



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS SOBRE
MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN DE
MERCURIO EN RÍOS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

T E S I S
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO INTEGRADO**

PRESENTA: JOAQUINA FLORES CABALLERO

**DIRECTOR DE TESIS: DR. MIGUEL ANGEL BARRÓN MEZA
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA AZCAPOTZALCO**

CODIRECTOR: M. EN C. JUAN MANUEL SÁNCHEZ NÚÑEZ

MÉXICO D. F., A 17 DE JUNIO DE 2005



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION
ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 13:00 horas del día 20 del mes de Mayo del 2005 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del CIEMAD-IPN para examinar la tesis de grado titulada:
"SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN DE MERCURIO EN RÍOS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL".

Presentada por la alumna:

Flores
Apellido paterno

Caballero
materno

Joaquina
nombre(s)

Con registro:

B	9	8	1	1	5	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

Maestro en Ciencias con especialidad en Medio Ambiente y Desarrollo Integrado

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Miguel A. Barrón Meza

Dr. Miguel Angel Barrón Meza

[Signature]
Dr. Adolfo Mejía Ponce de León

[Signature]
Dra. Minerva Rebollar Plata

[Signature]
M. en C. Ma. de la Luz Valderrábano Almegua

[Signature]
Dr. Pedro Lina Manjarrez

Codirector de tesis

[Signature]
M. en C. Juan Manuel Sánchez Núñez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Adolfo Mejía Ponce de León



SECRETARIA DE EDUCACION PUBLICA
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CIEMAD
DIRECCION

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 13 del mes de Junio del año 2005, la que suscribe Joaquina Flores Caballero alumna del programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Medio Ambiente y Desarrollo Integrado con número de registro B981158, adscrita al CIEMAD-IPN, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección del Dr. Miguel Ángel Barrón Meza y cede los derechos del trabajo intitulado “Simulación Numérica de la Dispersión de Mercurio en Ríos Mediante Dinámica de Fluidos Computacional” al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección electrónica, jfcaball@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente



Joaquina Flores Caballero

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS

A MIS PADRES, POR SER Y ESTAR

A mi hermanita ISRA y mi sobrinita AMBAR por su cariño y ternura.

A mis AMIGOS, que llevan consigo una parte de mi corazón:

Rubén Hernández Tovar

Hugo Hernández Maldonado

Alaide González Leche

Y Ana Luisa

A mi Alma Mater, el Instituto Politécnico Nacional.

Al M. en C. Alfredo Ramírez Treviño por su amistad, sus valiosas observaciones, sugerencias y apoyo incondicional.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, particularmente al área de materiales por otorgarme las facilidades y recursos para la elaboración de esta tesis, que se tradujo en espacio, infraestructura, equipo, materiales, etc., muy especialmente, al Coordinador del área, Dr. Antonio De Ita de la Torre y al director de la tesis, Dr. Miguel Ángel Barrón Meza y al Dr. Jesús González Trejo del área de sistemas.

Al comité revisor: al codirector de la tesis M. en C. Juan Manuel Sánchez Núñez, al Dr. Adolfo Mejía Ponce de León, al Dr. Pedro Lina Manjarrez, a la M. en C. María de la Luz Valderrábano Almegua y a la Dra. Minerva Rebollar Plata, por sus comentarios y sugerencias.

Al personal del Centro de Información y Documentación por su total apoyo incondicional, servicio y entusiasmo: a la Jefa del área, la M. en C. Rosa María Rivas García, a Gabriel Ramírez Arratia, a Bernardino Gómez Gómez y a Marco Antonio Vela Barrada.

DEDICATORIA:

Para todos aquellos que sienten, piensan y viven:

A mis amig@s de las comunidades Choles de Chiapas de Jol Nichtie, Tiutzol, Venustiano Carranza, Guanal, Jomajil, Álvaro Obregón, Misopa y Emiliano Zapata por compartir conmigo su visión del mundo; por haber representado un parteaguas en mi vida, enseñándome nuevos paradigmas, entre ellos el valor de la Palabra y el coraje para asumir "que si algo ha de ser, depende de mí" y por mostrarme que se puede vivir cotidianamente con valores como la integridad, la dignidad, el compromiso, la lealtad, la honestidad, la amistad, la compasión, la alegría, etc.

A la comunidad Huichol de Bajío del Tule, por compartir conmigo su espacio sagrado y sus enseñanzas, muy especialmente a la familia de Simón.

ÍNDICE

GLOSARIO	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
INTRODUCCIÓN	iv
CAPÍTULO I. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Justificación	8
1.3 Hipótesis	11
1.4 Objetivo general	12
1.5 Objetivos particulares	12
1.6 Descripción de las variables	12
CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL	
2.1 Desarrollo y medio ambiente	14
2.2 Antecedentes de disertaciones y planteamientos ambientales	16
2.3 Contaminación del agua	22
CAPÍTULO III. LA SIMULACIÓN DE CONTAMINANTES CASO DEL MERCURIO	
3.1 La simulación en algunos países del mundo	26
3.2 Simulación numérica y situación del agua en México	31
3.3 Importancia del agua y el mercurio en la contaminación del agua	38
3.4 Normatividad relativa a parámetros de calidad del agua en ríos	45
CAPÍTULO IV. MODELO MATEMÁTICO	
4.1 Descripción del modelo matemático	48
4.1.1 Ecuaciones de conservación de momento	49
4.1.2 Ecuación de conservación de masa	50
4.1.3 Ecuaciones de turbulencia del modelo k- ϵ estándar	51
4.2 Solución del modelo matemático	53

4.2.1 Dinámica de Fluidos Computacional (DFC)	53
4.2.2 Etapas de la simulación numérica	54
CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
5.1 Descripción de las simulaciones	61
5.2 Condiciones y características del fluido	62
5.3 Análisis	65
5.3.1 Efecto de la geometría	68
5.3.2 Efecto del gasto másico del río	69
5.3.3 Efecto del gasto másico de la descarga	70
5.3.4 Efecto de la concentración de mercurio en la descarga	71
5.3.5 Dispersión del mercurio de acuerdo a la geometría	78
5.4 Sección de figuras	90
CONCLUSIONES Y NUEVAS PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN	109
BIBLIOGRAFÍA	112

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de bloques de la metodología de la investigación	4
Figura 3.1. Agua disponible en el planeta	39
Figura 4.1 Balance de moméntum	49
Figura 4.2 Balance de masa	50
Figura 4.3 Mallado del sistema	55
Figura 4.4 Mallado y discretización del dominio	57
Figura 4.5 Algoritmo de solución	60
Figura 5.0 Esquema de los elementos que constituyen el río	68
Figura 5.1 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	91
Figura 5.2 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/Kg agua.	91
Figura 5.3 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	92
Figura 5.4 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	92
Figura 5.5 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	93
Figura 5.6 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	93
Figura 5.7 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	94
Figura 5.8 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	94
Figura 5.9 Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/Kg agua.	95
Figura 5.10 Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{des}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/Kg agua.	95

Figura 5.11	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	96
	$W_{\text{rio}}=5450 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8} \text{ kg mercurio/Kg agua}$.	
Figura 5.12	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	96
	$W_{\text{rio}}=8540 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.13	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	97
	$W_{\text{rio}}=60780 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.14	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	97
	$W_{\text{rio}}=8540 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.15	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	98
	$W_{\text{rio}}=5450 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.16	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	98
	$W_{\text{rio}}=87360 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.17	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	99
	$W_{\text{rio}}=60780 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.18	Dispersión de mercurio en un río en forma de codo.	99
	$W_{\text{rio}}=87360 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.19	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	100
	$W_{\text{rio}}=5450 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.20	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	100
	$W_{\text{rio}}=5450 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.21	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	101
	$W_{\text{rio}}=8540 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{efl}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	

Figura 5.22	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	101
	$W_{\text{río}}=60780 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.23	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	102
	$W_{\text{río}}=8540 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.24	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	102
	$W_{\text{río}}=5450 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.25	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	103
	$W_{\text{río}}=87360 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.26	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	103
	$W_{\text{río}}=60780 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.27	Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo.	104
	$W_{\text{río}}=87360 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.28	Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=5450 \text{ kg/seg}$,	104
	$W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.29	Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=5450 \text{ kg/seg}$,	105
	$W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.30	Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=8540 \text{ kg/seg}$,	105
	$W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.32	Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=60780 \text{ kg/seg}$,	106
	$W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.31	Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=8540 \text{ kg/seg}$,	106
	$W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.32	Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=5450 \text{ kg/seg}$,	107
	$W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	
Figura 5.33	Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=87360 \text{ kg/seg}$,	107
	$W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.	

Figura 5.36 Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.	108
Figura 5.37 Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}= 1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.	108

RELACION DE TABLAS

Tabla 5.1 Especificaciones de las morfologías de los ríos	61
Tabla 5.2 Gastos volumétricos de las corrientes: Río Tulijá, Río Grande de Morelia, Río de los Remedios y Río Coatzacoalcos.	63
Tabla 5.3 Gastos máxicos de ríos	63
Tabla 5.4. Gastos volumétricos y máxicos de descarga de aguas residuales.	64
Tabla 5.5 Límites máxicos permisibles de Mercurio en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	64
Tabla 5.6 Límite máxico permisible de mercurio en agua para consumo Humano.	65
Tabla 5.7 Valores de gastos máxicos y concentración de mercurio en río recto.	65
Tabla 5.8 Valores de gastos máxicos y concentración de mercurio en río en forma de codo.	66
Tabla 5.9 Valores de gastos máxicos y concentración de mercurio en río en forma de doble codo.	66
Tabla 5.10 Valores de gastos máxicos y concentración mercurio en río bifurcado.	67
Tabla 5.11 Contornos de concentración y dispersión del mercurio de las Figuras 4.1 y 4.2.	72
Tabla 5.12 Contornos de concentración y distribución del mercurio de las Figuras 4.10 y 4.11.	73
Tabla 5.13 Contornos de concentración y distribución del mercurio de las Figuras 4.19 y 4.20.	74
Tabla 5.14 Contornos de concentración y distribución del mercurio de las Figuras 4.28 y 4.29.	75

Tabla 5.15 Perfiles de concentración y dispersión del mercurio de las Figuras 4.7 y 4.9.	76
Tabla 5.16 Perfiles de concentración y dispersión del mercurio de las Figuras 4.16 y 4.18.	76
Tabla 5.17 Perfiles de concentración y distribución del mercurio de las Figuras 4.25 y 4.27.	77
Tabla 5.18 Contornos de distribución y concentración del mercurio de las Figuras 4.34 y 4.36.	77

GLOSARIO

Fluido	Sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante
Fluidos Newtonianos	Aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación
Fluidos no newtonianos	Todos los fluidos donde el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la rapidez de deformación
Fluidos incompresibles	Flujos en los cuales su densidad se puede suponer invariable, constante en todo el volumen del fluido y a lo largo de todo su movimiento, es decir no existe ninguna dilatación observable del fluido
Fluidos compresibles	Aquellos flujos en donde las variaciones en densidad no se pueden despreciar
Flujo estacionario	Cuando la velocidad del fluido no varía con el tiempo, se dice que el movimiento del fluido es estacionario. Es decir que en un flujo estacionario la velocidad de cada partícula en cualquier punto dado del fluido que pasa es siempre la misma. En cualquier otro punto, una partícula puede viajar con una velocidad diferente, pero cualquier otra partícula que pase por este segundo punto se comporta allí justo como lo hizo la primera partícula cuando paso por ese punto
Flujo no estacionario o transitorio	Las velocidades son una función del tiempo en cualquier punto dado.
Gasto másico	Cantidad de fluido expresado en masa por unidad de tiempo
Discretización	Acción de dividir el espacio en pequeños volúmenes, para aproximar la solución matemática de un fenómeno representado por funciones continuas

RESUMEN

El presente trabajo se contextualizó en el marco del medio ambiente – desarrollo, remarcando la importancia de los recursos hídricos en el proceso de desarrollo. Se discuten las afectaciones de este proceso en el entorno natural, en la salud y supervivencia humana y la paradoja que encierra; por una parte las consecuencias negativas que ha representado y al mismo tiempo su contribución para subsanar sus efectos adversos, mediante la aplicación de los logros de la ciencia y la tecnología, propiamente en cuanto a los avances en el campo de la simulación numérica.

Se simuló numéricamente la dispersión del mercurio en ríos mediante la técnica denominada Dinámica de Fluidos Computacional, empleando un software denominado FLUENT. Para las simulaciones se consideraron los límites máximos permisibles de mercurio en agua para uso urbano, descargada a ríos, marcados por la norma NOM-SEMARNAT-001-1996. Posteriormente se compararon los resultados con los parámetros para mercurio presente en agua para consumo humano que establece la norma NOM-127-SSA-1994, con el fin de determinar si las concentraciones simuladas cumplen esta norma. Las simulaciones se efectuaron con datos reales de gastos máxicos de ríos de México proporcionados por la Comisión Nacional de Agua, así como la información necesaria para calcular el gasto máxico de la descarga.

Las variables que se analizaron fueron la morfología del río, el gasto máxico en el efluente, el gasto máxico en la corriente del río, y la concentración de mercurio en el efluente. Se determinó que los factores determinantes en la dispersión del contaminante son la morfología del río y los gastos máxicos tanto de la descarga como de la corriente del río.

SUMMARY

The present work is within the framework of the environment-development, remarking itself the importance of the hydric resources in the development process. The effects of this process in the natural surroundings, the health and human survival are discussed and the paradox that locks up; on the one hand the negative consequences that its contribution has represented and at the same time to correct its adverse effects by means of the application of the profits of science and the technology, properly of the advances in the field of the numerical simulation.

Mercury dispersion in rivers was numerically simulated using a commercial software package known as FLUENT, which is based on computational fluids dynamics schemes. Simulating Input Data took into account the maximum limits that are considered as permissible in water coming from urban areas for river disposal, as is described in NOM-SEMARNAT-001-1996. The Output results were compared to mercury traces parameters in water for human consume, according to those fixed in NOM-SEMARNAT-001-1996, in order to find out if simulated concentrations are fulfilled. The simulations were carried out with real data from Mexican rivers. The mass flows data were taken from Comisión Nacional del Agua office, as well as the required information for discarding mass flow computation. Analyzed parameters included river morphology, and tributary and main stream mass flow respectively. River morphology and both mass flows, the tributary's and main stream's, were found as determining factors in the contaminant dispersion.

INTRODUCCIÓN

Después de la Segunda Guerra Mundial, los países en vías de desarrollo consideraron la industrialización como la forma más viable de alcanzar el crecimiento económico y el bienestar social de su población sin considerar los costos ecológicos. A principios de los años setentas se empieza a cuestionar la viabilidad del estilo de desarrollo implementado, en cuestión de la finitud de los recursos naturales y que como consecuencia de su explotación y degradación descontrolada se limitaría el alcanzar el objetivo de desarrollo.

Llevándose a cabo reuniones importantes como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, celebrada en Estocolmo en 1972 y más recientemente La Cumbre de la Tierra, realizada en Río de Janeiro, Brasil en 1992, las cuales han intentado vincular el proceso del desarrollo con el medio ambiente. Como resultado de estos encuentros se han hecho diagnósticos del estado en el que se encuentran a nivel global los recursos naturales, con el propósito de implementar acciones a fin de preservarlos, predecir o revertir sus daños. Considerando que la solución de los problemas ambientales no solo esta relacionada con decisiones de índole político y económico, sino que requiere de la participación de otros actores sociales como las Organizaciones no Gubernamentales y el ámbito académico entre otros. En cuanto a este último, cada vez es más frecuente que diversas áreas del conocimiento aborden estos temas por medio de investigaciones, haciendo uso de los avances tecnológicos, como las computadoras, las cuales representan hoy en día un instrumento básico en casi todas las disciplinas, produciendo una serie de beneficios por la implementación de software, reduciendo tiempo y costos. Tal es el caso de la simulación numérica que se ha desarrollado para distintos fines, entre los cuales se puede mencionar el diseño de estructuras hidráulicas, de aviones, para el estudio del comportamiento del flujo de fluidos, etc. Para este fin se utiliza una técnica denominada Dinámica de Fluidos Computacional (DFC). Esta técnica consiste en establecer un modelo matemático mediante el cual se describe a

través de ecuaciones el comportamiento del fluido en estudio; dichas ecuaciones gobernantes son resueltas posteriormente por medio de un método numérico y los resultados pueden ser representados y visualizados de manera virtual, explicando de forma muy aproximada a la realidad, el comportamiento del fluido.

Cada vez es más común que el área de las ciencias ambientales recurra a esta herramienta para solucionar y predecir problemas de contaminación de aire y agua. En el caso del agua, esta técnica ha sido utilizada para modelar y predecir el transporte y dispersión de contaminantes. La influencia de la velocidad, el flujo volumétrico de agua y la concentración de los contaminantes son parámetros considerar en las simulaciones. La repercusión que tiene la morfología del sistema en la dispersión de contaminantes también es importante. Asimismo por medio de esta técnica se puede simular la influencia de sustancias disueltas, metales pesados, sólidos, propiedades físicas como la temperatura en la calidad del agua.

En el primer capítulo se definen los conceptos de desarrollo y medio ambiente, se discute la necesidad de establecer una interrelación entre ambos, se abordan brevemente algunas reuniones importantes a nivel mundial en las que el tema principal es el medio ambiente y su repercusión en cuanto a la preservación de los recursos hídricos; la importancia que tiene el agua en el desarrollo. Se bosqueja brevemente acerca de cómo se contamina el agua, los tipos de contaminación, sus principales contaminantes y fuentes generadoras.

En el segundo capítulo se mencionan algunos estudios que se han hecho en torno a la simulación numérica, aplicada a la calidad de del agua en ríos, es países como Estados Unidos. Se discute el tema del estado actual de los recursos hídricos en nuestro país. Se reflexiona acerca de la importancia del agua como elemento vital de los seres vivos y del desarrollo de las sociedades. Se aborda el tema de la contaminación del agua por la presencia del mercurio y su toxicidad en

el ser humano y brevemente se menciona la normatividad existente en nuestro país en cuanto a calidad del agua en bienes nacionales.

En el tercer capítulo se define el modelo matemático del sistema en estudio y las ecuaciones de los tres principios básicos para su solución, conservación de moméntum y de masa y ecuaciones de turbulencia. Además se especifica la forma en que es resuelto el modelo matemático mediante el uso de DFC, se describe en que consiste dicha técnica y las etapas que la constituyen.

Por último, en el cuarto capítulo se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones, esto es, cómo influye la morfología del río, la concentración del contaminante en el efluente, los gastos máxicos tanto del efluente y de la corriente del río, en la dispersión del contaminante. Utilizando para las simulaciones, los valores dados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (que establece los límites máxicos permisibles de mercurio en descargas a ríos), posteriormente se comparan los resultados de las concentraciones obtenidas en las modelaciones con la NOM-127-SSA-1994 (que establece los límites máxicos permisibles de mercurio en agua para consumo humano) y finalmente se determina si dichas concentraciones están dentro de esta norma.

CAPÍTULO I

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El proceso de investigación para este trabajo, se efectuó mediante una serie de etapas sistémicas que de manera específica pueden considerarse tres. Inicialmente se visualizó la problemática de la contaminación del agua y la carencia en el ámbito científico del abordaje de dicho problema mediante herramientas de predicción como lo es la simulación numérica. Bajo este contexto, y teniendo la evidente escasez de trabajos relacionados con dos aspectos básicos para el desarrollo del estudio, es decir, la contaminación del recurso hídrico y la simulación computacional; se lograron definir tres fases principales en el proceso de investigación para el presente estudio.

Fase primera. Con la finalidad de conocer estudios realizados recientemente, en lo referente a simulación numérica enfocado a la determinación de la calidad del agua en corrientes hídricas, se realizó una intensa búsqueda bibliográfica o revisión del estado del arte, para involucrarse con la temática ya definida y plasmar de manera concreta el planteamiento del problema. Principalmente se recurrió a información bibliográfica de países desarrollados y con tecnología de vanguardia como es el caso de los Estados Unidos, país en el cual se da especial importancia a este tipo de estudios.

La etapa de recolección de datos en el aspecto normativo fue fundamental, pues se realizó una búsqueda de leyes, normas y criterios existentes, tanto la relativa a los parámetros o límites máximos permisibles de contaminantes presentes en las descargas de aguas residuales así como de las normas que establecen los parámetros de calidad del agua para consumo humano. En función de lo anterior se determinó que las normas más representativas para la presente investigación son la NOM-SEMARNAT-001-1996 y NOM-127-SSA-1994; que son la base para la comparación de los resultados.

Con base en lo anterior se hizo una selección y discriminación cuidadosa de la información relevante y útil para el trabajo, procediéndose a organizarla y sistematizarla de acuerdo a los temas a abordar. La etapa anterior fue crucial, ya que permitió visualizar de manera clara la estructuración del objeto de investigación, Asimismo se acotó el alcance del estudio mediante la definición del tema y los objetivos, general y particulares.

Como una segunda fase, se integraron los conceptos medio ambiente – desarrollo al contexto del estudio; con el fin de determinar su importancia y relevancia en estos ámbitos. Enfatizando el papel preponderante que ha jugado el recurso agua en el desarrollo de las sociedades, ya que este proceso repercute tanto en el entorno natural en forma de contaminación con sus consecuentes afectaciones y en el ser humano, en forma de problemas de salud.

En esta etapa también se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica de datos reales de caudales de ríos de la República Mexicana, de gastos de descarga y concentraciones de los contaminantes más peligrosos presentes en el agua, determinándose que el mercurio (al igual que otros metales pesados) es un factor muy común en las aguas residuales, principalmente industriales. Para lo anterior se tomaron como base los valores de la norma antes mencionada NOM-SEMARNAT-001-1996; con la finalidad de que la aplicación de esta información soporte los resultados obtenidos en las simulaciones.

De igual forma, en esta etapa se definió el modelo matemático, mediante las ecuaciones de conservación de movimiento, de conservación de masa y las ecuaciones de turbulencia del modelo k-e estándar, que describen el sistema. En función del modelo seleccionado se procedió a la definición de las variables a estudiar que fueron: la morfología del río, el caudal de la descarga, el caudal del río y las concentraciones del contaminante (mercurio) a ser modelado.

En la última fase, referente al procesamiento de los datos, se realizaron las simulaciones con los datos de caudales de ríos, caudales de descarga, concentraciones del mercurio previamente mencionados; y de esta forma establecer las condiciones de frontera del sistema y la especificación de los datos a ser utilizados en las simulaciones.

Finalmente se efectuó un análisis detallado de la influencia de las variables en la dispersión del mercurio: concentración, morfología de río, gastos máxicos de la corriente de río y descarga, para posteriormente proceder a la comparación de los resultados de los contornos de concentración de mercurio obtenidos a partir de haber establecido previamente en la descarga los límites máxicos permisibles del contaminante antes mencionado en la norma NOM-SEMARNAT-001-1996, con la norma NOM-127-SSA-1994 y de esta forma definir si las concentraciones obtenidas en los perfiles cumplen con los parámetros necesarios para considerarla agua apta para consumo humano.

La metodología antes descrita se presenta a continuación (Figura 1) en forma de diagrama de bloques.

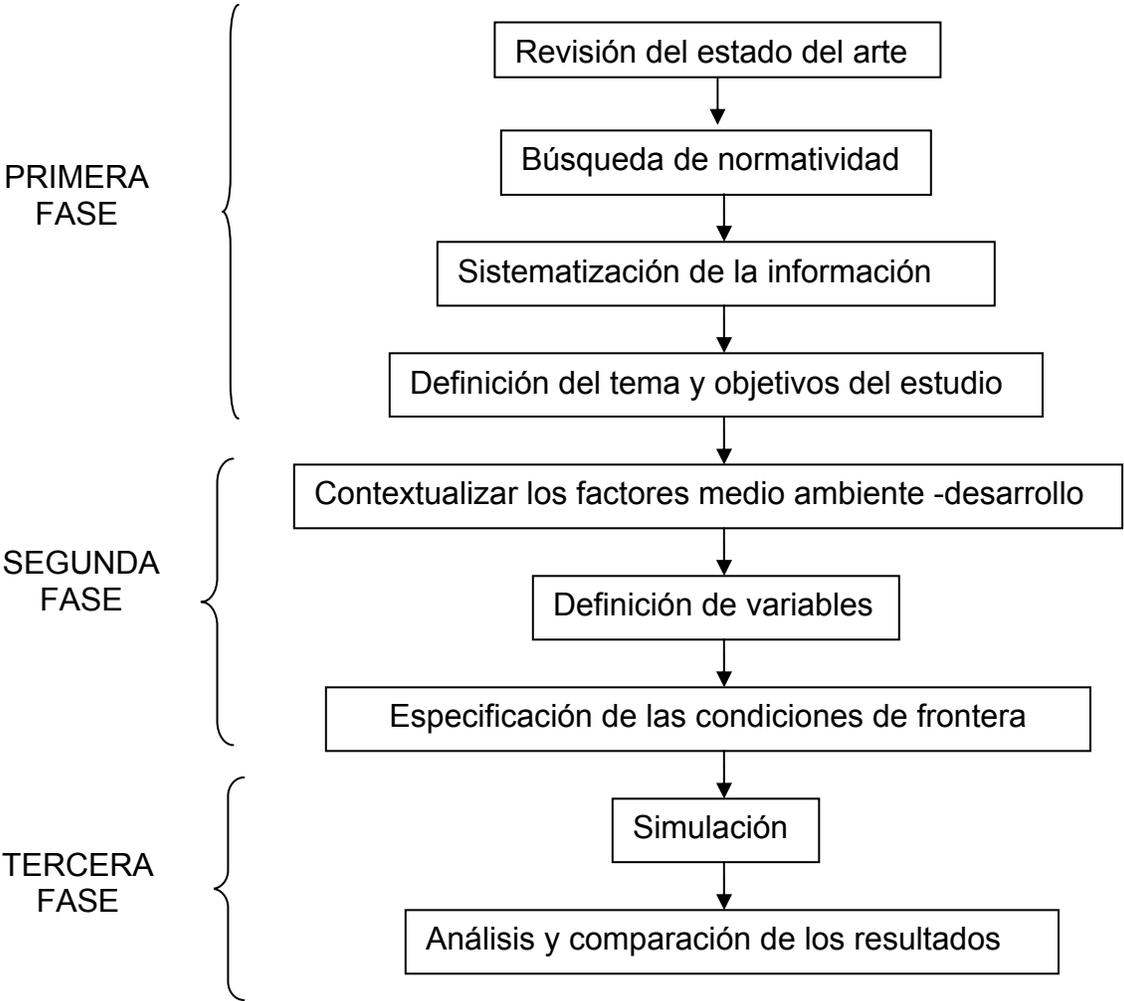


Figura 1. Diagrama de bloques de la metodología de la investigación

A fin de enmarcar el objeto de estudio y evitar perderse en la investigación, fue necesario establecer una guía que sirviera como referente y apegarse a ella en todo momento. El desarrollo y descripción de los puntos que involucran el proceso metodológico de investigación del presente trabajo se presentan a continuación.

1.1 Planteamiento del problema

El agua es el mejor disolvente del planeta, lo cual le permite sustentar la vida pero precisamente esta característica de disolver sustancias, la ha hecho susceptible de ser degradada con facilidad, ya que ha sido la manera más barata que el hombre ha encontrado de deshacerse de los residuos que genera, principalmente los líquidos.

El agua existente en el planeta es de aproximadamente 1400 millones de km³, de la cual sólo el 2.5% es agua dulce y sólo el 1% de este porcentaje es asequible para consumo humano, cantidad suficiente para satisfacer las necesidades de la población; sin embargo, el mal uso que se le ha dado ha repercutido de manera negativa en su calidad.

En México la problemática del agua cada vez es más severa por factores como la contaminación y sobreexplotación de las corrientes superficiales y subterráneas, la principal causa ha sido el proceso de desarrollo del país, que ha traído consigo un aumento en la población, crecimiento industrial y urbano, es así que de acuerdo con el Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para 1995 México era el único país en toda Latinoamérica que utilizaba el 10% de sus reservas de agua y según estimaciones actuales este porcentaje asciende al 15%, lo que ha implicado la sobreexplotación de agua de origen superficial y subterránea.

Según informes de la Comisión Nacional del agua, de los cuerpos superficiales de agua existentes en México, el 94% tienen presentes algún tipo de contaminante. Otro factor desfavorable es que la ubicación de las fuentes hídricas no es uniforme, de acuerdo con el Consejo Coordinador Empresarial, la zona norte y centro del país solo recibe el 9% de la precipitación anual, y es en donde se concentra más del 70% de la población y el producto interno bruto, lo que intensifica la extracción y desviación de ciertas corrientes.

Generalmente la población y los encargados de tomar las decisiones políticas y económicas no tienen conocimiento de la importancia del ciclo del agua, de la necesidad de mejorar las prácticas de su manejo, de métodos que permitan el uso eficiente del recurso, la implementación de control de fugas y de contaminantes, así como de soluciones tecnológicas para el manejo y conservación del agua.

Los actuales patrones de consumo de agua generan derroche y propician severas situaciones de escasez y contaminación, siendo cada vez más cuantiosas las inversiones gubernamentales para abastecer agua; las necesidades crecientes de la población, los cambios climáticos y la contaminación de ríos y acuíferos son consecuencias de la falta de administración y preservación del recurso.

Para 1995 la demanda de agua era de 190 km³/año [16] y según informes de la Comisión Nacional del Agua (CNA) de 1997, México contaba con un promedio de 474.9 km³/año, lo que representa el uso de aproximadamente el 40% del agua disponible, lo cual implica la sobreexplotación de los recursos, destinados principalmente a tres sectores, agricultura, industria y público o urbano. Siendo la agricultura la que demanda mayor cantidad de agua (76%) [26], se estima que cerca del 55% del agua empleada para el riego se desperdicia y que contribuye en gran medida a la contaminación de agua superficial y subterránea [27].

El porcentaje de agua destinado al sector urbano es de 17% [26], el 40% de esta cantidad se desperdicia por fugas en las instalaciones, además, este sector contribuye en gran medida a la contaminación del recurso por el empleo cada vez mayor de sustancias químicas contenidas en limpiadores de uso doméstico, detergentes y la gran cantidad de carga orgánica que genera.

La cantidad de agua destinada al sector industrial es relativamente baja (5%), sin embargo, se sabe que esta rama en su conjunto descarga un porcentaje de contaminantes equivalente al 140% del total generado por el país [27]. Por otra

parte el Consejo Coordinador Empresarial, calcula que en el país, solo se trata del 10% al 13% del total del agua residual producida a nivel nacional.

Los reportes oficiales coinciden en que los principales ríos y costas tienen una contaminación que va de severa a crítica, mientras el recurso se contamina, todavía hay millones de personas que habitan áreas urbanas y rurales que carecen de agua potable.

La cantidad de agua residual que se genera, el limitado control, el reducido tratamiento y reutilización que se le da, así como el atraso tecnológico, son factores que influyen negativamente en la salud y el medio ambiente en general. Los siguientes datos muestran el estado actual del agua superficial y subterránea del país. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), solo el 6% de las corrientes de agua superficial se encuentran libres de contaminación, y que de acuerdo con la SEMARNAT, 96 de los 653 acuíferos con que cuenta el país están sobre explotados.

Esta situación hace prever que en un futuro muy cercano el desarrollo del país estará determinado por la disponibilidad del agua, además de que se considera el problema del agua como un tema de seguridad nacional y otras especulaciones más fatalistas advierten que en un futuro próximo, las guerras podrían darse por la demanda del vital líquido.

Es un hecho bien sabido que el drenaje llega directamente a ríos, sin previo tratamiento, ocasionando muchos problemas a los lugares y poblaciones que reciben este tipo de agua. La contaminación del agua es un factor importante, dado que repercute de manera adversa en la salud humana, por la presencia de agentes patógenos, sustancias químicas como plaguicidas, metales pesados y materia orgánica principalmente.

Esta problemática hace necesario evitar que la disponibilidad de agua se convierta en un freno al desenvolvimiento económico y social, en amenaza a la salud y a la sobre vivencia de las poblaciones vulnerables, evitar poner en riesgo la vida en el planeta y que en el futuro sea todavía más costoso surtir de agua a la creciente población y los polos de atracción económica que la demandan.

En este contexto es de gran utilidad el empleo de las diversas herramientas producidas por los avances tecnológicos, tal es el caso de la simulación numérica, que cada vez adquiere mayor importancia, permitiendo, modelar de forma muy aproximada a la realidad, el comportamiento de un sistema ambiental en estudio, como lo son los ríos, permitiendo una mejor comprensión de éste y la toma de mejores decisiones, reduciendo tiempo de estudio, de costos económicos y sobre todo los costos ecológicos.

En el supuesto caso de que sean vertidas sustancias peligrosas a un río resulta necesario conocer la forma en cual se comportan, se transportan y dispersan estas sustancias de acuerdo a distintas variables como son flujos, velocidades, concentraciones de especies, formas de las fuentes de agua, ubicación de las descargas, para de esta forma determinar modelos que permitan predecir su movilidad y dispersión; asimismo prever y reducir riesgos potenciales, como intoxicaciones, simular posibles escenarios (qué sucedería si se modela con concentraciones superiores a los límites máximos permisibles, patrones de dispersión, contornos de concentración, etc.), delimitar concentraciones y conocer las velocidades de transporte de los contaminantes.

1.2 Justificación

Los sectores que más agua consumen en nuestro país son el de la agricultura, el de la industria y el urbano; en cada uno de ellos la eficiencia en el aprovechamiento de este recurso es bajo y cada uno de ellos representa una

problemática particular y una fuente de contaminación por el tipo de sustancias que se vierten en los cuerpos de agua.

Este recurso vital, generalmente no es aprovechado adecuadamente y es un elemento determinante en el desarrollo de las sociedades, que requiere cumplir ciertos parámetros de calidad para considerarla apta para el aprovechamiento humano y evitar riesgos a la salud, sin embargo, al mismo tiempo que los cuerpos de agua cubren las necesidades básicas de las poblaciones, también han sido el medio por el cual el hombre se deshace de sus residuos.

Derivado de esto, tanto en ríos como otras fuentes de agua cada vez es más común la presencia de elementos, sustancias, agentes patógenos, etc. que representan un riesgo constante para la salud humana y animal, que pueden traducirse en enfermedades y en casos extremos se ha observado la inhabilitación de esas fuentes de agua; como por ejemplo en muchos ríos era común encontrar especies acuáticas, aptas para el consumo humano, hoy en día estas y otras especies están contaminadas y su consumo representa un riesgo potencial y en el peor de los casos, estos están deshabitados o se han convertido en vertederos de desechos.

La preservación y deterioro de este vital líquido está íntimamente relacionada con la contaminación, situación que requiere ser controlada, haciendo necesario el conocimiento del funcionamiento de los sistemas a partir de estudios que sean abordados desde la óptica de distintas disciplinas del saber para contribuir a dar soluciones a esta problemática.

Lo anterior ha hecho necesarias las investigaciones en torno al agua y otras cuestiones ambientales efectuándose en todo el mundo sobre todo en los países desarrollados. En México al igual que otros países en vías de desarrollo se requieren investigaciones de este tipo, muchas veces es complicado llevarlos a cabo por la falta de recursos financieros para el desarrollo y empleo de recursos

tecnológicos necesarios, sin embargo, a pesar de ello se realizan esfuerzos para llevarlos a cabo. Es así que hoy en día los progresos científicos y tecnológicos proporcionan elementos que permiten explicar, predecir y solucionar problemas de tipo ambiental, tal es el caso de los avances en el campo de la computación y más específicamente el uso de software, y aunque tener acceso al empleo de estos programas es muy costoso; sin duda son muy útiles.

En este contexto, podemos asegurar y justificar el empleo de la simulación numérica como una herramienta que permite explicar ciertos fenómenos que se producen en la naturaleza, como el flujo de los fluidos. El propósito de la simulación es realizar un modelo matemático de un sistema real y llevar a cabo simulaciones con la finalidad de comprender de una manera más aproximada el comportamiento del sistema, pudiéndose evaluar nuevas estrategias.

Muchas veces va en contra de la ética, resulta peligroso, o costoso desde el punto de vista económico y ambiental, experimentar directamente en un sistema como podrían ser las corrientes de agua, en estos casos es aplicable la simulación numérica mediante la cual se pueden reproducir las condiciones del sistema en estudio, obteniéndose resultados muy cercanos a la realidad.

Por otra parte, la normatividad de nuestro país en cuanto a la calidad que debe cumplir el agua para consumo humano, así como los cuerpos de agua superficiales con características de aprovechamiento, es clara en los límites máximos permisibles de sustancias que se consideran contaminantes o que pudieran ejercer efectos adversos en la salud humana, como es el caso de los metales pesados, incluido el mercurio que es objeto de este estudio, por ser una sustancia sumamente peligrosa que se caracteriza por su alta toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumularse; de lo anterior se tienen evidencias, a raíz de ser vertido por negligencia o desconocimiento en corrientes hídricas para consumo humano y provocando intoxicaciones masivas.

La simulación numérica aplicada a la dispersión de este metal en ríos permite predecir su comportamiento a lo largo de las corrientes, su destino, plantear posibles escenarios, tomar decisiones en cuanto a la ubicación de las descargas de agua residual, etc. con el fin de reducir los riesgos a la salud.

En otros países del mundo, como Europa y los Estados Unidos es muy frecuente el empleo de la simulación numérica, aplicada a corrientes superficiales, incluso se tienen organismos especializados en ésta área, como el (SMIG) *Surface Water Quality and Flow Modelling Interest Group* de los Estados Unidos, el cual desarrolla software y diversos estudios, en cuanto a la determinación de la calidad del agua de los cuerpos de agua de ese país. Estudios de este tipo en México no es fácil realizarlos por los costos relativamente altos de los software, mucho menos en instituciones públicas como las universidades, como el Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Nacional Autónoma de México, o la Universidad Autónoma Metropolitana. Una buena opción es la colaboración conjunta entre instituciones educativas para abordar problemas ambientales de este tipo y contribuir a su solución, pudiendo ser el presente documento un antecedente de posteriores trabajos conjuntos y de esta manera hacer más eficientes los recursos tecnológicos y humanos de que dispone el país.

1.3 Hipótesis

La dispersión de mercurio en un río, determinada por los cuatro factores más importantes: como la morfología del río, concentración del mercurio en la descarga, gastos máxicos de la descarga y de la corriente del río, identifican los puntos críticos, la calidad del agua y el transporte, característicos de la contaminación del agua por mercurio.

1.4 Objetivo general

Analizar, mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional, la dispersión y concentración de mercurio en ríos tomando como concentración base los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

1.5 Objetivos particulares

Estudiar el efecto de la morfología del río en la dispersión del mercurio.

Estudiar el efecto de los gastos máxicos de la corriente del río y de la descarga en la dispersión del mercurio.

Estudiar el efecto de la concentración de mercurio en la descarga en la dispersión de éste contaminante.

Comparar los resultados de las simulaciones numéricas con las normas vigentes.

1.6 Descripción de las variables

El gasto máxico de la descarga, se refiere al flujo de agua con el contaminante disuelto, transportado y vertido a la corriente hídrica expresado en unidad de masa por unidad de tiempo (kg/seg).

El gasto máxico de la corriente del río, es la cantidad de flujo de agua trasportado por la corriente hídrica, expresada en unidad de masa por unidad de tiempo (kg/seg).

La morfología del río, se refiere a la geometría o forma que tiene la corriente hídrica, y que para fines del trabajo se consideraron cuatro: forma recta, forma de codo, forma de doble codo y bifurcada.

La concentración del mercurio, es la cantidad del contaminante que se encuentra disuelto en la corriente de descarga, expresada en unidad de masa de mercurio por unidad de masa de agua (kg mercurio/kg de agua).

El punto crítico, es el espacio en el cual el mercurio tiende a concentrarse y que puede visualizarse en forma de contornos de concentración.

CAPÍTULO II

MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se definen los conceptos de desarrollo y medio ambiente, se discute la necesidad de establecer una interrelación entre ambos, se abordan brevemente algunas reuniones importantes a nivel mundial en las que el tema principal es el medio ambiente y su repercusión en cuanto a la preservación de los recursos hídricos así como la importancia que tiene el agua en el desarrollo. Se bosqueja brevemente acerca de cómo se contamina el agua, los tipos de contaminación, sus principales contaminantes y fuentes generadoras.

2.1 Desarrollo y medio ambiente

El concepto de desarrollo se emplea a menudo para describir el estado actual de un país o una región con respecto a otra u otras. Las definiciones de desarrollo son diversas y dependen del momento histórico, la ideología que impera en ese momento, el contexto, su problemática y las metas de cada sociedad. El elemento económico es preponderante en cada una de las definiciones y ha sido criticado por muchos autores, no por ser menos importante o negativo, sino porque ha sido mal encauzado, dándole un carácter ilimitado a la cuestión económica [9], se ha visto que cuando se le da preponderancia al factor económico se tiene como consecuencia que en aras de conseguirlo, frecuentemente se sacrifica el bienestar de la sociedad, trayendo consigo efectos retrógrados para la humanidad, como son la pobreza, dominación, explotación, crisis ambientales y económicas. Este hecho ha motivado a redirigir, redefinir, ampliar y multidimensionar el concepto de desarrollo e incluir otros elementos como equidad, derechos humanos y derecho a un medio ambiente limpio.

Sunkel [10] define al desarrollo como “un proceso de transformación de la sociedad caracterizado por una expansión de su capacidad productiva, la

elevación de los promedios de productividad por trabajador y de ingresos por persona, cambios en la estructura de clases y grupos y en la organización social, transformaciones culturales y de valores, y cambios en las estructuras políticas y de poder, todo lo cual conduce a una elevación de los niveles medios de vida”.

Para llevar a cabo el proceso de desarrollo, además de los recursos humanos, se requiere de instrumentos, espacio, materias primas, energía, etc., que son proporcionados por la naturaleza, lo cual constituye el medio ambiente.

Como medio ambiente se considera al ámbito biofísico natural: energía solar, el aire, el agua y la tierra (fauna, flora, minerales y espacio disponible para la actividad humana), el medio ambiente construido y las interacciones ecológicas entre todos estos elementos y entre ellos y la sociedad y sus sucesivas transformaciones artificiales como su despliegue espacial [10].

Tradicionalmente las definiciones de medioambiente han tenido un enfoque biologicista, pero los conceptos más actuales, generalmente incluyen al hombre. La ideología de concebirse como una entidad separada es una razón por la cual se tienen los actuales problemas ambientales de todo tipo, por lo que se hace necesario que el ser humano se asuma como parte de un todo y que considere que cualquier actividad que realice impactará consecuentemente a su entorno biofísico y a él mismo.

Maurice Strong, el primer Director Ejecutivo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) consideró que desarrollo y medio ambiente no se contraponen sino que constituyen dos aspectos diferentes del mismo concepto y lo que realmente está en juego es la gestión racional de los recursos, con el objeto de mejorar el hábitat global del hombre y asegurar una mejor calidad de vida para toda la humanidad [11].

La problemática del desarrollo, el manejo de los recursos que sostienen la vida humana y consecuentemente la solución de las crisis ambientales requieren de la contribución de distintas áreas del conocimiento y de la tecnología.

La tecnología es uno de los resultados del desarrollo, la cual ha sido empleada en muchos casos con la idea de hacer más eficientes los procesos productivos en los distintos ámbitos, industrial, agrícola, etc., con el fin de satisfacer las demandas de la sociedad, pero que muchas veces la consecución de este objetivo no ha vislumbrado las repercusiones a largo plazo, muchas de ellas negativas, por ejemplo la contaminación de distintos elementos como el agua, aire y suelo.

Aunque los avances tecnológicos han tenido repercusiones negativas, se puede constatar que también han sido utilizados con el fin de solucionar problemas y de esta manera satisfacer el objetivo del desarrollo, “elevar la calidad de vida de la sociedad”, obteniéndose numerosos beneficios. Es así que en las últimas décadas el campo de la computación ha tenido un avance impresionante en el desarrollo y empleo de numerosos software, diseñados para distintas aplicaciones; como los destinados a la simulación numérica empleada en distintos campos de la ciencia, específicamente en el área del medio ambiente, extendiéndose en el campo del control de contaminantes atmosféricos, en la descripción del comportamiento de sustancias que afectan la calidad del agua subterránea y en las corrientes superficiales, por mencionar algunos usos.

2.2 Antecedentes de disertaciones y planteamientos ambientales

Hasta la década de los 60 los problemas ambientales relacionados con el manejo del agua y otros recursos se atribuían a las interacciones entre factores físicos y biológicos del medio ambiente. Hoy en día es importante el estudio de la relación del hombre con la naturaleza como un sistema interdependiente y no como elementos aislados. Es así que a partir de la década de los 60 se le dan distintas connotaciones y enfoques a la idea del desarrollo con la inclusión del elemento

medioambiental; así surgen conceptos como el de ecodesarrollo y más recientemente el de desarrollo sustentable. Este último es considerado como el proceso en el cual se satisfacen las necesidades de la población actual, sin comprometer las de las generaciones futuras.

En 1968 se formó el Club de Roma, cuyo objetivo fue analizar y determinar las implicaciones del desarrollo económico de esa época, concluyendo acerca del carácter finito de los recursos naturales, la necesidad de crecimiento material en los países menos desarrollados y las consecuencias del crecimiento indiscriminado de los países desarrollados.

En 1970 el Club de Roma invita al Grupo de Dinámica de Sistemas del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) a realizar un estudio de las tendencias e interacciones de cinco factores considerados determinantes en el futuro de la sociedad global: crecimiento poblacional, producción de alimentos, industrialización acelerada, agotamiento de los recursos naturales y deterioro del medio ambiente.

Este estudio se basó en el método científico, el análisis de sistemas -el método de dinámica de sistemas desarrollado por el profesor Jay W. Forrester- y la computadora moderna. Consistió en un modelo matemático como representación de la parte del mundo en estudio y analizó estos cinco factores, su interrelación con respecto al tiempo, sus tendencias, sus implicaciones a largo plazo (100 años), considerándose que estas tendencias se comportaban de manera exponencial [12].

El estudio realizado por el MIT representa un antecedente de la utilidad en la aplicación del empleo del modelado matemático y la computadora, si consideramos los avances científicos y tecnológicos como una herramienta para encarar y encontrar solución a los actuales problemas ambientales. El uso de los avances tecnológicos de esa época permitió hacer un análisis complejo,

permitiendo la interrelación de varios factores, hacer predicciones aproximadas y a mismo tiempo reducir el tiempo del estudio.

Dicho estudio concluyó que, de mantenerse las tendencias de aquella época (crecimiento poblacional, industrialización, contaminación ambiental, producción de alimentos y agotamiento de los recursos) el planeta alcanzaría los límites de crecimiento en 100 años, pero que esas tendencias de crecimiento podían modificarse para establecer condiciones de estabilidad ecológica y económica que pudieran mantenerse durante largo tiempo.

El fruto de este estudio fue el libro “Los límites del crecimiento” [12], el cual incluyó dicho estudio. Aquí se hace una valoración de la tecnología y la ciencia como motores del desarrollo humano, pero que al mismo tiempo se cuestiona el papel de éstas, responsabilizándolas de haber contribuido a la complejidad del sistema actual, al crecimiento de la población, a la contaminación y los efectos secundarios de la industrialización. Declara que al no tenerse una visión clara del futuro que se quiere, no se sabe hacia donde orientar la inmensa fuerza que representa la investigación científica y tecnológica y que ambas representan la fuerza que encierra “el potencial del progreso o la destrucción”.

La preocupación mundial acerca de los efectos del desarrollo han continuado hasta la actualidad. Otro encuentro importante tuvo lugar en 1972, con La Conferencia de las Naciones Unidas en Estocolmo sobre medio ambiente humano, convocada por Suecia, debido a un problema de contaminación en el mar Báltico y que afectaba a varios países, poniendo de manifiesto que la contaminación no respeta fronteras. En esta reunión se aborda el tema ambiental de manera global, y sirvió para reevaluar el tradicional concepto de desarrollo (identificado como crecimiento económico e industrial), poniendo en entredicho la idea de que trae como consecuencia la satisfacción de las necesidades básicas de la población, que había que considerar la adecuada utilización de los recursos naturales, ya que el problema ambiental está íntimamente relacionado con el

manejo de estos, y en general tener presente la relación que existe entre las leyes naturales y aquellas que rigen a las interacciones de carácter social.

Como se ha visto, lo que motivó este encuentro fue precisamente una problemática relacionada con el agua, este hecho demuestra la importancia que tiene el recurso agua, no sólo para la supervivencia del ser humano, sino como eje central del desarrollo de las sociedades; además de que su deterioro o sobreexplotación impactará de manera negativa el equilibrio natural y como consecuencia el bienestar humano, razón por la cual esta temática impregna muchísimas de las preocupaciones ambientales. En los principios de esta Conferencia se reiteró constantemente la necesidad de preservar los recursos de la Tierra, con el fin de garantizar condiciones de vida adecuadas para la población y una vida digna. En lo referente al recurso agua, el principio 2 de la Conferencia de Estocolmo se declara que el agua debe ser salvaguardada para disfrute de las generaciones actuales y venideras a través de una planificación cuidadosa de su administración [13]. Se insistió en la necesidad de una ordenación adecuada de los recursos hídricos y de medidas de protección contra su contaminación.

Durante esta conferencia también se puso en claro que los problemas ambientales están generalmente relacionados con la industria y el desarrollo tecnológico, pero también se reconoce la importancia de la aplicación de los avances tecnológicos para la solución de los problemas ambientales. Se manifestó que era necesaria la asistencia financiera y tecnológica a los países en vías de desarrollo, por parte de los países desarrollados con el fin de complementar los esfuerzos internos de los primeros.

Dicha reunión fue la punta de lanza para el decreto y consecución de políticas de tipo ambiental a nivel mundial. En 1987 se estableció una Comisión Mundial que trabajó en un reporte denominado Nuestro Futuro Común, que concluyó acerca de los riesgos que representan las prácticas incompatibles con el medio ambiente, el cual sirvió para que en 1989 se planearan las directrices para alcanzar un

desarrollo sustentable y ser discutidas en la Cumbre de la Tierra en 1992 en Río de Janeiro, Brasil.

Sin embargo, la preocupación que tienen los países desarrollados y los países en vía de desarrollo, con respecto al medio ambiente, deriva de sus niveles de bienestar. Mientras que estos han accedido a un mejor nivel de vida con sus necesidades básicas cubiertas y pueden destinar recursos monetarios para la preservación de sus recursos naturales, invirtiendo en investigación y tecnología, los países en vías de desarrollo se enfrentan ante la disyuntiva, de cubrir las demandas básicas de su población y la de preservar sus recursos, generalmente optando por la primera [19].

La interacción de las sociedades requiere de establecer acuerdos entre si y cumplirlos de alguna manera para que haya cierto equilibrio entre ellas, por lo cual como resultado de ésta última reunión –la Cumbre de la Tierra-, los gobiernos se comprometieron a implementar en sus planes de desarrollo el tema de la sustentabilidad, asimismo han establecido distintas propuestas para alcanzar este fin, una de ellas es la referente al fortalecimiento a la investigación científica y la innovación tecnológica [14].

Nuevamente en esta Cumbre se reitera la obligación que tienen los Estados en la cooperación y fortalecimiento para alcanzar el desarrollo sustentable, mediante la investigación científica y el intercambio de conocimientos científicos y tecnológicos, la adaptación, la difusión y la transferencia de tecnologías, reconociéndose la importancia de la aplicación de los avances tecnológicos para la solución de los problemas ambientales.

Uno de los resultados de dicha reunión es la Agenda 21. Este documento es un plan de acción mundial con normas tendientes al logro del desarrollo sustentable desde el punto de vista social, económico y ecológico. En cuanto a los recursos hídricos, Agenda 21 en su Capítulo 18 habla acerca de la protección de la calidad

y el suministro de los recursos de agua dulce, mediante la aplicación de criterios integrados para su aprovechamiento, ordenamiento y uso adecuado [15].

Se pone de manifiesto la necesidad de garantizar una adecuada calidad de vida a la población, mediante el suministro de agua que cumpla con los parámetros establecidos para su consumo, para evitar enfermedades relacionadas con agua contaminada así como disminuir los índices de morbilidad y mortandad, producidos por agua con contaminantes característicos de la pobreza, como el cólera, o aquellos producto del desarrollo como los plaguicidas o metales pesados, ya que se tienen estadísticas de que diariamente mueren 40 mil niños víctimas de enfermedades relacionadas con la mala calidad del agua que tienen a su alcance [20]. Evitar que los recursos hídricos sigan siendo utilizados como vertederos gratuitos, ya que la contaminación es una de las razones por las que el agua ha pasado de ser un bien público a ser un bien escaso por el que se debe pagar, haciendo que este recurso cada vez se convierta en el factor más importante del desarrollo del mundo, y que en un futuro muy cercano será el problema ambiental y político más decisivo que deberán enfrentar millones de personas, lo que implica la necesidad de adaptar las actividades humanas a los límites de la capacidad de la naturaleza. Realizar un balance cuantitativo y cualitativo, planificar y ordenar los recursos hídricos, con el fin de evitar su escasez, su contaminación y actividades incompatibles con la preservación de este recurso; asimismo tener en cuenta el papel que juega su uso en el desarrollo de las sociedades.

Los encuentros referentes a temas ambientales, no sólo han influido en el medio político, sino que también han permeado a la sociedad en general, particularmente al medio académico, interesados en comprender el proceso de la relación del hombre con la naturaleza y haciendo uso del bagaje humano acrecentado a través del tiempo. Hoy en día los avances tecnológicos proporcionan herramientas para analizar y dar posibles soluciones a las repercusiones de este proceso, como es el uso de los ordenadores o computadoras que mediante programas o software se diversifican sus

aplicaciones, desde los más simples como los procesadores de texto hasta los más sofisticados que se utilizan para modelar, siendo éste el caso de la simulación numérica que es empleada principalmente en los países desarrollados y para distintos fines en el modelaje de flujo de aguas superficiales, con el fin de conocer el comportamiento de sustancias contaminantes que hayan sido vertidas de manera intencional o accidental.

2.3 Contaminación del agua

Todas las actividades del hombre requieren agua, desde la agricultura hasta la industria y es impensable la vida sin ella. Según estimaciones, para lavar un vaso se requieren cuatro vasos con agua, para fabricar una tonelada de acero se emplean 250 toneladas de agua, la producción de una tonelada de rayón requiere 760,000 litros de agua [17].

De acuerdo con estudios, se sabe que la producción de una tonelada de cereales cosechada necesita 1,000 toneladas de agua [18]. Estos datos nos proporcionan, por una parte, una idea de lo vital e importante que es el agua para la subsistencia, el crecimiento y desarrollo de las sociedades, y por otra parte el poco valor que se le ha dado a este líquido.

La contaminación del agua se produce cuando ha perdido sus características naturales y ya no es aprovechable. La contaminación del agua puede ser de dos tipos puntual y no puntual. Las fuentes puntuales son aquellas que descargan sus efluentes directamente a cuerpos de agua, como son las industrias, refinerías, casas habitación, etc. y pueden ser monitoreadas o controladas. Las fuentes no puntuales introducen los contaminantes de manera indirecta a través de cambios ambientales, por ejemplo, la incorporación de fertilizantes provenientes de un campo de cultivo a un río a través de la lluvia.

Se considera contaminación a la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico. Un contaminante es toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural [19].

De acuerdo a la fuente la contaminación del agua se clasifica en: municipal, industrial y agrícola. Los principales contaminantes provenientes de la actividad agrícola son materia orgánica, herbicidas y plaguicidas, fertilizantes que contienen nitrógeno y fosfatos, que son los causantes de la eutrofización de ríos, lagos y otros cuerpos de agua. La industria es responsable de depositar una gran variedad de sustancias contaminantes de tipo químico como hidrocarburos, metales pesados, cianuros y ácidos.

Las fuentes municipales o urbanas introducen una serie de contaminantes como son materia fecal, sustancias peligrosas contenidas en productos de uso cotidiano como limpiadores, desinfectantes, destapacaños, detergentes, líquidos y sustancias empleadas en automóviles.

La contaminación del agua de acuerdo a su origen es de tipo natural y antropogénica. La contaminación natural sucede cuando el agua circula por la superficie o las capas profundas de la Tierra y se le añaden sustancias químicas, como pueden ser sales productos de la disolución de minerales, las erupciones volcánicas o materia orgánica de origen animal. La antropogénica se debe a las actividades que el hombre realiza para satisfacer sus necesidades.

La contaminación del agua puede ser de tres tipos: contaminación biológica, contaminación química y contaminación física. Dentro de la contaminación biológica se incluyen bacterias como la Salmomella, Shigella y E. Colli; virus, como el que produce la Hepatitis A, materia orgánica (materia fecal, animales

mueren y vegetales en estado de descomposición), virus, etc. La contaminación de tipo químico se subdivide en orgánica e inorgánica, dentro de la contaminación orgánica están incluidas sustancias como son, aceites y grasas, fenoles, plaguicidas orgánicos, entre otras; en la contaminación inorgánica se agrupan metales pesados (cromo, cadmio, mercurio, plomo, etc.); otros componentes inorgánicos como el nitrógeno y el fósforo provenientes de fertilizantes. La contaminación física puede ser producida por aumento de la temperatura del agua que se emplea como medio de enfriamiento en procesos químicos, y que se descarga directamente a cuerpos de agua con una temperatura mayor a la original. La radiactividad es otro ejemplo de contaminación física.

Los distintos contaminantes vertidos al agua, particularmente en las corrientes superficiales, impactan su calidad; los efectos negativos que provocan en los ecosistemas son diversos, e incluso repercuten en la salud del ser humano, lo que hace necesario su control. A continuación se describen las repercusiones de algunos agentes ajenos al agua.

Los sólidos suspendidos reducen la penetración de la luz, reduciendo la fotosíntesis de las plantas marinas ocasionando su degradación y disminuyendo su aportación de nutrientes; si esta problemática es persistente las plantas mueren, el oxígeno disuelto desaparece y también la posibilidad de mantener la vida, dando como resultado aguas estancadas y de mal olor.

Los plaguicidas, ampliamente utilizados en la agricultura, se consideran sustancias sumamente peligrosas, ya que su función es precisamente eliminar formas de vida indeseables, que al ser arrastrados por la lluvia o por las aguas de riego a los ríos afectan otras formas de vida a las cuales no iban destinadas como son los peces u otros animales, incluido el hombre.

En el caso de los fertilizantes con contenido de fósforo, nitrógeno y potasio, al ser arrastrados a ríos u otras fuentes de agua, producen un crecimiento excesivo de

las plantas acuáticas, lo cual reduce o elimina la cantidad de oxígeno disuelto provocando putrefacción y ello repercute en la calidad del agua requerida para sustentar la vida.

Los detergentes contienen una estructura química que no se degrada fácilmente, como los fosfatos, los cuales interfieren con la vida acuática y dificultan el tratamiento para purificar el agua.

Otros contaminantes sumamente peligrosos son los metales pesados, como el mercurio, el cadmio, el plomo, el arsénico, el cromo, etc., que provocan efectos adversos en la salud. El cadmio produce enfermedades cardiovasculares; el mercurio, se asimila por los peces y se transforma en metilmercurio o mercurio orgánico que al ser consumido por el hombre provoca la pérdida de control en los movimientos, ceguera y finalmente la muerte. El arsénico es cancerígeno en pequeñas cantidades y letal en dosis medias, así como el plomo y el cromo [16].

Los microorganismos patógenos son contaminantes, responsables de enfermedades que producen cólera, hepatitis, fiebre tifoidea, y en niños pueden ser fatales.

En nuestro país existen diversas evidencias del deterioro e inhabilitación de ríos. Como ejemplo, se tiene la contaminación del río Coatzacoalcos al cual son vertidos los desechos peligrosos de la industria petrolera y petroquímica, la de fertilizantes y otras más, los especialistas consideran que es el río más contaminado del país. Otra corriente que presenta un estado de afectación preocupante es el río Bravo, al cual son vertidos contaminantes provenientes de maquiladoras y otras industrias localizadas en la franja fronteriza y de asentamientos humanos [20].

CAPITULO III

LA SIMULACIÓN DE CONTAMINANTES, CASO DEL MERCURIO

En este capítulo se mencionan algunos estudios que se han hecho en torno a la simulación numérica, aplicada a la calidad del agua en ríos, en países como Estados Unidos. Se discute el tema del estado actual de los recursos hídricos en nuestro país. Se reflexiona acerca de la importancia del agua como elemento vital de los seres vivos y del desarrollo de las sociedades. Se aborda el tema de la contaminación del agua por la presencia del mercurio y su toxicidad en el ser humano y brevemente se menciona la normatividad existente en nuestro país en cuanto a calidad del agua en bienes nacionales.

3.1 La simulación en algunos países del mundo

El flujo de fluidos es un área de la física muy estudiada, debido a la importancia que tiene en la explicación y solución de problemas reales. Una herramienta empleada para este fin es la Dinámica de Fluidos Computacional (DFC), que es un proceso mediante el cual se simula el flujo de fluidos, a partir de un método numérico que resuelve las ecuaciones que gobiernan al fluido en estudio.

Uno de los muchos usos que se le da a la DFC es para determinar la calidad del agua en corrientes superficiales, tal es el caso del SMIG (*Surface-Water Quality and Flow Modelling Interest Group*) organismo a cargo del United Geological Survey, de los Estados Unidos de América, que se ha especializado en la simulación numérica de la dispersión de contaminantes en ríos, aguas subterráneas y lagos. Desarrollando una gran gama de software para este fin, a continuación se mencionan algunos y la aplicación que se les ha dado.

DAFLOW es considerado un modelo digital que rastrea el flujo de corrientes, utilizando la forma analógica de las ecuaciones de flujo en conjunción con un

esquema de solución Lagrangiano. El modelo de flujo es diseñado para proporcionar predicciones de descarga y velocidad de transporte, el movimiento y la calidad del agua debido a constituyentes disueltos [1].

Rounds y Wood [2] emplearon un software llamado CE-QUAL-W2 para modelar el flujo de fluidos en dos dimensiones. Simularon con la temperatura de descarga y la calidad del agua en el río Tualatin, en Oregon, durante las estaciones de verano de 1991-1993, cuando los flujos del río disminuyen, para determinar si se violaban los estándares impuestos por el Estado de Oregon. Se simularon 18 constituyentes (cloruros, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, materia orgánica disuelta, algas, nitratos, pH, carbonatos, bicarbonatos, dióxido de carbono, zooplancton, oxígeno disuelto, carbón inorgánico total, etc.). Para este caso se concluyó que la calidad del agua en uno de los brazos principales más bajos del río estaba dominado por tres condiciones, el tiempo de residencia, temperatura del aire y la insolación, encontrándose parámetros de pH máximo y una cantidad mínima de oxígeno disuelto.

Se ha acoplado software con la intención de simular la interacción del agua superficial con el agua subterránea; tal es el caso del DAFLOW que modela corrientes superficiales y MODFLOW que simula flujos de agua subterránea en tres dimensiones [3].

Otro modelo que ha sido empleado por investigadores interesados en problemas ambientales es el MODI, el cual se ha aplicado para simular en dos dimensiones y que se ha utilizado para determinar el transporte, mezclado de contaminantes en canales naturales y su autodepuración. Asimismo puede ser aplicado para delinear las zonas de mezclado, predecir la dispersión de contaminantes producto de vertidos accidentales, simulación de fuentes de contaminación no estacionarias situadas de manera arbitraria y la influencia de zonas muertas [4].

El modelo Branched Lagrangian Transport Modeling System (BLTM) se ha utilizado para simular la influencia de diez constituyentes en la calidad del agua en la parte baja del río Chattahoochee en Georgia, Atlanta [5]. Este modelo se utilizó para modelar en una dimensión, utilizando un marco de referencia Lagrangiano en el cual los nodos computacionales calculados se mueven con el flujo. Este esquema minimiza la dispersión numérica y permiten al usuario tabular el efecto de cada proceso físico en las concentraciones calculadas. El modelo BLTM puede rastrear cualquier número de constituyentes interactivos para los cuales los valores físicos y o de reacciones químicas son definidas en una subrutina. Unas subrutinas especiales han sido desarrolladas para rastrear la salinidad.

El modelo BLTM ha sufrido modificaciones para distintas aplicaciones, generándose una serie de programas, que pueden ser empleados para crear series de tiempo a partir de información meteorológica (velocidad del viento, radiación solar etc.), como es el EQUULTMP y el SOLAR, programas para construir modelos de transporte (BBLTM; BQUAL2E), para modelar con reacciones cinéticas definidas (BLTM, QUAL2E), etc.

El transporte de solutos en las corrientes superficiales, como son los ríos, son gobernados por procesos hidrológicos y geoquímicos. El conocimiento de estos procesos es necesario cuando se evalúan los resultados que dan los contaminantes que son vertidos a las aguas superficiales. El estudio del destino y transporte es frecuentemente ayudado por modelos de transporte de solutos que describen matemáticamente los procesos subyacentes. El modelo que considera el transporte en una dimensión con flujo de entrada y almacenaje (OTIS), puede ser utilizado en conjunción con información de campo para cuantificar procesos hidrológicos (advección, dispersión y almacenaje transitorio) y ciertas reacciones químicas.

OTIS puede ser utilizado para caracterizar el resultado y transporte de solutos contaminantes en ríos, determina las concentraciones que resultan del transporte

hidrológico y su transformación química. La primera suposición del modelo es que la concentración del soluto varía solo en dirección longitudinal, sin considerar la profundidad o el ancho del río, dicho esto, las ecuaciones desarrolladas para un sistema de una sola dimensión consisten en una serie de segmentos de la corriente. La conservación de la masa para cada segmento de corriente da una serie de ecuaciones diferenciales que se resuelven por métodos numéricos [6].

Los modelos a partir de redes neuronales artificiales, también han sido empleadas en la determinación de la calidad del agua; tal es el caso de la aplicación de estos modelos en el río Beaufort, en Carolina del Sur en E.E.U.U. Que se usaron para cuantificar las relación entre la concentración de oxígeno disuelto y cuatro fuentes puntuales de descarga de aguas residuales, que fueron monitoreadas en series de tiempo. El análisis incluyó factores ambientales como temperatura, movimiento del agua y la lluvia, para determinar los efectos de estos factores en la variación de oxígeno disuelto y por consiguiente en la demanda bioquímica de oxígeno [7].

Olsen [8] utilizó CFD para modelar estructuras hidráulicas. Asimismo para determinar cómo afectan e influyen grandes rocas en el flujo del río y la reducción de la velocidad del agua que se produce cuando el río es cubierto con vegetación.

En cuanto a la simulación numérica encaminada a estudiar las concentraciones de mercurio en cuencas, se han desarrollado diversos modelos, generalmente diseñados para emular un eslabón específico en el ciclo del mercurio, los cuales pueden ir desde simples relaciones lineales, a complejos modelos que implican bioacumulación.

El desarrollo y disponibilidad de numerosos modelos para el análisis de descargas a cuencas, son resumidos en el Compendio de Herramientas para la evaluación de cuencas de la EPA (*Environmental Protection Agency*). Entre ellos se cuenta con el MERC, se trata de un modelo generalizado para el transporte del mercurio además de ser un modelo cinético. Que puede ser empleado en una serie de sitios

contaminados con mercurio, como lagos, estuarios y corrientes. En cuanto a la evaluación del transporte y destino del mercurio se encuentran los modelos Linkage 2→3 y 3→4 que han sido diseñados para simular el transporte del mercurio en ambientes acuáticos. El modelo MCM Lake fue diseñado para analizar el ciclo del mercurio en un lago protegido de Wisconsin. Dentro de este grupo, se incluye un modelo desarrollado por la Universidad de California, el cual predice el destino del mercurio en una gran variedad de ambientes bajo regímenes hidrodinámicos de complejidad variable. Basado en un modelo desarrollado por la *US Army Corps of Engineers*, siendo desarrollado para la aplicación en ríos, lagos, reservorios, estuarios y bahías. El modelo puede ser utilizado para 1, 2 y 3 dimensiones y ha sido utilizado ampliamente a lo largo de California y alrededor del mundo. Otras versiones de este sistema de modelaje han sido aplicadas a la mayoría de cuerpos de agua que conciernen a la SRW (*Saugus River Watershed*) incluyendo el Río Sacramento, el Río Feather, El Río Clear Lake, el Sacramento-San Joaquín Delta y la bahía de San Francisco. La RMA (Resource Management Associates) emplea continuamente un modelo calibrado para la corriente principal del Río Sacramento, el Delta y la Bahía de San Francisco. Los resultados del RMA-2 son alimentados al modelo RMA-11, con el fin de simular la calidad del agua provocada por el transporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos y parámetros de eutroficación (temperatura, nutrientes, algas y oxígeno disuelto). También tiene un submódulo que describe la adsorción de mercurio [51].

Una de las razones para el desarrollo y empleo de modelos en mercurio es reducir la incertidumbre en la estimación de contaminación en tejidos de peces y de esta manera tener un soporte en las decisiones de los encargados de ello. El transporte y transformación de contaminantes en el ambiente es el resultado de procesos físicos, químicos y biológicos. El postulado subyacente del modelado, es una representación matemática de procesos físicos que pueden ser empleados para simular el transporte y transformación de contaminantes y cómo el movimiento de estos contaminantes cambia si las condiciones ambientales son modificadas.

Un modelo ambiental de mercurio serviría para un propósito primario, reducir la incertidumbre en la estimación de concentraciones futuras de mercurio en el ambiente. Sin algunas formas de modelos numéricos, las predicciones de esfuerzos efectivos de remediación serían esencialmente conjeturas, asociadas con un alto grado de incertidumbre.

Los modelos numéricos proporcionan algunos beneficios en el estudio y manejo de los sistemas ambientales. Los modelos numéricos pueden proporcionar a los encargados de tomar las decisiones una herramienta para sintetizar proyectos de investigación e ideas específicas acerca de procesos importantes. Comunicar conceptos clave en proyectos de investigación y a los equipos encargados de tomar decisiones.

3.2 Simulación numérica y situación del agua en México

México cuenta con grandes extensiones de territorio áridas o semiáridas en el centro y norte del país y muy húmedas en el sureste, lo que hace que el agua disponible sea muy heterogénea, la precipitación promedio anual en México es de 777 mm anuales y su distribución es irregular, el altiplano y norte reciben únicamente el 9%, y es ahí en donde se concentra el 75% de la población del país, el 70% del producto interno bruto y el 40% de las tierras agrícolas de temporal. El 70% de la precipitación ocurre en el sureste del país, en donde vive sólo el 24% de la población, aquí la industria es incipiente, excepto por la petrolera. En cuanto a la altitud el 85% del volumen almacenado se localiza a no más de 500 metros sobre el nivel del mar y el 85% de la población vive a una altitud mayor [24], lo que representa grandes inversiones para llevarla a alturas mayores que sería el caso de la mayor parte del país.

La demanda de agua para 1995 fue de 190 km³/año, de los cuales 163 km³ corresponden a aguas superficiales (el 40% del agua disponible) y 24 km³ de subterráneas (el 38% del total de recarga) [16]. Según informes de 1997 de la

Comisión Nacional del Agua (CNA), México cuenta con un promedio de 474.9 km³/año de agua; 426 km³ son el resultado de precipitación pluvial (1522 km³) y evapotranspiración (1096 km³) [25]. Cerca de la mitad del agua disponible, extraída de corrientes superficiales y acuíferos se le da tres usos principales: agricultura con un 76%, uso público 17%, industria 5% y el resto se destina a la acuicultura e hidroeléctricas [26].

En general el uso que se le da al agua es deficiente, en el caso de la agricultura la eficiencia en el aprovechamiento del agua no es mayor del 46%, además se sabe que esta actividad genera 10.65 km³ (337m³/seg) de aguas residuales, con un contenido de sustancias altamente tóxicas como los plaguicidas y otras sustancias causantes de la eutrofización de las corrientes superficiales, como lo son los fertilizantes. Esta rama también contribuye a la contaminación de acuíferos por infiltración de sustancias, además de que sus efluentes son de carácter no puntual, lo que imposibilita su control y tratamiento.

En el caso del uso público o urbano que se le da al agua, se sabe que el 27 de la población del país no cuenta con alcantarillado [27] lo que representaría una fuente de contaminación de tipo no puntual y la afectación de cuerpos de agua utilizados para consumo humano y la dificultad para un tratamiento previo. Asimismo se sabe que el 40% del agua destinada a éste sector, se desperdicia por fugas e infiltraciones, por la falta de recursos técnicos y financieros.

En cuanto al consumo de agua del sector industrial el porcentaje es bajo; sin embargo, en su conjunto, ésta rama descarga un porcentaje de contaminantes que equivalen al 140% de los que genera la población del país [27]. Cuatro ramas de la industria son las responsables del 82% del total de aguas residuales de este sector: azucarera 38.8%, química 21%, petrolera 8.25% y papel y celulosa 6%. En cuanto a la tecnología que se emplea en los procesos se sabe que es poco eficiente en el uso del recurso.

Según estimaciones, en el país se trata alrededor del 10% al 13.5 % del total de aguas residuales generadas. De acuerdo con estudios del Consejo Coordinador Empresarial (CCE) el 18% de las aguas producidas por la industria reciben tratamiento; en el caso de las aguas residuales de origen público o urbano, aunque, se posee una infraestructura para tratar el 23%, del cual solo se trata el 14% del caudal, también se sabe que el sector industrial contribuye con un 10% del total de las aguas residuales que se producen en el país, el sector urbano con un 28% y el sector agrícola con 62%.

Estos datos reflejan la falta de visión y planeación en el aprovechamiento de los recursos hídricos y como consecuencia el detrimento de su calidad, como lo demuestran los datos y la clasificación de calidad dada por la Comisión Nacional de Agua (CNA). Sólo el 6% de las corrientes de agua superficial se encuentran libres de contaminación, el 20% tiene calidad aceptable, el 51% se consideran poco contaminadas, el 16% están contaminadas y el 1% tienen presencia de tóxicos.

Otra problemática es la relacionada con la sobreexplotación de fuentes de agua subterránea; de acuerdo con la SEMARNAT, 96 de los 653 acuíferos con los que cuenta el país están sobreexplotados y el 50% del agua que se consume proviene de ellos; el 70% del abasto urbano proviene de éstas fuentes y satisface casi la totalidad de la demanda de la industria y del medio rural.

Dado el manejo que se le ha dado al agua, se prevé que el desarrollo del país estará determinado por la disponibilidad de éste líquido y que los principales sectores consumidores de agua (agricultura, industria y uso urbano) competirán entre sí por su uso.

Las grandes urbes que mayor impacto representan para las corrientes de agua superficiales y subterráneas, son las ciudades de Guadalajara, Monterrey y la Ciudad de México, ya que en su conjunto aportan el 40% de las aguas residuales

del total Nacional. En el caso de esta última se sabe que obtiene el agua que necesita para sus actividades de tres fuentes principales: el 71% se extrae de mantos acuíferos, el 26.5% de las cuencas de los ríos Lerma y Cutzamala, y el resto de las fuentes superficiales que existen, como el Río Magdalena. El suministro de agua a través del sistema Lerma-Cutzamala representa una gran inversión, ya que el recorrido es de 60 a 154 km, lo cual en 1988 representaba 23 millones de dólares por cada m³ adicional, y a esto hay que añadir los costos de operación por bombeo, transportación, mantenimiento, etc.

La Ciudad de México requiere un promedio de 35 a 37 mil l/seg para satisfacer las necesidades de la población; su consumo está directamente relacionando con el nivel socioeconómico, siendo de 20 l/día para la clase baja y de 600 l/día para la clase alta, esta situación ha provocado que los acuíferos que suministran a la ciudad se encuentran en estado de sobreexplotación, alcanzando una profundidad de 450 metros [28], contribuyendo al hundimiento de la ciudad (10cm/año).

Otra temática relacionada con la contaminación del agua es la repercusión que tiene en la salud humana. Se sabe que las descargas de aguas residuales, muchas veces se depositan en cuerpos de agua dulce, de los cuales se abastecen comunidades rurales, lo que ha desencadenado brotes de enfermedades infecciosas gastrointestinales, y que de acuerdo con estudios del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se sabe que las aguas superficiales y subterráneas están contaminadas principalmente por bacterias, de origen fecal, que el 33% de la población padece helmintiasis (lombrices) [29].

Asimismo, se sabe que las aguas negras que se producen en el país se reutilizan casi en su totalidad, sin tratamiento previo, es así que el 83% se destina a la agricultura de riego, 10% para usos públicos y el 7% se destina a la industria [29]. Se sabe que el uso de agua residual en el sector agrícola aumenta hasta en 150% la productividad, sin embargo, su uso incrementa hasta 16 veces el índice de morbilidad por su contenido de huevos de patógenos.

Esta problemática relativa al agua pone en tela de juicio el papel que ha jugado el desarrollo de las sociedades, en conseguir su principal objetivo el de elevar la calidad de vida del ser humano. Organismos internacionales como el PNUMA coinciden en que la responsabilidad de la comunidad internacional es cubrir las necesidades básicas de toda la población mundial (alimentación, salud, vivienda, educación, trabajo y vestimenta) pero que ninguna de estas puede ser satisfecha sin considerar el papel que desempeña el agua [30].

La escasez y contaminación de los recursos hídricos representa un elemento importante en el desarrollo del país, esta problemática está relacionada con varios factores, como son la adopción de patrones consumistas que contribuyen a explotarlos irracionalmente. La falta de conciencia de la población que la desperdicia y contamina sin considerar los altos costos sociales, económicos y ambientales que representa el transportar el vital líquido a los centros de población. En el ámbito político las autoridades no han invertido en la mejora de los sistemas de distribución, evitar fugas, etc., para promover el ahorro del agua, tampoco en impulsar de manera constante campañas de educación ambiental y en establecer medidas punitivas, tarifas más rígidas a los usuarios que más uso hagan del líquido. Se requiere establecer planes y programas que implementen e intensifiquen el reciclado de aguas residuales y recarga de acuíferos, evitar el vertido de sustancias que dañen su calidad, darle un uso más racional, tener un conocimiento de los recursos hídricos, mediante un diagnóstico cuantitativo y cualitativo con la finalidad de darles un mejor manejo [18].

Como ya se ha mencionado, uno de los factores de la problemática del agua es la contaminación de los recursos hídricos que repercute de manera negativa en la salud humana y en su calidad de vida. Lo cual requiere de la aplicación de tecnologías que sirvan como apoyo en la prevención de la contaminación, el diagnóstico de su grado de afectación, el análisis acerca del comportamiento que

tienen los contaminantes, para lo cual la simulación numérica en corrientes hídricas puede ser un apoyo muy útil para estos fines.

La simulación numérica puede ser considerada como el modelado de una parte del mundo o un sistema real que se desea comprender, llevando a cabo modelaciones con el mismo, con la finalidad de entender el comportamiento del sistema o de evaluar nuevas estrategias para el funcionamiento del sistema. Una simulación repite el comportamiento de un sistema del mundo real determinando cómo varía éste de un estado a otro en el tiempo. La simulación numérica es una herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema bajo una gran variedad de condiciones, entender el mundo que nos rodea, ayuda a producir mejores resultados de una manera más rápida, constituyendo una excelente herramienta para predecir el curso y resultados de ciertas acciones, como el cambio en las condiciones del sistema, entender el por qué tienen lugar los eventos que observamos, explorar los efectos de modificaciones en el sistema o modelo, confirmar que todas las variables son conocidas, evaluar ideas e identificar ineficiencias. La simulación nos brinda un nuevo camino para explorar y comprender el mundo que nos rodea y nos permite adquirir conocimiento.

Mediante simulación numérica es más fácil experimentar sobre un sistema simplificado, es factible hacer pruebas que en un sistema real podrían ser desastrosas, imposibles o contrarias a la ética, como el verter alguna sustancia tóxica a un río y analizar su comportamiento.

En corrientes hídricas, esta herramienta puede ser empleada para determinar las características de transporte, mezclado y autopurificación de corrientes de agua, así como para predecir la dispersión de contaminantes producto de derrames accidentales [4]; también para conocer el efecto de la temperatura y los puntos de descarga en la calidad del agua. Se ha empleado para modelar hasta 18 constituyentes en agua, como el oxígeno disuelto, sedimentos, alcalinidad, sólidos suspendidos, dióxido de carbono, etc [6].

En nuestro país la simulación numérica puede ser de gran utilidad para conocer la calidad del agua, la dispersión de contaminantes en un punto determinado e implementar medidas de prevención y control.

Con el fin de conocer estudios relacionados a simulación numérica por investigadores Mexicanos y específicamente a la dispersión de mercurio en corrientes hídricas de este país, se realizó una búsqueda en el periodo 1969-2005, en la revista internacional indexada de "Engineering Village 2" contratada por la Universidad Autónoma Metropolitana con las palabras clave "effluent dispersion", encontrándose solo siete artículos relacionados, sin embargo dichos artículos tratan de la dispersión de aceites provenientes de la industria petrolera y de la dispersión en reactores biotecnológicas. Por otro lado se encontraron tres artículos en esa misma revista, utilizando las palabras clave "mercury dispersion", uno relacionado con el modelado bidimensional y tridimensional del transporte de mercurio en el Golfo de Trieste en Italia y dos realizados por la Universidad de Nuevo México en cuanto a la dispersión de mercurio en ambiente marino y otro de emisiones a la atmósfera. Sin encontrarse estudios de dispersión de mercurio en corrientes hídricas Mexicanas, en dicha fuente bibliográfica. Y aunque esta área de estudio, no es nueva, sin embargo en países como el nuestro es empleada con menos frecuencia, a diferencia de los países desarrollados, por las limitaciones económicas como ya se ha mencionado repetidamente. Los estudios que se han realizado con simulación numérica en nuestro país y en América Latina, han sido encaminados principalmente a fuentes subterráneas, como lo muestra el estudio realizado mediante un método de elementos finitos en un acuífero de Argentina, diseñado para conocer el flujo subterráneo y transporte de solutos en una zona semiárida en la provincia de Salta, con el fin de caracterizar un acuífero de alta conductividad hidráulica a partir de datos de pozos, los cuales reflejaron las características del agua [52]. Otro ejemplo es el estudio realizado en Guanajuato, México con la finalidad de estudiar y conocer las condiciones bajo las cuales se extrae agua subterránea en el Estado y de esta forma crear los planes de manejo

del recurso en los subsistemas hídricos. A partir de los modelos matemáticos y otros estudios (hidrogeológicos y monitoreo), fue posible evaluar las condiciones de función hidrodinámica de los acuíferos, calcular los balances de aguas subterráneas y conocer el abatimiento promedio [53].

3.3 Importancia del agua y el mercurio en la contaminación del agua.

El agua químicamente pura (incolora, inodora e insabora) no existe en la naturaleza, esto se debe a su gran poder de disolución, y razón por la cual se contamina fácilmente y ha sido uno de los medios idóneos para deshacerse de los residuos, normalmente líquidos, que se generan durante la actividad humana.

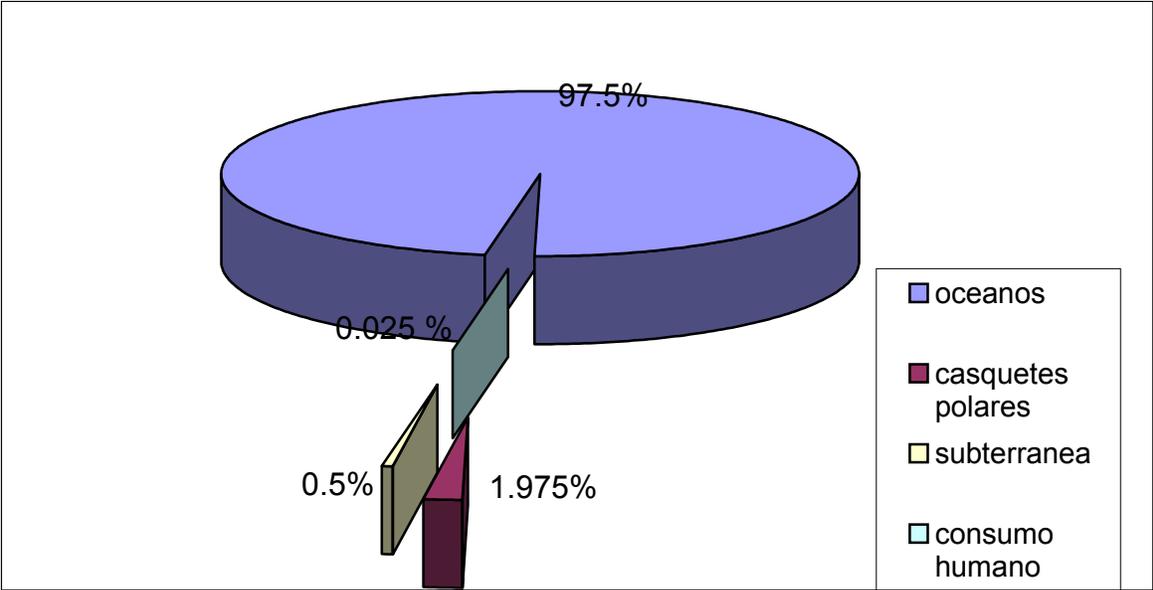
El agua es considerada el disolvente universal, es el mejor disolvente que existe (de sólidos, líquidos y de gases). Esta propiedad le permite sustentar la vida, conduce los nutrientes a los seres vivos y elimina sus desechos [16]. Es un componente primordial de los seres vivos, una de las sustancias más abundantes en la biosfera, un factor determinante del estado del tiempo y del clima, un elemento decisivo en el desarrollo de las sociedades, además es un excelente medio de transporte, inclusive para los contaminantes que son vertidos en ella.

El agua es un cuerpo formado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno, líquido inodoro e insípido; en pequeña cantidad incoloro y verdoso en grandes masas, que refracta la luz, disuelve muchas sustancias, se solidifica por el frío, se evapora por el calor y, más o menos pura, forma la lluvia, los ríos y los mares [16].

El agua se recicla permanentemente en el llamado ciclo hidrológico, por este motivo se le cree falsamente un recurso infinito. Es reciente la importancia que se le da a su escasez y como una limitante en el desarrollo de las sociedades; si bien la cantidad de agua en el planeta es constante, lo realmente preocupante es su calidad y ubicación.

Históricamente, el agua ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de las sociedades, tal es el caso de culturas antiguas que prosperaron al margen de ríos, como la Hindú y la Egipcia. La cultura Mexica se asentó en medio de recursos hídricos como los de Chapultepec, Xochimilco y el Peñón. Asimismo se cree que la decadencia de algunas culturas, como la Olmeca, tuvo que ver con la escasez de este líquido.

Si se considera al agua como un todo pareciera que es infinita, pero, los 1400 millones de km^3 de agua del planeta están repartidos en los océanos, mares, casquetes polares, nieves eternas, lagos y ríos. De esta cantidad, el 97.5% se encuentra en los océanos y es salada, el restante es agua dulce; de éste 2.5 % el 79% está congelada en los casquetes polares y el 20% son aguas subterráneas, por consiguiente solo el 1% del 2.5% estaría disponible para consumo humano [16], como lo muestra la siguiente figura.



Fuente: Guerrero, M. "El agua". Fondo de Cultura Económica.

Figura 3.1. Agua disponible en el planeta

Esta cantidad sería suficiente para abastecer a la población mundial, sin embargo, no sucede así debido a que su distribución no es homogénea; la demanda cada vez es mayor, su uso inadecuado por distintos factores como la contaminación, desperdicio y sobreexplotación. Como se ha visto anteriormente, al agua son vertidas una serie de sustancias que provocan que pierda su calidad como los metales pesados, dentro de este grupo, se encuentra el mercurio.

El mercurio se encuentra en la naturaleza en forma de metal libre o en forma de minerales, empleándose para diversos fines, en la fabricación de instrumentos como termómetros o barómetros, de equipo eléctrico como medidores, baterías, etc., en la fabricación de tubos de rayos X, de amalgamas, de soldaduras con plomo y estaño. En la industria química, se utiliza como cátodo líquido para la producción electrolítica de hidróxido de sodio, ácido clorhídrico y ácido acético. Se utiliza en el recubrimiento con oro, plata, etc., en la manufactura textil (de seda artificial), en fotografía y fotograbado, en la elaboración de pinturas, en la industria eléctrica, etc.

Durante los procesos de aprovechamiento de este metal se generan una serie de residuos que lo contienen, contaminando tres medios importantes, el agua, suelo y aire, y aunque las fuentes naturales de mercurio, contribuyen a la contaminación por este metal la aportación principal es la antropogénica. La contaminación de productos alimenticios se relaciona con el uso de fungicidas metilmercuriales y descargas de efluentes industriales. Se puede decir que las plantas que producen gas cloro e hidróxido de sodio se encuentran entre las fuentes importantes de descargas al agua y generación de residuos sólidos conteniendo mercurio. También es importante la contribución de la minería y los procesos de fundición de ciertos metales como el oro, a la contaminación ambiental por mercurio [40]. La contaminación del suelo y de los cultivos agrícolas ocurre por el depósito de las partículas del aire, como de la irrigación de cultivos con aguas o lodos de plantas de tratamiento de agua residual con contenido de concentraciones altas de mercurio de origen industrial.

Sin embargo no solo estos elementos son susceptibles al mercurio. Este puede ser transformado lentamente a mercurio orgánico a través de procesos naturales [40]. El mercurio inorgánico presente en sedimentos de agua es sujeto de la conversión bacteriana a compuestos de metilmercurio que son bioacumulados en la cadena alimenticia acuática para alcanzar las concentraciones más altas en peces predadores [41]. Los compuestos de metilmercurio son encontrados exclusivamente en comida del mar y peces. Pudiendo considerar al metilmercurio como un veneno neurológico para los animales, afectando primeramente el tejido cerebral. En los adultos el daño cerebral es focal, afectando la función de algunas áreas como el cerebelo, provocando ataxia [46].

El mercurio en el medio acuático se acumula en la biota conforme aumenta su edad y se biomagnifica (acumulación progresiva del metal de uno a otro nivel trófico sucesivo) en la cadena alimenticia, por lo que se encuentra recirculando continuamente en los distintos compartimentos ambientales. De acuerdo con el Organización Mundial de la Salud, la forma más riesgosa de exposición deriva de la ingestión de pescado conteniendo niveles elevados de metilmercurio [40]. En comparación con otros compuestos de mercurio, la eliminación del metilmercurio en peces es muy lenta. Además, las concentraciones de mercurio en peces de determinada especie tienden a aumentar con la edad, como consecuencia de la lenta eliminación del metilmercurio y una mayor ingesta debido a los desplazamientos en los niveles tróficos que suele haber a medida que el pez va creciendo (come cada vez más peces y las presas son más grandes). Por eso es común que los peces más viejos tengan en sus tejidos concentraciones más altas que los peces más jóvenes de la misma especie [47].

Un estudio realizado en lagunas y ríos de los estados costeros y del mar abierto del país, reveló que en Veracruz y Tabasco es en donde existe una mayor concentración de mercurio, plomo, cadmio, cromo, cobre, níquel y zinc, presentes en agua, sedimentos y organismos (moluscos, crustáceos y peces). Una

comparación de las concentraciones promedio en los ríos y lagunas de dichos estados, indicó que en Veracruz se presenta la mayor concentración de mercurio (7.5 mg/l), sobrepasando el límite permisible de mercurio en agua costera y en ríos [48], que es de 0.01 mg/l para explotación pesquera, uso en riego agrícola, navegación y otros usos, de 0.02 mg/l para fines de recreación, de 0.05 mg/l para uso público urbano y protección de vida acuática y de 0.02 mg/l para estuarios, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-SEMARNAT-1996.

Derivado de las descargas de agua con concentraciones de mercurio, a partir de la década de los años cincuentas se han dado episodios de intoxicaciones masivas causados por este metal, en todo el mundo, una de las más conocidas es la de Minamata, Japón. En esa bahía una industria descargaba al agua cloruro de mercurio, el cual era metilado por la acción de los organismos acuáticos, siendo absorbido rápidamente por la fauna y flora acuática en donde se bioconcentraba, encontrándose una concentración media de mercurio de 11mg/kg de pescado fresco, calculándose que la ingesta diaria de mercurio en la población expuesta fue de 5 a 100 µg/kg, con tiempos de exposición de varios meses hasta años. Las personas expuestas de Minamata, presentaron neuropatía (afectación del sistema nervioso), ataxia, sordera, ceguera, temblores involuntarios, deficiencias mentales, infecciones recurrentes, estado de coma y hasta la muerte en un periodo de 26 días a 4 años después de la exposición. En niños que estuvieron expuestos al metilmercurio durante su desarrollo fetal, nacieron con síndrome de parálisis cerebral. Este suceso afectó a 8 de cada 1000 habitantes de la Bahía de Minamata. Las autopsias de las personas y animales intoxicados por la ingestión de pescado que contenía grandes cantidades de metil mercurio, mostraron una destrucción masiva del cerebelo, de la corteza calcarina y de los ganglios cerebrales basales [40] y [49].

La intoxicación aguda no severa por mercurio inorgánico produce manifestaciones pulmonares, gastrointestinales y renales: dolor abdominal, náusea, diarrea, dificultad para respirar e insuficiencia renal. Si la intoxicación es severa pueden

parecer signos y síntomas neurológicos, entre las 24 a 48 horas después de la exposición a mercurio orgánico y hasta tres meses después de la exposición a mercurio orgánico. El cuadro neurológico tardío de la intoxicación aguda severa por mercurio comprende: ataxia (incoordinación en la actividad muscular voluntaria), disminución de la agudeza visual que puede llegar a la ceguera, retardo mental, espasmos mioclónicos y patrones encefalográficos anormales. Los primeros síntomas de la intoxicación crónica son cambios de carácter, ansiedad, depresión, irritabilidad, pérdida de la memoria y síntomas maniaco-depresivos, seguidos por temblores, ataxia y movimientos coreiformes (contorsiones y sacudidas irregulares, involuntarias y espontáneas de las extremidades y de los músculos de la cara). Cabe mencionar que los niños son especialmente vulnerables a los efectos del mercurio, ya que afecta más a su cerebro que al de un adulto e interfiere en su desarrollo. [41], [49] y [50]. La absorción del mercurio depende de su forma química, por ejemplo el metil mercurio se absorbe en un 90% y el cloruro de mercurio en 2% [40].

Los efectos en los animales son los mismos que en el humano, ya que en ellos han sido estudiados los efectos de la exposición de corta y larga duración a través del agua, de los animales o de la inhalación de polvo. Los estudios han arrojado los siguientes resultados. Por vía oral el mercurio inorgánico puede ocasionar daño renal, efectos en la presión sanguínea y el estómago, así como reacciones autoinmunes y alteraciones del sistema nervioso. Por su parte la exposición a corto plazo afecta a los fetos. El mercurio orgánico en exposiciones a largo plazo provoca daño renal, estomacal, intestinal, alteraciones en la presión sanguínea, efectos adversos en el feto, esperma y órganos reproductivos masculinos, además de abortos espontáneos y muerte la nacer; siendo el sistema nervioso el más sensible a esta sustancia, se tiene indicios de que pudiera ocasionar cáncer renal [40], [41] y [50]. Por otra parte en el caso de Minamata, los efectos en animales fueron graves, antes de haberse conocido la intoxicación en las personas, se observaron daños neurológicos graves en aves, experimentando dificultades para volar y otras presentaban conductas anormales [47].

En las últimas décadas se han duplicado o cuadruplicado los niveles de mercurio en focas anilladas y belugas de algunas áreas del Ártico Canadiense y Groenlandia. En aguas más cálidas los mamíferos marinos depredadores también podrían estar en riesgo. Asimismo, un estudio en delfines jorobados en Hong Kong determinó que el mercurio es aún más peligroso que otros metales pesados. En cuanto a los ecosistemas, hay estudios que evidencian que el mercurio ocasiona una reducción de la actividad microbiológica vital para la cadena alimentaria terrestre en suelos de grandes partes de Europa, pudiendo trasladarse esta situación a otras partes del mundo con características edafológicas similares. El aumento en los niveles de agua asociados con el cambio climático mundial, también podría tener efectos en la metilación del mercurio y su acumulación en peces. Existen indicios de una mayor formación de metilmercurio en lagos pequeños y cálidos y en muchas áreas recién inundadas. En la región del Ártico ha traído la atención debido al transporte a largas distancias del mercurio [47].

De acuerdo con los párrafos anteriores se puede recalcar y justificar el porque en este trabajo se tiene como eje central de estudio al mercurio, dado que es una sustancia extremadamente peligrosa por poseer tres características principales, toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumularse, que no solo es peligroso para los ecosistemas y otros animales diferentes del humano sino para el hombre mismo, razón por la cual requiere una atención especial para controlar su presencia en distintos medios físicos como el agua, y así evitar que se continúe afectando el entorno natural y consecuentemente la salud humana. Aunado a esto, en el marco del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte que suscribieron Canadá, Estados Unidos y México en 1994, la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) adoptó una resolución sobre manejo racional de sustancias químicas en octubre de 1995 como miembro del Consejo de la Comisión de Cooperación Ambiental. Con el fin de poner en práctica tal resolución se decidió elaborar planes de acción regionales sobre cuatro sustancias tóxicas, mercurio, bifenilos policlorados, el DDT y

clordano, para lograr la reducción de las emisiones, la exposición y los riesgos a dichas sustancias [40].

Para este trabajo se pretendió modelar con valores reales de concentraciones de mercurio vertidas a un río en particular. Lo cual no fue posible debido a que la institución encargada de recabar ese tipo de datos, en este caso la Comisión Nacional del Agua, no los proporcionó. Por otra parte, de acuerdo con información del Instituto Nacional de Ecología (INE) se sabe que en México no se dispone todavía de un inventario de emisiones de mercurio a la atmósfera, ni se cuenta con un muestreo y análisis sistemático de este metal en agua o con inventarios precisos sobre la generación de residuos que lo contengan, aunque se está llevando a cabo un estudio piloto apoyado por el Instituto de las Naciones Unidas para la Formación y la Investigación (UNITAR), que tiene como propósito registro de emisiones y transferencia de contaminantes (RETC), para construir una base de datos sobre mercurio, así como el monitoreo regular de la calidad del agua en las principales cuencas hidrológicas, partiendo de algunos estudios puntuales, que refieren la contaminación de agua y sedimentos con mercurio en varias cuencas.

3.4 Normatividad relativa a parámetros de calidad del agua en ríos.

El control de sustancias tóxicas, tiene como eje principal el establecimiento de una normatividad que regule su presencia en los distintos elementos vitales, como el agua. En México la legislación vigente en cuanto a prevención y control de la contaminación de las aguas está plasmada en la Ley de Aguas Nacionales. Su objetivo es regular su explotación o aprovechamiento, su distribución y control, así como establecer las medidas necesarias para protegerla, preservar su calidad y cantidad; también especificar las condiciones de descarga de aguas residuales a estos bienes nacionales, promover medidas para evitar que sustancias tóxicas, desechos, lodos de tratamiento de aguas residuales y otros contaminantes que sean vertidos. Además dar atribuciones al gobierno federal para que establezca los parámetros que deben cumplir las descargas, la capacidad de asimilación y

dilución de los cuerpos de agua nacionales, las cargas de contaminantes que pueden recibir y las metas de calidad [21].

En nuestro país existen dos Normas Oficiales Mexicanas: la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-127-SSA-1994 que establecen los límites máximos permisibles de sustancias o contaminantes del agua que producen efectos desfavorables en la salud por su consumo.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de un conjunto de contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en las descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales. Son clasificados por esta norma en tres: contaminantes básicos, contaminantes patógenos y parasitarios y metales pesados y cianuros [22].

Como contaminantes básicos considera a los que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales (filtración, sedimentación, floculación, etc.) como son: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno 5, nitrógeno total, fósforo total, temperatura y pH.

Contaminantes patógenos y parasitarios, son aquellos que afectan la salud humana, a la flora y fauna y se consideran los coliformes fecales y los huevos de helminto.

Los metales pesados y cianuros en cantidades superiores a las establecidas causan efectos negativos en el humano, flora y fauna. Esta norma considera al arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel plomo, zinc y cianuros.

La NOM-127-SSA1-1994 establece los parámetros y los tratamientos de potabilización que debe cumplir y ser aplicados a agua para consumo humano. Se consideran tres características: bacteriológicas, químicas, físicas y organolépticas

[23]. Las características bacteriológicas, se refieren a los límites máximos permisibles de microorganismos, específicamente coliformes. Las características químicas son dadas por elementos o sustancias nocivas para la salud, como metales pesados, plaguicidas, compuestos cíclicos, etc. Las características físicas están definidas por el color y turbiedad. Por último, las características organolépticas están referidas al olor y sabor.

En este contexto y para fines del presente trabajo se toman como referencia los límites máximos permisibles de mercurio presentes en descargas de agua residual vertidas a ríos establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, con la finalidad de llevar a cabo las simulaciones de la dispersión del mercurio en ríos, considerando la presencia de estas concentraciones del contaminante en la descarga, determinando la forma en que se dispersa el metal en la superficie del río y evaluar las concentraciones resultantes en dichas simulaciones. Trasladando esta situación a la realidad y asumiendo que esta agua es utilizada para consumo humano en comunidades rurales, lo cual requiere la comparación de las concentraciones obtenidas en el modelado, con el límite máximo permisible de este contaminante establecido por la NOM-127-SSA-1994 presente en agua para consumo humano y determinar si las concentraciones del metal están dentro de dicho límite.

CAPÍTULO IV

MODELO MATEMÁTICO

En este capítulo se define el modelo matemático del sistema en estudio y las ecuaciones de sus tres principios básicos para su solución: conservación de momento, de masa, y modelo de turbulencia. Además se especifica la forma en que es resuelto el modelo matemático mediante el uso de Dinámica de Fluidos Computacional (DFC), se describe en que consiste dicha técnica y las etapas que la constituyen.

4.1 Descripción del modelo matemático.

Los conceptos necesarios para el estudio y análisis del movimiento de fluidos están representados por ecuaciones conocidas como leyes de conservación, las que establecen que la cantidad de materia y energía son permanentes e inalterables y las cuales permiten predecir el comportamiento de los fluidos. Estas son: la ecuación de conservación de masa o continuidad, la ecuación de momento o de cantidad de movimiento y la ecuación de conservación de energía.

Otro concepto importante en el estudio de los fluidos es el régimen del flujo, laminar o turbulento. En un flujo laminar la estructura del flujo en movimiento es en capas o láminas que se deslizan unas sobre otras. En régimen turbulento el movimiento de los fluidos se da de forma aleatoria [31] y para describirlos se han desarrollado modelos matemáticos, tal es el caso del modelo κ - ϵ , empleado en este estudio.

Para fines de este trabajo, se asume que en el sistema es isotérmico, es decir, no hay cambio de temperatura, por tal razón no se considerará la ecuación de

energía, en la cual se establece el balance de energía del sistema, teniendo como principio la ley de la conservación de la energía.

4.1.1 Ecuaciones de conservación de moméntum

Para llegar a la ecuación de movimiento, se puede hacer un balance de moméntum a partir de un elemento de volumen $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ [45], como se muestra en la siguiente figura.

$$\left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{aumento de} \\ \text{moméntum} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{entrada de} \\ \text{moméntum} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{salida de} \\ \text{moméntum} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Fuerzas} \\ \text{externas} \\ \text{sobre el} \\ \text{fluido} \end{array} \right)$$

Figura 4.1. Balance de moméntum

Para encontrar la ecuación de cantidad de movimiento para un sistema se toma como base la segunda ley de Newton, que indica que la fuerza resultante que actúa sobre una región del espacio o volumen de control, es igual a la rapidez de aumento de la cantidad de movimiento lineal dentro del volumen de control, más el flujo neto de la cantidad de movimiento lineal en el volumen de control.

La conservación de moméntum en un marco de referencia inercial, es decir, en donde no hay aceleración es descrito por la siguiente ecuación, escrita en forma vectorial [43] y [45]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (1)$$

En donde p es la presión estática, t es el tiempo, τ es el tensor de esfuerzos, ρg es la fuerza del cuerpo gravitacional. También, $\partial / \partial t \cdot \rho v$ es la tasa de aumento del moméntum por unidad de volumen, $[\nabla \cdot \rho v v]$ es la tasa de adición de moméntum por convección por unidad de volumen ∇p y $\nabla \cdot \tau$ es la tasa de adición

de momento del transporte molecular por unidad de volumen; finalmente ρg es la fuerza externa sobre el fluido por unidad de volumen.

Desarrollando la ecuación de movimiento y escribiéndola en términos de τ , se obtiene [45]:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zx} \right] + \rho g_x \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zy} \right] + \rho g_y \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right] + \rho g_z \quad (4)$$

4.1.2 Ecuación de conservación de masa

Las ecuaciones de continuidad se desarrollan a partir del principio general de la conservación de la masa, que afirma que la masa dentro de un sistema sin reacción química permanece constante en el tiempo (Figura 3.2).

$$\left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{aumento} \\ \text{de masa} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{entrada de} \\ \text{masa} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{tasa de} \\ \text{salida de} \\ \text{masa} \end{array} \right)$$

Figura 4.2. Balance de masa.

En otras palabras, la ecuación de continuidad para un volumen de control (una región del espacio) afirma que la rapidez de aumento de la masa dentro de un volumen de control es justamente igual a la rapidez neta de flujo hacia adentro del volumen de control [33].

La ecuación de continuidad describe en el tiempo la tasa de cambio de la densidad del fluido en un punto en el espacio. Esta ecuación puede ser escrita en forma vectorial [45]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) \quad (5)$$

En donde $\partial \rho / \partial t$ es la tasa de incremento de masa por unidad de volumen ($\nabla \cdot \rho \mathbf{v}$) es la tasa neta de masa adicionada por unidad de volumen, por convección. Ahora, escribiendo la ecuación de continuidad en forma desarrollada, tenemos [45]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (6)$$

Escribiendo la ecuación en términos de concentración [42], tenemos:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \left(v_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) + R_A \quad (7)$$

en donde D_{AB} es la constante de difusividad, C_A es la concentración del componente A; x , y y z son las coordenadas, R_A es la tasa de generación del componente A, que para nuestro caso es 0, considerando que no hay reacción química y t es el tiempo.

4.1.3 Ecuaciones de turbulencia del modelo κ - ϵ estándar

El modelo κ - ϵ estándar se aplica a flujos turbulentos. En un flujo turbulento se considera que el movimiento de los volúmenes individuales del fluido es aleatorio (desordenado) e impredecible y aunque aparezca un movimiento principal en conjunto las velocidades de una partícula determinada, se desvían en forma

irregular e imprevisible del movimiento principal [34]. Físicamente lo que ocurre es que, partiendo de un flujo laminar y aumentando paulatinamente su velocidad, se alcanza un estado de inestabilidad dinámica. Los volúmenes ya no son estables en su trayectoria, y tal como ocurre en otros campos de la dinámica, cualquier perturbación las aparta en forma creciente con el tiempo de su trayectoria prevista. En un flujo turbulento las partículas del fluido (pequeñas masas moleculares) se mueven en trayectorias muy irregulares que causan un intercambio de cantidad de movimiento de una porción del fluido a otra, de una manera similar a la transformación de cantidad de movimiento molecular pero a una escala mayor. Las partículas de un fluido pueden variar en tamaño, desde uno muy pequeño (de unos cuantos miles de moléculas) hasta uno muy grande (miles de pies cúbicos) en un remolino grande de un río o en una ventolera atmosférica. En un sistema en el que el flujo es turbulento, la turbulencia establece mayores esfuerzos cortantes en todo el fluido y causa más irreversibilidades o pérdidas.

Las ecuaciones de transporte para κ (energía cinética turbulenta) y ϵ (tasa de disipación) son obtenidos de las siguientes ecuaciones de transporte [32]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_\kappa \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (9)$$

donde G_κ representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media, G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de flotación, Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible en valor de disipación total, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes, σ_κ y σ_ϵ son los números de Prandtl turbulentos para κ y ϵ respectivamente. S_κ y S_ϵ son términos de fuente definidos por el usuario.

La viscosidad turbulenta μ_t se calcula combinando κ y ε como sigue [32]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

en donde C_μ es una constante.

Las constantes del modelo $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_κ , y σ_ε tienen por default los siguientes valores: $C_{1\varepsilon}= 1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu= 0.09$, $\sigma_\kappa= 1.0$ y $\sigma_\varepsilon= 1.3$.

Tales valores que han sido obtenidos de manera experimental, para agua y aire [32].

4.2 Solución del modelo matemático

La simulación numérica es una herramienta matemática que requiere de computadoras de alto poder y capacidad de memoria para procesar los cálculos deseados. Comprende el planteamiento de un modelo matemático, el cual recibe un tratamiento analítico para posteriormente desarrollar un análisis numérico riguroso del problema. De los resultados obtenidos se realiza una visualización de los fenómenos estudiados.

4.2.1 Dinámica de Fluidos Computacional (DFC)

Para la simulación de fluidos en movimiento y la dispersión de componentes disueltos se han desarrollado una serie de técnicas que permiten comprender su comportamiento a través de métodos experimentales, analíticos y numéricos. Dentro de los métodos numéricos está la DFC, que es una de las técnicas más empleadas en la actualidad. Esta técnica permite simular numéricamente el flujo de fluidos, y posteriormente resolver las ecuaciones gobernantes del fluido en estudio.

La DFC tiene su origen en los años sesentas, pero su crecimiento y difusión se dio en los años noventas debido al desarrollo de la tecnología computacional, que implica la fabricación de procesadores más veloces y con mayor capacidad de memoria.

En sus inicios trabajar con DFC era muy complicado ya que no se contaba con computadoras de alta capacidad y con especialistas que reunieran todas las áreas del conocimiento necesarias para su aplicación (física, matemáticas, ingeniería, programación, arquitectura de computadoras, graficación, etc.). Actualmente diversas instituciones y empresas privadas a nivel mundial se dedican a agrupar expertos en las distintas áreas del conocimiento necesarias, para que en conjunto desarrollen estudios en DFC y su implementación en software.

La DFC tiene varias ventajas sobre otros métodos, ya que puede ser empleada para geometrías en dos o tres dimensiones, en sistemas en los cuales haya o no reacción química, para fluidos en estado estacionario o transitorio, para fluidos newtonianos o no newtonianos, para fluidos compresibles e incompresibles, en flujos a régimen laminar o turbulento, para sistemas en donde existe o no intercambio de calor. Entre las desventajas de la DFC está que el equipo de alta velocidad así como el software simulador son relativamente costosos.

4.2.2 Etapas de la simulación numérica

La solución de problemas por medio de DFC consta de tres etapas: preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento.

a) Preprocesamiento

Se refiere a los preparativos que se deben efectuar antes de iniciar las soluciones numéricas de las ecuaciones gobernantes. Esta etapa incluye la creación de la

geometría del sistema, la generación del mallado o discretización del dominio, que para este estudio se optó por una malla triangular (ver Figura 3.3) mediante GAMBIT, que es un software de los llamados dibujo asistido por computadora, el dimensionamiento del sistema 2D o 3D (dos o tres dimensiones). Para efecto de este trabajo se asumió que se trata de un sistema bidimensional, razón por la cual no se considera el fenómeno de sedimentación, de lo contrario se tendría que modelar en tres dimensiones, lo cual requeriría el empleo de un elevado tiempo de cómputo. Se definen las condiciones del sistema (entrada del río, de la descarga y salida del río) y la exportación del mallado; esto es, transferir la geometría y el mallado del sistema al software FLUENT [35].

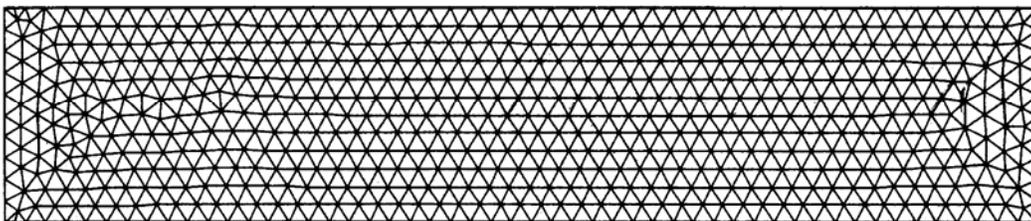


Figura 4.3. Mallado del sistema

b) Procesamiento

Se selecciona la formulación del solver, los cuales pueden ser, segregado para fluidos incompresibles a medianamente compresibles, implícito acoplado para fluidos altamente compresibles y explícito acoplado para fluidos altamente compresibles. Para este estudio se optó por el segregado para fluidos incompresibles dada la característica de incompresibilidad del fluido, agua, que se maneja. Se determina si el fluido es estacionario o transitorio. Se eligen las ecuaciones básicas a ser resueltas (si el régimen de flujo es laminar o turbulento, transporte de especies, reacciones químicas, modelos de transferencia de calor,

etc.). Se definen las sustancias que forman al fluido. Que en este caso se trata de mercurio disuelto en agua y se considera que no hay reacción química. Se especifican las propiedades físicas del material, si se trata de un fluido en estado gaseoso o líquido, viscosidades, densidades de los fluidos a manejar y las condiciones de frontera (gastos máxicos de los fluidos de entrada del río y de la descarga, concentraciones de las especies transportadas, en este caso del mercurio, temperaturas de entrada de los fluidos, velocidades), las cuales se fijan en los límites del sistema.

Durante esta etapa las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo de fluidos del modelo matemático (ecuación de movimiento o de Navier-Stokes, de continuidad, de turbulencia y de conservación de energía que para nuestro caso no se considerará dado que el sistema se considera isotérmico) para la superficie de control son convertidas a ecuaciones algebraicas para ser resueltas mediante el método numérico de diferencias finitas.

El proceso puede ser descrito de la siguiente manera: el dominio o sistema es dividido en un número finito de elementos de control discretizados mediante un mallado computacional (ver Figura 3.4). Se integran las ecuaciones gobernantes en volúmenes de control individuales para construir ecuaciones algebraicas para la discretización de variables no conocidas o dependientes como son: velocidades, presión y temperatura y otras cantidades escalares. Finalmente, se linealizan las ecuaciones discretizadas y se resuelve el sistema de ecuaciones lineales resultantes para dar paso al ajuste de valores a las nuevas condiciones de las variables dependientes o continuar con las iteraciones [36] y [37].

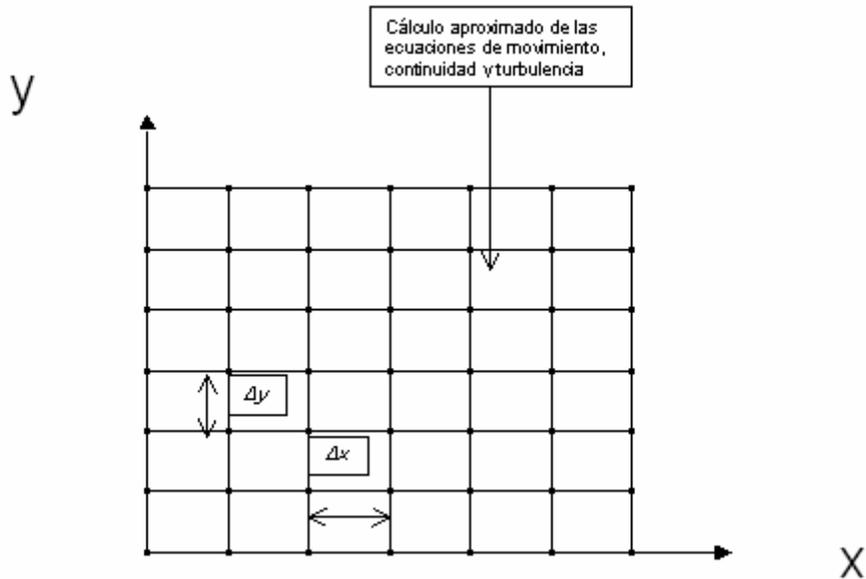


Figura 4.4. Mallado y discretización del dominio

Una vez que el sistema o dominio ha sido dividido en un número finito de mallas, en cada punto de la malla son resueltas las ecuaciones que gobiernan al fluido. En el estudio el sistema se malló triangularmente, los elementos (mallas) están unidos estructuralmente unos con otros, en donde el nodo de un elemento es a la vez un nodo del elemento contiguo o vecino; el solver resuelve las ecuaciones en las esquinas de cada elemento y las condiciones de frontera se aplican sobre los nodos externos.

El proceso de interacción puede ser descrito de la siguiente manera (ver Figura 3.5): las propiedades del fluido son ajustadas a las nuevas condiciones, basándose en la solución actualizada. Se resuelven las ecuaciones de movimiento, empleando los valores actualizados de presión y flujos de masa para ajustar el campo de velocidad a las nuevas condiciones. Si las velocidades obtenidas no satisfacen la ecuación de continuidad, se deriva una ecuación tipo poisson de la ecuación de continuidad y de las ecuaciones de movimiento linealizadas y así se obtienen las correcciones necesarias para la presión, los campos de velocidad y los flujos de masa, de tal manera que se satisfaga la

ecuación de continuidad. La ecuación de turbulencia es resuelta utilizando previamente los valores ajustados a las nuevas condiciones de las otras variables [37]. Durante este proceso el software permite que se visualice gráficamente el proceso de solución que sigue cada una de las variables involucradas, hasta que se llega a la convergencia.

Como se ha mencionado repetidamente, los fluidos y los fenómenos que se relacionan con ellos son descritos mediante ecuaciones diferenciales parciales, las cuales no pueden ser resueltas de manera analítica excepto en casos especiales. Para obtener una solución numérica aproximada se utilizan métodos de discretización, los cuales aproximan las ecuaciones diferenciales por medio de un sistema de ecuaciones algebraicas, las cuales pueden ser resueltas mediante computadora. Las aproximaciones son aplicadas a pequeños dominios de espacio y tiempo, entonces las soluciones numéricas proporcionan resultados para sitios discretizados en espacio y tiempo. La exactitud de las soluciones numéricas depende de factores como el tamaño de la malla empleada, error de redondeo de la computadora, del modelo de turbulencia empleado, etc. [32].

Los códigos por computadora de la dinámica de fluidos computacional (DFC) han llegado a ser una parte integral del análisis complejo e investigación científica. Desafortunadamente en las soluciones llevadas a cabo de las simulaciones con esos códigos de computadora es inherente el error o incertidumbre en los resultados. La cuestión de la incertidumbre numérica es la dirección en el desarrollo de métodos que definan la magnitud del error o el error de frontera en una simulación dada

En cuanto al error derivado del tamaño de malla se puede decir que las inexactitudes inherentes a cualquier problema continuo de simulación numérica, se deben al hecho de que se hacen aproximaciones en un sistema continuo a través de una longitud finita (aproximación discreta). Asumiéndose en este proceso que $h \rightarrow 0$ (el tamaño de la malla tiende a cero), entonces se recupera la

ecuación diferencial continua y la solución exacta. Esta suposición es calificada en las condiciones de consistencia y convergencia. Este es el objetivo de los procedimientos de verificación y validación, demostrar que la suposición es verdadera [44].

c) Postprocesamiento

En esta etapa los resultados obtenidos numéricamente son transformados para que puedan ser desplegados a manera de imágenes y den una visión general del comportamiento del fenómeno en estudio, en forma de campos vectoriales, contornos de distribución de especies, velocidades, densidades, temperatura y presión, el software es capaz de realizar videos y animaciones.

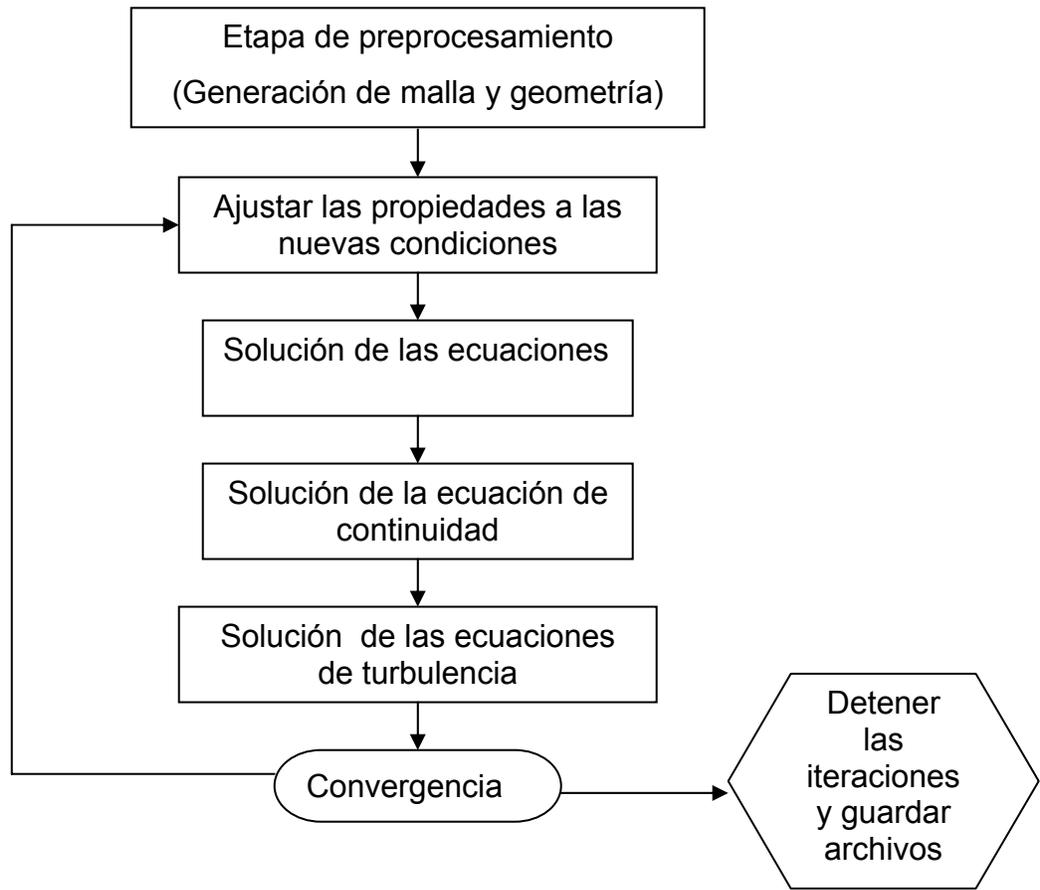


Figura 4.5. Algoritmo de solución

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones, esto es, cómo influye la morfología del río, la concentración del contaminante de la descarga, los gastos máxicos tanto de la descarga y de la corriente del río en la dispersión del contaminante. Para las simulaciones se utilizaron los valores dados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (que establece los límites máxicos permisibles de mercurio en descargas a ríos) y comparando los resultados de las concentraciones obtenidas en las modelaciones con la NOM-127-SSA-1994 (que establece los límites máxicos permisibles de mercurio en agua para consumo humano) y determinando si dichas concentraciones entran dentro de esta norma.

5.1 Descripción de las simulaciones

Se consideraron cuatro geometrías, en dos dimensiones; cada geometría está constituida de dos entradas (corriente principal y descarga del efluente): forma recta, forma con un codo, forma con doble codo y forma bifurcada.

En la Tabla 5.1 se muestran las características de cada forma, dimensiones aproximadas y el número de mallas.

Tabla 5.1. Especificaciones de las morfologías de los ríos

Forma de río	Dimensiones aproximadas	Número aproximado de mallas triangulares
Recta	100m x 20m	2032
Un codo	180m x 20m	2562
Doble codo	200m x 20m	2679
Bifurcada	36m x 20m primera parte del río (antes de las bifurcaciones). 65m x 10m cada bifurcación	1272

5.2 Condiciones y características del fluido.

Se considera que la descarga transporta agua y mercurio disuelto (concentración en fracción masa), que todas las condiciones del fluido en un punto dentro de la corriente se mantienen constantes con respecto al tiempo (fluido en estado estacionario), que el movimiento de las partículas es aleatorio e impredecible, (régimen turbulento), que el fluido puede describirse mediante el modelo turbulento k-e y que el sistema es isotérmico. En cuanto a la elección del solver, se empleó el segregated para fluidos incompresibles dado que el fluido manejado es agua y este es considerado un líquido incompresible.

Cabe aclarar que se simuló con mercurio por su alta toxicidad, además se consideró que si se tratara de otro metal pesado diferente, se comportaría de forma semejante.

Las simulaciones se realizaron considerando tres variables: gasto másico del río (W_{rio}), gasto másico de la descarga (W_{des}) y concentración del mercurio (C_{des}).

A continuación se muestra la Tabla 5.2 con los datos que se emplearon para las simulaciones numéricas. Incluye la región hidrológica, el Estado de la República Mexicana al cual pertenece cada corriente hídrica, la estación en la cual se realizaron las mediciones de los gastos volumétricos, el río o corriente hídrica, el año y el mes en que se realizaron las mediciones y finalmente el gasto volumétrico mensual promedio [38].

Tabla 5.2. Gastos volumétricos de las corrientes: Río Tulijá, Río Grande de Morelia, Río de los Remedios y Río Coatzacoalcos de México.

Región	Estado	Estación	Corriente	Cuenca hidrológica	Año	Mes	Gasto medio mensual (m ³ /seg)
Grijalva-Usumacinta	Chiapas	Salto de Agua	Río Tulija	Rio Grijalva	1999	Mayo	87.36
Lerma-Santiago	Michoacán	Santiago Undameo	Río Grande de Morelia	Lago de Cuitzeo	1985	Agosto	5.45
Pánuco	Estado de México	Molino Blanco	Río de los Remedios	Vaso de Cristo	1998	Septiembre	8.54
Río Coatzacoalcos	Veracruz	Las perlas	Río Coatzacoalcos	Río Coatzacoalcos	1999	Mayo	60.78

Fuente: Banco Nacional de Aguas Superficiales de la CNA (BANDAS)

Los gastos volumétricos se convirtieron a gastos máscicos; en la tabla 5.3 se muestran estos valores.

Tabla 5.3 Gastos máscicos de ríos

Río	Gasto volumétrico medio (m ³ /seg)	Gasto máscico (kg/seg)
Tulija	87.36	87360
Grande de Morelia	5.45	5450
De los Remedios	8.54	8540
Coatzacoalcos	60.78	60780

Fuente: Banco Nacional de Aguas Superficiales de la CNA (BANDAS)

Para el cálculo de los gastos máscicos transportados por la descarga se utilizaron los datos de velocidades de agua residual y diámetro de tubería de descarga, proporcionados por el manual MAPAS de la CNA (Tabla 5.4) [39].

A continuación se muestra el cálculo de gastos máscicos en la descarga, considerando un diámetro de tubería de 0.75 m.

Calculando el área

$$A = \pi d^2/4$$

$$A = (\pi)(0.75\text{m})^2/4 = 0.442 \text{ m}^2$$

El gasto se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = v A$$

$$Q = (3.0)(0.442) = 1.326\text{m}^3/\text{seg}$$

Calculando el gasto másico

$$Q_m = Q \rho$$

$$Q_m = (1.326 \text{ m}^3/\text{seg})(1 \text{ kg/l})(1000 \text{ l/m}^3) = 132.6 \text{ kg/seg}$$

Tabla 5.4. Gastos volumétricos y másicos de descarga de aguas residuales

Material de tubería	Diámetro (m)	Velocidad máxima (m/seg)	Velocidad Mínima (m/seg)	Gasto volumétrico máximo (m ³ /seg)	Gasto volumétrico mínimo (m ³ /seg)	Gasto másico Máximo (kg/seg)	Gasto másico Mínimo (kg/seg)
Concreto simple	0.75	3.0	0.30	1.326	0.133	1326	132.6

Fuente: Manual del Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la CNA 2003

Las concentraciones de mercurio utilizadas para realizar las simulaciones se tomaron de la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de mercurio en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Límites máximos permisibles de Mercurio en descargas de aguas residuales en aguas en bienes nacionales.

Parámetro	Promedio diario (mg/l)	Instantáneo (mg/l)	Promedio diario expresado en fracción masa	Instantáneo expresado en fracción masa
Mercurio	0.005	0.01	5×10^{-9}	1×10^{-8}

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-SEMARNAT-1996

Los resultados obtenidos de las concentraciones de los contornos de dispersión del mercurio en las simulaciones se compararon con el límite máximo permisible de mercurio en agua para consumo humano establecido por la norma NOM-127-SSA1-1994, y de esta forma determinar si se encuentran dentro de dicha norma. A continuación se muestra la Tabla 5.6 con los valores.

Tabla 5.6. Límite máximo permisible de mercurio en agua para consumo humano.

Parámetro	Límite permisible (mg/l)	Límite permisible expresado en fracción masa
Mercurio	0.001	1×10^{-9}

Fuente: NOM-127-SSA1-1994

5.3 Análisis

Las simulaciones se realizaron con los datos de los valores de flujo de las dos corrientes y la concentración en fracción masa del mercurio de las Tablas 5.7 a 5.10 de los valores de flujo de las dos corrientes y la concentración en fracción masa del mercurio. A continuación se presenta el análisis y en la sección de figuras se muestran las imágenes de los casos más representativos de dichas simulaciones, cabe mencionar que las que se omitieron (identificadas con letras) tienen un comportamiento similar a las que se analizan.

Tabla 5.7. Valores de gastos máxicos y concentración de mercurio en río recto.

Figura 5.1	Figura 5.2	Figura 5.3	Figura 5.4
$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$
Figura 5.5	Figura 5.6	Figura 5.7	Figura 5.8
$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$
Figura 5.9	Río2c	Río2d	Río1f
$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{eff}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$
Río1h	Río1l	Río1n	Río1p
$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$

Tabla 5.8. Valores de gastos másicos y concentración de mercurio en río en forma de codo.

Figura 5.10	Figura 5.11	Figura 5.12	Figura 5.13
W _{rio} : 5450 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 5450 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 8540 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 60780 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹
Figura 5.14	Figura 5.15	Figura 5.16	Figura 5.17
W _{rio} : 8540 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 5450 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 87360 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 60780 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹
Figura 5.18	Río2c	Río2d	Río2f
W _{rio} : 87360 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 87360 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 87360 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 8540 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸
Río2h	Río2l	Río2n	Río2p
W _{rio} : 60780 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 8540 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 60780 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 5450 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸

Tabla 5.9. Valores de gastos másicos y concentración de mercurio en río en forma de doble codo.

Figura 5.19	Figura 5.20	Figura 5.21	Figura 5.22
W _{rio} : 5450 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 5450 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 8540 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 60780 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹
Figura 5.23	Figura 5.24	Figura 5.25	Figura 5.26
W _{rio} : 8540 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 5450 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 87360 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 60780 W _{des} : 1326 C _{des} : 5x10 ⁻⁹
Figura 5.27	Río3c	Río3d	Río3f
W _{rio} : 87360 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 87360 W _{des} : 132.6 C _{des} : 5x10 ⁻⁹	W _{rio} : 87360 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 8540 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸
Río3h	Río3l	Río3n	Río3p
W _{rio} : 60780 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 8540 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 60780 W _{des} : 1326 C _{des} : 1x10 ⁻⁸	W _{rio} : 5450 W _{des} : 132.6 C _{des} : 1x10 ⁻⁸

Tabla 5.10. Valores de gastos máxicos y concentración de mercurio en río bifurcado.

Figura 5.28	Figura 5.29	Figura 5.30	Figura 5.31
$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$
Figura 5.32	Figura 5.33	Figura 5.34	Figura 5.35
$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$
Figura 5.36	Río5c	Río5d	Río5f
$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 5 \times 10^{-9}$	$W_{\text{rio}}: 87360$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$
Río5h	Río5l	Río5n	Río5p
$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 8540$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 60780$ $W_{\text{des}}: 1326$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$	$W_{\text{rio}}: 5450$ $W_{\text{des}}: 132.6$ $C_{\text{des}}: 1 \times 10^{-8}$

Como ya se mencionó anteriormente, en el punto de las condiciones del fluido las simulaciones se efectuaron con la concentración máxima permisible de mercurio establecida por la NOM-001-SEMARNAT-1996, asimismo se consideró una sola descarga; estos factores fueron determinantes para que en ningún caso se sobrepase dicho límite del contaminante.

Es importante analizar la influencia que tiene cada variante en la dispersión de mercurio, estas son: la geometría, gasto másico del río, gasto másico en la descarga y concentración del mercurio.

Para una mayor comprensión del análisis que se hará, en la siguiente figura (Figura 5.0) se describen en forma esquemática los elementos que constituyen el río.

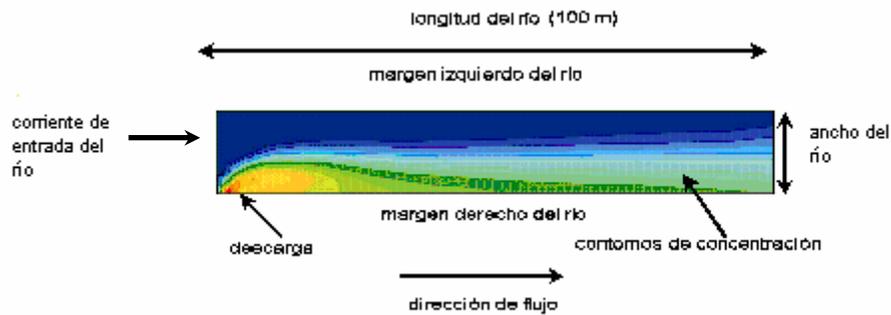


Figura 5.0 Esquema de los elementos que constituyen el río

5.3.1 Efecto de la geometría

La morfología del río es un factor determinante en la dispersión del mercurio; esto se puede observar principalmente en las Figuras 5.1, 5.10, 5.19 y 5.28, en las cuales se mantienen constantes los gastos máxicos en las corrientes de entrada y la concentración del mercurio.

Si comparamos las primeras tres figuras ya mencionadas, se observa que en todas se lleva a cabo una dispersión considerable, la cual es mayor en la geometría con un solo codo que en la figura recta. En la geometría con codo, la curvatura provoca que haya una mayor turbulencia y que después de la curvatura el mercurio llegue a dispersarse y a homogenizarse en toda la superficie del río. En la Figura 5.19 se efectúa una mayor dispersión y homogenización del mercurio que en figura 5.10. La primera curvatura de la figura 5.19 provoca un mayor mezclado, aumentando la dispersión del mercurio y que al final de esta abarque casi la totalidad de la superficie. Al inicio de la segunda curvatura la dispersión del mercurio se da en toda el área.

En el caso del río con bifurcación (Figura 5.28), su morfología provoca que en una de las bifurcaciones haya distribución del mercurio en toda su superficie así como una mayor homogenización, esto está provocado por la reducción en el ancho de

la bifurcación en comparación con el ancho total del río. En la segunda bifurcación la dispersión es menor porque la mayor concentración tiende a situarse en la primera bifurcación.

5.3.2. Efecto del gasto másico del río

La influencia del gasto másico en la corriente principal para la dispersión del mercurio puede observarse en todos los casos. Para las geometrías del río recto se puede observar que la influencia del gasto másico en la corriente principal es determinante en la dispersión del mercurio. Se puede ver que conforme aumenta el gasto másico en la corriente principal del río, la dispersión del mercurio disminuye, es decir, la dispersión del mercurio es inversamente proporcional al aumento en el gasto másico de la corriente del río.

En los casos en los cuales se maneja un gasto semejante o proporcional al gasto de la descarga se observa una mayor dispersión del mercurio, como en las Figuras 5.1, 5.10, 5.19 y 5.28. En las Figuras 5.3, 5.12, 5.21, 5.30, en donde hay un ligero aumento en el gasto másico del río se observa una menor dispersión del mercurio; aunque el gasto de la descarga permanece constante, el aumento del gasto en el río contribuye a que haya una mayor dilución de la corriente de descarga y por ende una menor dispersión.

Para los casos en los cuales el gasto másico de la corriente principal (87360 kg/seg) no guarda proporción o semejanza con el de la descarga, es decir que el gasto en esta corriente es considerablemente mayor al de la descarga (132.6 kg/seg), disminuye la dispersión del mercurio en la superficie del río como se muestra en las Figuras 5.4, 5.13, 5.22 y 5.31.

En los casos en los que los gastos no son tan desproporcionados (Figuras 5.5, 5.14, 5.23, 5.32), aunque tampoco guardan mucha relación en los gastos másicos de la corriente del río (8540 kg/seg) y de la descarga (132.6 kg/seg) se observa

una mayor dispersión del mercurio a lo largo del río. Cuando disminuye el gasto en la corriente principal (5450 kg/seg) y permanece constante el gasto de la descarga (132.6 kg/seg), como los casos de las figuras 5.6, 5.15, 5.24 y 5.33, la dispersión del mercurio es ligeramente mayor. En las Figuras 5.7, 5.16, 5.25 y 5.34 hay cierta similitud en el comportamiento de la dispersión del mercurio a los casos anteriores, sin embargo, el gasto másico de la corriente del río (87360 kg/seg) no guarda similitud con el gasto másico de la descarga (1326 kg/seg). Para los casos de las Figuras 5.8, 5.17, 5.26 y 5.35 se observa un ligero aumento en la dispersión del mercurio, por la disminución en el gasto másico de la corriente del río (60780 kg/seg), manteniendo constante el gasto en la descarga (1326 kg/seg).

5.3.3. Efecto del gasto másico de la descarga

El efecto de la descarga en la dispersión del mercurio está relacionado con el gasto del río, ya que si el gasto másico en esta corriente disminuye hay menor dilución de la corriente de descarga y como consecuencia una mayor dispersión del contaminante a lo largo de la superficie del río; por el contrario, si aumenta el gasto en la corriente principal, se diluye el flujo de la descarga, provocando que disminuya su dispersión. Esto queda de manifiesto en las Figuras 5.1, 5.10, 5.19 y 5.28, en las cuales existe cierta relación entre los gastos másicos de las dos corrientes de entrada, en las cuales para la corriente principal se transporta un gasto másico de 5450 kg/seg y en la descarga 1326 kg/seg, lo que influye en que haya una mayor dispersión del mercurio. Cuando el gasto en la descarga permanece constante y se aumenta el gasto en la corriente principal 8540 kg/seg, como se observa en las Figuras 5.3, 5.12, 5.21 y 5.30, disminuye la dispersión del mercurio. Esta tendencia de disminución en la dispersión del mercurio se puede observar en otros casos, ver Figuras 5.5, 5.14, 5.23 y 5.32 en los cuales el gasto de la descarga (132.6 kg/seg) es demasiado pequeño en comparación con el gasto en la corriente principal (8540 kg/seg). Lo anterior también se aplica para las Figuras 5.7, 5.16, 5.25 y 5.34, en los cuales se observa que aumenta el gasto en

la corriente principal (87360 kg/seg) y en la descarga (1326 kg/seg), pero que a pesar de esto no guardan proporción los gastos máxicos.

5.3.4 Efecto de la concentración de mercurio en la descarga

La concentración del mercurio no afecta en la forma en que se dispersa en el río; esto queda de manifiesto en las Figuras 5.1 y 5.2 en las cuales se tiene una concentración de entrada de mercurio de 5×10^{-9} kg/kg agua y 1×10^{-8} kg/kg agua, respectivamente; aquí se observa que la dispersión del mercurio en ambas figuras es la misma, sin embargo, a pesar de que se tiene un comportamiento semejante, se aprecia que en cada uno de los contornos las concentraciones de mercurio son mayores. Para constatar esto último se analizarán algunos casos en los cuales se manejan gastos máxicos proporcionales en ambas corrientes de entrada pero con distintas morfologías y como ya se mencionó, con diferentes concentraciones de mercurio, (Figuras 5.1, 5.2, 5.10, 5.11, 5.19, 5.20, 5.28 y 5.29); asimismo, algunos de los casos en los que se manejan gastos altos del río y gastos pequeños en la descarga, (Figuras 5.7, 5.9, 5.16, 5.18, 5.25, 5.27, 5.34 y 5.36). Las Tablas 5.11 a 5.18 muestran las diferencias de concentración en cada uno de los contornos para cada caso.

Para los casos de las Figuras 5.1 y 5.2 se tienen el mismo número de perfiles (siete) de dispersión con diferente color cada uno que muestran las concentraciones de mercurio que van de verde (el cual representa la concentraciones mayores) al azul; las concentraciones mayores se localizan en el margen derecho del río y disminuyen conforme aumenta el ancho del río y la distancia. Para el caso de la Figura 5.1 se tiene que hasta el segundo contorno se sobrepasa el límite máximo permisible de mercurio establecido por la NOM-127-SSA-1994 para agua de consumo humano, mientras que las demás concentraciones quedan dentro de la norma.

En la Figura 5.2 se observa que los primeros cuatro contornos de dispersión del mercurio quedan fuera de norma antes mencionada; esto se debe a que la concentración de entrada de mercurio en la descarga es mayor al caso anterior, por lo que hay menor dilución. Los perfiles restantes quedan dentro de la norma.

Tabla 5.11. Contornos de concentración y dispersión del mercurio de las Figuras 5.1 y 5.2.

Figura 5.1		Figura 5.2	
Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)	Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)
1	2.89×10^{-09} - 1.24×10^{-09}	1	5.78×10^{-9} - 2.48×10^{-9}
2	1.03×10^{-09}	2	2.06×10^{-9}
3	8.26×10^{-10}	3	1.65×10^{-9}
4	6.19×10^{-09}	4	1.24×10^{-9}
5	4.13×10^{-10}	5	8.26×10^{-10}
6	2.06×10^{-10}	6	4.13×10^{-10}
7	$0.00 \times 10^{+00}$	7	$0.00 \times 10^{+00}$

En las Figuras 5.10 y 5.11 los perfiles de dispersión del mercurio son semejantes; difieren las concentraciones en cada uno de ellos de una figura a otra y ambos casos constan de 7 contornos. En la Figura 5.10 los primeros dos contornos tienen concentraciones de mercurio superiores a la norma NOM-127-SSA-1994, el tercer contorno posee el límite máximo permisible fijado por dicha norma y los contornos restantes tienen concentraciones que están dentro de norma.

Para el caso de la Figura 5.11 se tiene que los primeros cuatro contornos rebasan el límite establecido por la norma, el quinto perfil tiene una concentración igual al límite establecido por dicha norma y los dos contornos restantes tienen concentraciones que están dentro de la norma; esto muestra que para este caso, un ancho mayor del río tiene concentraciones mayores, se debe a que en la descarga hay mayor concentración de mercurio.

Tabla 5.12. Contornos de concentración y dispersión del mercurio de las Figuras 5.10 y 5.11.

Figura 5.10		Figura 5.11	
Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)	Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)
1	3.25×10^{-09} - 1.50×10^{-09}	1	6×10^{-09} - 3×10^{-09}
2	1.25×10^{-09}	2	2.50×10^{-09}
3	1.00×10^{-09}	3	2.00×10^{-09}
4	7.50×10^{-10}	4	1.50×10^{-09}
5	5.00×10^{-10}	5	1.00×10^{-09}
6	2.50×10^{-10}	6	5.00×10^{-10}
7	$0.00 \times 10^{-+00}$	7	$0.00 \times 10^{-+00}$

Las Figuras 5.19 y 5.20 están constituidas por siete contornos que representan las concentraciones de mercurio a lo largo y ancho del río. En la Figura 5.19 sólo los dos primeros perfiles de dispersión tienen concentraciones del contaminante superiores al que establece la norma antes indicada, el tercer contorno tiene la concentración límite y los contornos restantes poseen concentraciones que están dentro de norma. En la Figura 5.20 se tienen cuatro contornos con concentraciones por arriba de norma, el quinto perfil tiene la concentración máxima permisible y los contornos restantes tienen concentraciones que están dentro de norma.

En la Figura 5.20 se tiene que en un número mayor de contornos se sobrepasan los límites establecidos por la norma NOM-127-SSA-1994; este comportamiento se debe a que en la descarga hay mayor concentración de mercurio que en la Figura 5.19.

Tabla 5.13. Contornos de concentración y dispersión del mercurio de las Figuras 5.19 y 5.20.

Figura 5.19		Figura 5.20	
Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)	Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)
1	2.50×10^{-09} - 1.50×10^{-09}	1	5.00×10^{-09} - 3×10^{-09}
2	1.25×10^{-09}	2	2.50×10^{-09}
3	1.00×10^{-09}	3	2.00×10^{-09}
4	7.50×10^{-10}	4	1.50×10^{-09}
5	5.00×10^{-10}	5	1.00×10^{-09}
6	2.50×10^{-10}	6	5.00×10^{-10}
7	$0.00 \times 10^{+00}$	7	$0.00 \times 10^{+00}$

Cada una de las Figuras 5.28 y 5.29, con bifurcación, están constituidas por siete contornos de dispersión de mercurio. En la Figura 5.28 se tiene que los primeros dos perfiles poseen concentraciones mayores a la determinada por la norma, el tercer contorno tiene la concentración máxima aceptada por dicha norma y los cuatro contornos restantes tienen concentraciones que están dentro de la norma. En la Figura 5.29 se tiene que los primeros cuatro contornos tienen concentraciones de mercurio superiores a la que establece la norma ya citada, el quinto contorno tiene la concentración límite y los otros dos contornos con concentraciones dentro de norma. Las concentraciones mayores de mercurio en los contornos se deben al aumento de concentración de mercurio en la descarga.

Tabla 5.14. Contornos de concentración y dispersión del mercurio de los Figuras 5.28 y 5.29.

Figura 5.28		Figura 5.29	
Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)	Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)
1	2.50×10^{-09} - 1.50×10^{-09}	1	5.00×10^{-09} - 3.00×10^{-09}
2	1.25×10^{-09}	2	2.50×10^{-09}
3	1.00×10^{-09}	3	2.00×10^{-09}
4	7.50×10^{-10}	4	1.50×10^{-09}
5	5.00×10^{-10}	5	1.00×10^{-09}
6	2.50×10^{-10}	6	5.00×10^{-10}
7	$0.00 \times 10^{+00}$	7	$0.00 \times 10^{+00}$

Las Figuras 5.7 y 5.9 están constituidas de cinco perfiles de dispersión de mercurio cada una, los cuales tienen un comportamiento semejante en ambos casos. La dispersión del mercurio en el río es mínima por la disparidad existente entre los gastos máxicos de entrada del río y de la descarga, como ya se ha mencionado. En la Figura 5.7 las concentraciones de cada uno de los contornos de dispersión del contaminante están fuera de norma, a diferencia de la Figura 5.9 en el cual solo el primer contorno tiene una concentración por arriba de la norma y las demás concentraciones están por debajo. Esta diferencia es causada por el aumento de la concentración de mercurio transportada por la descarga.

Tabla 5.15. Perfiles de concentración y dispersión del mercurio de las Figuras 5.7 y 5.9.

Caso 5.7		Caso 5.9	
Contorno	Concentración de (kg Hg/kg agua)	Contorno	Concentración de mercurio (kg Hg/kg agua)
1	6.15×10^{-10}	1	1.23×10^{-9}
2	4.61×10^{-10}	2	9.23×10^{-10}
3	3.08×10^{-10}	3	6.15×10^{-10}
4	1.54×10^{-10}	4	3.08×10^{-10}
5	0.00×10^{-10}	5	$0.00 \times 10^{+00}$

En las Figuras 5.16 y 5.18 se observa la forma en que se dispersa el mercurio de acuerdo con la manera en la que están distribuidos y la amplitud que tienen los perfiles de dispersión del metal, los cuales son tres para ambos casos. En la Figura 5.16 se puede ver que las concentraciones de cada uno de los contornos no rebasan el límite establecido por la norma NOM-127-SSA-1994. Para la Figura 5.18 el primer contorno tiene la concentración límite, mientras que los otros dos contornos tienen concentraciones por debajo de la que marca la norma.

Tabla 5.16. Perfiles de concentración y dispersión del mercurio en las Figuras 5.16 y 5.18.

Figura 5.16		Figura 5.18	
Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)	Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)
1	5.00×10^{-10}	1	1.00×10^{-9}
2	2.50×10^{-10}	2	5.00×10^{-10}
3	0.00×10^{-10}	3	$0.00 \times 10^{+10}$

En las Figuras 5.25 y 5.27 la dispersión del mercurio es semejante en los dos casos, constituidos por tres perfiles de distribución cada uno, difiriendo en la concentración que tiene cada contorno. En la Figura 5.25 los tres contornos de dispersión tienen concentraciones inferiores a la marcada por la norma NOM-127-

SSA-1994, mientras que para la Figura 5.27 se observa que solo el primer contorno tiene una concentración igual a la establecida y los otros dos contornos tienen concentraciones por debajo de la norma.

Tabla 5.17. Perfiles de concentración y dispersión del mercurio para las Figuras 5.25 y 5.27.

Figura 5.25		Figura 5.27	
Contorno	Concentración (kg Hg/kg agua)	Contorno	Concentración (kg Hg/kg agua)
1	5.00×10^{-10}	1	1.00×10^{-9}
2	2.50×10^{-10}	2	5.00×10^{-10}
3	$0.00 \times 10^{+00}$	3	$0.00 \times 10^{+00}$

El comportamiento en la forma en que se dispersa el mercurio para las Figuras 5.34 y 5.36 es semejante, conteniendo la misma cantidad de contornos de dispersión y la amplitud de cada uno de ellos, distinguiéndose por las concentraciones de cada contorno. En la Figura 5.34 se tiene que las concentraciones de mercurio no rebasan la norma NOM-127-SSA-1994. Para el caso de la Figura 5.36 el primer contorno tiene una concentración igual al límite máximo permisible y los otros dos contornos tienen concentraciones por debajo a lo establecido por la norma.

Tabla 5.18. Contornos de dispersión y concentración del mercurio para las Figuras 5.34 y 5.36.

Figura 5.34		Figura 5.36	
Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)	Contorno	Concentración de mercurio (kg/kg agua)
1	5.00×10^{-10}	1	1.00×10^{-9}
2	2.50×10^{-10}	2	5.00×10^{-10}
3	$0.00 \times 10^{+00}$	3	$0.00 \times 10^{+00}$

5.3.5. Dispersión del mercurio de acuerdo a la geometría.

En este apartado se hace un análisis más detallado de cómo influye la morfología del río en la dispersión del mercurio y la repercusión de dos variables adicionales, el gasto másico de la descarga y del río, permaneciendo constante la concentración del contaminante.

Río recto

Figura 5.1. Dada la relación tan pequeña que guardan los volúmenes del río (5450kg/seg) y de la descarga (1326 kg/seg), la dispersión del mercurio (5×10^{-9} en fracción masa) se realiza en aproximadamente dos terceras partes a lo ancho del río muy cerca de la descarga y se incrementa conforme aumenta la distancia que al final de la longitud de la figura es de aproximadamente las cuatro quintas partes del ancho. Esto demuestra que la dispersión es directamente proporcional al aumento de la distancia, de lo cual se infiere que a una distancia mayor a la manejada en la figura, la dispersión del mercurio sería total en toda la superficie del río. Se observa que la concentración máxima del contaminante se ubica en la descarga y representa aproximadamente el 20% de la figura con una concentración de mercurio que va de 4.1×10^{-9} a 2.68×10^{-9} kg/kg agua, disminuyendo con el aumento de la distancia; sin embargo, el mercurio se concentra del lado en el cual se posiciona la descarga. El rango de concentración de mercurio a lo largo del margen derecho fluctúa entre 2.89×10^{-9} - 1.86×10^{-9} kg/kg agua, el cual sobrepasa el límite máximo permitido de mercurio presente en agua para consumo humano, establecido por la norma NOM-127-SSA-1994.

Figura 5.3. En este caso se observa una disminución en la dispersión del mercurio, este comportamiento está determinado por el aumento en el gasto másico de la corriente del río (8540 kg/seg). El gasto de la descarga no tiene influencia ya que éste permanece constante al caso anterior (1326 kg/seg). La dispersión del contaminante es mayor con el aumento de la distancia; cerca de la

descarga representa menos de la mitad del ancho del río y al final de la figura es aproximadamente de las dos terceras partes. De acuerdo con este comportamiento se puede deducir que la distancia en la que la dispersión del contaminante fuese total será mayor al caso anterior, asimismo la concentración máxima de mercurio se ubica en la entrada de la descarga, disminuyendo con el aumento de la distancia con un rango de 4.48×10^{-9} a 1.57×10^{-9} kg/kg agua; esta concentración del mercurio se localiza en el margen derecho del río y mantiene este comportamiento a todo lo largo de la figura, sobrepasando el límite máximo permisible por la norma ya citada para agua de consumo humano.

Figura 5.4. En este caso la dispersión del mercurio es menor al caso anterior, esto se debe al aumento en el gasto másico de la corriente del río (60780 kg/seg) y por la disminución en el gasto másico de la descarga (132.6 kg/seg). La concentración máxima del contaminante solo se mantiene justo en el punto de descarga, para posteriormente diluirse, localizándose la mayor concentración de mercurio a lo largo de todo el margen derecho del río, con una concentración constante de 1.37×10^{-10} kg/kg agua; esta concentración está por debajo del límite máximo de mercurio permitido por la NOM-127-SSA-1994.

Figura 5.5. En esta figura la dispersión del mercurio es mayor al caso anterior, lo cual es causado por la disminución del gasto másico en la corriente del río (8540kg/seg), dado que se mantiene constante el gasto másico en la descarga (132.6 kg/seg), asimismo, la dispersión del mercurio es mayor con el aumento de la distancia, se presume que la dispersión se llevará a cabo en todo lo ancho del río, para ello se requiere un tiempo y distancia mayor a 100 metros (que en las Figuras 5.1 y 5.3). En la entrada de la descarga la dispersión es de aproximadamente 1/7 del ancho del río y para el final de la figura es aproximadamente 1/3 parte del ancho del río, la concentración de mercurio a lo largo del margen derecho del río fluctúa entre una concentración de mercurio de 6.54×10^{-10} a 1.64×10^{-10} kg/kg agua. Asimismo la concentración máxima del mercurio se localiza solo en el punto de descarga y se diluye rápidamente.

Figura 5.6. La dispersión del mercurio es mayor en este caso que el anterior por la disminución del gasto en la corriente del río (5450 kg/seg), ya que el gasto en la descarga (132.6 kg/seg) permanece constante. En la entrada de la descarga es apenas perceptible la concentración máxima del mercurio, dispersándose rápidamente, estabilizándose en un rango de concentración de mercurio que va de 8.74×10^{-10} a 1.75×10^{-10} kg/kg agua. Dichas concentraciones están por arriba del límite máximo de mercurio para agua para consumo humano aceptado por la norma NOM-127-SSA-1994. Se puede deducir que en un tiempo y una distancia mayor a 100 metros la dispersión del mercurio abarcará todo lo ancho del río, lo cual se deduce de la figura, en la cual para el punto de entrada de la descarga alcanza aproximadamente la 1/7 parte del ancho de la figura y al final de los 100 metros es mayor a la tercera parte.

Figura 5.7. En esta figura la dispersión del mercurio a lo largo del río es mínima, este comportamiento está determinado por el gasto másico de la corriente principal (87360 kg/seg), que es mucho mayor al gasto de la descarga (1326 kg/seg). También se puede observar que la dispersión es directamente proporcional al aumento de la distancia; en la entrada de la descarga abarca aproximadamente 1/7 del ancho del río y para una distancia de 100 metros el mercurio presente en el río representan aproximadamente $\frac{1}{4}$ parte del ancho del río, infiriéndose que el mercurio abarcará todo el ancho del río a una distancia mayor a los 100 metros. La concentración del mercurio se sitúa en el margen derecho del río y tiene una concentración que fluctúa en un rango de 6.15×10^{-10} a 1.54×10^{-10} kg/kg agua que no rebasa el límite máximo establecido por la norma NOM-127-SSA-1994 para agua de consumo humano.

Figura 5.8. Para este caso se observa que la dispersión del mercurio es mayor al caso anterior; esto se debe a la disminución en el gasto másico transportado por la corriente principal (60780 kg/seg), ya que el gasto manejado por la descarga se mantiene constante al caso anterior, así como la concentración de entrada del

mercurio (5×10^{-9} kg/kg), como en el caso anterior. La dispersión aumenta con la distancia, para el inicio es de $1/7$ del ancho del río y para el final de los 100 metros de aproximadamente $1/3$; de este comportamiento se deduce que para una distancia mayor a los 100 metros pero menor que el caso anterior, la dispersión se realizará a todo lo ancho del río. También se puede observar que la línea situada en el margen derecho del río en donde se localiza el mercurio tiene una concentración mayor al caso anterior con un rango de 8.20×10^{-10} a 1.64×10^{-10} kg/kg agua, que se mantiene dentro del límite máximo de mercurio en agua para consumo humano, establecido por la norma NOM-127-SSA-1994. Cerca de la entrada de la descarga se tiene una concentración mayor de mercurio (1.31×10^{-9} kg/kg agua) comparada con la Figura 5.7; este comportamiento está determinado por la disminución en el volumen de la corriente del río.

Río en forma de codo

Figura 5.10. Se observa que la dispersión del mercurio con una concentración de entrada de 5×10^{-9} kg/kg agua es intensa, justo en el punto de descarga (5450 kg/seg) abarcando las $2/3$ partes del ancho del río; esto se debe a la proporción que guardan los gastos entre la descarga y la corriente principal (1326 kg/seg). Se puede ver que la dispersión es mayor con el aumento de la distancia. Otro factor que influye en dicho comportamiento es la curvatura del río, es decir la morfología, que determina que la dispersión del mercurio sea total, aproximadamente $1/10$ parte antes del final del río; a mayor distancia la tendencia es que el mercurio se homogenice en toda la superficie del río. Se observa que el mercurio se localiza en el margen derecho del río y ahí la concentración es mayor. En el punto de descarga y en aproximadamente $2/5$ partes del río, se observa una concentración máxima de mercurio, con un rango de 3.25×10^{-9} - 2.25×10^{-9} kg/kg agua. Otra observación importante es que la concentración del contaminante a lo largo de todo el río, sobrepasa en el margen derecho el límite máximo permisible de mercurio en agua para consumo humano dado por la NOM-127-SSA-1994.

Figura 5.12. En este caso, al igual que el anterior, se maneja el mismo gasto másico de la descarga (1326 kg/seg) el gasto másico transportado por el río es mayor (8540kg/seg); este cambio influye para que la dispersión del mercurio sea menor, se observa que en el punto de descarga la dispersión del mercurio es inferior a la mitad del ancho del río y que para el final de la figura es de las 3/4 partes; en este caso la curvatura tiene cierta influencia en la dispersión, sin embargo, el aumento en el gasto de entrada del río también es determinante. Se puede observar que el mercurio se localiza en el margen derecho y que la concentración es menor por el aumento en el gasto de la corriente principal. Las concentraciones máximas de mercurio se observan a la entrada de la descarga y hasta poco antes de la curvatura de la figura con más de las 2/3 partes del ancho del río, con un rango de 3.25×10^{-9} a 2.75×10^{-9} kg/kg agua. Para este caso también se sobrepasa el límite de mercurio presente en agua para consumo humano establecido por la norma NOM-127-SSA-1994 a todo lo largo del río.

Figura 5.13. Se observa que la dispersión del mercurio es apenas visible en aproximadamente la tercera parte del primer tramo recto, aunque su concentración tiende a cero, con el aumento de la distancia, este comportamiento está determinado por los gastos tan dispares manejados por las dos corrientes, 60780 kg/seg para la corriente principal y 132.6 kg/seg para la descarga.

Figura 5.14. La dispersión del mercurio en el punto de descarga es de aproximadamente 1/5 parte del ancho del río, incrementándose con la distancia, sobre todo en la curvatura, aumentando en más de 1/3 parte, después de la curvatura disminuye la dispersión llegando a la cuarta parte en el final de la figura. La dispersión es menor que en los dos primeros casos; esto se debe a que el gasto másico manejado en la descarga (132.6 kg/seg) es demasiado pequeño comparado con el de la corriente del río (8540 kg/seg). Cabe mencionar que el mercurio se localiza en el margen derecho del río, que su concentración máxima

fluctúa entre 5.00×10^{-10} y 2.50×10^{-10} kg/kg agua, por lo que no se sobrepasa el límite establecido por norma NOM-127-SSA-1994.

Figura 5.15. En esta figura se observa una mayor dispersión del mercurio debido a que disminuye el gasto másico de la corriente del río y se mantiene constante el gasto en la descarga (132.6 kg/seg). A la entrada del río la dispersión del mercurio se lleva a cabo en más de 1/5 parte del ancho del río y aumenta con la distancia y en mayor proporción en la curvatura, siendo ésta determinante en dicho fenómeno, en la cual abarca poco más de la tercera parte, disminuyendo la dispersión en la parte recta y abarcando aproximadamente 1/3 del ancho del río. Al igual que en los casos anteriores, la mayor concentración del mercurio se localiza en el margen derecho del río, y solo en los primeros 20 metros la concentración de este contaminante 1.25×10^{-9} kg/kg agua es superior al de la norma NOM-127-SSA-1994, aunque el ancho de este perfil es pequeño y para el segundo contorno el rango es de 7.50×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua.

Figura 5.16. La dispersión del mercurio en la entrada es de aproximadamente 1/7 del ancho del río con una tendencia a un ligero incremento, dicho comportamiento en la primera parte recta se debe a que el volumen manejado en la descarga (1326 kg/seg) es mucho menor al que fluye a través de la corriente del río (87360 kg/seg), sin embargo, desde el inicio de la curvatura la dispersión se incrementa ligeramente hasta el final de ésta abarcando aproximadamente 1/6 parte del ancho del río, disminuyendo en la parte recta hasta volverse constante teniendo aproximadamente 1/6 del ancho del río. El mercurio se localiza en el margen derecho del río y la concentración de este contaminante tiene un rango que va de 5.00×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua, inferior al límite máximo permitido en agua para consumo humano de la norma NOM-127-SSA-1994; este comportamiento se debe a la disparidad de en los gastos de las corrientes de entrada.

Figura 5.17. Este caso maneja el mismo gasto másico en la descarga 1326 kg/seg, disminuyendo el transportado por la corriente del río 60780 kg/seg lo que

provoca que la dispersión del mercurio aumente ligeramente. Al igual que en el caso anterior, la dispersión aumenta en una pequeña proporción en la primera parte recta, siendo mayor al principio y durante toda la curvatura; al final de esta, disminuye la dispersión, estabilizándose en la segunda parte recta. En la entrada la dispersión abarca aproximadamente 1/3 parte, en la curvatura es de 1/4 parte y en la segunda parte curva es de poco más de 1/5 parte. El rango de concentraciones de mercurio es de 5.00×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua, por lo que no sobrepasa el límite máximo permisible de mercurio establecido por la norma NOM-127-SSA-1994.

Río en forma de doble codo

Figura 5.19. Se observa que la dispersión en la entrada del río es de aproximadamente la mitad y rápidamente aumenta, cerca de la primera curva en la cual la dispersión es casi total; en la segunda parte recta una pequeña porción del ancho del río queda libre de mercurio. En el inicio de la segunda curva se lleva a cabo una dispersión total del mercurio en toda la superficie, la cual se mantiene hasta el final de la figura, de lo cual se deduce que el comportamiento de dispersión se mantendría a una distancia mayor y estará determinado por la proporción tan estrecha que guardan los gastos de entrada del río (5450 kg/seg) como el de la descarga (1326 kg/seg). Se observa que en la entrada y hasta aproximadamente 50 metros se extiende una mancha que guarda las concentraciones máximas de mercurio que van de 3.00×10^{-9} - 1.50×10^{-9} kg/kg agua. Desde el inicio hasta el final del río se mantienen concentraciones mayores a las establecidas como máximo en la norma para agua de consumo humano, las cuales se localizan principalmente en el margen derecho del río con concentraciones de mercurio que van desde 3.00×10^{-9} a 1.25×10^{-9} kg/kg agua.

Figura 5.21. En este caso la dispersión del mercurio disminuye por el efecto del aumento del gasto de la corriente principal 8540 kg/seg, porque el gasto de la descarga (1326 kg/seg) permanece constante. En el punto de descarga la

dispersión del mercurio se lleva a cabo en aproximadamente la mitad del ancho del río y aumenta en mayor grado por influencia de la curvatura; en la segunda parte recta la dispersión disminuye ligeramente, en la tercera parte recta la dispersión del mercurio es total en todo lo ancho del río por efecto de la segunda curvatura. La mayor concentración del mercurio se localiza en el margen derecho del río, en la cual las concentraciones están por arriba de la NOM-127-SSA-1994 con concentraciones de mercurio que van de 3.00×10^{-9} a 1.25×10^{-9} kg/kg agua en aproximadamente la mitad del río, con tendencia a disminuir con la distancia, alcanzando el límite máximo permitido por la norma (1×10^{-9} kg/kg agua) hasta casi el final de la Figura y reduciéndose la amplitud del contorno.

Figura 5.22. La dispersión del mercurio (5×10^{-9} kg/kg agua) es prácticamente despreciable, debido a la desproporción que guardan los gastos manejados por las dos corrientes, 60780 kg/seg del río y 132.6 kg/seg de la descarga. La contribución de la morfología es nula.

Figura 5.23. La dispersión del contaminante es pequeña por la acción que ejerce la disparidad en los gastos de entrada del río 8540 kg/seg y de la descarga 132.6 kg/seg. La dispersión del contaminante, a pesar de ser pequeña, se observa que en la primer curvatura aumenta y se llega a un punto máximo (de $1/7$ del ancho del río en la entrada a $1/4$ en la primer curvatura) y va disminuyendo con el aumento de la distancia hasta el final de la figura donde se observa que el mercurio se ubica en el margen derecho del río. Cabe mencionar que las concentraciones de mercurio no rebasan los límites máximos permisibles las cuales van de 1.00×10^{-9} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua. La concentración máxima se localiza en una pequeña línea cercana al punto de descarga esta concentración máxima es la que establece la norma NOM-127-SSA-1994.

Figura 5.24. En este caso la dispersión aumenta en comparación con el caso anterior, en la entrada alcanza $1/6$ parte del ancho del río y aumenta considerablemente en la curvatura, siendo de aproximadamente $1/3$ del ancho del

río, se reduce en la segunda parte recta hasta estabilizarse en el inicio de la segunda curvatura manteniéndose constante y teniendo un ligero aumento en la tercera parte recta con un ancho de poco menos de la tercera parte del ancho total del río. Este comportamiento está determinado por dos factores: en primer lugar por la disminución en la corriente del río 5450 kg/seg lo que contribuye a que haya una mayor dispersión ya que el gasto másico en la descarga se mantiene constante (132.6 kg/seg) y en segundo lugar a la contribución de la curvatura.

Figura 5.25. En el punto de descarga la dispersión del mercurio abarca aproximadamente una décima parte del ancho del río con tendencia al incremento, sobre todo en la curvatura abarcando 1/6 parte del ancho del río; en la segunda parte recta disminuye la dispersión hasta después de la segunda curvatura para tener un ligero aumento en la tercera parte recta y mantenerse constante comprendiendo poco menos de 1/6 parte del ancho del río. La poca dispersión del mercurio tiene que ver con el hecho de que el gasto de entrada de la corriente del río 87360 kg/seg es muy alto comparado con el de la descarga 1326 kg/seg, lo cual reduce la dispersión del contaminante. Por otra parte, el ligero aumento en la dispersión tiene que ver con el efecto de la primera curvatura. El mercurio se sitúa en el margen derecho del río manteniendo concentraciones menores al límite máximo permitido por la norma NOM-127-SSA-1994, con un rango de 5×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua.

Figura 5.26. En este caso se observa una mayor dispersión del mercurio que en el caso anterior; para este caso en la entrada se tiene que el mercurio se distribuye a través de aproximadamente 1/6 parte del ancho del río y se incrementa en la curvatura en aproximadamente 1/4 del ancho del río. Después de la curvatura tiene una ligera disminución tanto en la segunda parte recta como en la segunda parte curva, mientras que en la tercera parte recta tiene un ligero aumento que constituye aproximadamente 1/5 parte del ancho del río. Este aumento en la dispersión tiene que ver con la disminución del gasto másico de la corriente principal de 60780 kg/seg con un gasto constante de la descarga (1326 kg/seg).

Asimismo, esta disparidad entre los gastos másicos provoca que la dispersión se realice en una amplitud pequeña del ancho total del río. La concentración del mercurio se localiza en el margen derecho del río sin que este sobrepase la norma NOM-127-SSA-1994 con un rango de concentración de 7.50×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua.

Río bifurcado

Figura 5.28. La dispersión del mercurio se lleva a cabo en más de las 2/3 partes del ancho del río hasta antes del inicio de las bifurcaciones, efectuándose de manera total en la bifurcación derecha y en poco más de la mitad de la segunda bifurcación. El hecho de que la dispersión se lleve a cabo en la mayor parte de la superficie del río se debe a la proporción tan estrecha que guardan las corrientes de entrada, el río con un gasto másico de 5450 kg/seg y la descarga con 1326 kg/seg. La concentración máxima de mercurio se despliega hasta aproximadamente el inicio de las bifurcaciones y decrece hasta mantener unas concentraciones de 1.25×10^{-9} a 1.00×10^{-9} kg/kg agua en el brazo derecho del río, en donde la primera concentración se localiza en el margen derecho de este brazo rebasando el límite máximo permisible de la norma NOM-127-SSA-1994 y la segunda concentración representa el perfil superior, siendo el límite máximo permitido por la norma. También se observa que la homogeneización de la concentración del mercurio tiende a aumentar con la distancia y esto se puede apreciar en ambos brazos del río. En el brazo izquierdo en donde también se observa presencia de mercurio, se mantiene una concentración de 5.00×10^{-10} kg/kg agua en la parte inferior de dicha bifurcación y de 2.50×10^{-10} kg/kg agua en el contorno superior predominando esta última concentración.

Figura 5.30. El gasto másico de la descarga es el mismo que en el caso anterior (1326 kg/seg) aumentando en la corriente principal (8540 kg/seg) contribuyendo a que la dispersión del mercurio decrezca. Para este caso se observa que en el punto de descarga la dispersión del mercurio alcanza poco menos de la mitad del

ancho del río, y tiene un ligero aumento hasta el área de la bifurcación y alcanza solo una pequeñísima parte de la segunda bifurcación que prácticamente puede despreciarse. La dispersión del mercurio se lleva a cabo solo en el primer brazo, abarcándolo totalmente. Se observa que a diferencia del caso anterior el mercurio alcanza una concentración más alta a una distancia mayor, ampliándose a una distancia de aproximadamente las 2/3 partes de la longitud total del río y disminuyendo en la última parte del río. Se observa que en todo el margen derecho del río se mantienen concentraciones del mercurio por arriba de los límites establecidos por la norma NOM-127-SSA-1994. En la entrada de la descarga y hasta poco antes del inicio de la bifurcación, la concentración máxima de mercurio de 2.50×10^{-9} kg/kg agua, alcanza aproximadamente 1/3 del ancho del río y después de la bifurcación va disminuyendo, alcanzando una concentración de 1.50×10^{-9} kg/kg agua, para finalmente tener una concentración de 1.25×10^{-9} kg/kg agua; estas concentraciones se localizan en el primer contorno del margen derecho de dicha bifurcación, mientras que en el segundo y tercer contornos se tienen concentraciones de 1×10^{-9} kg/kg y 7.50×10^{-10} kg/kg agua respectivamente. El segundo contorno tiene la concentración máxima establecida por la norma ya mencionada, y el tercer contorno está por debajo de este límite.

Figura 5.31. En este caso la dispersión del contaminante es casi nula, este efecto es producido por la desproporción que existe entre el gasto de la descarga (132.6 kg/seg) y el gasto del río (60780 kg/seg).

Figura 5.32. La dispersión de mercurio en la entrada del río es de aproximadamente 1/6 del ancho, se mantiene prácticamente constante y tiende a localizarse en el margen derecho, razón por la cual solo afecta el primer brazo en poco más de 1/3 parte del ancho de éste. En el vértice del brazo derecho se observa un ligero aumento en la dispersión manteniéndose constante hasta el final de la figura. La forma en la que distribuye el mercurio en esa superficie tiene que ver con la disparidad entre los flujos de entrada del río 8540 kg/seg y de la descarga 132.6 kg/seg. También se puede observar que las concentraciones del

mercurio se mantienen en un rango de 5.00×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua a lo largo del río y no sobrepasan los límites establecidos por la norma NOM-127-SSA-1994 para agua de consumo humano.

Figura 5.33. En este caso, la dispersión del mercurio alcanza 1/5 parte del ancho del río desde el punto de descarga manteniéndose prácticamente constante hasta un poco antes del segundo vértice del brazo derecho del río. Al inicio de este empieza un incremento en la dispersión alcanzando más de la mitad del ancho del río para posteriormente mantenerse constante. El aumento en la dispersión en comparación con el caso anterior está determinado por la disminución del gasto másico de la corriente del río 5450 kg/seg dado que se mantiene constante el gasto en la descarga 132.6 kg/seg lo que permite que haya una menor disolución de esta corriente y como consecuencia una mayor dispersión del mismo. La dispersión del mercurio se presenta solo en el margen derecho del río y en la primera bifurcación, las concentraciones de este contaminante no sobrepasan las establecidas como límite por la norma NOM-127-SSA-1994, manteniendo un rango de 7.50×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua.

Figura 5.34. En esta figura la dispersión del mercurio en el punto de descarga se lleva a cabo en aproximadamente la 1/6 parte del ancho del río y se mantiene constante hasta el primer vértice, punto en que da comienzo la primera bifurcación, aumentando hasta un poco antes del segundo vértice para posteriormente mantenerse constante hasta el final de la figura, el cual constituye poco más de un medio del ancho de la bifurcación derecha. Se observa que el brazo izquierdo se mantiene libre de mercurio, esta baja dispersión del mercurio esta determinado por la disparidad en los gastos másicos de la corriente del río 87360kg/seg y el de la descarga 1326 kg/seg. La concentración de mercurio a lo largo del río se mantiene con un rango de 5.00×10^{-10} a 2.50×10^{-10} kg/kg agua, el cual no sobrepasa el límite establecido por la norma NOM-127-SSA-1994 para agua de consumo humano.

Figura 5.35. En este caso se lleva a cabo un ligero aumento en la dispersión del mercurio que en el caso anterior por la reducción en el gasto másico manejado en la corriente del río 60780 kg/seg manteniéndose constante el gasto en la descarga 1326 kg/seg. El mercurio alcanza una proporción superior a 1/6 del ancho del río y se mantiene constante hasta poco antes del inicio del primer vértice del río e inicio de la bifurcación incrementándose ligeramente la dispersión. En el inicio del segundo vértice se observa una mayor dispersión representando poco más de 1/3 parte del ancho del río en la última parte del brazo derecho. También se observa que el mercurio está ausente en el brazo derecho del río, lo que está determinado por la desproporcionalidad de los gastos de las dos corrientes. En este caso tampoco se rebasa el límite máximo permisible de mercurio establecido por la norma NOM-127-SSA-1994, manteniendo unas concentraciones de 7.50×10^{-10} a 5.00×10^{-10} kg/kg agua, localizándose la primera concentración cerca de la entrada de la descarga y va disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar la segunda concentración en el contorno del margen derecho de la bifurcación.

4.4 Sección de figuras

A continuación se presentan las imágenes de cada uno de los casos que se describieron en el punto referente al análisis.

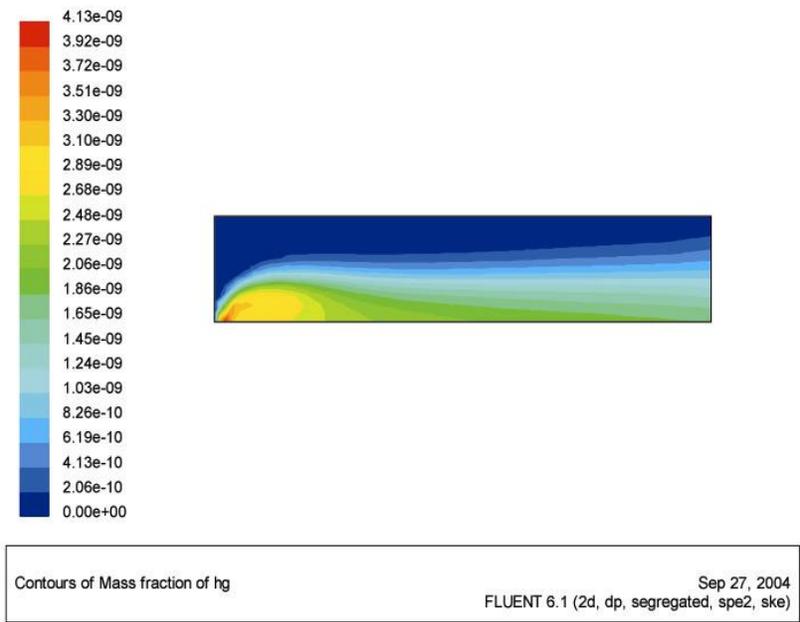


Figura 5.1. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{rio}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

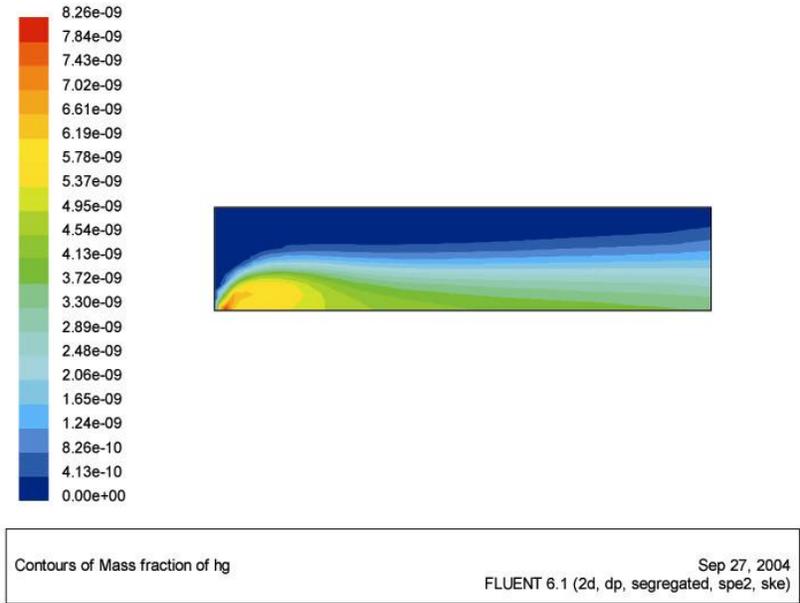


Figura 5.2. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{rio}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

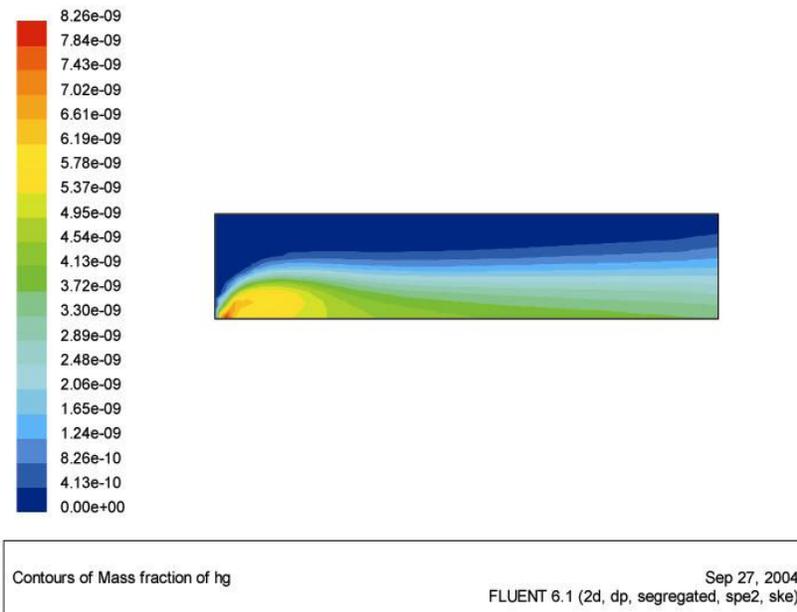


Figura 5.3. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{rio}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

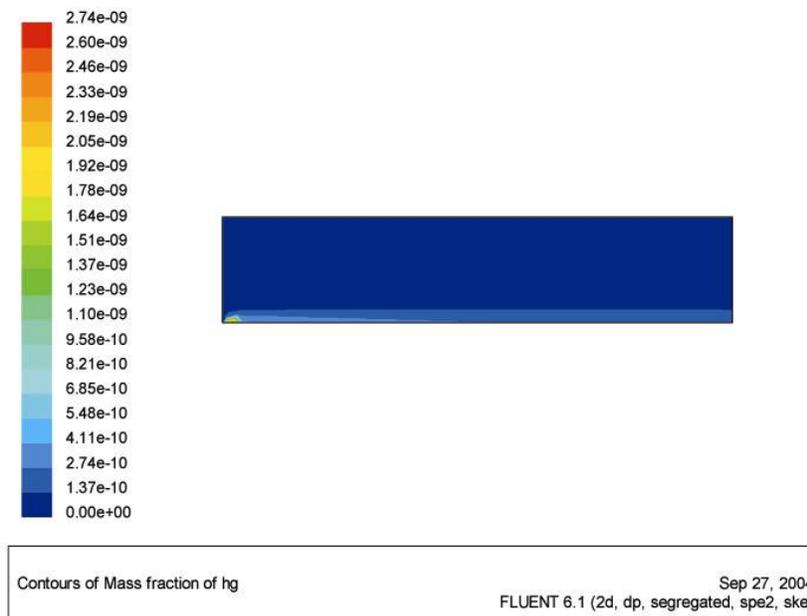


Figura 5.4. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{rio}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

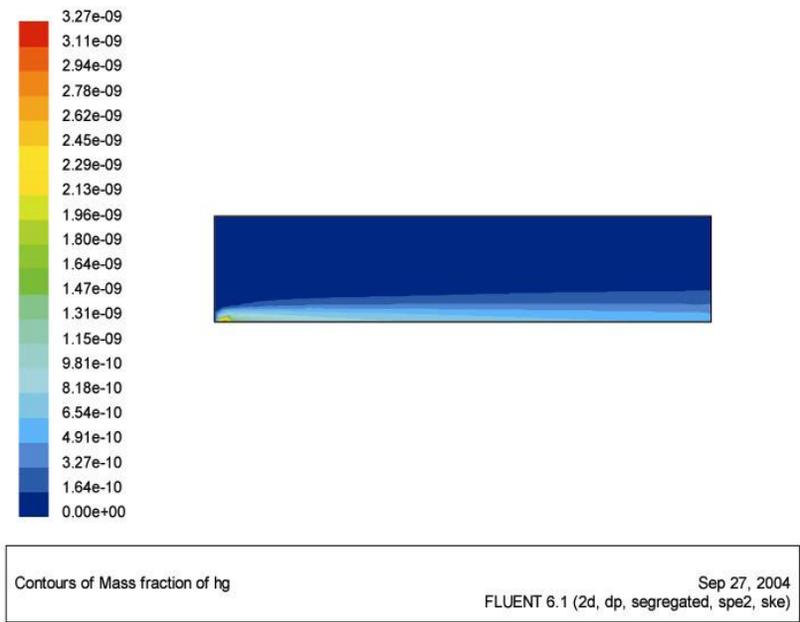


Figura 5.5. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{rio}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

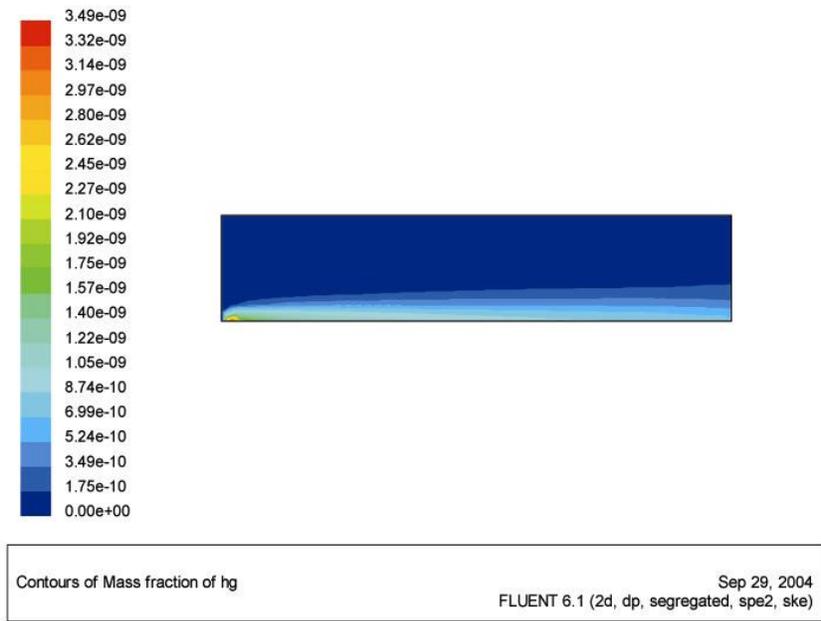


Figura 5.6. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{rio}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

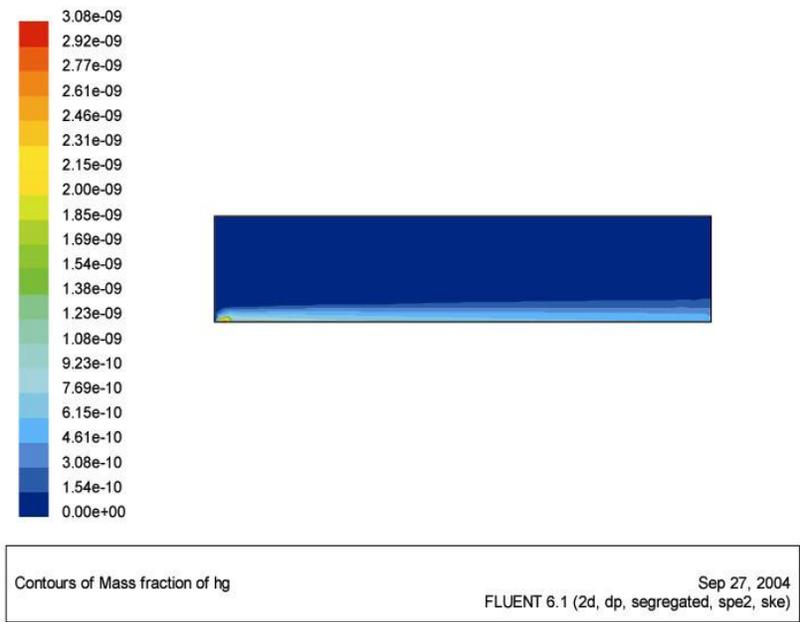


Figura 5.7. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

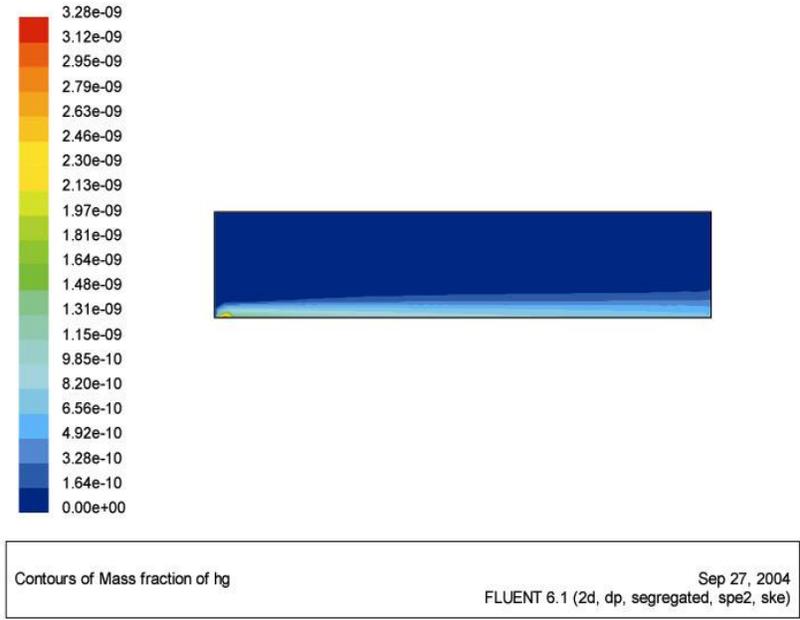


Figura 5.8. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

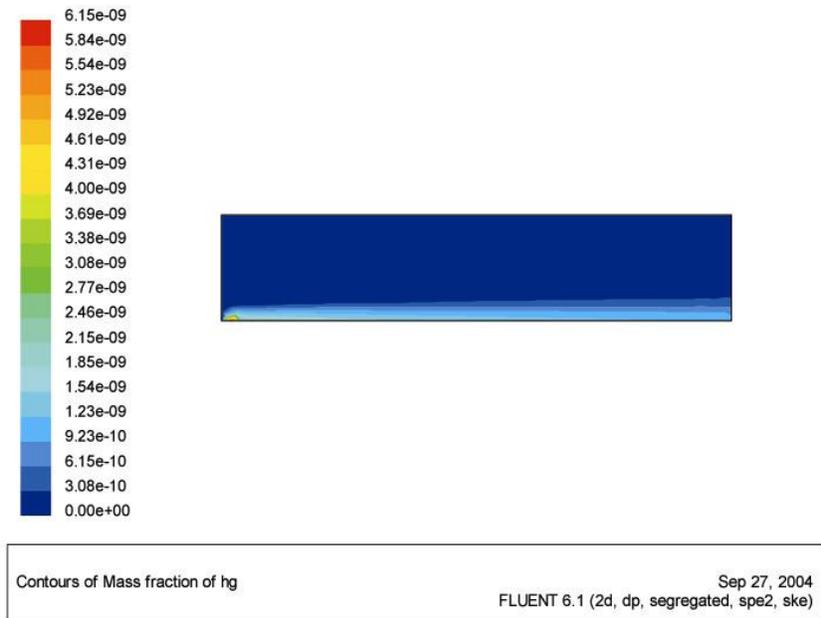


Figura 5.9. Dispersión de mercurio en un río recto. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}= 1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

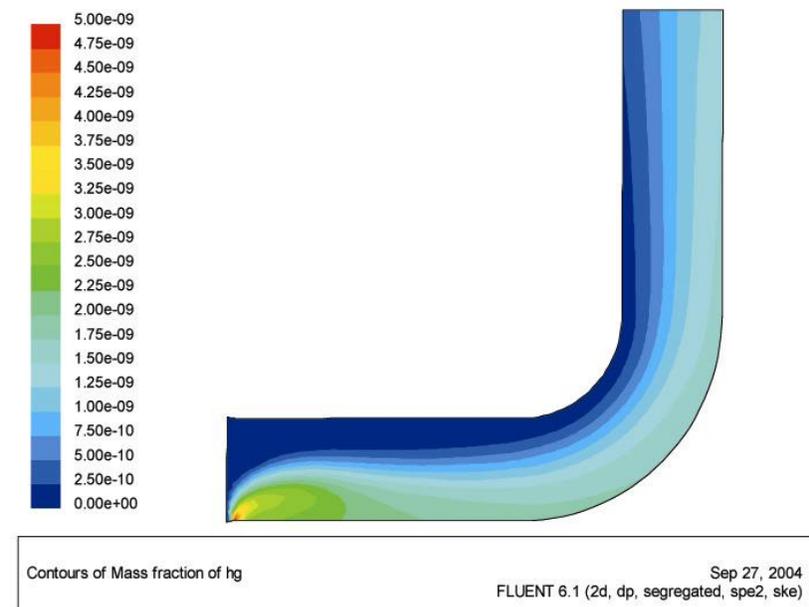


Figura 5.10. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

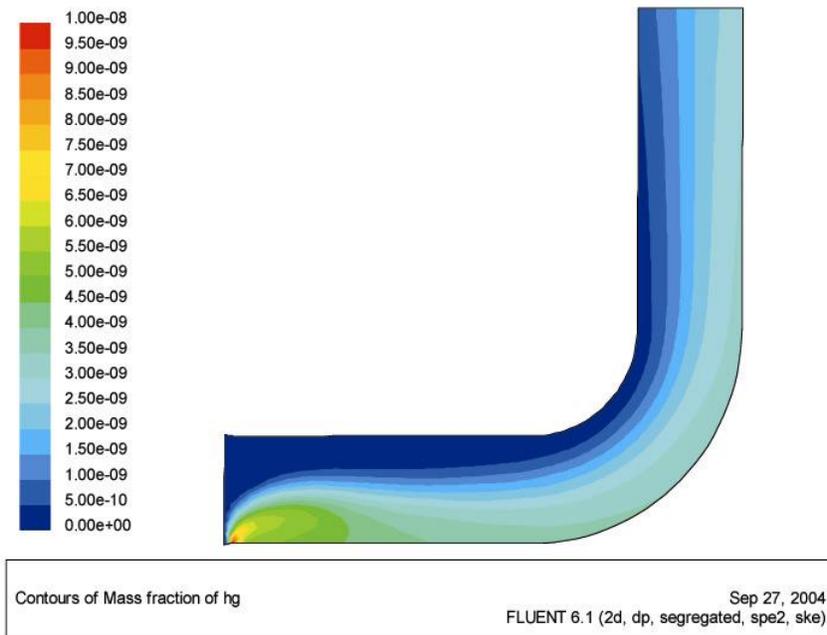


Figura 5.11. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{rio}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

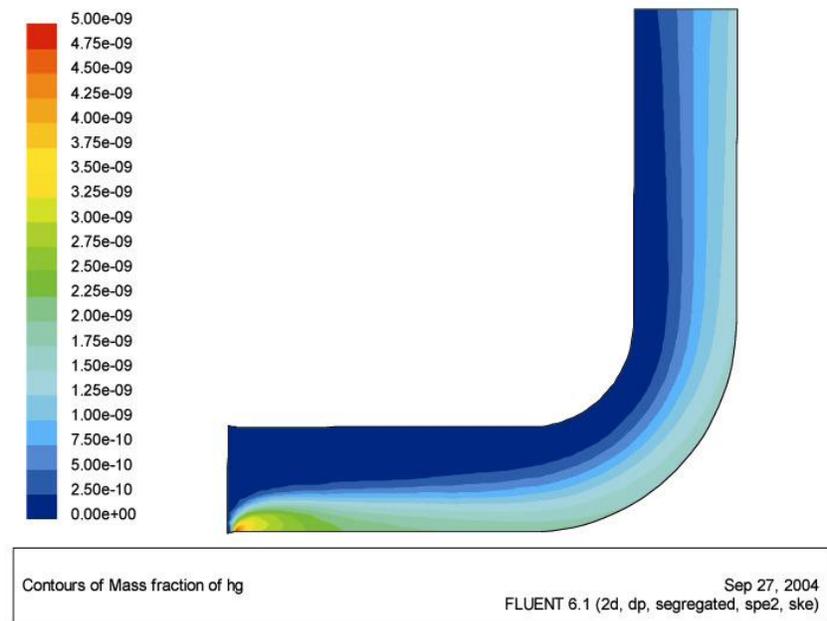


Figura 5.12. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{rio}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

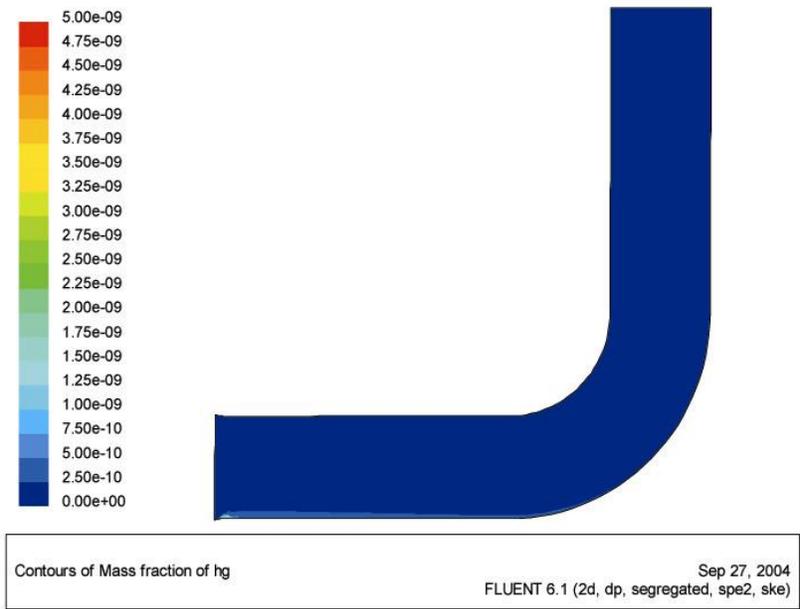


Figura 5.13. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

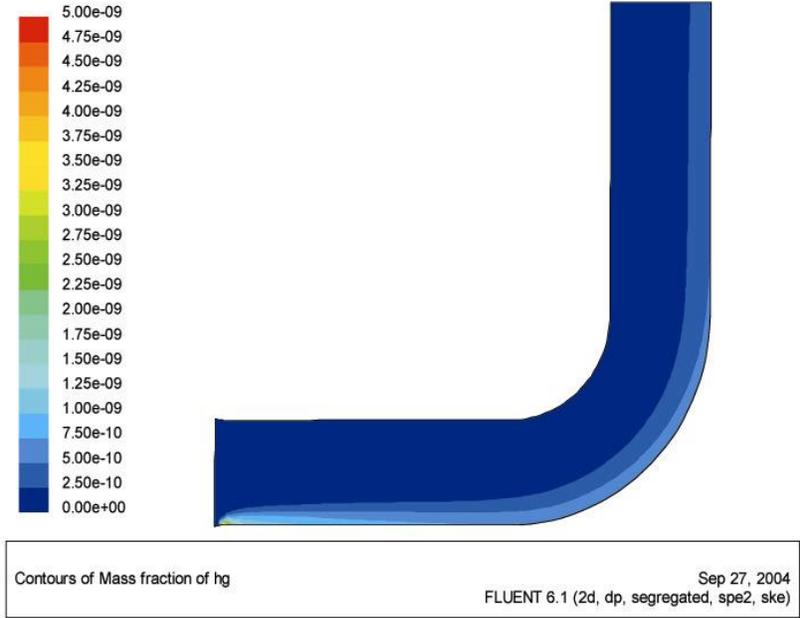


Figura 5.14. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

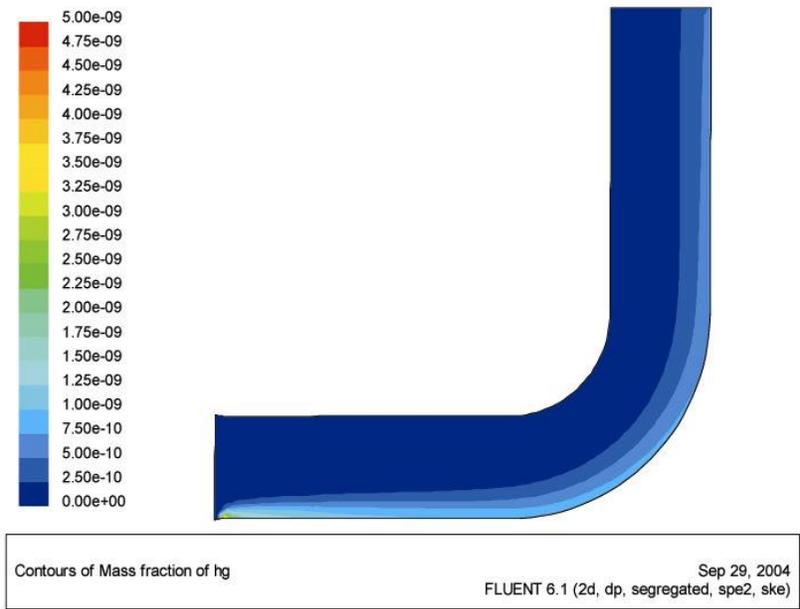


Figura 5.15. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{río}}=5450 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=132.6 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.

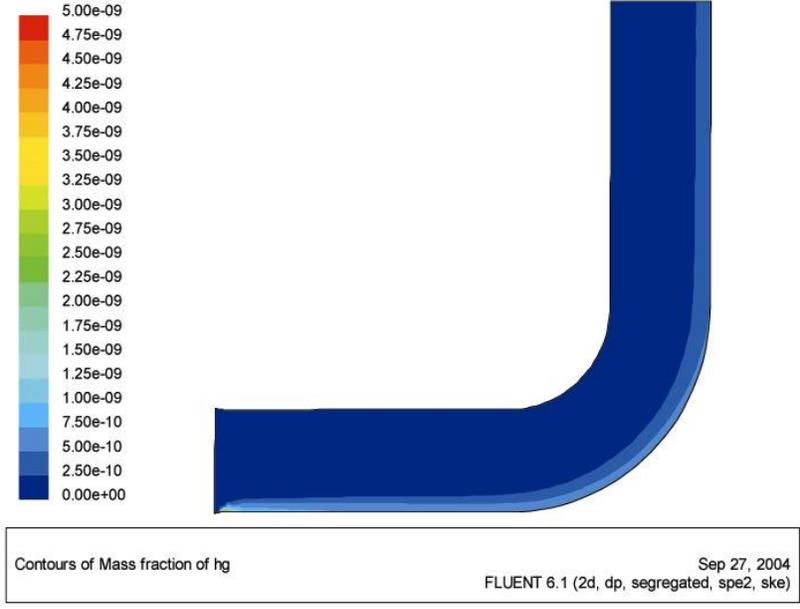


Figura 5.16. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{río}}=87360 \text{ kg/seg}$, $W_{\text{des}}=1326 \text{ kg/seg}$, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9} \text{ kg mercurio/kg agua}$.

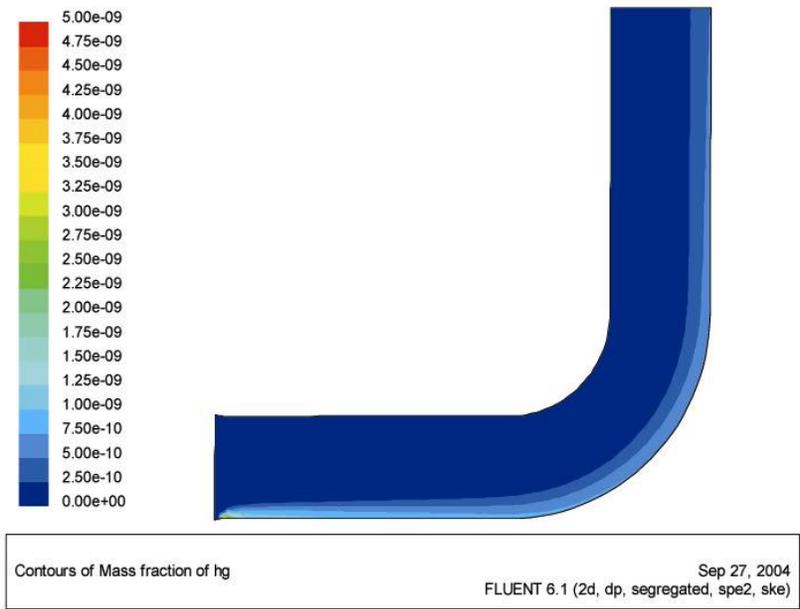


Figura 5.17. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

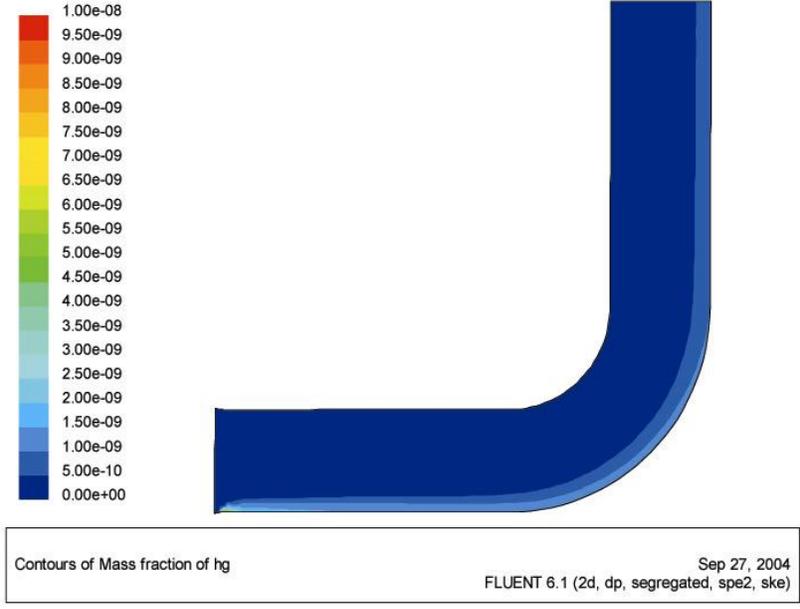


Figura 5.18. Dispersión de mercurio en un río en forma de codo. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

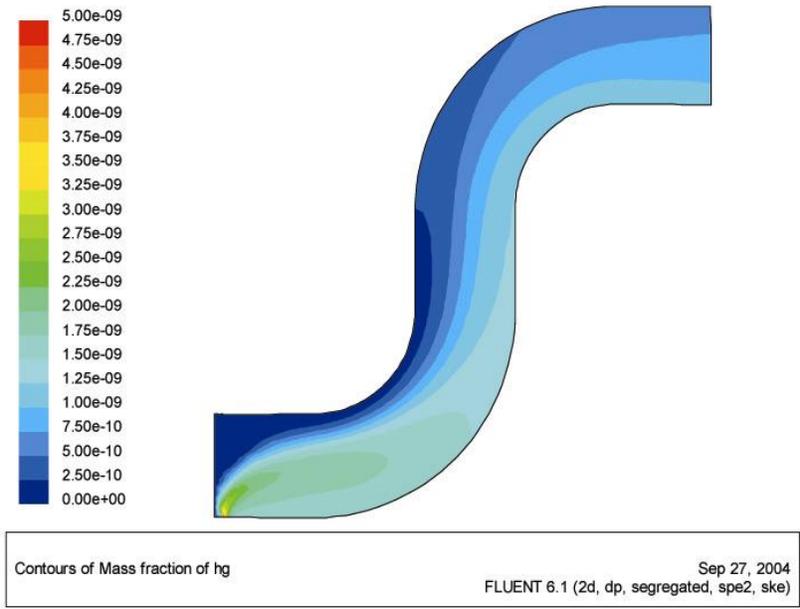


Figura 5.19. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

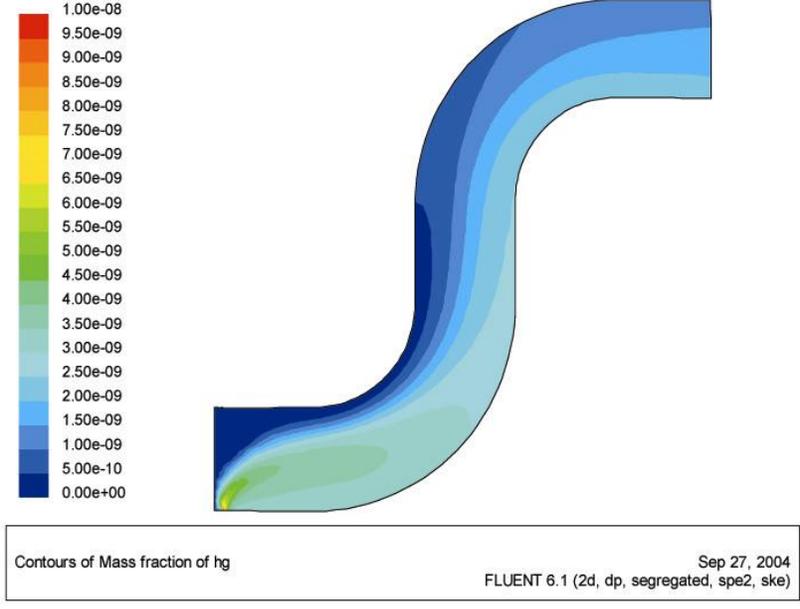


Figura 5.20. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

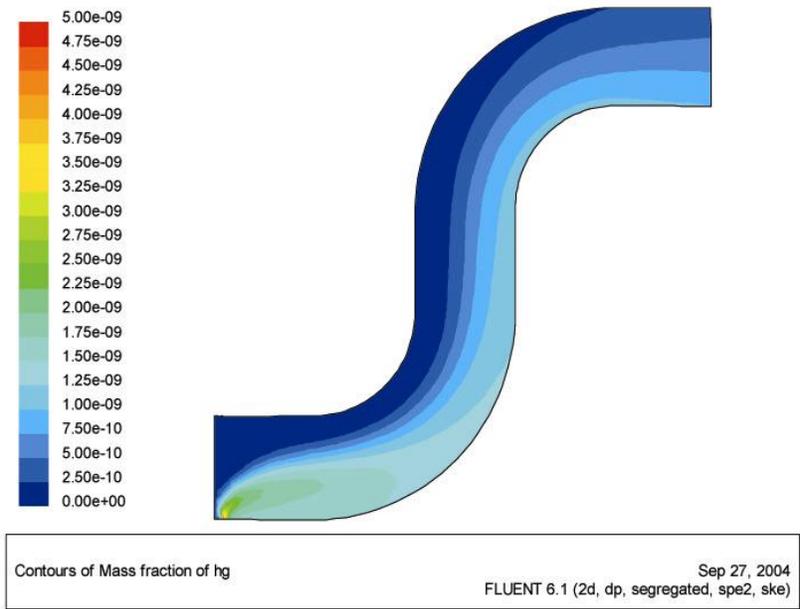


Figura 5.21. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

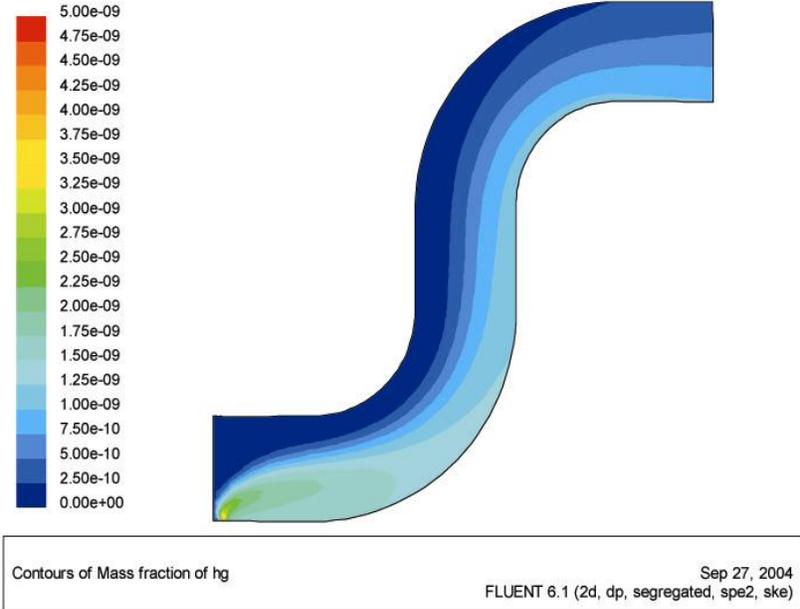


Figura 5.22. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

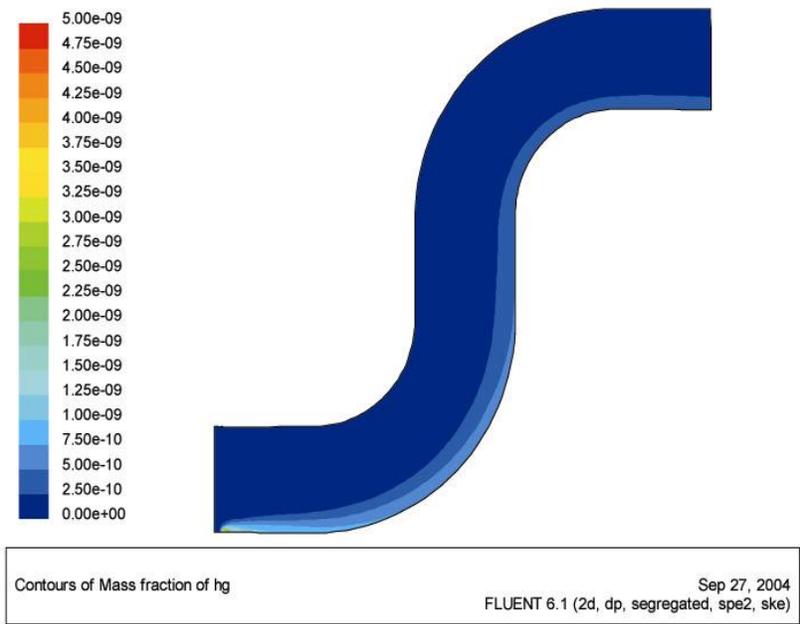


Figura 5.23. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

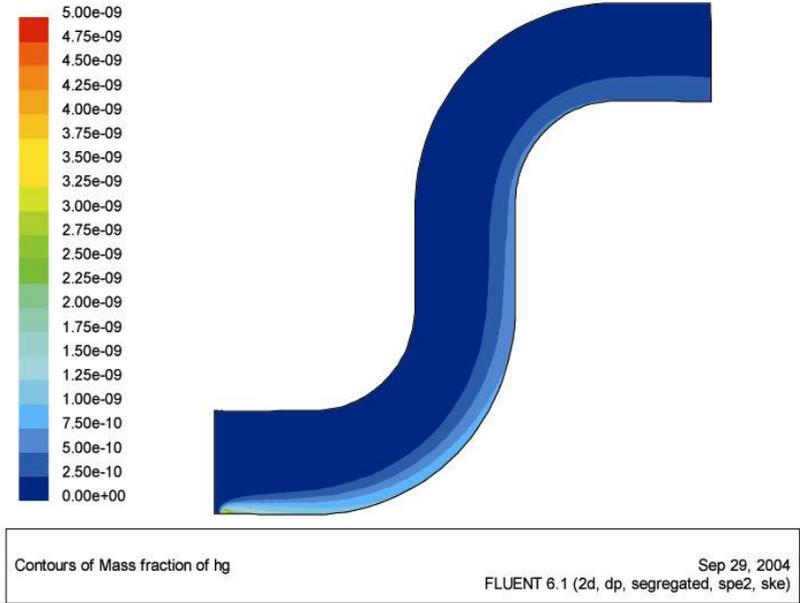


Figura 5.24. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

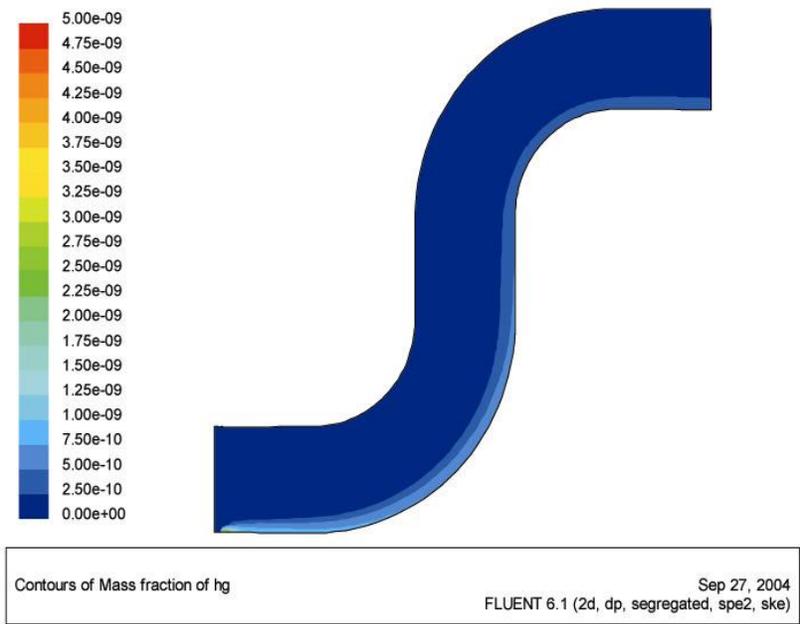


Figura 5.25. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

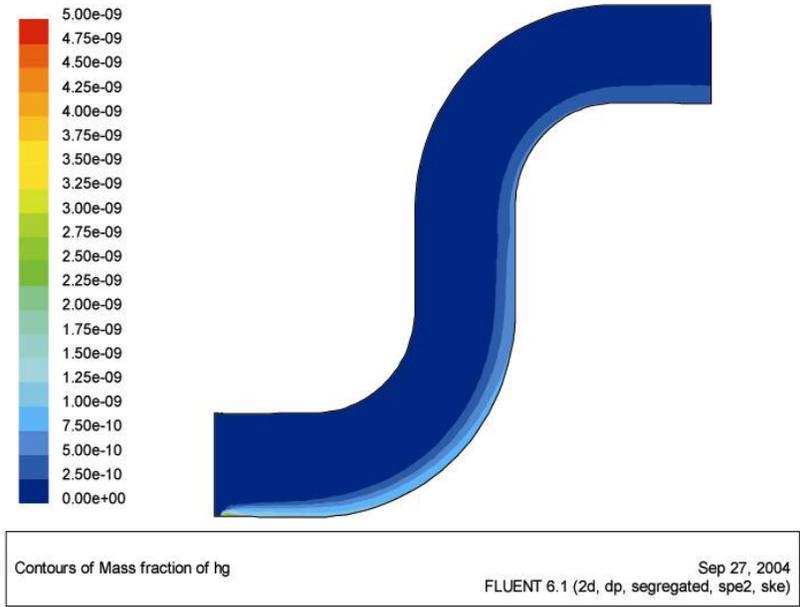


Figura 5.26. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

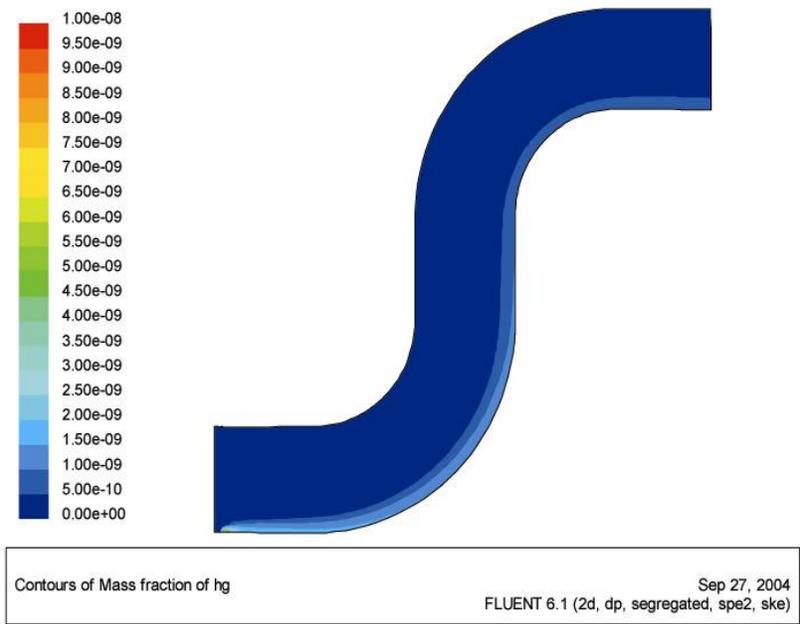


Figura 5.27. Dispersión de mercurio en un río en forma de doble codo. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

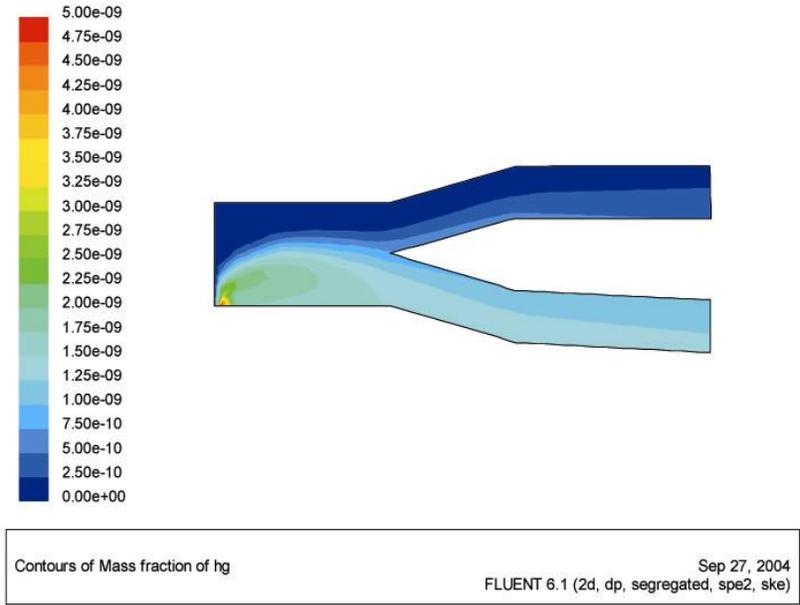


Figura 5.28. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

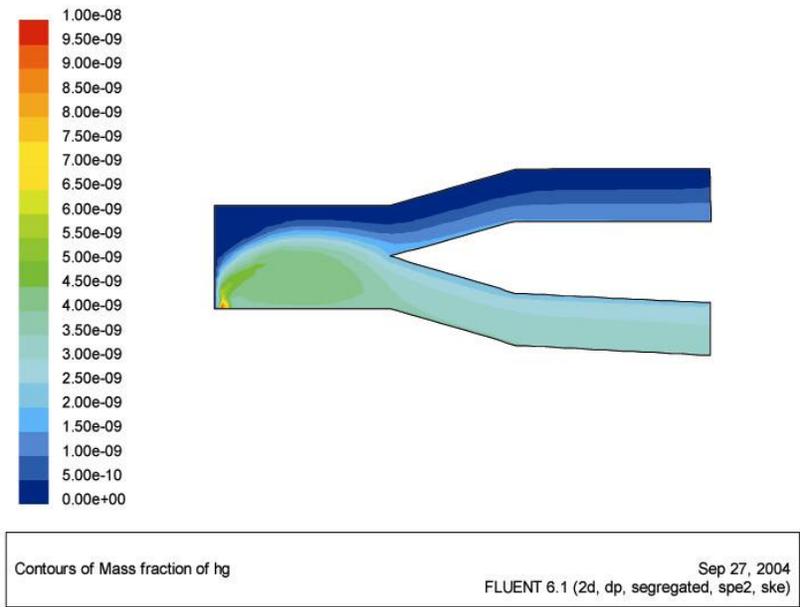


Figura 5.29. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

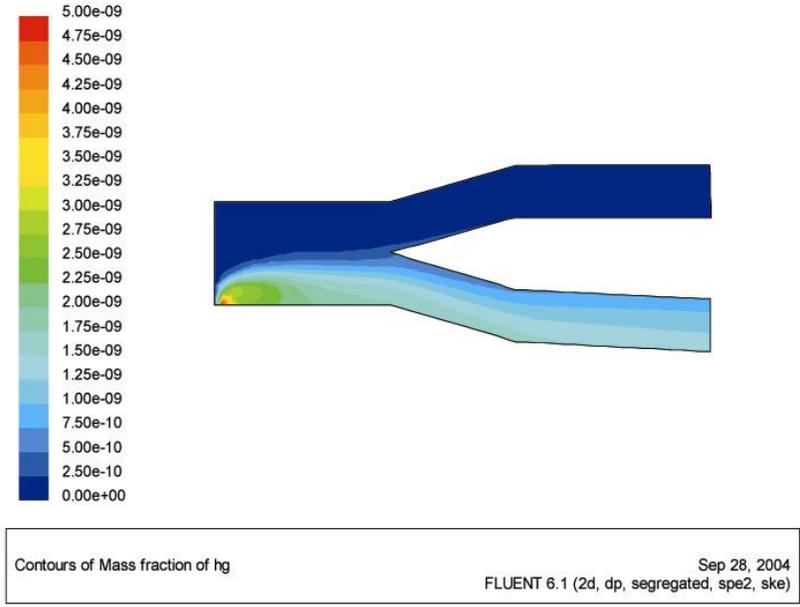


Figura 5.30. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

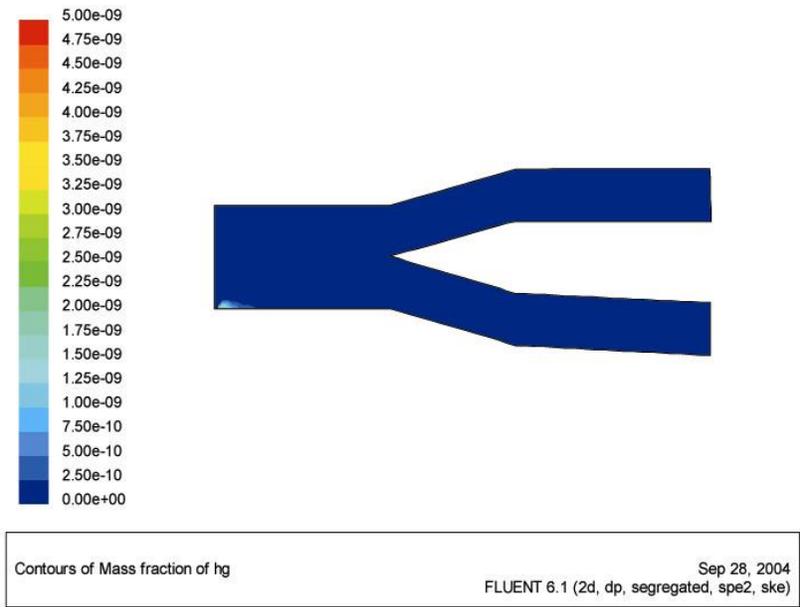


Figura 5.31. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

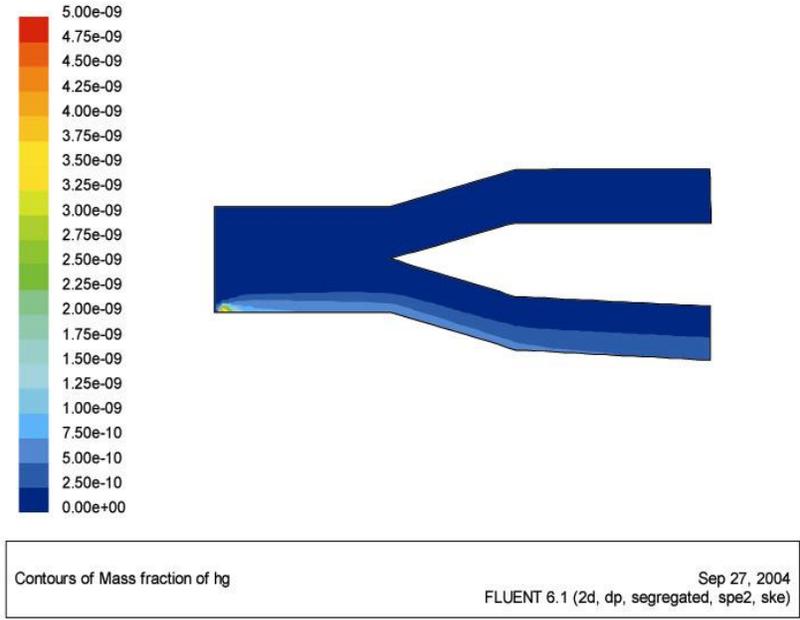


Figura 5.32. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=8540$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

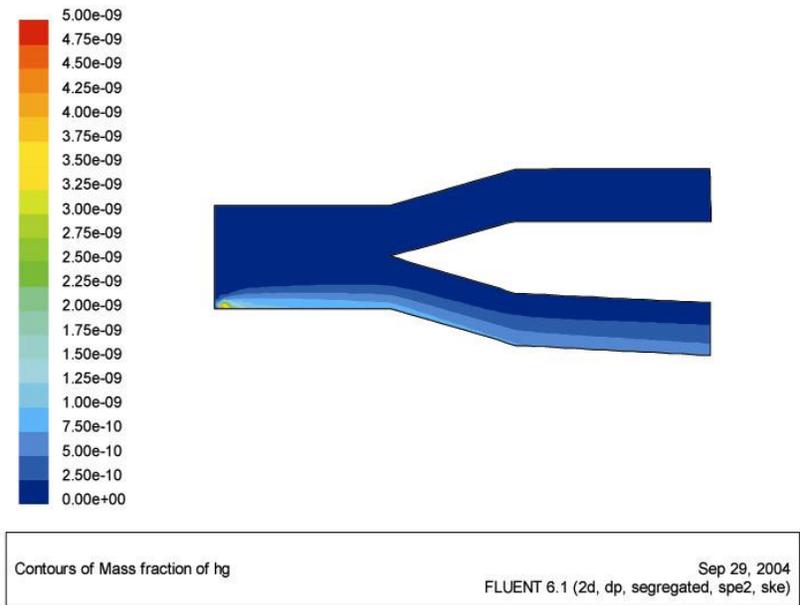


Figura 5.33. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{rio}}=5450$ kg/seg, $W_{\text{des}}=132.6$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

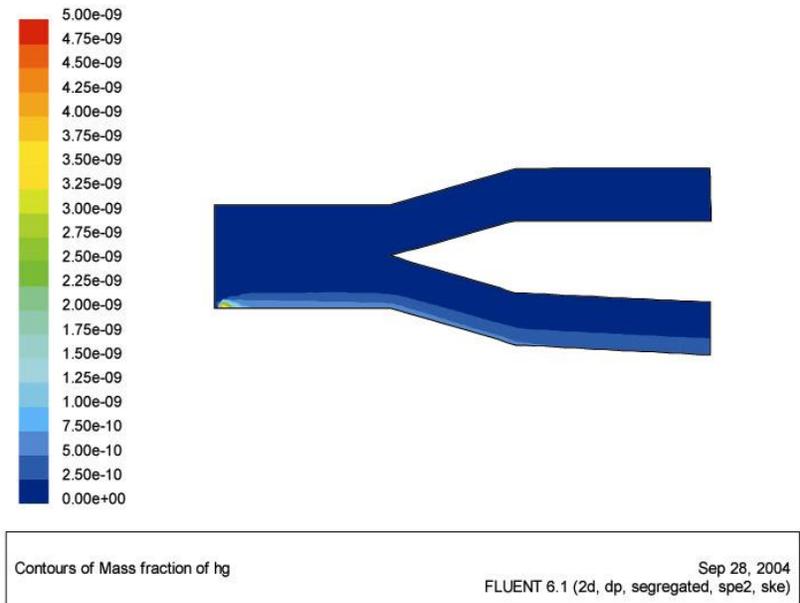


Figura 5.34. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{rio}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

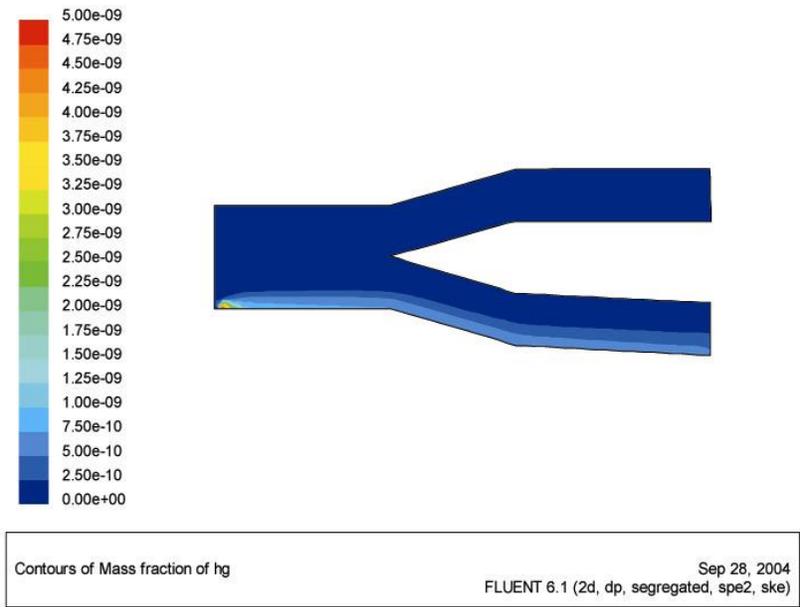


Figura 5.35. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=60780$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=5 \times 10^{-9}$ kg mercurio/kg agua.

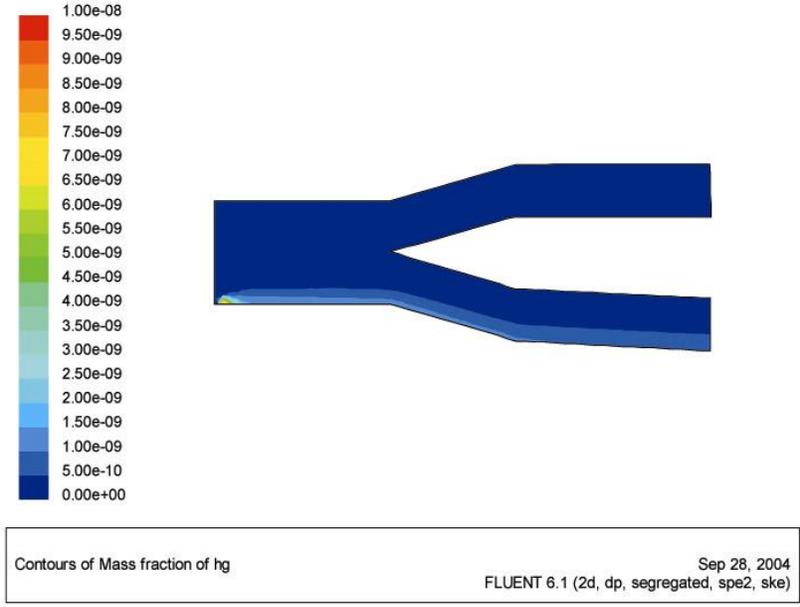


Figura 5.36. Dispersión de mercurio en un río bifurcado. $W_{\text{río}}=87360$ kg/seg, $W_{\text{des}}=1326$ kg/seg, $C_{\text{des}}=1 \times 10^{-8}$ kg mercurio/kg agua.

CONCLUSIONES Y NUEVAS PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN

Muchos de los problemas ambientales actuales tienen que ver con la visión predominantemente antropocentrista que se tiene como sociedad, que se desvincula y se apropia de la naturaleza considerándola solo como una proveedora de recursos. Asimismo se le ha dado prioridad al elemento económico en el proceso de desarrollo por sobre las necesidades básicas de la población. La tecnología ha jugado un papel muy importante en este proceso permitiendo el crecimiento de las sociedades y la rápida degradación de los ecosistemas. Pese a esto la tecnología también es un vehículo que contribuye a revertir este proceso negativo. Una infinidad de evidencias han puesto de manifiesto que cualquier acción que se realice en la naturaleza tendrá un efecto positivo o negativo en ella y el hombre.

La contaminación del agua por mercurio ha causado intoxicaciones masivas, sobre todo en poblaciones vulnerables, y si realmente el objetivo del desarrollo es elevar la calidad de vida, se debe garantizar la salud de las sociedades mediante la aplicación de acciones tendientes al conocimiento, preservación y control de la calidad del agua.

La comprensión de los fenómenos que tienen que ver con la calidad del agua pueden ser abordados a partir de DFC en la que se establece y resuelve un modelo matemático que describa el sistema en estudio, esta herramienta permite la aproximación cercana al comportamiento real de una corriente de agua en particular y así tomar decisiones y acciones más adecuadas para su control.

La simulación numérica en la dispersión de mercurio en ríos permite reducir la incertidumbre en la estimación de la contaminación, transporte, estimación de concentraciones futuras de este metal, su destino, movimiento de los contaminantes bajo distintos escenarios o cuando las condiciones son modificadas.

La preservación del agua requiere del esfuerzo de la sociedad en su conjunto, en particular del ámbito académico, que puede aportar un mayor entendimiento del mundo que nos rodea para encontrar soluciones a ésta problemática. Haciendo uso de los avances científicos y tecnológicos como herramientas para lograr éste fin, como fue el caso del presente trabajo, que para la consecución de los objetivos, se empleó la simulación numérica (que incluye, el empleo de la computadora y un software), que mediante dinámica de fluidos computacional se determinaron los factores que influyen en la dispersión del mercurio en ríos, llegándose a lo siguiente.

Los resultados obtenidos señalan que la geometría del río es determinante en la dispersión del mercurio; a mayor complejidad de ésta, su distribución es mayor por el aumento del mezclado del contaminante lo cual queda de manifiesto en las geometrías de codo y doble codo.

La dispersión del mercurio es directamente proporcional a la distancia, lo que permite inferir que en un determinado tiempo la dispersión del mercurio se daría en toda la superficie del río. En este punto también influye el gasto másico de la descarga, mientras mayor sea este gasto, el tiempo de mezclado del mercurio en toda la superficie del río disminuye, y viceversa.

La concentración del mercurio en la descarga no es determinante en su dispersión, aunque sí, en las concentraciones de cada perfil de distribución, considerando que si aumenta la concentración del contaminante lo mismo sucede en cada perfil. Más bien el efecto de la dispersión del mercurio tiene que ver con los gastos másicos de las corrientes de entrada del río y de la descarga. A mayor gasto en la descarga se incrementa la dispersión del mercurio sobre todo si el gasto en la corriente principal guarda proporcionalidad o equiparables con el gasto másico de la descarga. Si el flujo del río es considerablemente mayor al gasto de la descarga disminuye la dispersión del mercurio.

En los casos de geometría bifurcada, la segunda bifurcación, representa un obstáculo para que se efectúe la dispersión del mercurio en toda la superficie del río, llevándose a cabo principalmente en el lado en donde se posiciona la descarga. En estos casos el volumen en el gasto de la descarga es determinante, pues en cuanto más se equiparen las corrientes de entrada principal y de descarga, mayor es la distribución del contaminante, influyendo en ambas bifurcaciones; sin embargo, la bifurcación más afectada es aquella del lado de la cual se posicione la corriente de descarga.

Este trabajo abre más posibilidades de estudio en las cuales se puede evaluar la dispersión de otras sustancias distintas al mercurio. La dinámica de fluidos computacional, implementada al software empleado, el cual permite la simulación de sustancias distintas al mercurio; con una base de datos muy amplia de elementos y compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, con sus respectivas propiedades fisicoquímicas: por ejemplo metano, etano, benceno, bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, etc. Ahora bien, las sustancias que no aparecen en la base de datos pueden ser creadas tecleando el nombre y sus propiedades, de esta manera se incorporan a dicha base.

Asimismo, es conveniente hacer más complejo el sistema incluyendo otras variables para describir el sistema de una manera más cercana a la realidad y para comprender el comportamiento del sistema, y determinar de una forma más certera la dispersión del mercurio; así como de otros contaminantes. Dichas variables a incluirse podrían ser: un sistema en tres dimensiones, considerar sus zonas muertas, obstáculos en el sistema (rocas, árboles), desniveles en el fondo del río, rugosidad del material del río, modelar más de un constituyente, reacciones químicas y cambio de temperatura en el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

[1]. Water resources applications software. (Consulta 12-04-04).

<http://smig.usgs.gov/SMIG/SMIG.html>

[2]. Rounds ,S.; Wood, T., and Lynch, D. Modelling discharge, heat and water quality the Tualatin river, Oregon, with CE-QUAL-W2. (Consulta 12-04-04).

<http://SMIG.usgs.gov/SMIG/SMIG.html>]

[3]. Jobson, H. E., Harbaugh, A. W. Modifications to the diffusion analogy surface-water flow model (DAFLOW) for coupling the modular finite-difference ground-water flow model (MODFLOW). Consulta (12-04-04).

<http://smig.usgs.gov/SMIG/SMIG.html>

[4]. Veliskova, Y. Numerical prediction of pollutant dispersion in upper part of Ondava River. ERB and Northern European FRIEND Project 5 Conference. Slovakia, 2002.

[5]. Jobson, H. E. Enhancements to the branched lagrangian transport modeling system. (Consulta 12-04-04).

<http://smig.usgs.gov/SMIG/SMIG.html>

[6]. Runkel, R. L. Using OTIS to model solute transport in streams and rivers. (Consulta 12-04-04).

<http://smig.usgs.gov/SMIG/SMIG.html>

[7]. Conrads, P.A.; Roehl, E. A. and Martello, W. P. Estimating point source impacts on the Beaufort River using artificial neural network models. (Consulta 12-04-04).

<http://smig.usgs.gov/SMIG/SMIG.html>

[8]. Olsen, N. R. B. CFD modeling for hydraulic structures. Preliminary 1st Edition, May 2001, ISBN 82-7598-048-8.

[9]. Bifani, P. Medio ambiente y desarrollo. Universidad de Guadalajara, tercera edición, México 1997.

[10]. Sunkel, O.; Gligo, N. Estilos de desarrollo y medio ambiente en la América Latina, Fondo de Cultura Económica, México 1980, tomo 36.

[11]. Szekely, F. Medio ambiente en México y América Latina, Editorial nueva imagen, 1^a edición 1978, México.

[12]. Meadows, L. D.; Meadows, H. D.; Randers, J.; Behsens III, W. Los límites del crecimiento, Fondo de Cultura Económica, 5a reimpresión 1985, México.

[13]. Organización de las Naciones Unidas. (Consulta 24-06-04).
www.rolac.unep.mx/docamb/esp/mh1972.htm

[14]. Presidencia de la República (Poder Ejecutivo Federal). Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006. Impreso en México.

[15]. Organización de las Naciones Unidas (Consulta 24-06-04)
<http://www.unp.org/esa/sustdev/documents/agenda21>

[16]. Guerrero, M. El agua. Fondo de Cultura Económica, cuarta edición 2003, México.

[17]. Green, I. El agua. Edit. Diana, 1^a. Edición 1967, México.

[18]. Valdez, A., Valdez, S. El agua en la estrategia del desarrollo sustentable de México, Universidad de Guadalajara, primera edición 1999, México.

[19]. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente. (Consulta: 30-06-04)

<http://148.233.168.204/pfnm2/leyes/lgeepa.htm>

[20]. Restrepo, I.(coordinador), Agua, salud y derechos humanos, Comisión Nacional de los Derechos Humanos, primera edición 1995, México.

[21]. Ley de Aguas Nacionales (Consulta: 30-06-04)

http://148.233.168.204/marco_jurídico/federal/aguas-nacionales.shtml

[22]. NOM-001-SEMARNAT-1996

[23]. NOM-127-SSA1-1994

[24]. Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable (Consulta: 21-04-04).

<http://www.cce.org.mx/céspedes/publicaciones/cuadernos/c7.html>

[25]. Recursos hídricos (Consulta: 22-04-04).

http://www.148.168.204/estadisticas_2000/naturaleza/estadistica-am/informe/acrobat/capitulo2-1-3.pdf

[26]. El agua recurso estratégico y asunto de seguridad Nacional (Consulta: 23-04-04).

<http://www.jornada.UNAM.mx/2001/feb01/010226/eco-b.htm>

[27]. Cámara de Diputados (Consulta: 23-04-04)

<http://www.cddhcu.gob.mx/bibliot/publica/inveyana/polisoc/dps03/3pronat.htm>

[28]. Secretaría del Medio Ambiente (Consulta: 11-05-04).

<http://www.sma.df.gob.mx>

- [29]. Crisis hidráulica en México y Latinoamérica (Consulta: 19-05-05).
http://www.dgi.unam.mx/boletin/bdboletin/2003_215.html
- [30]. Kamal M, Desarrollo sin destrucción, Ediciones del Serbal, 1ª. Edición 1982, España.
- [31]. Bertin, J. Mecánica de fluidos para ingenieros. Edit. Prentice-Hall Hispanoamericana, México1986.
- [32]. Ferziger, H.J.; Peric, M. Computational Methods for Fluid Dynamics, Edit Springer, segunda edición, Germany 1999.
- [33]. Streter, L. V.; Wylie, B. E. Mecánica de fluidos. Edit. Mc Graw-Hill, Colombia, octava edición en español 1988.
- [34]. Roca, R. Introducción a la mecánica de fluidos. Edit. Limusa, segunda reimpresión 1987, México
- [35]. Guía de usuario de GAMBIT, volumen 1, enero de 2003.
- [36]. Guía de usuario de FLUENT, volumen 2, enero de 2003.
- [37]. Guía de usuario de FLUENT, volumen 1, enero de 2003.
- [38]. Fuente: Banco Nacional de Aguas Superficiales de la CNA (BANDAS).
- [39]. Comisión Nacional del Agua. Manual del agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS). Comisión Nacional de Agua. Julio de 2003, versión 4.0 en disco compacto.

[40]. Instituto Nacional de Ecología (Consulta: 16-03-2005)
www.ine.gob.mx

[41]. Clarkson, T., Magos, L. and Myers, G. The toxicology of mercury. Massachusetts Medical Society, U.S.A. 2003

[42]. Bird, R., Stewart, W. y Lightfoot, E. Transport Phenomena. John Wiley & sons, 1960, United States of America.

[43]. Kessler D.P., Greenkorn, R. A. Momentum, Heat and Mass Transfer Fundamentals. Editorial Marcel Dekker, New York 1999.

[44]. Freitas, C. The issue of numerical uncertainty. Southwest Research Institute, Computational Mechanics, San Antonio, Texas USA, december 1999.

[45]. Bird, R., Stewart, W., Lightfoot, E. Transport phenomena, John Wiley & sons, inc., second edition 2002, United States of America.

[46]. National Library of Medicine (Consulta 18-03-2005)
ncbi.nlm.nih.gov

[47]. Organización de las Naciones Unidas (Consulta 17-03-2005)
www.rolac.unep.mx

[48]. Revista Ecológica en línea (Consulta 17-03-2005)
www.planeta.com

[49]. Vega, S. Evaluación epidemiológica de riesgos causados por agentes químicos ambientales, Toxicología III. Centro Panamericano de Ecología Humana y salud, Organización Panamericana de la Salud, Organización Panamericana de la Salud, México 1985

[50]. Hiroshi, S. Occupational and environmental toxicology of mercury and its compounds. Environmental Health Sciences, Tohoku University School of Medicine, Japan 2000.

[51]. Saugus River Watershed Program. Mercury models report. Saugus River Watershed Program.

[52]. Kohn, J., Kruse, E. y Santos, J. "Transporte de cloruro en acuíferos aluviales". CONICET, Departamento de geofísica aplicada, Facultad de ciencias astronómicas y geofísicas. Universidad Nacional de la Plata, Argentina.

[53]. Acevedo, B., Serra, M. y Cruz, J. Situación hidrogeológica en Guanajuato, México. III Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrológicas