0.00	9.36	41.77	-32.16	0.00	0.00	0.00	0.00
24	2	14	21.00	8.91	3.94	4.97	0.00	0.00	8.76	41.63	-31.81	0.00	0.00	0.00	0.00
25	2	15	21.00	8.91	3.90	5.01	0.00	0.00	8.23	41.45	-31.46	0.00	0.00	0.00	0.00
26	2	16	21.00	8.91	3.86	5.05	0.00	0.00	7.77	41.26	-31.12	0.00	0.00	0.00	0.00
27	2	17	21.00	8.91	3.79	5.13	0.00	0.00	7.36	41.42	-30.68	0.00	0.00	0.00	0.00
28	3	1	21.00	8.91	1.23	7.68	0.00	0.00	0.00	124.15	-132.83	0.00	0.00	0.00	0.00
29	3	2	21.00	8.91	1.31	7.61	0.00	0.00	0.00	184.84	-123.71	0.00	0.00	0.00	0.00
30	3	3	21.00	8.91	1.31	7.40	0.00	0.00	0.00	179.87	-115.19	0.00	0.00	0.00	0.00
31	3	4	21.00	8.91	1.80	7.12	0.00	0.00	0.00	172.91	-107.27	0.00	0.00	0.00	0.00
32	3	5	21.00	8.91	2.13	6.78	0.00	0.00	0.00	164.80	-99.88	0.00	0.00	0.00	0.00
33	3	6	21.00	8.91	2.49	6.43	0.00	0.00	0.00	156.11	-93.01	0.00	0.00	0.00	0.00
34	3	7	21.00	8.91	2.86	6.06	0.00	0.00	0.00	147.21	-86.61	0.00	0.00	0.00	0.00
35	3	8	21.00	8.91	3.22	5.70	0.00	0.00	0.00	138.38	-80.64	0.00	0.00	0.00	0.00
36	3	9	21.00	8.91	3.55	5.36	0.00	0.00	0.00	130.34	-74.92	0.00	0.00	0.00	0.00
37	4	1	21.00	8.91	2.43	6.46	0.00	0.00	-7.52	124.78	-125.30	0.00	0.00	0.00	0.00
38	4	2	21.00	8.91	1.56	7.35	0.00	0.00	-4.99	106.20	-102.13	0.00	0.00	0.00	0.00
39	4	3	21.00	8.91	1.33	7.58	0.00	0.00	-4.54	111.88	-94.63	0.00	0.00	0.00	0.00
40	4	4	21.00	8.91	1.33	7.38	0.00	0.00	-5.58	112.03	-70.14	0.00	0.00	0.00	0.00
41	4	5	21.00	8.91	2.00	6.91	0.00	0.00	-7.86	108.07	-58.10	0.00	0.00	0.00	0.00
42	4	6	21.00	8.91	2.63	6.28	0.00	0.00	-11.20	101.45	-48.11	0.00	0.00	0.00	0.00
43	4	7	21.00	8.91	3.34	5.58	0.00	0.00	-15.34	93.24	-39.82	0.00	0.00	0.00	0.00
44	4	8	21.00	8.91	4.07	4.85	0.00	0.00	-20.87	84.24	-32.96	0.00	0.00	0.00	0.00
45	4	9	21.00	8.91	4.78	4.13	0.00	0.00	-27.35	75.03	-27.27	0.00	0.00	0.00	0.00
46	4	10	21.00	8.91	5.45	3.47	0.00	0.00	-35.27	66.02	-22.55	0.00	0.00	0.00	0.00
47	4	11	21.00	8.91	6.06	2.83	0.00	0.00	-45.22	57.49	-18.67	0.00	0.00	0.00	0.00
48	4	12	21.00	8.91	6.60	2.31	0.00	0.00	-58.29	49.63	-15.43	0.00	0.00	0.00	0.00
49	4	13	21.00	8.91	7.08	1.83	0.00	0.00	-76.58	42.55	-12.80	0.00	0.00	0.00	0.00
50	4	14	21.00	8.91	7.49	1.42	0.00	0.00	-105.47	35.40	-10.65	0.00	0.00	0.00	0.00
51	4	15	21.00	8.91	7.78	1.14	0.00	0.00	-157.55	33.24	-10.28	0.00	0.00	0.00	0.00
52	5	1	21.00	8.91	4.37	4.34	0.00	0.00	-20.65	104.92	-85.83	0.00	0.00	0.00	0.00
53	5	2	21.00	8.91	3.89	5.03	0.00	0.00	-163.91	81.75	-82.09	0.00	0.00	0.00	0.00
54	5	3	21.00	8.91	3.62	5.29	0.00	0.00	-32.02	96.04	-77.87	0.00	0.00	0.00	0.00
55	5	4	21.00	8.91	3.53	5.38	0.00	0.00	-36.27	102.67	-74.15	0.00	0.00	0.00	0.00
56	5	5	21.00	8.91	3.39	5.52	0.00	0.00	-41.59	111.70	-78.64	0.00	0.00	0.00	0.00
57	5	6	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	175.91	-405.10	0.00	0.00	0.00	0.00
58	5	7	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	153.49	-285.31	0.00	0.00	0.00	0.00
59	5	8	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	143.54	-270.71	0.00	0.00	0.00	0.00
60	5	9	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	148.58	-261.45	0.00	0.00	0.00	0.00
61	5	10	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	152.74	-411.84	0.00	0.00	0.00	0.00
62	5	11	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	157.60	-331.15	0.00	0.00	0.00	0.00
63	5	12	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	154.98	-330.02	0.00	0.00	0.00	0.00
64	5	13	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	144.85	-1015.09	0.00	0.00	0.00	0.00
65	5	14	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	121.97	-962.80	0.00	0.00	0.00	0.00
66	5	15	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	124.56	-913.06	0.00	0.00	0.00	0.00
67	5	16	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	126.72	-862.40	0.00	0.00	0.00	0.00
68	5	17	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	129.08	-817.92	0.00	0.00	0.00	0.00
69	5	18	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	132.34	-776.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	5	19	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	134.63	-745.94	0.00	0.00	0.00	0.00
71	5	20	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	137.17	-706.92	0.00	0.00	0.00	0.00
72	6	1	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	147.18	-194.32	0.00	0.00	0.00	0.00
73	6	2	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	1.05	152.99	-171.35	0.00	0.00	0.00	0.00
74	6	3	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	150.35	-158.37	0.00	0.00	0.00	0.00
75	6	4	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	149.56	-146.51	0.00	0.00	0.00	0.00
76	6	5	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	148.79	-135.67	0.00	0.00	0.00	0.00
77	6	6	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	147.95	-125.80	0.00	0.00	0.00	0.00
78	6	7	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	147.14	-116.73	0.00	0.00	0.00	0.00

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

\*\*\*\* SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO \*\*\*\*  
 \*\* DATOS DE OXÍGENO DISUELTTO \*\*

ELE ORD	RCH NUM	ELE NUM	TEMP LEG-C	DO			LO DEF MG/L	LAM INPUT MG/L	NIT INHIB FACT	COMPONENTS OF DISSOLVED OXYGEN MASS BALANCE (MG/L-DAY)					
				SAT MG/L	DO MG/L	DO MG/L				F-FUNCTN INPUT	OXIGEN REAIR	C-BOD	SOE	NET P-R	NH3-N
79	6	8	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	146.41	-108.43	0.00	0.00	0.00	0.00
80	6	9	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	145.69	-100.84	0.00	0.00	0.00	0.00
81	5	10	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	144.99	-93.88	0.00	0.00	0.00	0.00
82	6	11	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	144.29	-87.51	0.00	0.00	0.00	0.00
83	6	12	21.00	8.91	0.00	8.91	0.00	0.00	0.00	143.61	-81.67	0.00	0.00	0.00	0.00
84	6	13	21.00	8.91	0.25	8.67	0.00	0.00	0.00	138.94	-76.31	0.00	0.00	0.00	0.00
85	6	14	21.00	8.91	0.85	8.07	0.00	0.00	0.00	128.78	-71.39	0.00	0.00	0.00	0.00
86	7	1	21.00	8.91	0.58	8.33	0.00	0.00	-0.06	182.49	-132.96	0.00	0.00	0.00	0.00
87	7	2	21.00	8.91	1.23	7.68	0.00	0.00	-0.13	214.11	-126.01	0.00	0.00	0.00	0.00
88	7	3	21.00	8.91	1.79	7.13	0.00	0.00	-0.19	198.81	-118.38	0.00	0.00	0.00	0.00
89	7	4	21.00	8.91	1.78	7.14	0.00	0.00	-0.18	197.70	-132.72	0.00	0.00	0.00	0.00
90	7	5	21.00	8.91	1.98	6.94	0.00	0.00	-0.21	190.82	-124.20	0.00	0.00	0.00	0.00
91	7	6	21.00	8.91	2.20	6.71	0.00	0.00	-0.22	183.59	-115.84	0.00	0.00	0.00	0.00
92	7	7	21.00	8.91	2.53	6.38	0.00	0.00	-0.26	173.66	-108.41	0.00	0.00	0.00	0.00
93	7	8	21.00	8.91	2.88	6.03	0.00	0.00	-0.29	164.34	-101.51	0.00	0.00	0.00	0.00
94	7	9	21.00	8.91	3.23	5.69	0.00	0.00	-0.33	154.95	-95.02	0.00	0.00	0.00	0.00
95	7	10	21.00	8.91	3.57	5.34	0.00	0.00	-0.36	145.73	-88.94	0.00	0.00	0.00	0.00
96	7	11	21.00	8.91	3.90	5.02	0.00	0.00	-0.40	136.93	-83.26	0.00	0.00	0.00	0.00
97	8	1	21.00	8.91	4.03	4.89	0.00	0.00	-7.89	94.21	-58.83	-1.06	0.00	0.00	0.00
98	8	2	21.00	8.91	3.50	5.42	0.00	0.00	-7.20	61.51	-55.13	-1.07	0.00	0.00	0.00
99	8	3	21.00	8.91	3.21	5.70	0.00	0.00	-6.96	65.85	-51.66	-1.08	0.00	0.00	0.00
100	8	4	21.00	8.91	3.10	5.81	0.00	0.00	-7.11	68.24	-48.40	-1.09	0.00	0.00	0.00
101	8	5	21.00	8.91	3.14	5.78	0.00	0.00	-7.52	69.13	-45.34	-1.11	0.00	0.00	0.00
102	8	6	21.00	8.91	3.27	5.65	0.00	0.00	-8.46	68.87	-42.16	-1.12	0.00	0.00	0.00
103	8	7	21.00	8.91	3.47	5.44	0.00	0.00	-9.52	67.75	-39.75	-1.14	0.00	0.00	0.00
104	8	8	21.00	8.91	3.73	5.18	0.00	0.00	-11.11	66.03	-37.22	-1.15	0.00	0.00	0.00
105	8	9	21.00	8.91	4.02	4.89	0.00	0.00	-12.95	63.87	-34.84	-1.17	0.00	0.00	0.00
106	8	10	21.00	8.91	4.33	4.58	0.00	0.00	-15.23	61.42	-32.61	-1.19	0.00	0.00	0.00
107	8	11	21.00	8.91	4.65	4.26	0.00	0.00	-17.99	58.81	-30.52	-1.22	0.00	0.00	0.00
108	8	12	21.00	8.91	4.98	3.94	0.00	0.00	-21.40	56.12	-28.55	-1.24	0.00	0.00	0.00
109	8	13	21.00	8.91	5.30	3.62	0.00	0.00	-25.69	53.43	-26.71	-1.27	0.00	0.00	0.00
110	8	14	21.00	8.91	5.62	3.30	0.00	0.00	-31.24	50.82	-24.99	-1.31	0.00	0.00	0.00
111	8	15	21.00	8.91	5.92	2.99	0.00	0.00	-38.76	48.34	-23.37	-1.36	0.00	0.00	0.00
112	8	16	21.00	8.91	6.22	2.69	0.00	0.00	-49.56	46.07	-21.87	-1.41	0.00	0.00	0.00
113	8	17	21.00	8.91	6.52	2.40	0.00	0.00	-66.58	44.12	-20.48	-1.48	0.00	0.00	0.00
114	8	18	21.00	8.91	6.79	2.12	0.00	0.00	-97.75	42.97	-19.28	-1.58	0.00	0.00	0.00
115	8	19	21.00	8.91	6.37	2.33	0.00	0.00	-12.17	55.42	-22.48	-1.62	0.00	0.00	0.00
116	8	20	21.00	8.91	5.78	2.14	0.00	0.00	-210.32	52.79	-21.12	-1.85	0.00	0.00	0.00
117	9	1	21.00	8.91	7.39	1.53	0.00	0.00	68.53	109.47	-31.46	-3.34	0.00	0.00	0.00
118	9	2	21.00	8.91	7.97	0.95	0.00	0.00	57.70	105.71	-40.48	-3.22	0.00	0.00	0.00
119	9	3	21.00	8.91	8.18	0.73	0.00	0.00	49.90	77.86	-32.95	-3.12	0.00	0.00	0.00
120	9	4	21.00	8.91	8.29	0.62	0.00	0.00	44.00	63.26	-27.28	-3.04	0.00	0.00	0.00
121	9	5	21.00	8.91	8.36	0.55	0.00	0.00	39.38	53.98	-23.69	-2.97	0.00	0.00	0.00
122	9	6	21.00	8.91	8.41	0.50	0.00	0.00	35.67	47.35	-19.84	-2.91	0.00	0.00	0.00
123	9	7	21.00	8.91	8.43	0.45	0.00	0.00	32.61	42.04	-17.27	-2.85	0.00	0.00	0.00
124	9	8	21.00	8.91	8.49	0.43	0.00	0.00	30.05	37.84	-15.20	-2.80	0.00	0.00	0.00
125	9	9	21.00	8.91	8.51	0.40	0.00	0.00	27.88	34.29	-13.51	-2.76	0.00	0.00	0.00
126	9	10	21.00	8.91	8.54	0.38	0.00	0.00	25.00	31.50	-12.13	-2.72	0.00	0.00	0.00
127	9	11	21.00	8.91	8.56	0.35	0.00	0.00	24.37	29.05	-10.95	-2.68	0.00	0.00	0.00
128	9	12	21.00	8.91	8.58	0.34	0.00	0.00	22.94	26.96	-9.96	-2.64	0.00	0.00	0.00
129	9	13	21.00	8.91	8.59	0.32	0.00	0.00	21.67	25.15	-9.12	-2.61	0.00	0.00	0.00
130	9	14	21.00	8.91	8.61	0.31	0.00	0.00	20.54	23.52	-8.39	-2.58	0.00	0.00	0.00
131	9	15	21.00	8.91	8.62	0.29	0.00	0.00	19.52	22.31	-7.77	-2.55	0.00	0.00	0.00
132	9	16	21.00	8.91	8.63	0.28	0.00	0.00	18.60	20.99	-7.23	-2.53	0.00	0.00	0.00
133	9	17	21.00	8.91	8.64	0.27	0.00	0.00	17.77	19.94	-6.75	-2.50	0.00	0.00	0.00

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN