

DETERMINACION DE LA APLICABILIDAD DE UN SOFTWARE PARA LA
MODELACION DEL TRANSPORTE Y DESTINO DE MERCURIO EN LA
SUBCUENCA DEL RIO SURATA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER,
COLOMBIA

PEDRO JAVIER RODRIGUEZ FUENTES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUIMICA
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2013

DETERMINACION DE LA APLICABILIDAD DE UN SOFTWARE PARA LA
MODELACION DEL TRANSPORTE Y DESTINO DE MERCURIO EN LA
SUBCUENCA DEL RIO SURATA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER,
COLOMBIA

PEDRO JAVIER RODRIGUEZ FUENTES

Trabajo de aplicación para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Director:

ALVARO ANDRÉS CAJIGAS

Ingeniero Sanitario y Ambiental, MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUIMICA
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

A DIOS Padre todopoderoso por su benevolencia, al darme todo lo necesario para sacar adelante este y todos los demás proyectos que me he propuesto.

A mis mayores amores: mis hijos Javier Felipe y Santiago, son ellos el motor que mueve mi voluntad a diario.

RECONOCIMIENTO A ENTIDADES

Expreso mi agradecimiento a la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, en especial a los ingenieros Carlos Mauricio Torres y Andrea Báez, y al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, amb, en especial a la ingeniera Yolanda Arboleda, por permitirme utilizar la información requerida en este proyecto y disponer de su tiempo para debatir los resultados.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Al doctor Humberto Escalante, coordinador de la maestría en ingeniería ambiental, por su oportuno consejo y orientación valiosa para alcanzar esta meta.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCION	19
1. ANTECEDENTES	22
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
3. OBJETIVOS	26
3.1 OBJETIVO GENERAL	26
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
4. MARCO TEORICO	27
4.1 TOXICIDAD Y EFECTOS CARCINOGENICOS DEL MERCURIO	27
4.2 EL MERCURIO EN EL SUBSISTEMA HÍDRICO	27
4.3 EL MERCURIO A TRAVÉS DE LAS CADENAS TRÓFICAS	28
4.4 MODELOS DE CALIDAD DE AGUA	30
4.5 MODELACIÓN DE MERCURIO	31
4.6 PROCESOS DE CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN	32
5. UBICACIÓN Y ASPECTOS FÍSICOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	34
5.1 CLIMATOLOGÍA	35
5.1.1 Precipitación	36
5.1.2 Temperatura	37
5.1.3 Humedad relativa	37
5.1.4 Brillo solar	37
5.1.5 Velocidad del viento	37
5.1.6 Evaporación	38
5.2 HIDROLOGÍA	38
5.3 GEOLOGÍA	39
5.4 SUELOS	40
6. METODOLOGIA	41
6.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA SUBCUENCA RIO	

SURATÁ	41
6.2 IDENTIFICACIÓN ESTACIONES HIDROLÓGICAS PERTINENTES A LOS OBJETIVOS DEL PROYECTO	41
6.3 RECOPIACIÓN DE VALORES HISTÓRICOS DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, HIDRODINÁMICOS Y DE CALIDAD DE AGUA DEL RIO SURATÁ	41
6.4 DEFINICIÓN DEL ÁREA OBJETO DE MODELACIÓN	42
6.5 SELECCIÓN DEL MODELO	42
6.5.1 Revisión bibliográfica y preselección de modelos	43
6.5.2 Calificación de modelos	43
6.6 CONSULTA DETALLADA DEL MODELO SELECCIONADO	43
6.7 TRABAJO DE CAMPO	44
6.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CONTAMINACIÓN DEL RIO SURATÁ POR MATERIA ORGÁNICA	44
6.9 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE Y DESTINO DE MERCURIO	45
6.10 MODELACIÓN DE ESCENARIOS	45
7. RESULTADOS	46
7.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, HIDRODINÁMICOS Y DE CALIDAD DE AGUA DEL RIO SURATÁ	46
7.2 DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL	47
7.2.1 Usos del suelo	47
7.2.2 Tratamiento de aguas residuales	49
7.2.2.1 Contaminación por coliformes en el punto SA-05	50
7.2.2.1.1 Contaminación por coliformes totales	50
7.2.2.1.2 Contaminación por coliformes fecales	51
7.2.2.2 Contaminación por coliformes en el punto SA-03	52
7.2.2.2.1 Contaminación por coliformes totales	52
7.2.2.2.2 Contaminación por coliformes fecales	53
7.2.3 Actividad minera	54

7.3	DELIMITACIÓN TRAMO DEL RIO SURATÁ A MODELAR	60
7.4	SELECCIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DE AGUA	65
7.4.1	Características de modelos preseleccionados para simular calidad del agua	65
7.4.2	Calificación de los modelos preseleccionados	66
7.5	NOTAS RELEVANTES ACERCA DEL MODELO SELECCIONADO	68
7.5.1	Simulación del transporte en WASP7	68
7.5.2	Flujo de agua superficial en WASP7	69
7.5.3	Ecuaciones hidrogeométricas	70
7.5.4	Módulo para mercurio de WASP7	71
7.5.4.1	Ecuaciones de partición	71
7.5.4.2	Ecuaciones de transformación	72
7.6	APLICACIÓN DEL SOFTWARE WASP7 AL RIO SURATÁ	73
7.6.1	Consideraciones iniciales	73
7.6.2	Curvas de concentración de Hg0 “pronosticadas” por el modelo WASP7	74
7.6.3	Cálculo del error	76
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
8.1	AFECTACIÓN DEL SUELO	78
8.2	AFECTACIÓN DEL AGUA POR MATERIA ORGÁNICA	79
8.3	VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO WASP7	80
8.3.1	Curva de valores medidos en campo vs curva WASP estación SA-05	81
8.3.2	Curva de valores medidos en campo vs curva WASP estación SA-04	82
8.3.3	Curva de valores medidos en campo vs curva WASP estación SA-03	83
8.4	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS	84
8.4.1	Escenario 1: Incremento al doble del caudal (Temporada invernal)	84
8.4.1.1	Escenario 1 para el tramo 2, estación SA-05	84
8.4.1.2	Escenario 1 para el tramo 3, estación SA-04	85
8.4.1.3	Escenario 1 para el tramo 4, estación SA-03	85

8.4.2	Escenario 2: Reducción a la mitad del caudal (verano intenso)	86
8.4.2.1	Escenario 2 para el tramo 2, estación SA-05	86
8.4.2.2	Escenario 2 para el tramo 3, estación SA-04	87
8.4.2.3	Escenario 2 para el tramo 4, estación SA-03	87
8.4.3	Escenario 3: Incremento al doble de las descargas de Hg0 (Aumento de la población minera)	88
8.4.3.1	Escenario 3 para el tramo 2, estación SA-05	88
8.4.3.2	Escenario 3 para el tramo 3, estación SA-04	89
8.4.3.3	Escenario 3 para el tramo 4, estación SA-03	89
9.	CONCLUSIONES	91
	BIBLIOGRAFIA	94
	ANEXOS	101

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Estaciones hidrométricas y metereológicas de la CDMB	36
Tabla 2: Extensión por microcuencas subcuenca rio Suratá	39
Tabla 3: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-07	46
Tabla 4: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-05	46
Tabla 5: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-04	47
Tabla 6: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-03	47
Tabla 7: Descripción de los usos y coberturas de las tierras	48
Tabla 8: Contenido límite de coliformes según decreto 1594/1984	50
Tabla 9: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes totales punto SA- 05	51
Tabla 10: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes fecales punto SA-05	52
Tabla 11: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes totales punto SA-03	53
Tabla 12: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes fecales punto SA-03	54
Tabla 13: Monitoreo de Hg en corrientes hídricas, rio Suratá, segundo semestre 2009	57
Tabla 14: Control de Hg y calidad de aguas, planta Bosconia, noviembre 2009	58
Tabla 15: Concentraciones de Hg medidas en afluentes del rio Suratá	59
Tabla 16: Matriz consolidación de puntajes para los modelos preseleccionados	67
Tabla 17: Error promedio valores de campo vs valores WASP estación SA-05	76
Tabla 18: Error promedio valores de campo vs valores WASP estación SA-03	77

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Presencia de mercurio y/o cianuro en el río Suratá y sus tributarios	22
Figura 2: Promedios mensuales de mercurio en el río Vetás	23
Figura 3: Promedios mensuales de mercurio en la quebrada La Baja	23
Figura 4: Promedios mensuales de mercurio en agua cruda de la planta Bosconia	24
Figura 5: Ciclo acuático del mercurio	29
Figura 6: Proceso general de calibración de un modelo de simulación	32
Figura 7: Ubicación geográfica departamento de Santander y su capital Bucaramanga	34
Figura 8: Municipios y principales ríos de la subcuenca río Suratá	35
Figura 9: Distribución de microcuencas en la subcuenca río Suratá	38
Figura 10: Distribución del uso de las tierras	48
Figura 11: Red de monitoreo hidrológico instalada sobre la subcuenca río Suratá	60
Figura 12: Red de modelado WASP7 con trayectorias de transporte advectivo	68
Figura 13: División en segmentos del río Suratá y sus tributarios	73
Figura 14: Arquitectura modelo WASP del río Suratá	74
Figura 15 Curva de concentración de Hg0 “pronosticada” en la estación SA-05	75
Figura 16: Curva de concentración de Hg0 “pronosticada” en la estación SA-04	75
Figura 17: Curva de concentración de Hg0 “pronosticada” en la estación SA-03	76
Figura 18: Curva WASP vs datos de campo tramo 2 río Suratá	81
Figura 19: Curva WASP vs datos de campo tramo 3 río Suratá	82
Figura 20: Curva WASP vs datos de campo tramo 4 río Suratá	83

	Página
Figura 21: Concentración de Hg0 en el tramo 2 al doble de caudal	84
Figura 22: Concentración de Hg0 en el tramo 3 al doble de caudal	85
Figura 23: Concentración de Hg0 en el tramo 4 al doble de caudal	85
Figura 24: Concentración de Hg0 en el tramo 2 a la mitad de caudal	86
Figura 25: Concentración de Hg0 en el tramo 3 a la mitad de caudal	87
Figura 26: Concentración de Hg0 en el tramo 4 a la mitad de caudal	87
Figura 27: Concentración de Hg0 en el tramo 2 doblando las descargas	88
Figura 28: Concentración de Hg0 en el tramo 3 doblando las descargas	89
Figura 29: Concentración de Hg0 en el tramo 4 doblando las descargas	89

LISTA DE FOTOS

	Página
Foto 1: Utilización del mercurio para la extracción de oro	19
Foto 2: Extracción artesanal de oro	20
Foto 3: Rio Suratá sector “Uña de gato” antes de la desembocadura del rio Vetás	55
Foto 4: Quebrada La Baja antes de desembocar al rio Vetás	55
Foto 5: Rio Suratá metros debajo de la desembocadura del rio Vetás	56
Foto 6: Aspecto físico del rio Suratá en la bocatoma de la planta Bosconia	56
Foto 7: Socavón en el área de exploración de la empresa minera AUX Gold	59
Foto 8: Estación SA-07 “Uña de gato”	61
Foto 9: Estación RV-01	62
Foto 10: Estación SA-04 “El Palmar”	63
Foto 11: Estación SA-03	63
Foto 12: Estación RCH-01	64
Foto 13: Estación RT-01	64
Foto 14: Socavón construido en las montañas de California	78
Foto 15: Primeros metros del socavón de la foto 14	79

LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo 1: Valores de parámetros geométricos e hidrodinámicos medidos en estaciones ubicadas sobre el río Suratá	101
Anexo 2: Características de modelos preseleccionados	105
Anexo 3: Tablas de puntuación para los modelos preseleccionados	112

RESUMEN

TITULO:

DETERMINACION DE LA APLICABILIDAD DE UN SOFTWARE PARA LA MODELACION DEL TRANSPORTE Y DESTINO DE MERCURIO EN LA SUBCUENCA DEL RIO SURATA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA*

AUTOR:

RODRIGUEZ FUENTES, Pedro Javier**

PALABRAS CLAVE:

Calidad de agua, mercurio, modelación, efecto carcinogénico, wasp

DESCRIPCION:

La minería artesanal practicada desde hace varios años en los municipios de Vetás y California vierte desechos contaminados con mercurio y cianuro al río Suratá. Aproximadamente treinta kilómetros abajo se ubica la planta de potabilización de agua Bosconia, que capta las aguas de este río para abastecer a cerca de una tercera parte del sistema de acueducto de la ciudad de Bucaramanga. Sin embargo, actualmente ni el amb ni la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga poseen una herramienta eficaz para modelar el comportamiento de las aguas del río Suratá ante acciones de contaminación como las anteriormente mencionadas. Se propone entonces validar la aplicabilidad de un modelo de calidad de agua para la simulación del transporte y destino de mercurio.

El trabajo inició con el reconocimiento de las particularidades de la subcuenca del río Suratá y de la actividad socio-económica de la zona, prosiguiendo con la investigación referente a tipos de modelos de calidad de aguas que simularan la química y transporte de metales pesados, en especial mercurio, la recopilación y evaluación de información hidrométrica y de calidad de agua requerida por el modelo seleccionado para finalizar con la aplicación del software a la mencionada corriente hídrica.

Como resultado de un proceso de calificación aplicado a los modelos se optó por utilizar el programa Water Quality Analysis Simulation Program, versión 7, para la simulación del transporte y destino de mercurio en el tramo comprendido entre la estación SA-07, ubicada aguas arriba de la confluencia del río Vetás al río Suratá y la estación SA-03, ubicada en la bocatoma del amb. Se descarta la presencia de especies organomercúricas como el metilmercurio tanto en las aguas del río Suratá como de sus tributarios y en consecuencia este trabajo de aplicación se concentra solo en la modelación de Hg^0 .

* Trabajo de Aplicación

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental. Director: Alvaro Andrés Cajigas, MSc.

ABSTRACT

TITLE:

DETERMINING THE APPLICABILITY OF A SOFTWARE FOR MODELING TRANSPORT AND FATE OF MERCURY IN THE SURATA RIVER SUBBASIN, SANTANDER, COLOMBIA*

AUTHOR:

RODRIGUEZ FUENTES, Pedro Javier**

KEY WORDS:

Water quality, mercury, modeling, carcinogenic effect, wasp

DESCRIPTION:

Artisanal mining practiced for several years in Vetás and California municipalities has poured mercury and cyanide contaminated waste into Surata river. About thirty kilometers down the Bosconia water purification plant is located, which captures the waters of this river to supply nearly a third of the water system of the Bucaramanga city. Currently, however, neither the Corporation for the Defence of Bucaramanga Plateau nor the metropolitan aqueduct of Bucaramanga have an effective tool to model the behavior of the water pollution in the Surata river regarding the contamination actions mentioned above. It is therefore proposed to validate the applicability of a water quality model for simulating the transport and fate of mercury.

The work began with the recognition of the characteristics of the Surata river basin and socio-economic activity in the area, then the investigation concerning types of water quality models that simulate the chemistry and transport of heavy metals, especially mercury, gathering and evaluating hydrometric and water quality information required by the selected model. Finally, the software is applied to the water stream we are analyzing.

As a result of a qualification process applied to the models, we chose to use the Water Quality Analysis Simulation Program, WASP, version 7, to simulate the transport and fate of mercury in the section between the SA-07 station (located upstream of the Vetás river confluence on the Surata river) and SA-03 station (located at the intake of the amb). The presence of species such as methylmercury is discarded, both in waters Surata river and its tributaries, and consequently, this application work focuses only on the modeling of Hg0.

* Final work

** Physicochemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering. Master of Environmental Engineering. Director: Alvaro Andrés Cajigas, MSc.

INTRODUCCION

En los municipios de Vetás y California, localizados en la parte superior de la subcuenca del río Suratá, la explotación de oro por parte de pequeñas empresas mineras y mineros artesanales tradicionalmente involucra la utilización de mercurio en los procesos de beneficio (Ver foto 1).

Foto 1: Utilización del mercurio para la extracción de oro



Fuente: www.agenciadenoticias.unal.edu.co

Productos de desecho contaminados con mercurio y cianuro, sin un tratamiento técnico previo, son arrojados directa o indirectamente a las quebradas y ríos circundantes, corrientes que finalmente entregan sus aguas al río Suratá (Ver foto 2). Este último abastece de agua a más de 23000 suscriptores del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, amb, desde la planta de potabilización Bosconia (Dato suministrado por el amb para el 2012).

Foto 2: Extracción artesanal de oro



Fuente: Periódico Vanguardia Liberal, edición 15/03/2013

El mercurio (Hg) es un tóxico con movilidad en el ambiente a través de la cadena trófica que causa numerosos efectos adversos sobre la salud humana y en los ecosistemas naturales. Es un metal pesado, líquido a temperatura ambiente, se puede encontrar naturalmente en tres variedades: metálico o elemental (Hg^0); sales inorgánicas (Hg_2^{+2} , Hg^{+2}) y compuestos orgánicos (Metilmercurio-MeHg-, etilHg y fenilHg). Los estudios toxicológicos demuestran que el mercurio se destaca por su fácil penetración de la barrera hematoencefálica y la dificultad de su salida, daño renal, etc. En el agua el mercurio puede estar disuelto o adherido a partículas formando compuestos organomercuriales (Bertello Luis F, 1996; García et al, 2003).

Los modelos de simulación de calidad de agua pueden ilustrar el comportamiento de un cuerpo hídrico superficial ante acciones de contaminación y descontaminación de origen humano o natural, permitiendo evaluar diferentes

alternativas de ingeniería para el control y manejo de la calidad del agua. También se utilizan como herramientas de planificación de éste recurso natural. A nivel internacional se pueden citar trabajos como “Simulación del transporte y destino de mercurio en el río Carson, Nevada” (Carroll et al, 2000) y “Fuentes y remediación de la contaminación por mercurio en los sistemas acuáticos” (Wang et al, 2004). A nivel nacional, entre otros ejemplos, se ha modelado el comportamiento de metales pesados en los sedimentos de la cuenca media y baja del río Bogotá (Alba et al, 1995), el transporte de metales pesados en suspensión para un tramo del río Magdalena utilizando la herramienta MATLAB (Bitar et al, 2005) y también se modeló el transporte de metales pesados en la cuenca baja del río Tunjuelo (Bedoya, John. 2007). No obstante lo anterior, el autor de este estudio no encontró precedentes de modelación del transporte y destino de mercurio para el río Suratá.

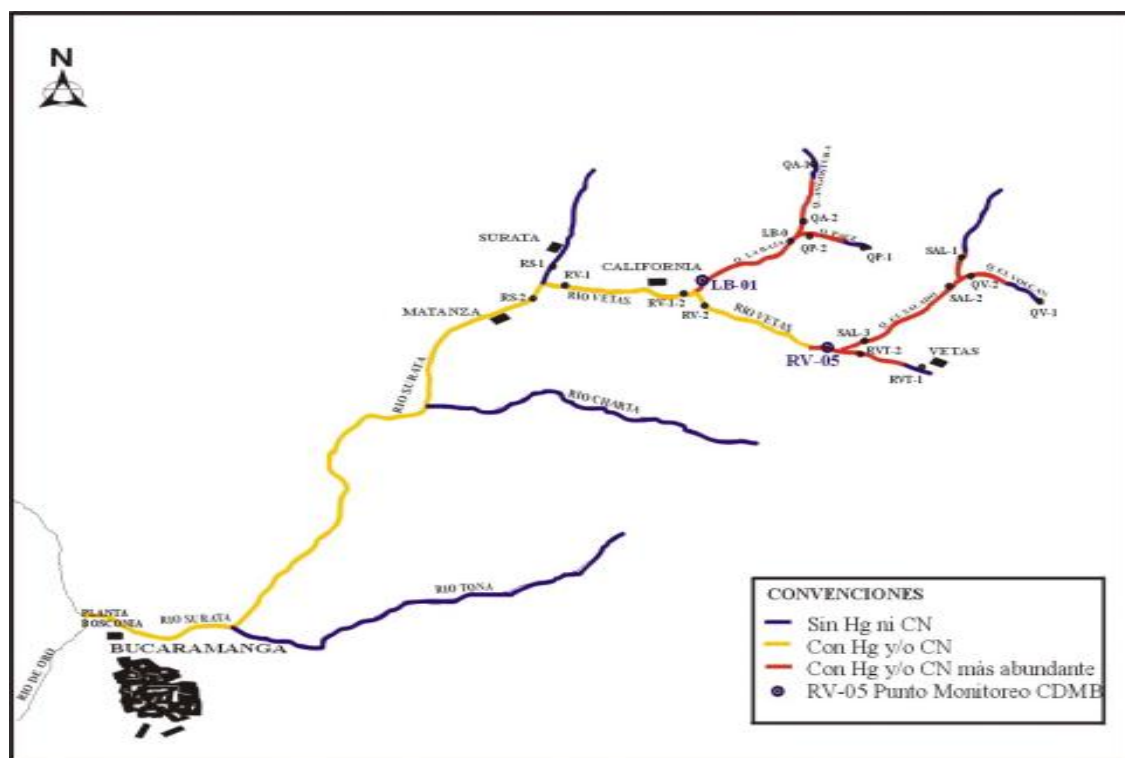
El presente trabajo de aplicación consistió en seleccionar un software de simulación de calidad de agua capaz de modelar el transporte y destino de mercurio en corrientes superficiales y determinar sus posibilidades de aplicación para la subcuenca del río Suratá. La calibración y validación del mismo se llevó a cabo con la información disponible en las bases de datos tanto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, amb, como de la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB.

1. ANTECEDENTES

En los municipios de Vetas y California históricamente se ha desarrollado minería aurífera de filón a lo largo de las riberas de quebradas como El Volcán, El Salado, Angosturas, Páez y La Baja, al igual que en el río Vetas. Como resultado de tal actividad sus aguas contaminadas con mercurio y cianuro terminan desembocando al río Suratá, cuyas aguas son captadas por la planta de potabilización de agua Bosconia, ubicada treinta kilómetros abajo, la cual abastece más de una tercera parte del sistema de acueducto de la ciudad de Bucaramanga.

Con base en un programa de monitoreo de aguas y sedimentos realizado por la CDMB en puntos ubicados en las zonas con actividad minera, se corroboró la presencia de cianuro y mercurio (Ver figura 1).

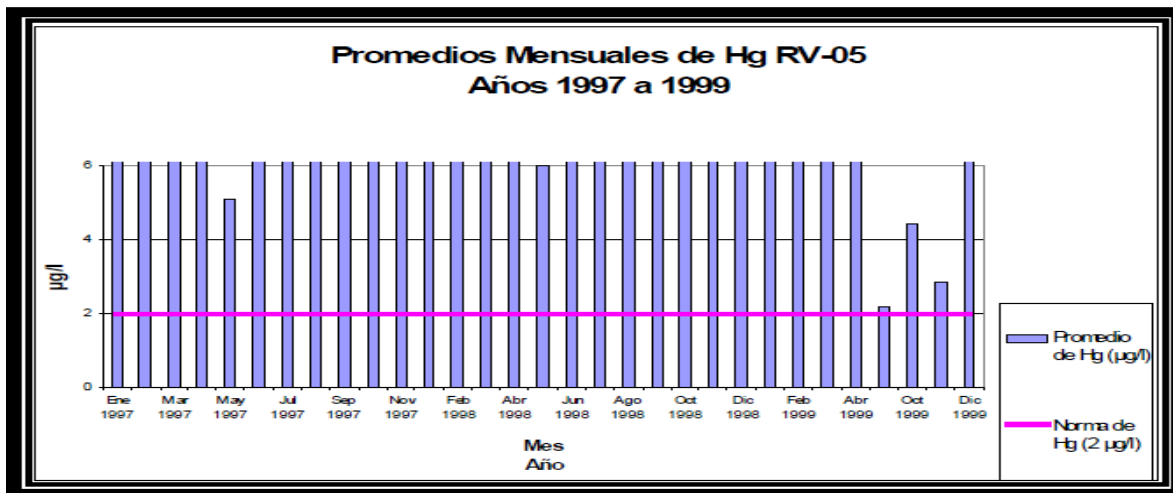
Figura 1: Presencia de mercurio y/o cianuro en el río Suratá y sus tributarios



Fuente: Proyecto río Suratá: Líneas de acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería aurífera en Vetas y California

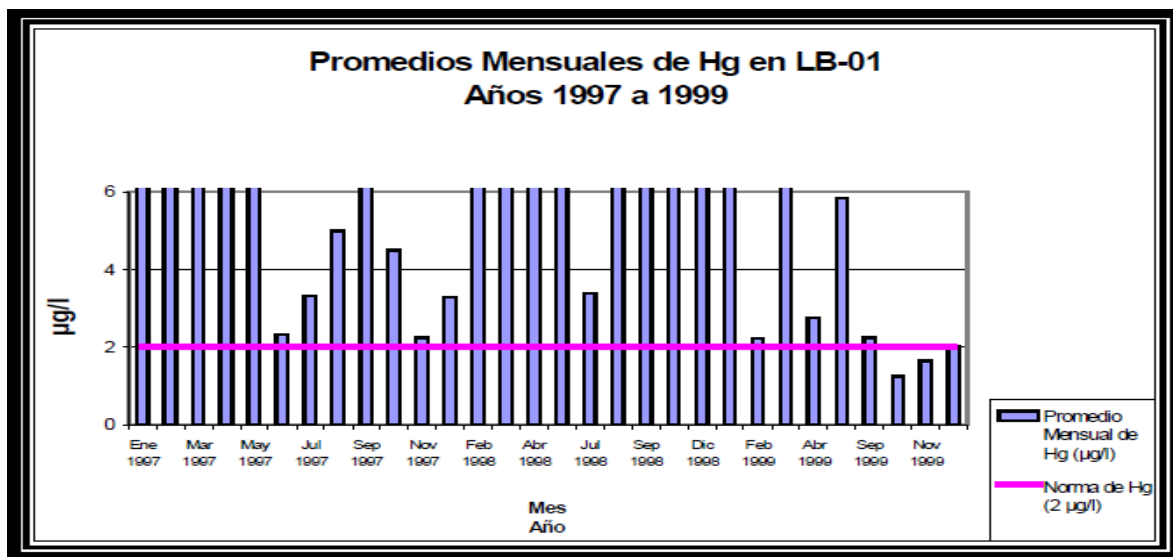
Los resultados del monitoreo (ver figuras 2 y 3) revelaron que desde 1.997 hasta 1.999 en las estaciones RV-05 y LB-01, ubicadas sobre el río Vetás y la quebrada La Baja respectivamente, los valores de mercurio superaban lo establecido en la norma colombiana para aguas (Decreto 1594 de 1.984: 0,2 microgramos / litro).

Figura 2: Promedios mensuales de mercurio en el río Vetás



Fuente: Proyecto río Suratá: Líneas de acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería aurífera en Vetás y California

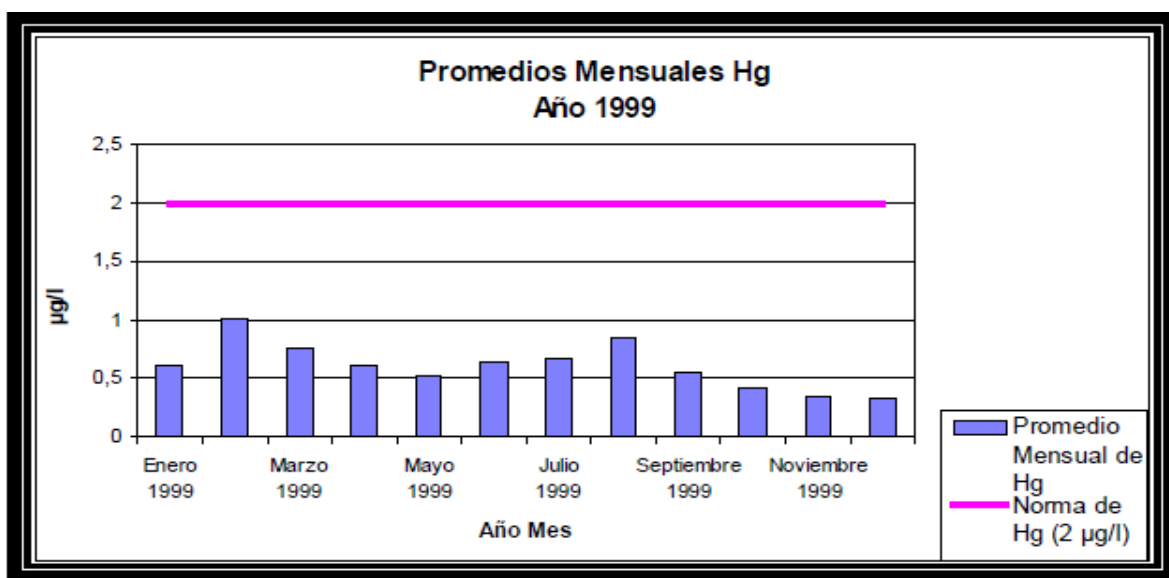
Figura 3: Promedios mensuales de mercurio en la quebrada La Baja



Fuente: Proyecto río Suratá: Líneas de acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería aurífera en Vetás y California

Ante esta situación el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, amb, realiza en su planta de Bosconia tratamiento a las aguas contaminadas del río Suratá utilizando técnicas de separación y/o neutralización de los compuestos perjudiciales. Técnicamente se retira la mayor parte del mercurio con un proceso preliminar de sedimentación agregando algunas veces sulfato de aluminio para acelerarlo. Este tratamiento es ejecutado antes del proceso convencional de potabilización de agua y ha dado resultados positivos (Ver figura 4)

Figura 4: Promedios mensuales de mercurio en agua cruda de la planta Bosconia



Fuente: Proyecto río Suratá: Líneas de acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería aurífera en Vetas y California

Otro estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander y contratado por la CDMB en octubre del año 2.000, reporta ausencia casi total de comunidades bentónicas y presencia mínima de comunidades perifíticas en las riberas de las quebradas en donde hay actividad minera. Se corrobora entonces la contaminación de las aguas por residuos de mercurio provenientes de las actividades mineras en la zona.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre las acciones que el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga ejecuta para el manejo de la contaminación producida por la pequeña y mediana minería se resaltan:

- Implementación de procesos de pretratamiento en la planta Bosconia para acondicionar el agua del río Suratá antes de potabilizarla.
- Medición en línea y monitoreo de parámetros de calidad: pH, cianuro, mercurio, turbiedad, color, conductividad, para la toma de acciones inmediatas.
- Estudios de tratabilidad para la mejora de procesos (carbón activado), manejo de lodos y uso de coagulantes alternos.

Sin embargo, actualmente ni el acueducto metropolitano de Bucaramanga ni la CDMB poseen una herramienta eficaz para modelar el comportamiento de las aguas del río Suratá ante vertimientos repetitivos de desechos contaminados con mercurio y cianuro o predecir las consecuencias de eventos puntuales acompañados de cambios significativos en el caudal. En consecuencia, cuando no se puede asegurar el límite de 2 microgramos Hg/litro, se pueden presentar tomas de decisiones drásticas como la suspensión del tratamiento en la planta Bosconia.

Se detecta entonces la necesidad de una herramienta técnica de juicio para solicitar la expedición de leyes más restrictivas frente al uso indiscriminado de este recurso, ventaja que puede ser ofrecida por un software de simulación de calidad de agua capaz de modelar transporte y destino de mercurio.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Validar la aplicabilidad de un modelo de calidad de agua para la simulación del transporte y destino de mercurio en un tramo del río Suratá, departamento de Santander, Colombia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir la condición ambiental del río Suratá, en el tramo seleccionado, a causa del vertimiento de residuos contaminados con mercurio utilizando la información suministrada por las autoridades ambientales de la zona
- Seleccionar un software de modelación de calidad de agua cuyas características se adapten mejor a la problemática presente en el río Suratá
- Validar el software seleccionado para modelar la variación de la concentración de mercurio elemental en la columna de agua

4. MARCO TEORICO

4.1 TOXICIDAD Y EFECTOS CARCINOGENICOS DEL MERCURIO

A diferencia de los metales de los grupos 1A y 2A, que tienden a concentrarse en los fluidos corporales, los metales pesados se asocian a estructuras moleculares mayores, como enzimas y proteínas, y su eliminación del cuerpo es más lenta. La toxicidad de un metal como el mercurio puede relacionarse con la respuesta a un efecto específico, ya que al tener una fuerte afinidad sulfófila bloquea los grupos sulfhidrilos (HS-) esenciales para la estabilidad de proteínas y enzimas (Oyarzún, Ricardo. 2007).

La forma química del metal puede afectar su grado de absorción así como su toxicidad y efecto cancerígeno. Con respecto al mercurio, su absorción y, por lo tanto sus efectos tóxicos, aumentan desde su forma metálica pura a la combinación inorgánica (Ej. HgCl_2) y es máxima como compuesto organometálico. Como ejemplo, en la bahía de Minamata (Japón) una industria petroquímica contaminó durante años los sedimentos de la bahía. En ellos, el metano formado por acción bacteriana en los sedimentos finos reductores, reaccionó con el mercurio formando metil-mercurio. Este compuesto organometálico fue asimilado por los peces e invertebrados marinos, base de la alimentación de los poblados de la zona (Oyarzún, Ricardo. 2007).

4.2 EL MERCURIO EN EL SUBSISTEMA HÍDRICO

El mercurio puede aparecer en este medio ya sea por fenómenos naturales o por actividades humanas. En el primer caso, la concentración de mercurio en los cuerpos de agua depende en gran medida de las características específicas de la cuenca hidrográfica, de la química del agua, del tipo de suelo y del comportamiento hidrológico en la región o área de estudio. Los patrones de uso del suelo ejercen una gran influencia en la distribución de la concentración de Hg

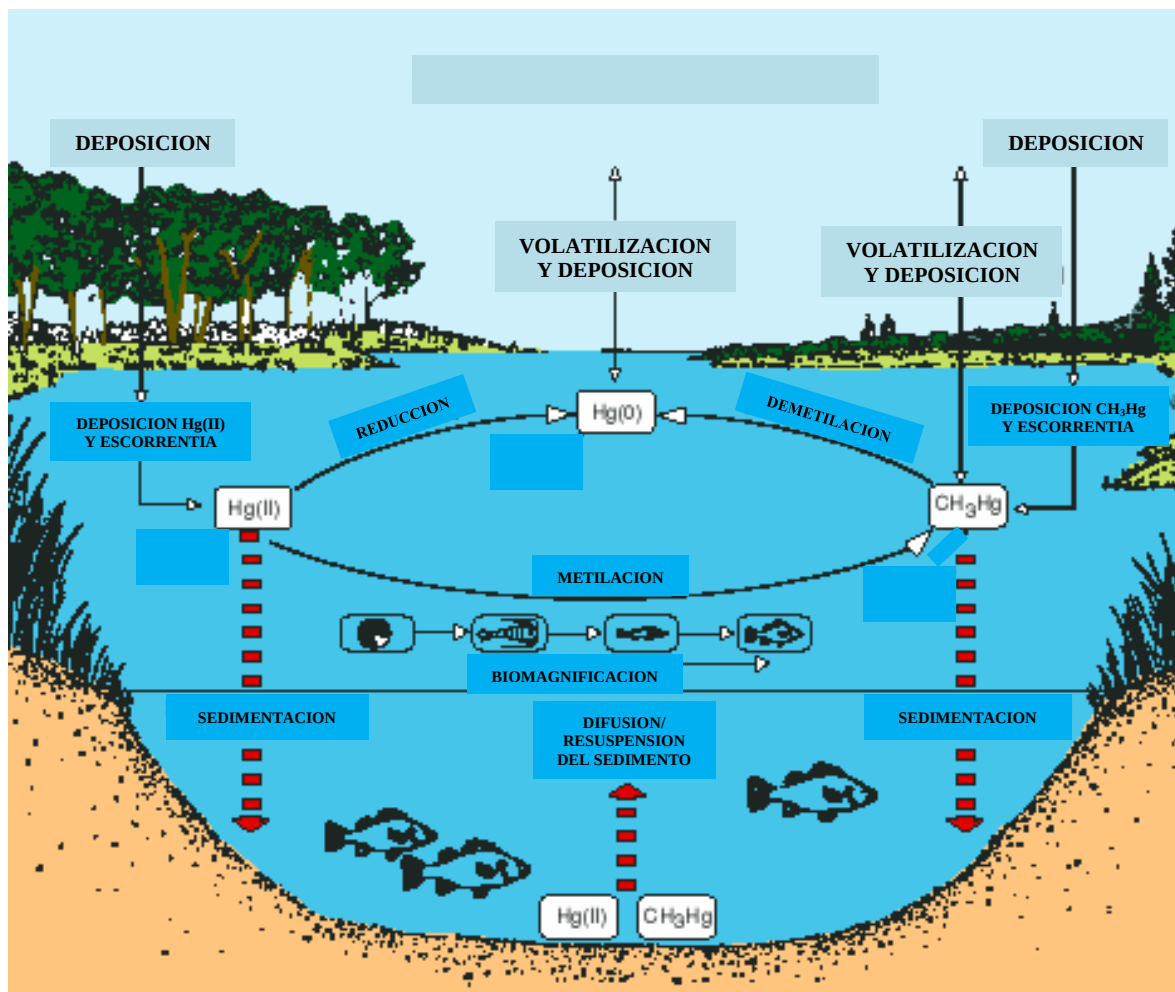
en el agua (Harris, et al., 2007). El comportamiento medio anual y diario de la precipitación de la cuenca se relaciona con el depósito atmosférico de Hg y aumenta los caudales de escorrentía, influyendo a su vez en la variación espacial temporal de las concentraciones de mercurio en el agua y sus sedimentos.

En el segundo caso, la contaminación con mercurio principalmente se origina en los procesos de beneficio del oro, el cual es extraído mezclando la roca triturada enriquecida con el metal precioso con mercurio metálico para formar una amalgama, la cual es presionada para remover el exceso de mercurio. Este proceso ocasiona el derramamiento directo de grandes cantidades del metal en los ríos y demás cuerpos de agua cercanos (Turizo et al, 1997).

4.3 EL MERCURIO A TRAVÉS DE LAS CADENAS TRÓFICAS

Después de la depositación húmeda o seca del mercurio inorgánico en las masas de agua, ocurren procesos de precipitación y secuestro en la columna de agua y de metilación en la fracción activa de los sedimentos. La metilación es un punto crítico y responsable del proceso de bioacumulación del metal en las comunidades del plancton y de los macroinvertebrados bentónicos y por tanto se produce su ingreso a niveles superiores de las redes tróficas acuáticas, hasta llegar a los peces y a los seres humanos (Ver figura 5). Este proceso de bioalquilación, que se define como la incorporación de grupos alquilo a un metal y en el caso particular del metil al mercurio, desde el punto de vista ecotoxicológico se considera la transformación más importante del ciclo biogeoquímico del mercurio ya que conduce al aumento significativo de su biodisponibilidad y toxicidad (Palacio Baena, 2007).

Figura 5: Ciclo acuático del mercurio



Fuente: Adaptado de <http://www.healthbenchmarks.org/Mercury/AquaticCycle.cfm>

Las bacterias sulfatoredutoras son el principal grupo bacteriano identificado como agente biometilador en la interfase entre las zonas aerobias y anaerobias de los sedimentos. Sin embargo también ha sido observada metilación en aguas anaerobias y en la rizósfera de las macrófitas flotantes (Furutani&Rudd, 1980).

La biodisponibilidad es una condición básica para que se presenten efectos ecotoxicológicos y está afectada principalmente por la especiación química, los procesos de transporte y la transformación de las sustancias en la fase ambiental (aire, agua, suelo, sedimento). Se ha registrado que valores bajos de pH en el agua y en el suelo favorecen la movilidad y la presencia de altas concentraciones

de mercurio, así como la mayor eficiencia del proceso de metilación en los ecosistemas acuáticos (Palacio Baena, 2007).

4.4 MODELOS DE CALIDAD DE AGUA

Un modelo de calidad de agua es una herramienta que permite evaluar los efectos de actividades antropogénicas o naturales que depositan uno o varios contaminantes sobre el cuerpo hídrico. Algunas ventajas de su utilización, entre otras, son:

- Facilitan el establecimiento de planes de gestión de los recursos hídricos disponibles.
- Permiten evaluar la degradación del cuerpo receptor en diversos puntos a lo largo de la trayectoria del cuerpo receptor producto de las descargas de aguas residuales
- Permiten comparar el efecto de diversos tipos de tratamiento para el agua, ya sea para el control de su calidad o para restablecerla.
- Representan una base técnica de juicio para regular el vertimiento de algún contaminante o de algunos de sus componentes.

Por lo general, para modelar la calidad del agua los datos más necesarios son de tipo hidrográfico, de tipo hidrodinámico, un inventario de las descargas tanto puntuales como no puntuales y parámetros convencionales de calidad de agua. Para discretizar datos se utiliza el método de diferencias finitas, el cual consiste en dividir el tramo a modelar en segmentos con propiedades homogéneas y con saltos discretos entre ellos.

Actualmente para simular la calidad del agua existe diversidad de programas informáticos que permiten la creación de modelos aplicables a diferentes casos

específicos. La posibilidad de conexión de estos programas con modelos hidrodinámicos es una gran ventaja, pues al usarlos en conjunto se logra una representación bastante cercana a la dinámica real del transporte y destino de los contaminantes en el agua.

4.5 MODELACIÓN DE MERCURIO

La modelación de mercurio está ganando cada vez más atención debido a la contaminación generalizada de las aguas superficiales en varios países. Las fuentes de mercurio en las cuencas incluyen la deposición atmosférica seca y húmeda tanto de largo alcance (por ejemplo, de continente a continente) como de menor rango de transporte, es decir, procedente de fuentes industriales como las centrales eléctricas de carbón, las zonas urbanas y áreas de minería. Sin embargo, el desarrollo de modelos para el transporte y destino de Hg se enfrenta a muchos desafíos pues los códigos van desde sencillas hojas de cálculo (Brown et al., 2007) hasta programas mucho más complejos.

Algunos ejemplos de modelación de mercurio son:

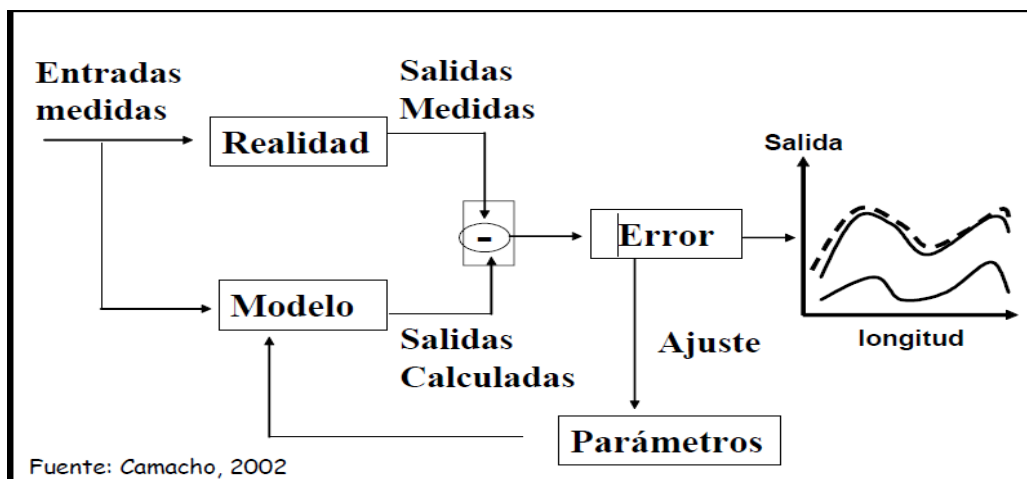
- **Alpers et al, 2005, 2006 (en revisión):** Se modelaron las cargas de mercurio en una cuenca de California (EEUU), impactada por minería. Entre las fuentes de mercurio existentes en las cuencas de California se incluyen minas de mercurio y minas de oro. En este trabajo se describen las cargas de contaminantes como funciones de flujo y de tiempo, encontrándose una correlación positiva entre el metilmercurio y la temperatura de la corriente (se midieron mayores concentraciones de Hg durante el verano con bajos caudales).
- **Ambrose et al. 2005:** Se modelaron las concentraciones y los flujos de mercurio en una cuenca en Georgia que recibía deposición atmosférica combinando un Sistema de Caracterización de Cuencas con un módulo de

transporte de Hg desarrollado a partir de una hoja de cálculo (USEPA, 1997c) y un modelo de escorrentía terrestre más detallado (Tsiros y Ambrosio, 1999). El transporte dentro de la corriente fue simulado utilizando la hoja de cálculo y el módulo Hg de WASP6, este último incluido en el módulo de químicos tóxicos de WASP (Wool et al., 2001).

4.6 PROCESOS DE CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Para que un modelo de simulación de calidad de agua sea útil debe estar en capacidad de reproducir con cierta precisión los datos obtenidos en campo para diferentes épocas. La diferencia o error que aparece entre los datos medidos y los presentados por el modelo tiene relación directa con la sensibilidad del sistema a cada uno de los parámetros contemplados en la simulación, de tal manera que habrá parámetros que inducen mayores cambios en la respuesta del modelo que otros. El ajuste de dichos parámetros a valores que minimicen la diferencia mencionada es lo que permite determinar si el modelo ha sido calibrado (Ver figura 6).

Figura 6: Proceso general de calibración de un modelo de simulación



Fuente: Optimización Modelo Simulación de la Calidad del Agua del Río Cauca, Corporación Autónoma Regional del Valle

La verificación corresponde a la simulación del modelo con los parámetros estimados confrontando la validez del ajuste elaborado. Ésta debe ser realizada principalmente para un rango de valores de salida que el modelo utilizará durante la simulación (Tucci, 1998).

5. UBICACIÓN Y ASPECTOS FÍSICOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el departamento de Santander (Ver figura 7), nororiente de Colombia. La capital es la ciudad de Bucaramanga.

Figura 7: Ubicación geográfica departamento de Santander y su capital Bucaramanga



Fuente: Adaptado de www.oleocordoba.com.co

El río Suratá, objeto del presente estudio, nace al nororiente de Bucaramanga y sobre él desembocan varios tributarios siendo los principales el río Vetás, el río Charta y el río Tona (Ver figura 8). Sobre las riberas de estos tributarios se encuentran municipios como Vetás, California, Suratá, Matanza, Charta y Tona, de gran trascendencia socioeconómica para el departamento de Santander.

5.1 CLIMATOLOGÍA

35

Tabla 1: Estaciones hidrométricas y metereológicas de la CDMB

Estaciones Hidrométricas

No.	NOMBRE	CORRIENTE	SUBCUENCA	INSTRUMENTO	MUNICIPIO
1	Carrizal	Río Tona	Tona	Mira, Sedimentos	Tona
2	Golondrinas	Q. Golondrinas	Tona	Mira	Tona
3	Arnanía	Q. Arnanía	Tona	Mira	Tona
4	Florida - La Esperanza	Río Frío	Frío	Mira	Floridablanca
5	La Corcova	Río Frío	Frío	Mira	Floridablanca
6	Majadas	Río Suratá	Suratá	Mira, Sedimentos	Suratá
7	El Roble	Río Manco	Chicamocha	Mira	Piedecuesta
8	Tahona	Río Umpala	Chicamocha	Mira	Sta. Bárbara
9	Piedras Blancas	Q. Piedras Blancas	Saladita - Caraba	Mira	Tona
10	El Saladito	Q. Saladito	Caraba	Mira	Silos
11	Antala	Q. Antala	Mataperros- Caraba	Mira	Silos
12	Guayabales	Q. Guayabales	Mataperros - Caraba	Mira	Silo

Estaciones Meteorológicas

No.	NOMBRE	CORRIENTE	SUBCUENCA	INSTRUMENTO	MUNICIPIO
1	El Brasil	Río Tona	Tona	Pluviómetro - termómetro	Tona
2	Morrochiquito	Q. Arnanía	Tona	Pluviómetro	Tona
3	El Pajal	Q. Golondrinas	Tona	Pluviómetro	Tona
4	La Mariana	Río Frío	Frío	Pluviómetro	Floridablanca
5	La Granja	Q. Pirita	Suratá	Pluviómetro	Charta
6	La Lora	Río Suratá	Suratá	Pluviómetro	Suratá
7	Povedas	Río Vetás	Suratá	Pluviómetro	California
8	Miraflores	Río Suratá	Suratá	Pluviómetro	Matanza
9	Huerta Grande	Río Charta	Suratá	Pluviómetro	Charta
10	La Vega	Río Manco	Chicamocha	Pluviómetro	Piedecuesta
11	Piedras Blancas	Q. Piedras Blancas	Saladito - Caraba	Pluviómetro	Tona
12	El Vaho	Q. Guayabales	Mataperros-caraba	Pluviómetro	Sta. Bárbara

Fuente: Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca río Suratá, CDMB

5.1.1 Precipitación

La precipitación anual promedio varía entre 660 a 1200 m.m. El régimen de lluvias regional es bimodal, con los períodos de invierno comprendidos entre los meses de marzo a mayo o abril a junio y también entre septiembre y noviembre, presentando en promedio entre 9 y 16 días con precipitación al mes, y precipitaciones máximas diarias entre 20 y 50 mm.

5.1.2 Temperatura

En la subcuenca los valores más altos de temperatura se presentan durante los meses de marzo a mayo, y el menor en noviembre. El rango de variación de la temperatura instantánea se estima entre valores muy cercanos a cero grados en la parte alta de los páramos de Tasajero, Monsalve, Vetas y Ramírez influencia del páramo de Berlín y con 35°C para la parte baja de la desembocadura del Río Suratá.

5.1.3 Humedad Relativa

Se observan valores ligeramente mayores en los meses de abril a mayo y de octubre a noviembre. A partir de la información histórica se estima la humedad relativa media multianual en 81% para la región.

5.1.4 Brillo Solar

El brillo solar anual varía entre 1.472 horas/año, relacionadas para la parte alta de la subcuenca en la zona de páramos y 1.913 horas/año en la parte media y baja de la subcuenca. El mayor brillo solar se presenta en los meses de diciembre y enero (aproximadamente 200 horas/mes) y el menor en los meses de octubre o junio (entre 90 y 130 horas/mes).

5.1.5 Velocidad del Viento

La información de vientos en la zona de estudio es muy escasa. Los valores medios multianuales en la zona se encuentran entre 1 y 2.8 m/s. Los meses con mayor velocidad del viento son febrero, marzo y diciembre. Los meses que presentan menores valores son junio, julio y noviembre.

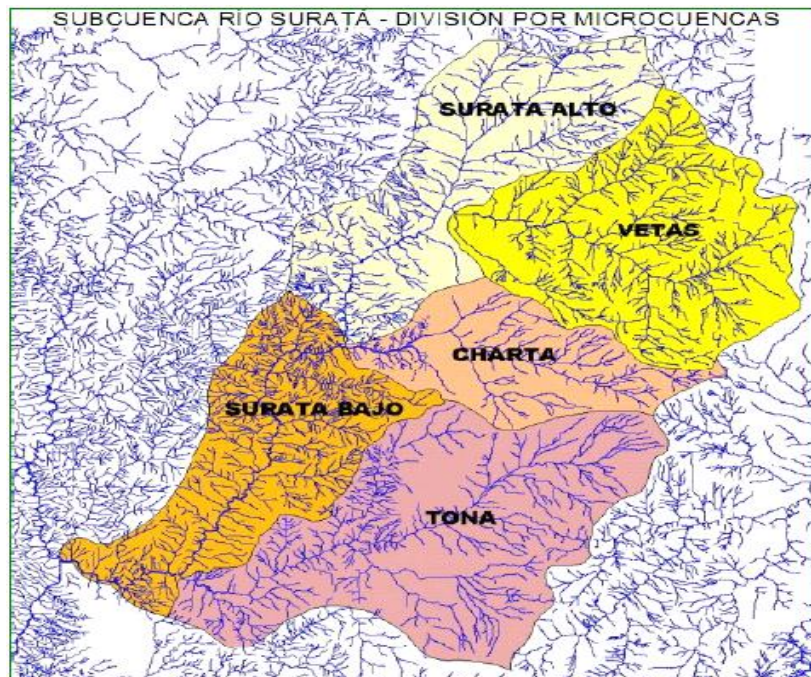
5.1.6 Evaporación

La evaporación media multianual en la región varía entre 700 mm/año y 1500 mm/año. Los meses de mayor evaporación corresponden al período diciembre - marzo. Los meses de menor evaporación son septiembre y noviembre. Los valores mensuales registrados oscilan entre 45 y 140 mm/mes.

5.2 HIDROLOGÍA

El Río Suratá nace en la microcuenca del río Suratá alto sobre la cota de los 3.800 m.s.n.m. en el páramo de Monsalve y desemboca en el río Lebrija en la vereda Santa Rita, sobre la cota de los 1.000 m.s.n.m. La red hidrológica de la subcuenca del Río Suratá esta conformada por cinco corrientes tributarias: río Vetás, río Suratá Alto, río Charta, río Tona y en la parte final la Microcuenca río Suratá Bajo, conformando el tributario principal río Suratá . (Ver Figura 9 y Tabla 2).

Figura 9: Distribución de microcuencas en la subcuenca río Suratá



Fuente: Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca río Suratá, CDMB

Tabla 2: Extensión por microcuencas subcuenca rio Suratá

Cuenca	Subcuenca	Microcuencas	Area (Ha)
Lebrija	Rio Suratá	Vetas	15.551
		Suratá Alto	13.603
		Charta	7.830
		Tona	19.233
		Suratá Bajo	12.244
Total			68.461

Fuente: Sistema de Información Ambiental (SIA) CDMB. Año 2006

5.3 GEOLOGÍA

La subcuenca del Río Suratá es un territorio con mayor predominio de rocas del complejo ígneo metamórfico con relieves montañosos fluvio erosionados; en la parte alta en las microcuenca Vetas, Charta y Suratá alto, las rocas metamórficas como filitas, esquistos cuarcitas de la formación Silgara afloran en un gran porcentaje del territorio, disminuyendo gradualmente su presencia hacia la parte media a baja de la subcuenca. En este sector las rocas ígneas que predominan son la cuarzomonzonita de la corcova, cuarzomonzonitas biotíticos entre otras composiciones. Este complejo ígneo metamórfico esta afectado por controles estructurales de fallas locales con influencia de un sistema regional en dirección Suroeste-Noreste. Dentro de la subcuenca afloran también rocas sedimentarias con alto callamiento en dirección predominante Sureste-Noroeste; las rocas que afloran en mayor proporción son areniscas, calizas, lutitas pertenecientes a formaciones Tambor, Rosablanca, Paja entre otras que se observan en la parte alta y media de la subcuenca en franjas alargadas generando un relieve de laderas estructurales; en la parte de baja de la subcuenca, en la microcuenca Suratá bajo, se presentan las formaciones sedimentarias mas antiguas como Formación Tiburón, Jordán y Girón caracterizadas por lutitas ,calizas y conglomerados.

5.4 SUELOS

En la subcuenca se presentan variedad de suelos. En la parte más alta en territorios de los municipios de Vetás, Suratá, Charta y Tona, se presentan suelos muy superficiales, texturas gruesas, con fertilidad baja a muy baja. Otro tipo de suelo que se desarrolla en la parte alta y media de la subcuenca, en pendientes relativamente altas a moderadas, se presenta en sectores de las microcuencas Vetás, Suratá Alto, Charta y Tona, el cual es muy superficial, con textura franco fina y franco grueso, con drenaje natural bueno y fertilidad natural baja. Es necesario desarrollar prácticas de conservación de suelo, por la tendencia a procesos altamente erosivos.

La parte media de la subcuenca está enmarcada dentro de un clima medio húmedo, en donde se presentan suelos profundos y moderadamente superficiales; texturas medias, moderadamente gruesas, en algunos sectores con saturación de aluminio; fertilidad baja y moderada. En la parte media a baja de la microcuenca los suelos son superficiales con texturas arcillosas, con drenaje natural bueno y fertilidad natural alta.

En la parte baja de la subcuenca, sobre el territorio de la microcuenca Suratá Bajo, los suelos están asociados a relieves quebrados con poca profundidad y fertilidad muy baja.

6. METODOLOGIA

El diseño y desarrollo de este trabajo de aplicación se realizó en las siguientes fases:

6.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA SUBCUENCA RIO SURATÁ

Se estudiaron las particularidades de la subcuenca referentes a las actividades identificadas como fuentes de mercurio y materia orgánica e infraestructura para saneamiento básico existente. Es así como se recolectó información secundaria acerca de usos del suelo, tratamiento de aguas residuales y actividad minera.

6.2 IDENTIFICACIÓN ESTACIONES HIDROLÓGICAS PERTINENTES A LOS OBJETIVOS DEL PROYECTO

Se requirió de un mapa de la jurisdicción de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga que incluyera la ubicación de las estaciones limnigráficas y limnimétricas sobre el río Suratá y sus afluentes (Ver figura 12). A través de dichas estaciones la CDMB realiza el monitoreo y control de la calidad del agua. También se contó con información suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, amb, específicamente sobre la estación “Uña de gato” y la bocatoma de la planta Bosconia.

6.3 RECOPIACIÓN DE VALORES HISTÓRICOS DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, HIDRODINÁMICOS Y DE CALIDAD DE AGUA DEL RIO SURATÁ

Se tabuló la información contenida en los aforos realizados por la CDMB y el amb a través de las estaciones hidrométricas ubicadas sobre el río Suratá. Los pares caudal – fecha constituyen funciones temporales generalmente requeridas por

modelos de transporte de solutos en corrientes hídricas. También se tabuló información sobre mercurio y parámetros convencionales de calidad de agua.

6.4 DEFINICIÓN DEL ÁREA OBJETO DE MODELACIÓN

La delimitación del área de la subcuenca del río Suratá objeto de modelación se definió con base en los tres siguientes factores:

- Información previa sobre sectores del río Suratá afectados por la actividad minera.
- Identificación de las estaciones limnigráficas y limnimétricas, ubicadas sobre el río Suratá y sus afluentes, sobre las que se llevara un monitoreo periódico y suficientemente amplio.
- Existencia de información sobre concentración de mercurio, caudales y parámetros convencionales de calidad de agua contenida en las bases de datos del amb y la CDMB, o posibilidad de obtenerla.

6.5 SELECCIÓN DEL MODELO

En el procedimiento para seleccionar el modelo de simulación de calidad de agua se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- El tipo de problema que se quiere analizar en el río Suratá, partiendo de las necesidades de las entidades interesadas, en este caso la CDMB y el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga
- Las características físicas de la corriente hídrica en el área objeto de modelación

- El tiempo y los recursos financieros disponibles para la elaboración del trabajo de aplicación

Una vez establecido lo anterior, los pasos seguidos fueron:

6.5.1 Revisión bibliográfica y preselección de modelos

La investigación se dirigió a conocer los tipos de modelos de simulación de calidad de aguas, las características individuales que definían sus fortalezas y aplicabilidad al transporte y destino de mercurio. Se preseleccionó software de distribución gratuita que puede ser obtenido de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), del Departamento de Agricultura (USDA) o del Servicio Geológico (USGS) de los Estados Unidos.

6.5.2 Calificación de modelos

Los modelos preseleccionados serán calificados utilizando una tabla de puntuación en la que una cualidad específica útil a la modelación de mercurio, bajo las condiciones exhibidas por el río Suratá, suma una unidad al modelo calificado y cuando no se cumpla con dicha cualidad simplemente no se adjudica puntaje.

Los puntajes adjudicados a los modelos finalistas se consolidarán en una matriz y el de mayor puntaje será el modelo a utilizar en este trabajo de aplicación.

6.6 CONSULTA DETALLADA DEL MODELO SELECCIONADO

Escogido el software que se utilizará para la simulación del transporte y destino de mercurio en el tramo seleccionado del río Suratá, se consulta información específica acerca de su arquitectura, tipos de transporte simulados, información requerida para cada segmento, entre otros.

6.7 TRABAJO DE CAMPO

Una vez determinada la información requerida por el software de modelación seleccionado se consultaron las bases de datos tanto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga como de la CDMB con el propósito de establecer si la información era completa y suficiente para la calibración y verificación del modelo. Con el propósito de cubrir vacíos en la información se hizo necesario realizar dos jornadas de medición de mercurio y parámetros de calidad de agua en las estaciones El Palmar y SA-05 e igualmente para el río Vetás en la estación RV-01.

6.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO SURATÁ POR MATERIA ORGÁNICA

Debido a la diversa interacción del mercurio con la materia orgánica disuelta en el medio acuático, el autor decidió complementar este trabajo de aplicación con un análisis estadístico acerca del nivel de contaminación del río Suratá por materia orgánica, tomando como base el decreto 1594 de 1984. Para comprobar si la calidad del agua del río Suratá, principal fuente de abastecimiento de la planta de potabilización de agua Bosconia, cumple con lo establecido en el mencionado decreto, se decidió tomar como indicadores a los coliformes totales y a los coliformes fecales.

Se tomaron aleatoriamente dos conjuntos de 29 datos, uno para coliformes totales y otro para coliformes fecales; se comprobó que tuvieran una distribución normal y se aplicó como estadístico de contraste la prueba t de student para rechazar o no la hipótesis nula.

6.9 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE Y DESTINO DE MERCURIO

Se tomó la información correspondiente a los aportes que hacen los tributarios al río Suratá, es decir, caudal de agua y concentraciones de Hg0, sólidos suspendidos y materia orgánica disuelta, para efectuar la validación de los resultados arrojados por el modelo versus los datos medidos en campo.

6.10 MODELACIÓN DE ESCENARIOS

Se recrearon tres posibles escenarios así: Aumento al doble del caudal por temporada invernal, reducción a la mitad del caudal por intenso verano y aumento al doble de las descargas de mercurio por aumento de la población minera.

7. RESULTADOS

7.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, HIDRODINÁMICOS Y DE CALIDAD DE AGUA DEL RIO SURATÁ

Las tablas del anexo 1 contienen valores de parámetros geométricos e hidrodinámicos del río Suratá, calculados a lo largo de varios años, en diferentes épocas, correspondientes a cada una de las cuatro estaciones hidrométricas ubicadas a lo largo de su curso. En cuanto a parámetros de calidad de agua, a continuación se muestra el promedio de cada uno de ellos:

Tabla 3: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-07

ESTACION SA-07 “Uña de gato”							
VARIABLE	pH	OD (mgO ₂ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO ₅ (mgO ₂ /l)	COLIFORMES TOTALES (NMP/100ml)	COLIFORMES FECALES (NMP/100ml)	Hg (µg Hg/L)
PROMEDIO	7,86	No medido	No medido	No medido	No medido	No medido	0,46

Fuente: CDMB

Tabla 4: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-05

ESTACION SA-05							
VARIABLE	pH	OD (mgO ₂ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO ₅ (mgO ₂ /l)	COLIFORMES TOTALES (NMP/100ml)	COLIFORMES FECALES (NMP/100ml)	Hg (µg Hg/L)
PROMEDIO	7,83	7,54	17,68	1,53	69191	50625	0.84

Fuente: CDMB

Tabla 5: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-04

ESTACION SA-04							
VARIABLE	pH	OD (mgO ₂ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO ₅ (mgO ₂ /l)	COLIFORMES TOTALES (NMP/100ml)	COLIFORMES FECALES (NMP/100ml)	Hg (µg Hg/L)
PROMEDIO	8,32	7,65	<15.7	<1.3	17500	4800	<0.5

Fuente: CDMB

Tabla 6: Valores promedio parámetros calidad de agua estación SA-03

ESTACION SA-03							
VARIABLE	pH	OD (mgO ₂ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	DBO ₅ (mgO ₂ /l)	COLIFORMES TOTALES (NMP/100ml)	COLIFORMES FECALES (NMP/100ml)	Hg (µg Hg/L)
PROMEDIO	7,97	7,4	23,13	1,37	85574	15122	0,99

Fuente: CDMB

7.2 DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL

7.2.1 Usos del suelo

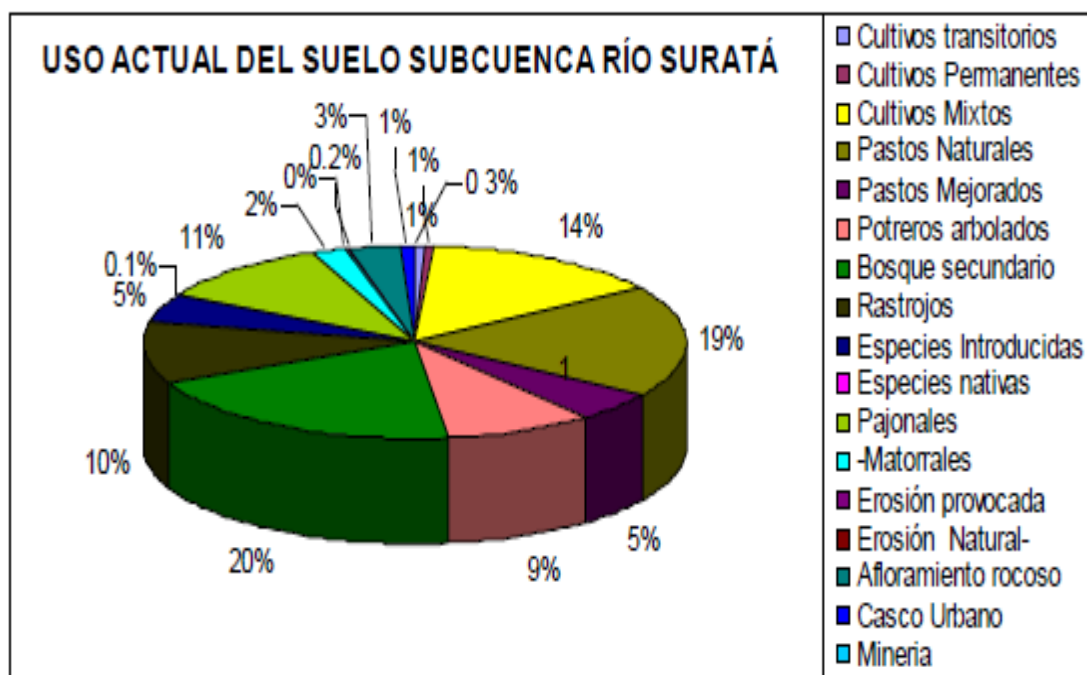
Las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta se conoce como usos del suelo. La tabla 7 y la figura 10 muestran que la tierra en la subcuenca del río Suratá no se explota con la misma intensidad ni con los mismos propósitos en toda su superficie. Algunas porciones son modificadas profundamente al ser utilizadas con fines agropecuarios o como asentamientos humanos; otras han permanecido relativamente inalteradas por las actividades de la sociedad.

Tabla 7: Descripción de los usos y coberturas de las tierras

Microcuenca	Tierras Agropecuarias		Agroforestal	Bosques y Rastrojos altos	Bosque Plantado	Vegetación Especial - Pajonales	Tierras Eriales	Urbano – DM - Minería	TOTAL
	Cultivos y Misceláneos	Pastos	Silvoagrícola-silvopastoril						
Vetas	1.957	2.907	1.508	3.490	132	3.470	2.076	11	15.551
Suratá Alto	3.192	2.211	1.745	4.241	942	797	264	211	13.603
Charta	192	3.410	522	1.703	957	1.029	-	17	7.830
Tona	4.616	2.677	2.353	6.381	983	2.211	-	10	19.233
Suratá Bajo	1.246	4.159	151	4.276	304	1.200	2	908	12.244
Total	11.203	15.364	6.279	20.091	3.318	8.707	2.342	1.157	68.461

Fuente: Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca río Suratá, CDMB

Figura 10: Distribución del uso de las tierras



Fuente: Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca río Suratá, CDMB

7.2.2 Tratamiento de aguas residuales

En la microcuenca Vetás existe alcantarillado para el 80% del área urbana. En el área rural el 54 % de las viviendas tienen solución séptica y las demás vierten directamente a campo abierto.

Las unidades de servicios públicos de Vetás y California no realizan tratamiento de aguas residuales ya que no cuentan con una PTAR para dicha actividad. El cuerpo receptor de las aguas residuales es el río Vetás. (Fuente: www.sui.gov.co/riesgo/anexos, año 2008)

Actualmente los municipios de Suratá y Matanza no realizan tratamiento del agua residual. El cuerpo receptor de vertimientos es el río Suratá. (Fuente: Plan de desarrollo del municipio de Suratá 2012 – 2015).

El municipio de Charta no ha construido la planta de tratamiento de aguas residuales, solo cuenta con una laguna de oxidación sin terminar. El sistema de alcantarillado es combinado y las aguas son recogidas en un colector principal donde son dispuestas sin tratamiento previo al río Charta. (Fuente www.sui.gov.co/riesgo/anexos, año 2011).

La unidad de servicios públicos de Tona no realiza tratamiento de aguas residuales ya que no cuenta con una PTAR para dicha actividad. Los cuerpos receptores de las aguas residuales son el río Tona y el río Jordán. (Fuente www.sui.gov.co/riesgo/anexos, año 2008).

Tradicionalmente, los coliformes son considerados como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano en razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es

principalmente fecal. Por tanto, su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura. Asimismo, su número en el agua es proporcional al grado de contaminación fecal; mientras más coliformes se aíslan del agua, mayor es la gravedad de la descarga de heces.

Se intenta determinar estadísticamente si la cantidad de coliformes totales y coliformes fecales en la corriente río Suratá se encuentra dentro de los límites establecidos por el decreto 1594 de 1984.

Tabla 8: Contenido límite de coliformes según decreto 1594/1984

CONSUMO HUMANO TRATAMIENTO CONVENCIONAL		USO AGRICOLA (Riego de frutas que se consumen sin quitar la cáscara y hortalizas de tallo corto)		ACTIVIDADES RECREATIVAS CONTACTO PRIMARIO	
COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES
20000	2000	5000	1000	1000	200

Fuente: Ministerio de agricultura

7.2.2.1 Contaminación por coliformes en el punto SA-05

7.2.2.1.1 Contaminación por coliformes totales

Hipótesis nula: Media poblacional menor o igual al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Hipótesis alterna: Media poblacional mayor al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Tabla 9: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes totales punto SA 05

COLIFORMES TOTALES				
Media	59796,55			
Error típico	7680,091			
Mediana	54000			
Moda	92000			
Desviación estándar	41358,56			
Varianza de la muestra	1710530345			
Curtosis	0,3517			
Coeficiente de asimetría	0,8372			
Rango	152100			
Mínimo	7900			
Máximo	160000			
Suma	1734100			
Cuenta	29			
Mayor (1)	160000			
Menor(1)	7900		t	5,1818
Nivel de confianza (95,0%)	15731,9542		Valor crítico	1,7011

Fuente: Elaboración propia

Como $t(5,1818)$ está por fuera de la región de aceptación, se rechaza la hipótesis nula de que la media poblacional es menor o igual a 20000 NMP.

7.2.2.1.2 Contaminación por coliformes fecales

Hipótesis nula: Media poblacional menor o igual al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Hipótesis alterna: Media poblacional mayor al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Tabla 10: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes fecales punto SA 05

COLIFORMES FECALES				
Media	41655,1724			
Error típico	5153,5070			
Mediana	35000			
Moda	35000			
Desviación estándar	27752,4849			
Varianza de la muestra	770200418,7			
Curtosis	-0,4197			
Coeficiente de asimetría	0,7567			
Rango	87100			
Mínimo	4900			
Máximo	92000			
Suma	1208000			
Cuenta	29			
Mayor (1)	92000			
Menor(1)	4900		t	7,6948
Nivel de confianza (95,0%)	10556,4807		Valor crítico	1,7011

Fuente: Elaboración propia

Como $t(7,695)$ está por fuera de la región de aceptación, se rechaza la hipótesis nula de que la media poblacional es menor o igual a 2000 NMP.

7.2.2.2 Contaminación por coliformes en el punto SA-03

7.2.2.2.1 Contaminación por coliformes totales

Hipótesis nula: Media poblacional menor o igual al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Hipótesis alterna: Media poblacional mayor al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Tabla 11: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes totales punto SA 03

COLIFORMES TOTALES				
Media	36677,77778			
Error típico	6891,322289			
Mediana	24000			
Moda	54000			
Desviación estándar	35808,36101			
Varianza de la muestra	1282238718			
Curtosis	4,274451126			
Coeficiente de asimetría	1,8171396			
Rango	159100			
Mínimo	900			
Máximo	160000			
Suma	990300			
Cuenta	27			
Mayor (1)	160000			
Menor(1)	900		t	2,42011287
Nivel de confianza (95,0%)	14165,31584		Valor crítico	1,70561792

Fuente: Elaboración propia

Como $t(2,4201)$ está por fuera de la región de aceptación, se rechaza la hipótesis nula de que la media poblacional es menor o igual a 20000 NMP.

7.2.2.2.2 Contaminación por coliformes fecales

Hipótesis nula: Media poblacional menor o igual al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Hipótesis alterna: Media poblacional mayor al límite establecido para consumo humano con tratamiento convencional

Tabla 12: Estadística descriptiva y prueba t para valores coliformes fecales punto SA 03

COLIFORMES FECALES				
Media	20877,77778			
Error típico	4504,269369			
Mediana	11000			
Moda	54000			
Desviación estándar	23404,87019			
Varianza de la muestra	547787948,7			
Curtosis	1,758753194			
Coeficiente de asimetría	1,42870112			
Rango	91800			
Mínimo	200			
Máximo	92000			
Suma	563700			
Cuenta	27			
Mayor (1)	92000			
Menor(1)	200		t	4,19108544
Nivel de confianza (95,0%)	9258,658287		Valor crítico	1,70561792

Fuente: Elaboración propia

Como $t(4,1911)$ está por fuera de la región de aceptación, se rechaza la hipótesis nula de que la media poblacional es menor o igual a 2000 NMP.

7.2.3 Actividad minera

En Vetás y California, los mineros desarrollan procesos de beneficio mineral replicados a partir de sus prácticas ancestrales, en las cuales el mercurio y el cianuro han sido los compuestos utilizados para obtener su producto comercial. Al finalizar su proceso productivo los mineros vierten las arenas procesadas a las corrientes hídricas más cercanas que corresponden con tributarios del río Suratá (Wolff, E. 2001). Las fotos 3, 4 y 5 muestran el cambio en el aspecto físico del

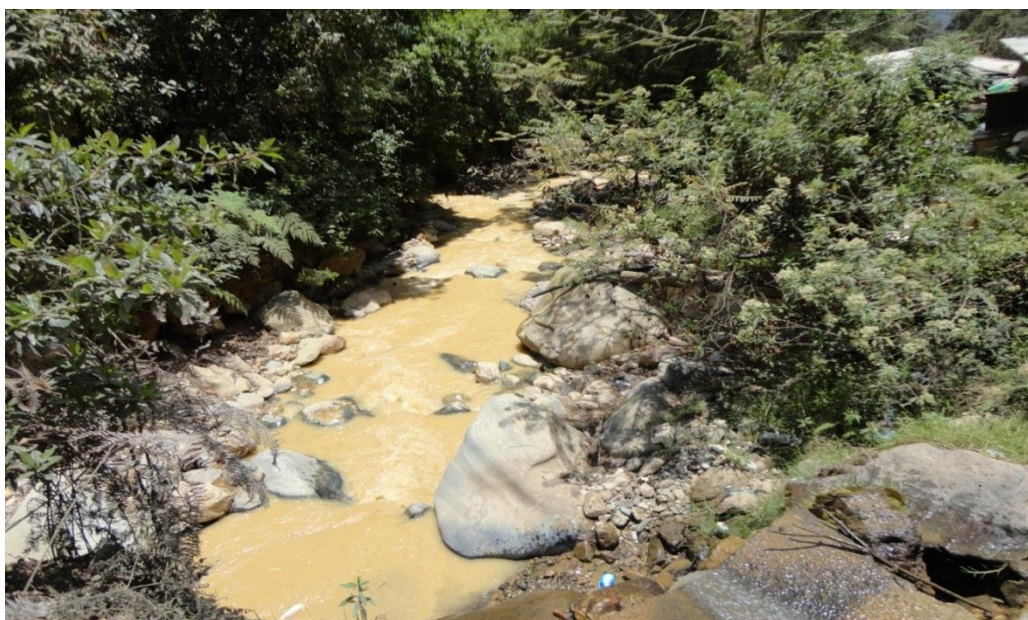
agua del rio Suratá luego de recibir las aguas del rio Vetas, este último receptor de las aguas de la quebrada La Baja.

Foto 3: Rio Suratá sector “Uña de gato” antes de la desembocadura del rio Vetas



Fuente: El autor. Abril de 2013.

Foto 4: Quebrada La Baja antes de desembocar al rio Vetas



Fuente: El autor. Abril de 2013.

Foto 5: Rio Suratá metros abajo de la desembocadura del rio Vetas



Fuente: El autor. Abril de 2013.

Foto 6: Aspecto físico del rio Suratá en la bocatoma de la planta Bosconia



Fuente: CDMB.

El río Suratá presenta concentraciones de mercurio desde la confluencia del río Vetás, detectables incluso aguas abajo en la bocatoma del amb. Lo anterior se corrobora con tablas de monitoreo de Hg de la CDMB (Tabla 13) y de control de calidad de aguas del amb (Tabla 14); fijarse en los campos resaltados en amarillo.

Tabla 13: Monitoreo de Hg en corrientes hídricas, río Suratá, segundo semestre 2009

 MONITOREO DE CORRIENTES HÍDRICAS Punto de Muestreo: SA-05 Año: 2009 Corriente:									
Mes	U. MEDIDA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
Día							24		25
Hora							12:00		12:40
Numeración del Laboratorio							169		419
O.D	mgO ₂ /l						7.600		7.580
DQO	mgO ₂ /l						15.800		15.800
DBO ₅	mgO ₂ /l						1.300		1.300
Nitrógeno Total									
Fósforo Total	mgP/l						0.060		0.070
Coliformes Totales	NMP/100 ml						160000		24000
Coliformes Fecales	NMP/100 ml						54000		24000
Sólidos Totales	mg/l						198		202
Turbiedad	NTU						75		51.7
pH	unidades								
Temperatura agua	C						21		20
ICA							52		54
Clasificación							BUENA		BUENA
Nitrógeno Total Kjeldalh	mgN/l						0.740		0.740
Nitrógeno Amoniacal									
Nitrógeno Orgánico									
Nitritos	mgN/l						0.003		0.004
Nitratos	mgN/l						0.250		0.130
Sólidos Suspendidos	mg/l						98		68
Sólidos Suspendidos Volátiles									
Temperatura ambiente	C						27		28
Cianuro Total									
Conductividad	umhos/cm ²								
Mercurio	ug Hg/l						1.100		1.500

Fuente: CDMB

Tabla 14: Control de Hg y calidad de aguas, planta Bosconia, noviembre 2009

FCC 510-006

Rev: 0

CALIDAD FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA AGUA CRUDA PLANTAS



LABORATORIO DE CONTROL CALIAD AGUAS

FECHA:	nov-13	AÑO:	2009																																			
MUESTRAS	Turbiedad UNT Color UPC	pH	Calcio mg Ca/L	Hierro Total mg Fe/L	Manganeso mg Mn/L	Cloruros mg Cl /L	O-Fosfatos mg PO ₄ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	Nitratos mg NO ₃ /L	Amonio mg NH ₄ /L	Sulfatos mgSO ₄ /L	Conductividad µs/cm	Oxígeno Disuelto mg O ₂ /L	DQO mg/L	DBO mg DBO/L	Alcalinidad Fenol mg CaCO ₃ /L	Alcalinidad Total mg CaCO ₃ /L	Dureza Total mg CaCO ₃ /L	Dureza Cálcica mg CaCO ₃ /L	Sólidos Totales mg/L	Aluminio mg Al/L	Cinc mg Zn/L	Cobre mg Cu/L	Cadmio µg Cd/L	Plomo µg Pb/L	Niquel mg Ni/L	Mercurio µg Hg/L	Plata mg Au/L	Bario mg Ba/L	Cromo total mg Cr/L	Fluor mg F/L	Selenio µg Se/L	Arsenico µg As/L	Cianuro Libre mg CN /L	Coliformes Totales NMP/ 100ml	E. Coli NMP/100 ml		
Cruda Flora	12	36	7,82	15,0	0,30	0,04	2,0	0,16	0,009	1,0	0,2	15,2	104	7,90	20	0,74	ND	45,4	55,0	37,5	140	0,02	0,02	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1,50	ND	540	240	
Cruda Florida	24	23	7,72	7,6	0,4	0,23	2,5	0,25	0,014	3,6	0,2	6,5	64	7,84	64	0,68	ND	28,7	24,0	19,0	100	0,02	0,03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3,4	ND	5400	1700		
Cruda Bosconia	200	32	8,01	23,1	1,9	0,40	4,6	0,18	0,020	1,0	0,4	22	142	7,98	35	0,80	ND	55,3	79,0	57,8	200	0,03	0,10	ND	ND	40	0,04	0,4	ND	ND	ND	ND	31	ND	54000	1100		
Decreto 1594/84	*	75	6,5-9,0	*	*	*	250	*	3,29	44,3	1,0	400	*	*	*	*	*	*	*	*	*	15	1	10	50		2	50	1	50	*	10	50	0,2	20000	2000		
Convenciones	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto UFC: Unidades Formadoras de Colonia																																					
NOTA:	El agua Cruda Flora corresponde al Río Tona, la Cruda Florida al Río Frio y la Cruda Bosconia al Río Suratá																																					

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, amb

De acuerdo a resultados obtenidos por la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, en los últimos cinco años se ha presentado una disminución notable del uso inadecuado de mercurio en los procesos de minería. Los puntos de monitoreo donde se corrobora lo anterior son la estación LB-01, ubicada aguas arriba de la desembocadura de la quebrada La Baja al río Vetás, y la estación RV-02, ubicada sobre el río Vetás antes de la desembocadura de la quebrada La Baja. La primera monitorea la contaminación producida por los mineros del municipio de California y la segunda monitorea la contaminación producida por los mineros del municipio de Vetás. La siguiente tabla muestra el intervalo de valores de contaminación por mercurio desde 2002 hasta 2010:

Tabla 15: Concentraciones de Hg medidas en afluentes del río Suratá

CONCENTRACION DE MERCURIO [mg/l]				
Estación	LB-01		RV-02	
Año	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
2002	0,0011	0,0121	0,0005	0,006
2003	0,0011	0,0713	0,0008	0,0079
2004	0,0009	0,0442	0,0006	0,0173
2005	0,0011	0,074	0,0007	0,0068
2006	0,0006	0,0556	0,0006	0,0026
2007	0,0012	0,0132	0,0007	0,0025
2008	0,001	0,012	0,0008	0,0063
2010	0,0008	0,0032	0,0005	0,0014

Fuente: Plan de ordenamiento del recurso hídrico para la microcuenca del río Vetas, 2010

Los yacimientos auríferos son diseminados y de tal magnitud que han generado el interés de empresas extranjeras como AUX Gold y Eco Oro, que a la fecha están en etapa de exploración. La foto 7 muestra una instalación típica de exploración.

Foto 7: Socavón en el área de exploración de la empresa minera AUX Gold



Fuente: El autor. Abril de 2013.

7.3 DELIMITACIÓN TRAMO DEL RIO SURATÁ A MODELAR

[illegible]

60

En la figura 11 se aprecia la ubicación de las estaciones hidrométricas a través de las cuales la CDMB realiza el monitoreo y control de la calidad del agua. A su vez, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga monitorea y controla la calidad del agua que capta del río Suratá, específicamente sobre la estación “Uña de gato” (SA-07) y la bocatoma de la planta Bosconia (Estación Majadas).

Con base en la figura 1 y el mapa de la figura 11 se consideran útiles para los objetivos de éste proyecto las siguientes estaciones:

- **Estación SA-07 “Uña de gato”:** Estación limnimétrica ubicada sobre el río Suratá antes de la confluencia del río Vetás (La mira está instalada en 2 secciones).

Foto 8: Estación SA-07 “Uña de gato”



Fuente: Informe de la red hidroclimatológica. CDMB. 2009

- **Estación RV-01:** Estación limnimétrica ubicada sobre el río Vetás antes de la confluencia en el Suratá.

Foto 9: Estación RV-01



Fuente: Informe de la red hidroclimatológica. CDMB. 2009

- **Estación SA-05:** Estación ubicada sobre el río Suratá antes de la confluencia con el río Charta. Actualmente no posee limnómetro.
- **Estación SA-04 “El Palmar”:** Estación limnimétrica ubicada sobre el río Suratá después de la confluencia con el río Charta.

Foto 10: Estación SA-04 “El Palmar”



Fuente: Informe de la red hidroclimatológica, año 2009

- **Estación SA-03:** Ubicada sobre el río Suratá después de la confluencia con el río Tona y que corresponde a la captación realizada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga para abastecer a la ciudad con el mismo nombre.

Foto 11: Estación SA-03



Fuente: CDMB

- **Estación RCH-01:** Estación limnimétrica ubicada sobre el rio Charta

Foto 12: Estación RCH-01



Fuente: CDMB

- **Estación RT-01:** Estación limnimétrica ubicada sobre el curso del rio Tona

Foto 13: Estación RT-01



Fuente: CDMB

Valorado lo hasta aquí expuesto, se decidió aplicar la simulación del transporte y destino de mercurio en el tramo comprendido entre la estación SA-07 (Uña de gato), ubicada sobre el río Suratá antes de la confluencia del río Vetás y la estación SA-03 (también llamada estación Majadas), ubicada en la bocatoma del acueducto metropolitano de Bucaramanga.

7.4 SELECCIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DE AGUA

7.4.1 Características de modelos preseleccionados para simular calidad del agua

Se preseleccionaron siete modelos de simulación de calidad de agua a partir de la distribución gratuita de su código ejecutable y la disponibilidad de los respectivos manuales. Las siguientes características se consideraron como la información más relevante para los propósitos de este trabajo de aplicación.

- **Cuerpos de agua:** Existen modelos aplicables a ríos y/o embalses y/o estuarios.
- **Modelación transporte de químicos orgánicos:** Un software de calidad de agua está en capacidad de modelar transporte de químicos orgánicos e/o inorgánicos.
- **Modelación transporte y destino de mercurio:** Capacidad del software para modelar específicamente este metal.
- **Modelo hidrodinámico integrado:** De cumplirse, el modelo matemático de calidad de agua calcula las velocidades, caudales y volúmenes bajo diferentes escenarios hidrológicos sin necesidad de acoplarse a otro software.

- **Preprocesador y postprocesador integrados:** El preprocesador introduce los datos de acuerdo al formato requerido por el modelo y el postprocesador interpreta los datos para su tabulación y/o graficación.
- **Interfase introducción datos / ejecución Windows:** Interfase más amable al usuario que D.O.S. tanto para la introducción de datos como para la operación del software.
- **Estado:** Esta propiedad se refiere al comportamiento en el tiempo de los procesos simulados por el modelo, el cual puede ser estable, cuasidinámico o dinámico.
- **Dimensionalidad:** Dirección predominante en la que ocurren las reacciones de los constituyentes en una corriente. Un modelo puede trabajar desde una hasta tres dimensiones.
- **Transporte:** Que puede ser advectivo y/o dispersivo y/o bentónico.
- **Código ejecutable y manuales de distribución gratuita:** Existencia o nó de manuales completos para el manejo del software de calidad de agua.

Las tablas con las características de cada uno de los modelos preseleccionados se pueden consultar en el anexo 2.

7.4.2 Calificación de los modelos preseleccionados

La tabla de puntuación para cada uno de los modelos preseleccionados se puede consultar en el anexo 3. A continuación se muestra la matriz que consolida los puntajes adjudicados:

Tabla 16: Matriz consolidación de puntajes para los modelos preseleccionados

CARACTERISTICA	MODELO						
	AQUATOX	EPDRIV1	QUAL2K	WASP 7	CE- QUAL- ICM	MEXAMS	HSPF
Cuerpos de agua	3	2	2	3	3	3	2
Modelación químicos orgánicos	1	1	1	1	1	1	1
Modelación transporte y destino de mercurio	0	0	0	1	0	0	0
Modelo hidrodinámico integrado	0	1	1	1	0	1	1
Preprocesador y postprocesador incorporados	2	2	1	2	0	1	0
Interfase introducción datos/ejecución Windows	2	2	2	2	0	1	0
Estado	2	2	1	2	1	1	1
Dimensionalidad	0	1	1	3	3	3	1
Transporte	3	3	3	3	3	3	3
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	1	1	1	1	0	0	0
TOTAL PUNTUACION	14	15	13	19	11	14	9

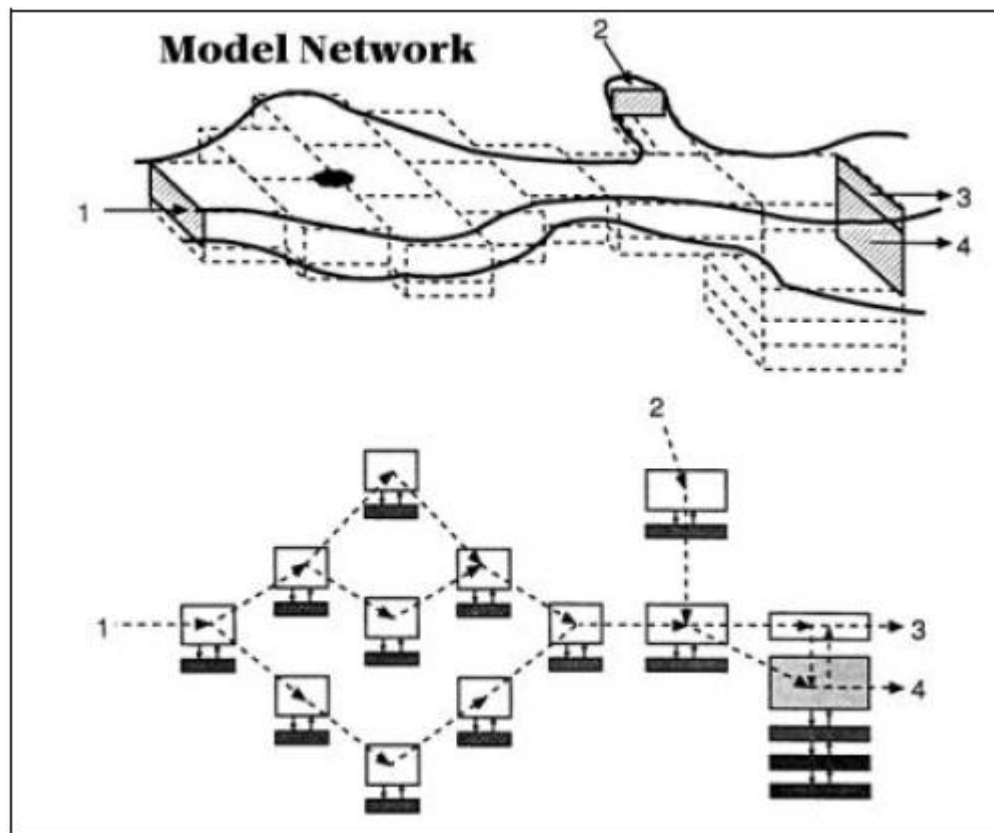
Fuente: El autor

Con base en los puntajes mostrados en la matriz de calificación se escoge al modelo WASP7 para la simulación del transporte y destino de mercurio en el río Suratá.

7.5 NOTAS RELEVANTES ACERCA DEL MODELO SELECCIONADO

WASP7 es un sistema compartimental dinámico de balance de masa para modelación del transporte y destino de contaminantes en aguas superficiales. Puede ser aplicado en una, dos o tres dimensiones con transporte advectivo y dispersivo entre compartimentos físicos discretos o "segmentos" (Ver figura 12).

Figura 12: Red de modelado WASP7 con trayectorias de transporte advectivo



Fuente: WASP7 stream transport. Model theory and user's guide

7.5.1 Simulación del transporte en WASP7

El transporte advectivo en WASP se divide en seis tipos distintos, o "campos". El primer campo el transporte representa flujo advectivo en la columna de agua. Este flujo advectivo transporta "aguas abajo" los componentes de calidad del agua

teniendo en cuenta la dilución dentro de la corriente. El segundo campo de transporte especifica el movimiento del agua y los constituyentes de calidad de agua entre los poros de los sedimentos del lecho. Los campos de transporte tercero, cuarto y quinto, especifican el transporte de partículas contaminantes por efecto de la sedimentación, resuspensión, y el entierro de los sólidos. Los componentes de calidad del agua adsorbidos sobre las partículas sólidas suspendidas se transportan entre la columna de agua y los sedimentos del lecho. El sexto campo de transporte representa la evaporación o precipitación desde o hacia los segmentos de agua superficial.

7.5.2 Flujo de agua superficial en WASP7

Los flujos advectivos en la columna de agua controlan el transporte de contaminantes particulados y disueltos en muchos cuerpos de agua. En WASP el flujo en la columna de agua es introducido vía el campo de transporte 1.

A partir de la versión 6.2, WASP es capaz de calcular internamente el flujo a través de una red unidimensional ramificada utilizando la formulación de la onda cinemática (opción de flujo 4). El usuario debe suministrar una función de continuidad y una función de tiempo para cada flujo de entrada. Para segmentos de agua superficial el usuario debe especificar las pendientes del fondo y los factores de rugosidad, así como anchos y profundidades para condiciones de flujo promedio y un exponente de profundidad hidráulica para canales no rectangulares. El modelo usa las funciones de flujo de entrada y trayectoria de flujos junto con la geometría especificada para el canal para calcular el movimiento del agua variable en el tiempo (flujos y velocidades) e hidrogeometría del canal (anchos máximos, profundidades promedio en el área transversal y volúmenes).

7.5.3 Ecuaciones hidrogeométricas

Un conjunto de coeficientes de descarga hidráulica define la relación entre velocidad, profundidad y flujo en los segmentos de agua superficial. Para las opciones de flujo descriptivo (flujo neto y flujo bruto) las velocidades y profundidades de los segmentos no tiene influencia en el esquema de transporte, esta son usadas únicamente en cálculos de tasas de reaireación y volatilización. Para la opción de onda cinemática, las velocidades, anchos y profundidades de segmento son parte integral de los cálculos de transporte.

Los coeficientes de descarga con los que se obtiene la profundidad y la velocidad de flujo de la corriente se basan en observaciones empíricas de la relación de flujo de la corriente con la velocidad y la profundidad (Leopold y Maddox, 1953). Las ecuaciones que relacionan la velocidad, ancho de canal y la profundidad a la corriente de flujo son:

$$v = v_{\text{mult}} * Q^{v_{\text{exp}}}$$

$$R = d_{\text{mult}} * Q^{d_{\text{xp}}}$$

$$B = b_{\text{mult}} * Q^{b_{\text{exp}}}$$

donde v es la velocidad [m/s], R es el radio hidráulico, o profundidad de la sección transversal promedio [m], B es el ancho de la parte superior [m], v_{mult} , d_{mult} , y b_{mult} son coeficientes empíricos, y v_{exp} , d_{xp} y b_{exp} son exponentes empíricos. El área de la sección transversal, A , es el producto de la anchura de la parte superior y la profundidad promedio.

El flujo viene dado por la expresión:

$$Q = v \cdot A = v \cdot R \cdot B = (v_{\text{mult}} \cdot Q^{\text{vexp}}) \cdot (d_{\text{mult}} \cdot Q^{\text{dexp}}) \cdot (b_{\text{mult}} \cdot Q^{\text{bexp}}) \\ = (v_{\text{mult}} \cdot d_{\text{mult}} \cdot b_{\text{mult}}) \cdot Q^{(\text{vexp} + \text{dexp} + \text{bexp})}$$

Donde se debe cumplir:

$$v_{\text{mult}} \cdot d_{\text{mult}} \cdot b_{\text{mult}} = 1$$

$$\text{vexp} + \text{dexp} + \text{bexp} = 1$$

Las opciones de flujo neto y flujo bruto en WASP requieren la especificación de las relaciones hidráulicas para la velocidad y la profundidad. La opción de onda de flujo cinemática requiere la especificación del exponente de profundidad hidráulica dexp, junto con la profundidad Dm y el ancho Bm bajo condiciones de flujo promedio. La ecuación de Manning (reorganizada) se utiliza para calcular la velocidad Vm bajo condiciones de flujo promedio. En definitiva, para simulaciones específicas de un río o arroyo, los coeficientes y exponentes hidráulicos deben ser estimados.

7.5.4 Módulo para mercurio de WASP7

El módulo para mercurio de WASP7, MERC7, utiliza un subconjunto del módulo general de químicos tóxicos de WASP7, TOXI7, para calcular las concentraciones de sólidos y especies de mercurio en la columna de agua y sedimentos en cada tramo de un cuerpo hídrico. MERC7 simula tres especies de mercurio, Hg0, Hg(II) y MeHg, así como uno a tres tipos de sólidos (limos, arenas, sólidos bióticos).

7.5.4.1 Ecuaciones de partición

Hg(II) y MeHg son particionados entre las fases disuelta, complejada con DOC y sorbida a sólidos usando un conjunto de coeficientes de partición y las siguientes ecuaciones lineales:

$$C_{DOC} = K_{DOC} C_{diss}$$

$$C_{sand} = K_{sand} C_{diss}$$

$$C_{silt} = K_{silt} C_{diss}$$

$$C_{biotic} = K_{biotic} C_{diss}$$

donde C_{diss} es la concentración de mercurio disuelto divalente o metilo, C_{DOC} es la concentración de DOC-complejado, C_{sand} , C_{silt} y C_{biotic} son las concentraciones absorbidas, K_{DOC} y K_{sand} , K_{silt} y K_{biotic} son los coeficientes de reparto a DOC, arena, limo y sólidos bióticos en mg/kg, mg/L o L/kg.

7.5.4.2 Ecuaciones de transformación

En el módulo mercurio de WASP7, las velocidades de reacción se aplican a las fases disuelta, DOC-complejada, y sorbidos a sólidos utilizando un conjunto de multiplicadores de fase de proceso específico, designados X_{diss} , X_{DOC} , y X_{sorb} . Estos multiplicadores se fijan generalmente igual a 1 para las fases disuelto y sorbido, e igual a 0 para la fase de DOC-enlazado. En las siguientes ecuaciones, las constantes de velocidad k_i son introducidas en unidades de día⁻¹ y las tasas de transformación S_{K_i} son calculadas en unidades de g/m³-day.

- **Oxidación:** El Hg⁰ es oxidado en la columna de agua a Hg(II) usando la siguiente ecuación lineal:

$$S_{K_{ox}} = k_{ox} x_{diss} Hg_{diss}^0$$

donde $S_{K_{ox}}$ es la velocidad de oxidación y k_{ox} es la constante de velocidad de oxidación. Las constantes k_{ox} son especificadas por el usuario como un parámetro del modelo variable espacialmente.

- **Reducción:** Hg(II) es reducido por la luz solar en la columna de agua a Hg⁰ usando la siguiente ecuación lineal:

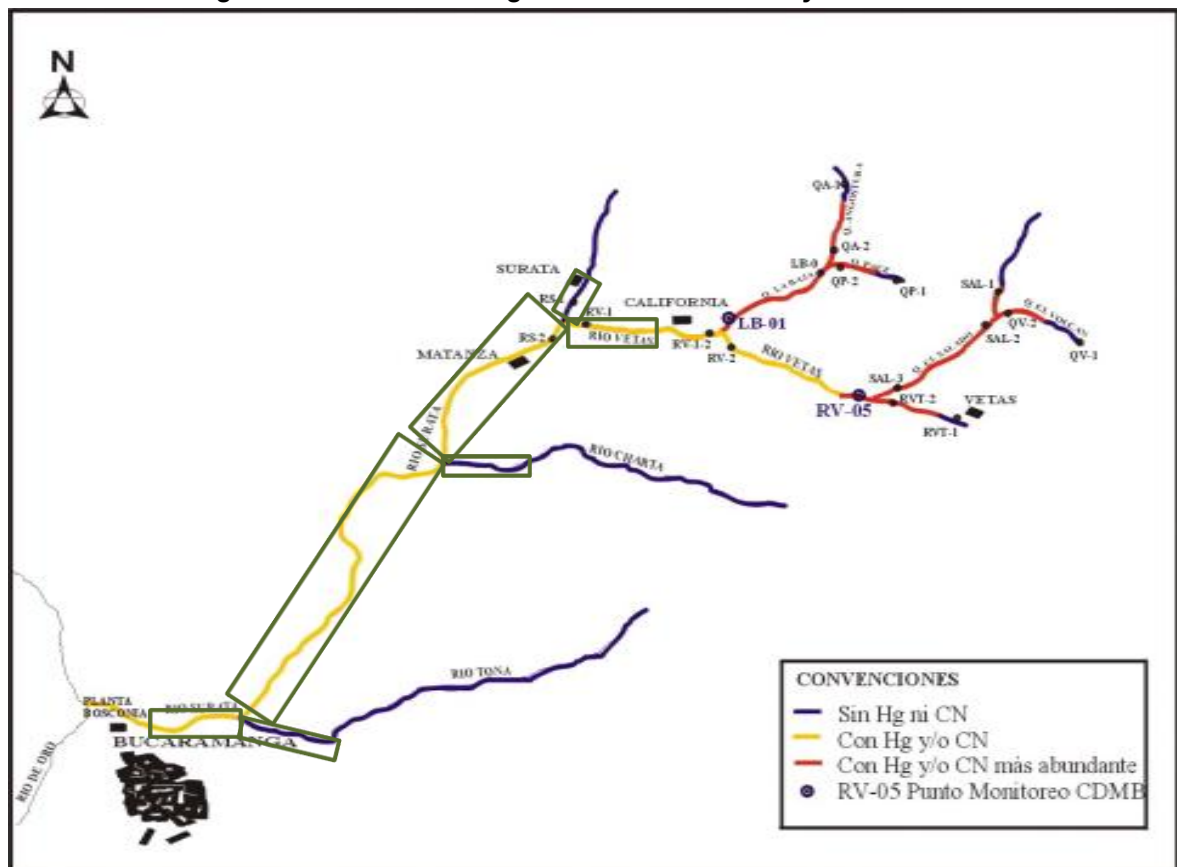
$$S_{K_{red}} = k_{red} \cdot L_N(t) \cdot [x_{diss} Hg(II)_{diss} + x_{DOC} Hg(II)_{DOC} + x_{sorb} Hg(II)_{sorb}] \cdot 10^{-6}$$

donde SKred es la velocidad de reducción y kred es la constante de velocidad de reducción en superficie. $L_N(t)$ es la intensidad de luz normalizada a través de la profundidad del segmento.

7.6 APLICACIÓN DEL SOFTWARE WASP7 AL RIO SURATÁ

7.6.1 Consideraciones iniciales

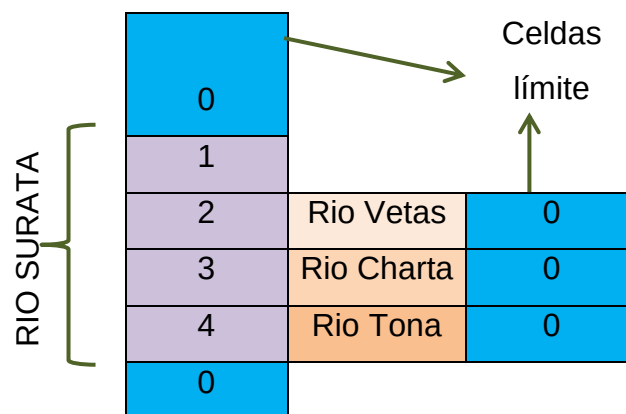
Figura 13: División en segmentos del río Suratá y sus tributarios



Fuente: El autor

Según se aprecia en la figura 13, el tramo a modelar del río Suratá fue dividido en cuatro segmentos debido a que solo existen igual número de estaciones hidrométricas ubicadas sobre su curso que contienen información histórica hidráulica y de mercurio. Modelaciones similares en ríos de EEUU utilizando el software WASP han requerido de más de 100 segmentos con longitudes alrededor de 400 metros cada uno. También, solo se programaron segmentos de agua superficial pues ni la CDMB ni el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga tienen archivo histórico de concentración de Hg0 en sedimentos. Partiendo de las dos premisas anteriores, la arquitectura de la red modelo introducida al WASP7 fue la siguiente:

Figura 14: Arquitectura modelo WASP del río Suratá



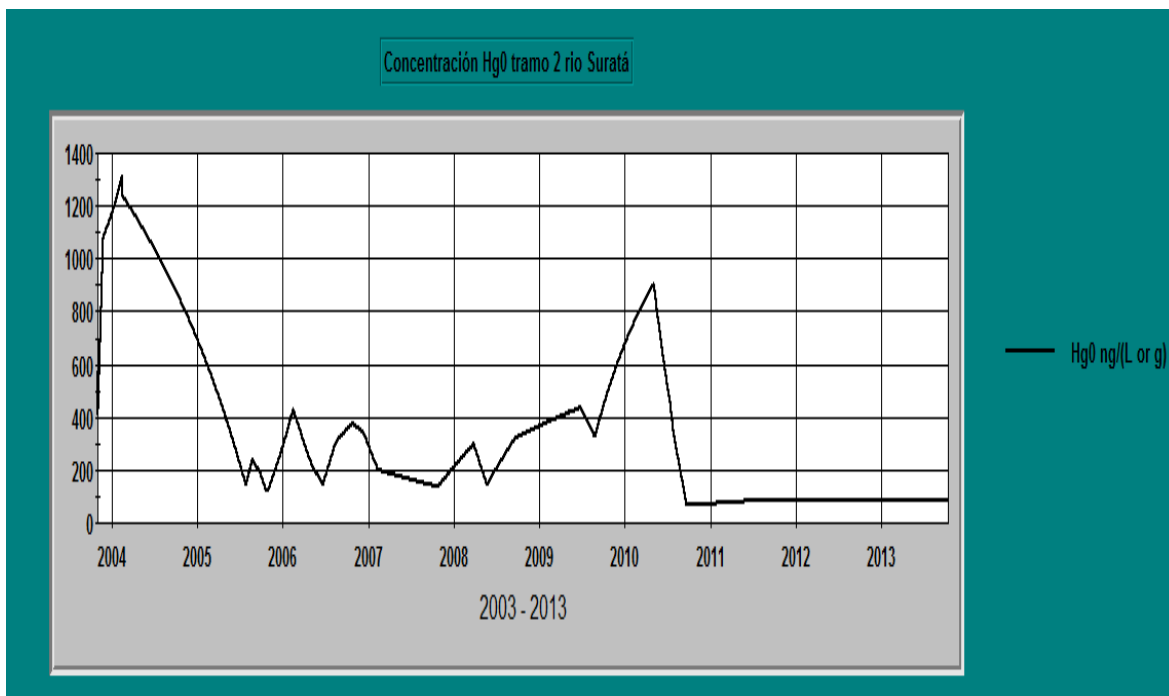
Fuente: El autor

Las celdas 1, 2, 3, y 4 tienen como punto de monitoreo las estaciones SA-07, SA-05, SA-04 y SA-03 respectivamente.

7.6.2 Curvas de concentración de Hg0 “pronosticadas” por el modelo WASP7

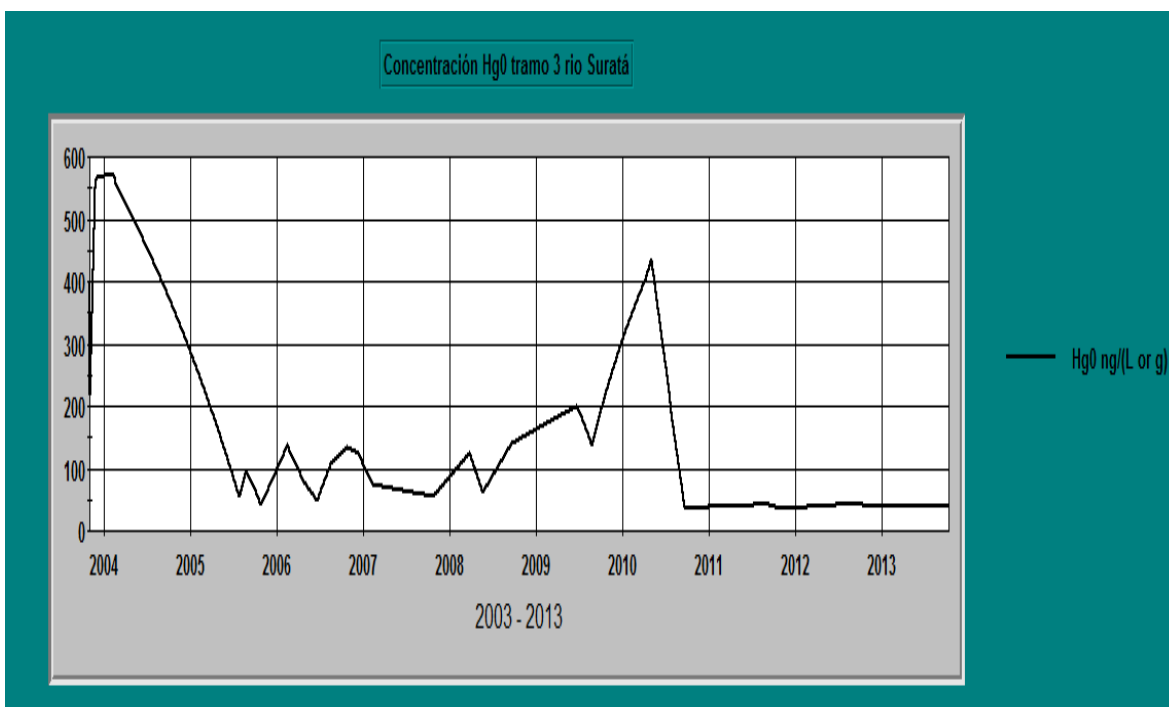
Las siguientes fueron las curvas de concentración de Hg0 “pronosticadas” por el modelo WASP7 desde el año 2003 hasta el año 2013:

Figura 15: Curva de concentración de Hg0 “pronosticada” en la estación SA-05



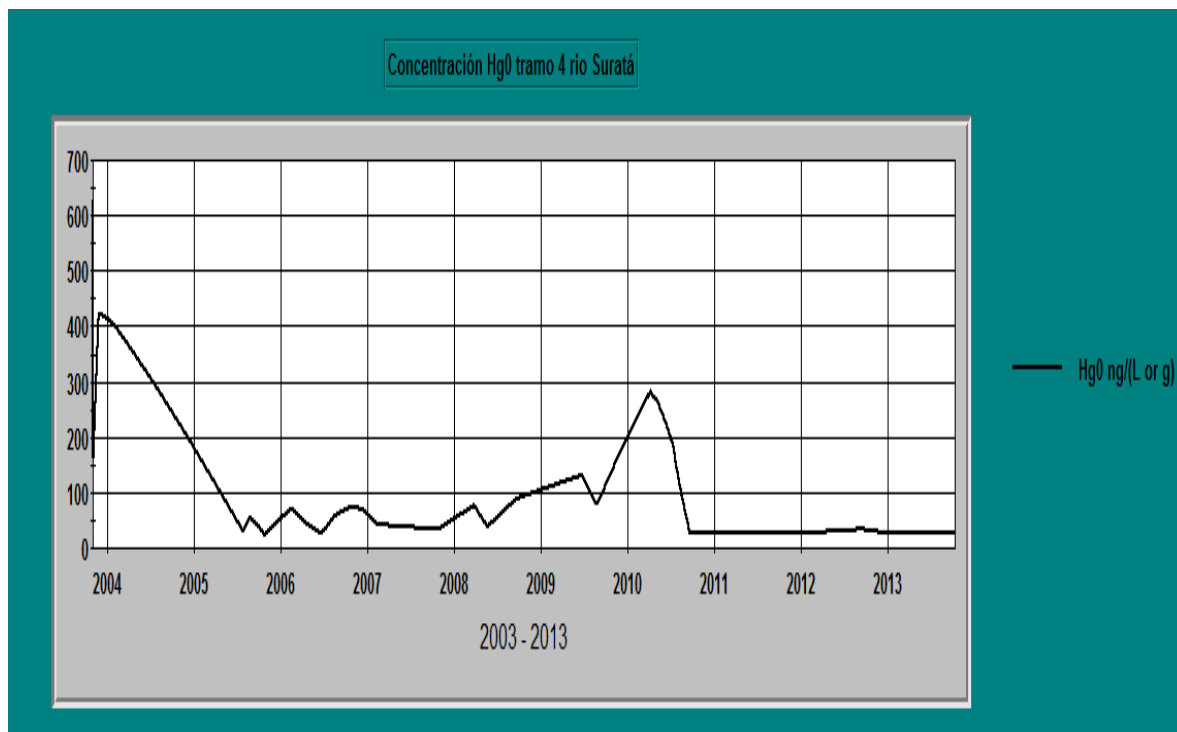
Fuente: Postprocesador software WASP7

Figura 16: Curva de concentración de Hg0 “pronosticada” en la estación SA-04



Fuente: Postprocesador software WASP7

Figura 17: Curva de concentración de Hg0 “pronosticada” en la estación SA-03



Fuente: Postprocesador software WASP7

7.6.3 Cálculo del error

El error promedio obtenido en cada estación se calcula en cada fecha, para cada par de valores, según la siguiente fórmula:

$$\% \text{ error} = \text{Valor absoluto ([Hg0]med – [Hg0]wasp)} \times 100 / [\text{Hg0}]_{\text{med}}$$

Tabla 17: Error promedio valores de campo vs valores WASP estación SA-05

ESTACION SA-05			
VARIABLE	[Hg0] ng/l medido	[Hg0] ng/l WASP	Porcentaje de error (%)
PROMEDIO	835,65	238,65	71,99

Fuente: El autor

Tabla 18: Error promedio valores de campo vs valores WASP estación SA-03

ESTACION SA-03			
VARIABLE	[Hg0] ng/l medido	[Hg0] ng/l WASP	Porcentaje de error (%)
PROMEDIO	976,28	118,07	85,65

Fuente: El autor

La estación SA-04 denominada “El Palmar” no ha sido utilizada desde hace varios años, y por lo tanto, no existe registro histórico de valores de mercurio y parámetros de calidad de agua. Solo fue posible realizar dos mediciones durante el desarrollo de este trabajo de aplicación, exactamente en marzo 20 y abril 4 de 2013. En consecuencia, no se contrasta la curva de concentración de Hg0 simulada por el modelo WASP.

8 ANALISIS DE RESULTADOS

8.1 AFECTACIÓN DEL SUELO

En la tabla 3 se pudo apreciar que en los suelos de la subcuenca río Suratá predominan bosques y rastrojos altos. Aunque la actividad principal es la minería, esta no afecta gravemente la cobertura vegetal pues no se ejerce a cielo abierto sino por socavones (Ver fotos 14 y 15), para lo cual solo es necesario remover el material vegetal de la entrada.

Foto 14: Socavón construido en las montañas de California



Fuente: El autor

Foto 15: Primeros metros del socavón de la foto 14



Fuente: El autor

Sin embargo, el material removido se deposita a cielo abierto en arrumos con fuertes pendientes, los cuales al llegar las lluvias permiten el arrastre de gran cantidad de este material hacia las corrientes hídricas, aumentando de esta manera el deterioro de estos cauces y sus áreas aledañas.

8.2 AFECTACIÓN DEL AGUA POR MATERIA ORGÁNICA

Según se pudo apreciar en la figura 10, solo el 1% del territorio de la subcuenca del río Suratá se encuentra urbanizado. Sin embargo, los principales centros urbanos no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, lo que ocasiona que las aguas negras sean dispuestas sin tratamiento previo a los tributarios del río Suratá.

Con base en los resultados obtenidos del análisis estadístico de los ítems 8.2.2.1 y 8.2.2.2, se puede concluir que la concentración de coliformes totales y coliformes fecales hace que las aguas del Suratá en los puntos SA-05 y SA-03 no sean aptas para actividades recreativas donde se produce contacto primario, como la natación; contacto secundario, como en la pesca y deportes náuticos, y no sean aptas para consumo humano sin tratamiento convencional.

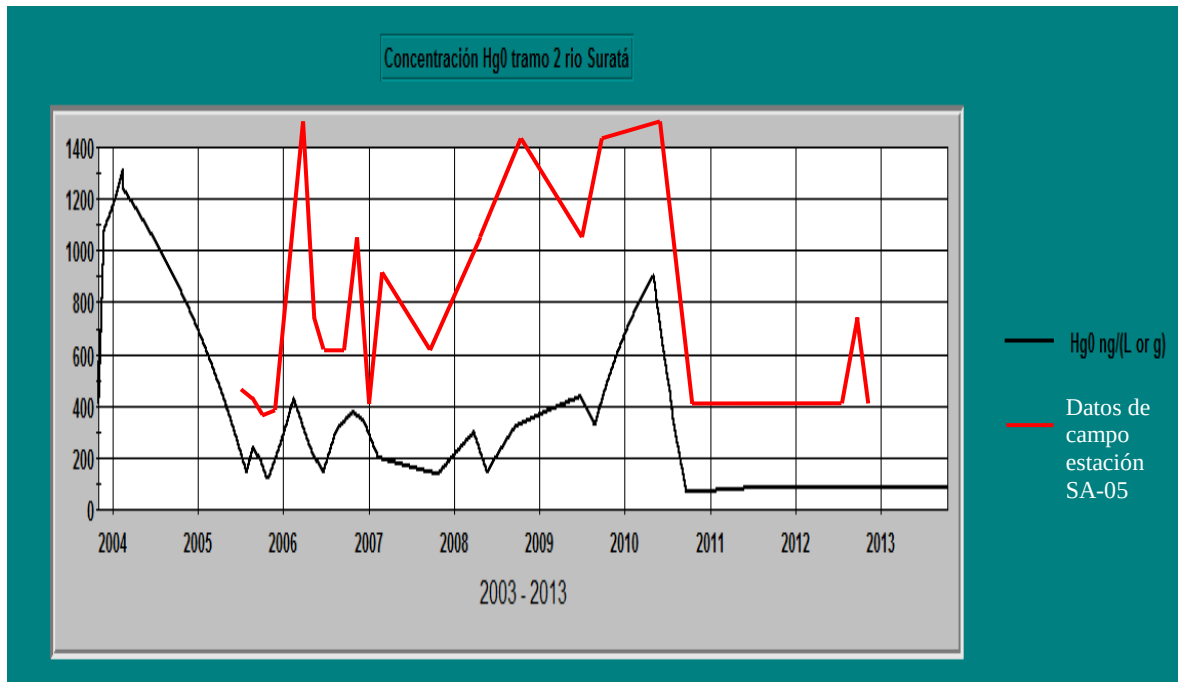
Tratando de relacionar los altos valores de OD, los bajos valores de DBO5 y los altos valores de coliformes (ver tablas 4 y 6), el autor piensa que la torrencialidad y la irregularidad del fondo del río (muchacha presencia de roca de diversos tamaños) provoca una efectiva reaereación del cuerpo hídrico, y al mismo tiempo su velocidad no dá tiempo a que se alcance a degradar la materia orgánica suspendida y disuelta en el agua a lo largo del tramo de aproximadamente 35 kms. Adicionalmente, se observa que los coliformes totales aguas abajo aumentan mientras que los fecales disminuyen. Coliformes es un parámetro muy difícil de interpretar, su comportamiento en corrientes de agua es complejo porque su reproducción y supervivencia depende de muchos factores ambientales (radiación solar, pH, oxígeno disuelto, tóxicos, etc.). De hecho, los coliformes no fecales son más resistentes que los coliformes fecales y por eso puede ser que los totales sigan aumentando a medida que se presentan descargas aguas abajo, mientras que los fecales, al ser más susceptibles al medio ambiente, las condiciones les sean adversas y por eso disminuyen.

8.3 VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO WASP7

En las siguientes gráficas se superponen las curvas de valores de concentración de Hg0 medidos por la CDMB y el amb en las respectivas estaciones.

8.3.1 Curva de valores medidos en campo vs curva WASP estación SA-05

Figura 18: Curva WASP vs datos de campo tramo 2 río Suratá



Fuente: El autor

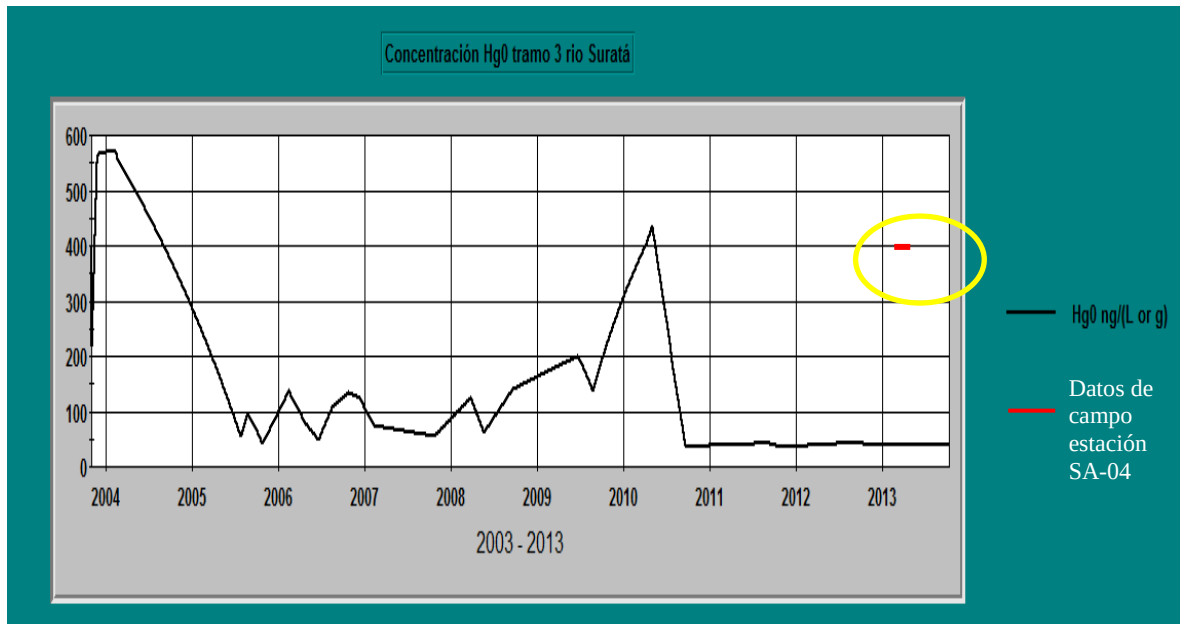
A pesar de haberse obtenido un error del 71,99%, el autor opina que la curva modelada por WASP para el tramo 2 del río Suratá es válida por las siguientes razones:

- La curva de concentración de Hg0 obtenida con el modelo WASP sigue bastante bien la tendencia de la curva de valores medidos en campo para cada uno de los intervalos anuales.
- Siempre se mantiene al mismo lado de la curva de valores de campo (abajo) y no presenta discontinuidades en los puntos de inflexión (varios valores de [Hg0] para un mismo valor de t).

Lo anterior garantiza que la simulación fue estable durante todo el intervalo de tiempo de modelado.

8.3.2 Curva de valores medidos en campo vs curva WASP estación SA-04

Figura 19: Curva WASP vs datos de campo tramo 3 río Suratá



Fuente: El autor

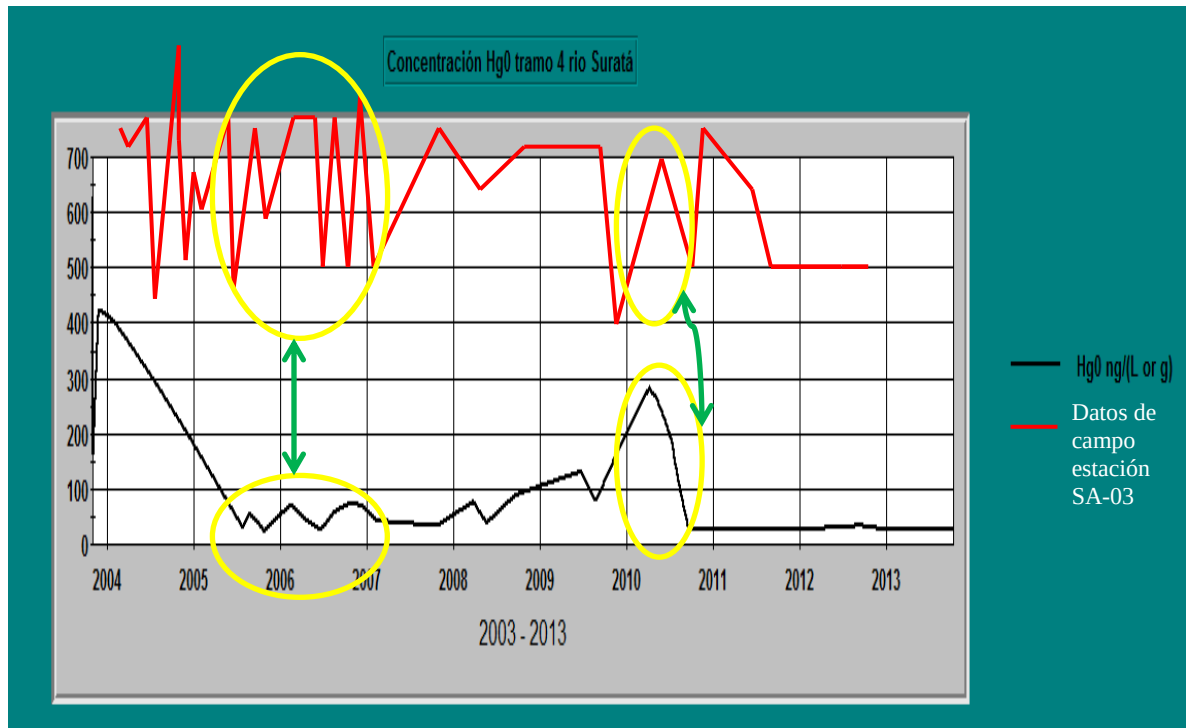
Tal como se mencionó en el ítem 8.6.3 “Cálculo del error”, la estación SA-04 denominada “El Palmar” no ha sido utilizada desde hace varios años y por lo tanto no existe registro histórico de valores de mercurio. En la figura 19 se muestran las dos medidas de campo realizadas en marzo 20 y abril 4 de 2013 (encerradas en el círculo amarillo) pero esto no es suficiente para emitir un juicio acerca de la exactitud de la curva modelada por WASP en este tramo.

Sin embargo, comparando la curva WASP de los tramos 2 y 3 (figuras 18 y 19 respectivamente), se puede apreciar que la segunda sigue a la primera pero con magnitudes de [Hg0] inferiores. Lo anterior tiene explicación en la dilución que

aporta el río Charta, tributario que no lleva mercurio en sus aguas según los análisis realizados por la CDMB.

8.3.3 Curva de valores medidos en campo vs curva WASP estación SA-03

Figura 20: Curva WASP vs datos de campo tramo 4 río Suratá



Fuente: El autor

Dentro de la arquitectura del software WASP se tienen en cuenta los intercambios, es decir, los aportes de constituyentes como sólidos suspendidos, materia orgánica disuelta y elementos como mercurio que hace un segmento a otro adyacente, hasta recorrer la estructura completa del tramo o sistema modelado. Dado que el segmento adyacente “aguas arriba” del tramo 4 es el tramo 3, parece comprensible que a la falta de información presentada por este último ocurra lo que se observa en la figura 20.

No obstante lo anterior, se resalta la bondad del modelo WASP al seguir la tendencia de la alta frecuencia de variación de la curva de [Hg0] medida, así:

- Entre mediados del 2005 y principios del 2007
- Entre abril y octubre de 2008
- Entre enero y octubre de 2010
- A partir de agosto de 2011

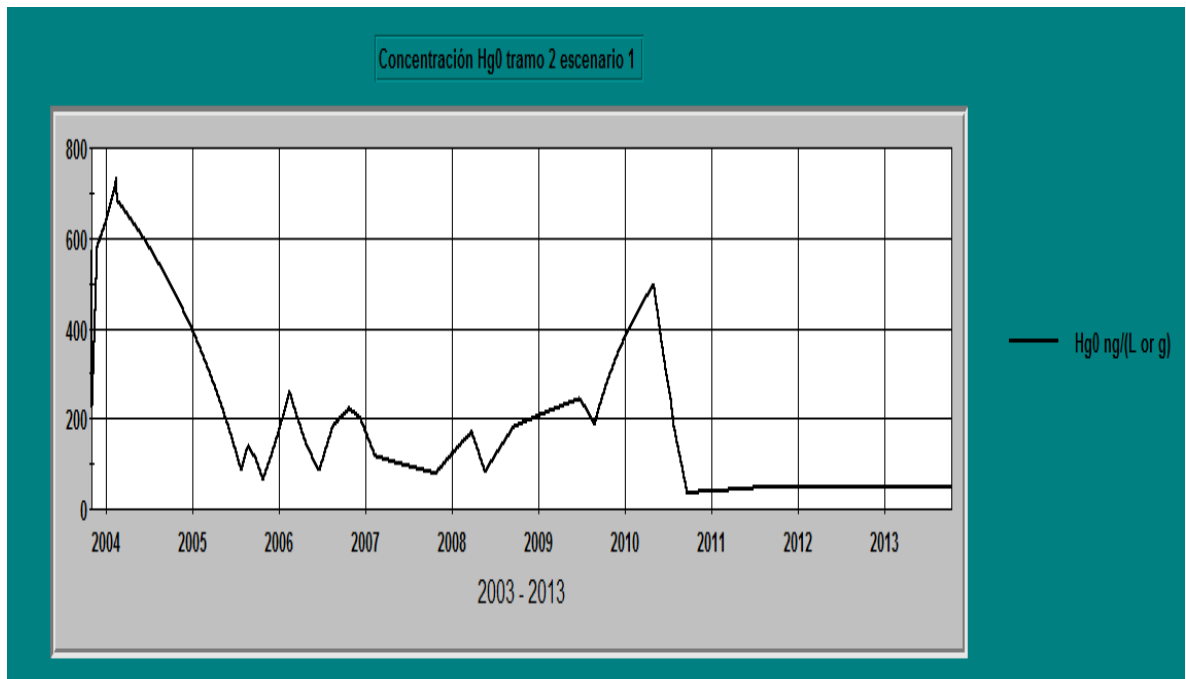
Para mayor claridad, se resaltan algunos intervalos en círculos amarillos.

8.4 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

8.4.1 Escenario 1: Incremento al doble del caudal (Temporada invernal)

8.4.1.1 Escenario 1 para el tramo 2, estación SA-05

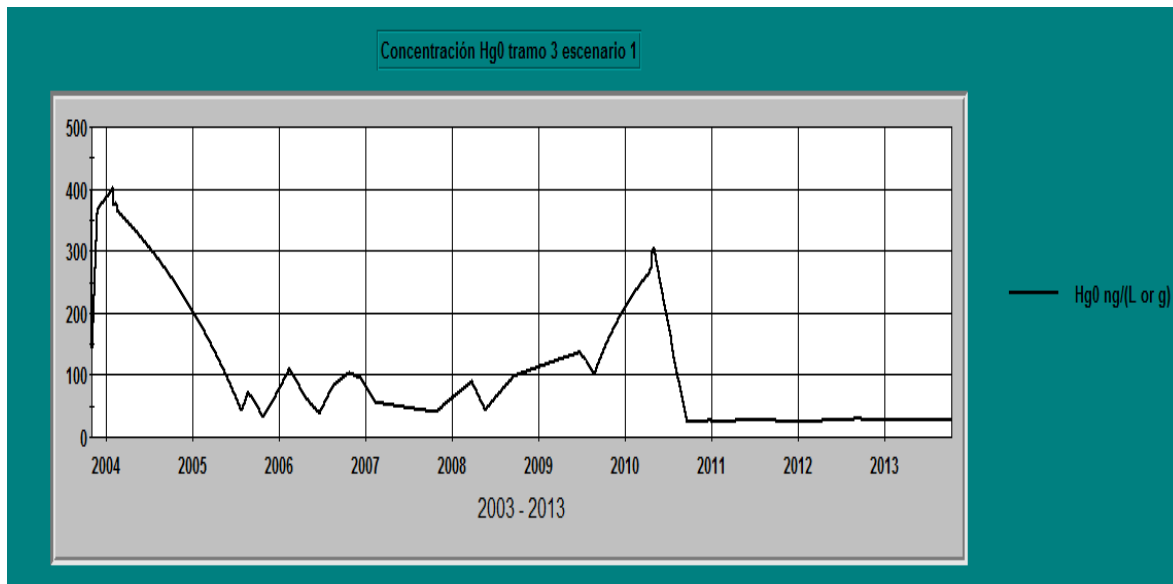
Figura 21: Concentración de Hg0 en el tramo 2 al doble de caudal



Fuente: El autor

8.4.1.2 Escenario 1 para el tramo 3, estación SA-04

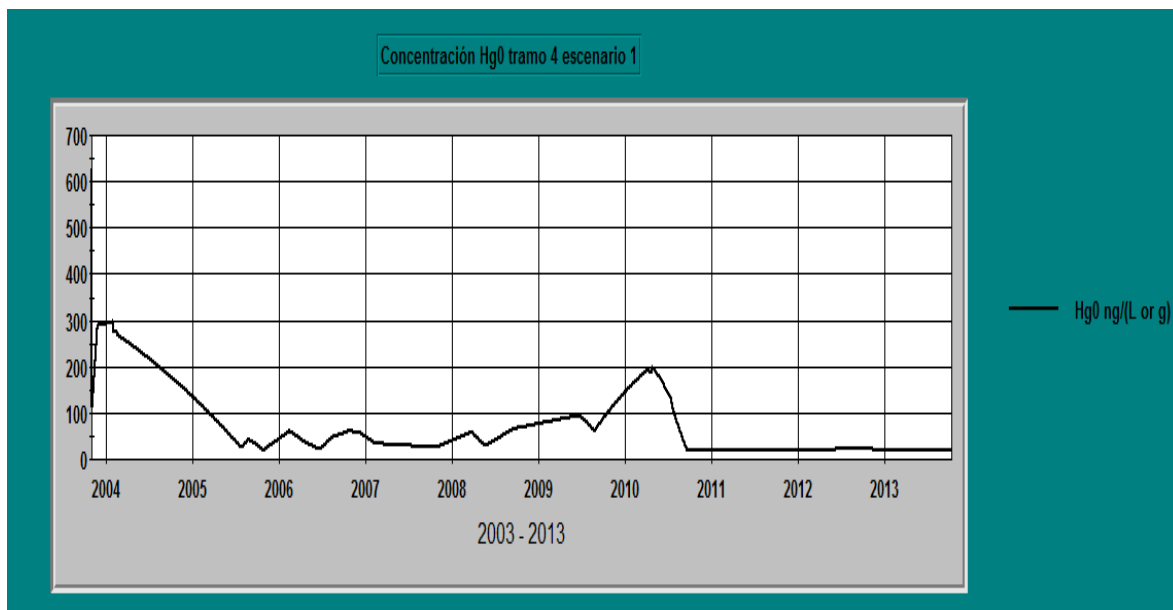
Figura 22: Concentración de Hg0 en el tramo 3 al doble de caudal



Fuente: El autor

8.4.1.3 Escenario 1 para el tramo 4, estación SA-03

Figura 23: Concentración de Hg0 en el tramo 4 al doble de caudal



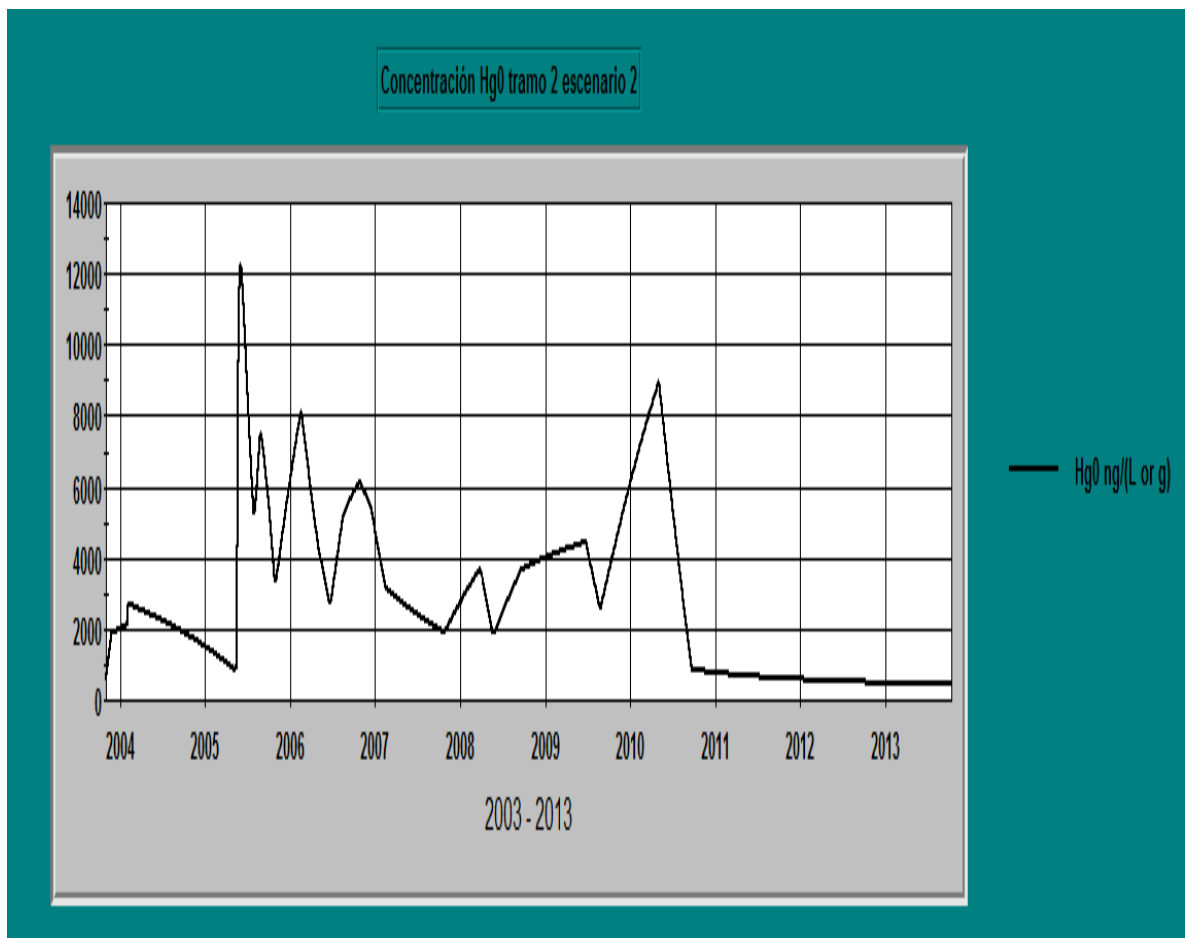
Fuente: El autor

Comparando las figuras 15 con 21, 16 con 22 y 17 con 23, se observa que el modelo WASP refleja perfectamente la mayor dilución del soluto, en este caso, el mercurio.

8.4.2 Escenario 2: Reducción a la mitad del caudal (verano intenso)

8.4.2.1 Escenario 2 para el tramo 2, estación SA-05

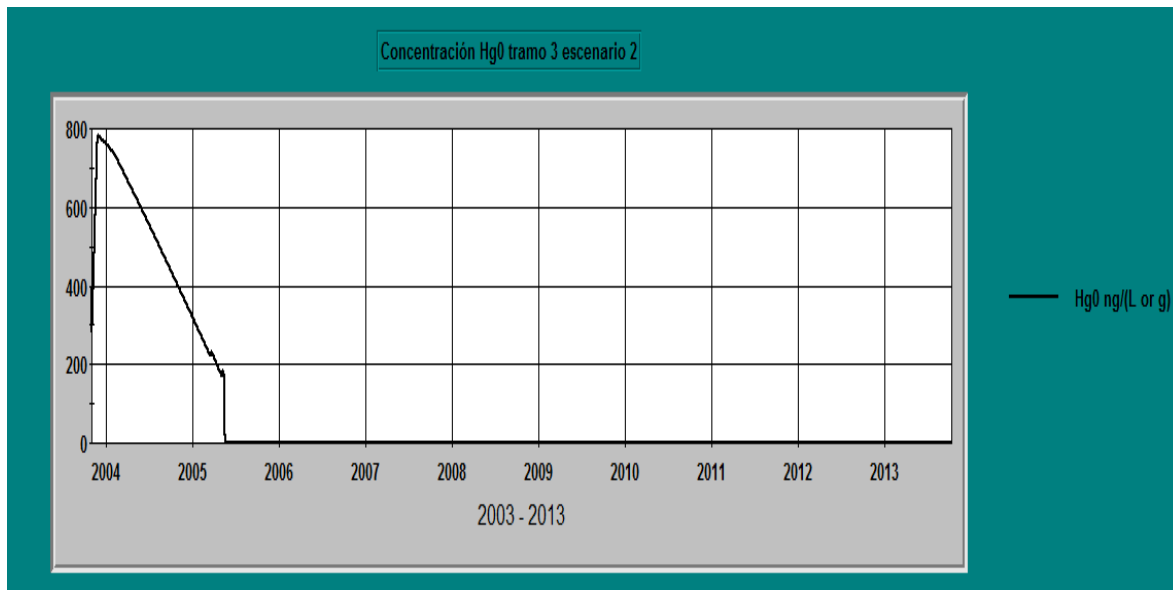
Figura 24: Concentración de Hg0 en el tramo 2 a la mitad de caudal



Fuente: El autor

8.4.2.2 Escenario 2 para el tramo 3, estación SA-04

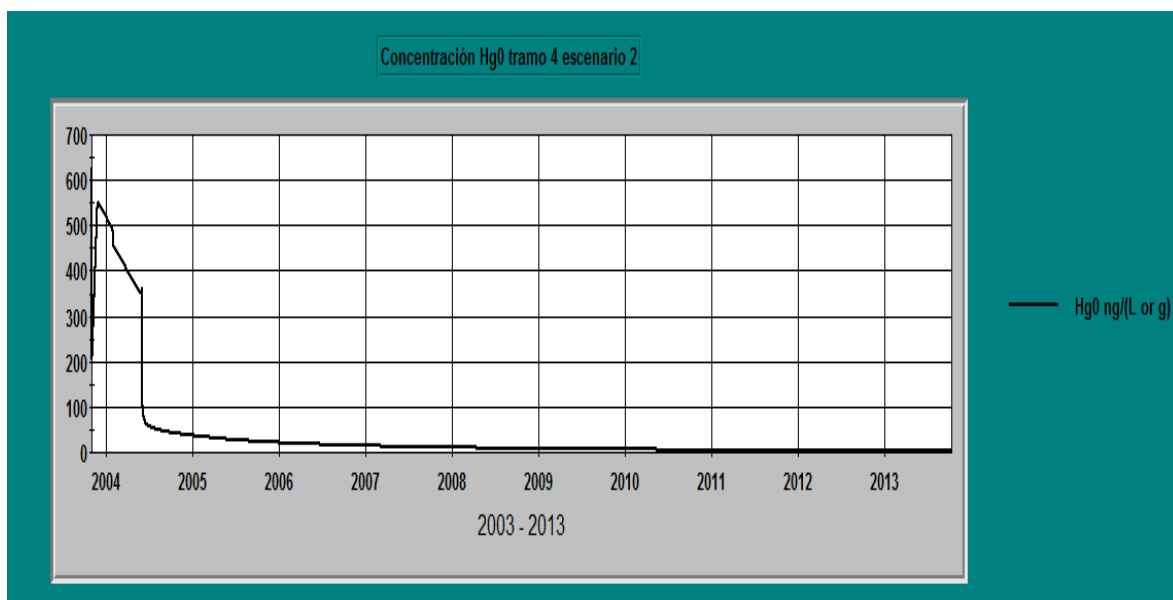
Figura 25: Concentración de Hg0 en el tramo 3 a la mitad de caudal



Fuente: El autor

8.4.2.3 Escenario 2 para el tramo 4, estación SA-03

Figura 26: Concentración de Hg0 en el tramo 4 a la mitad de caudal



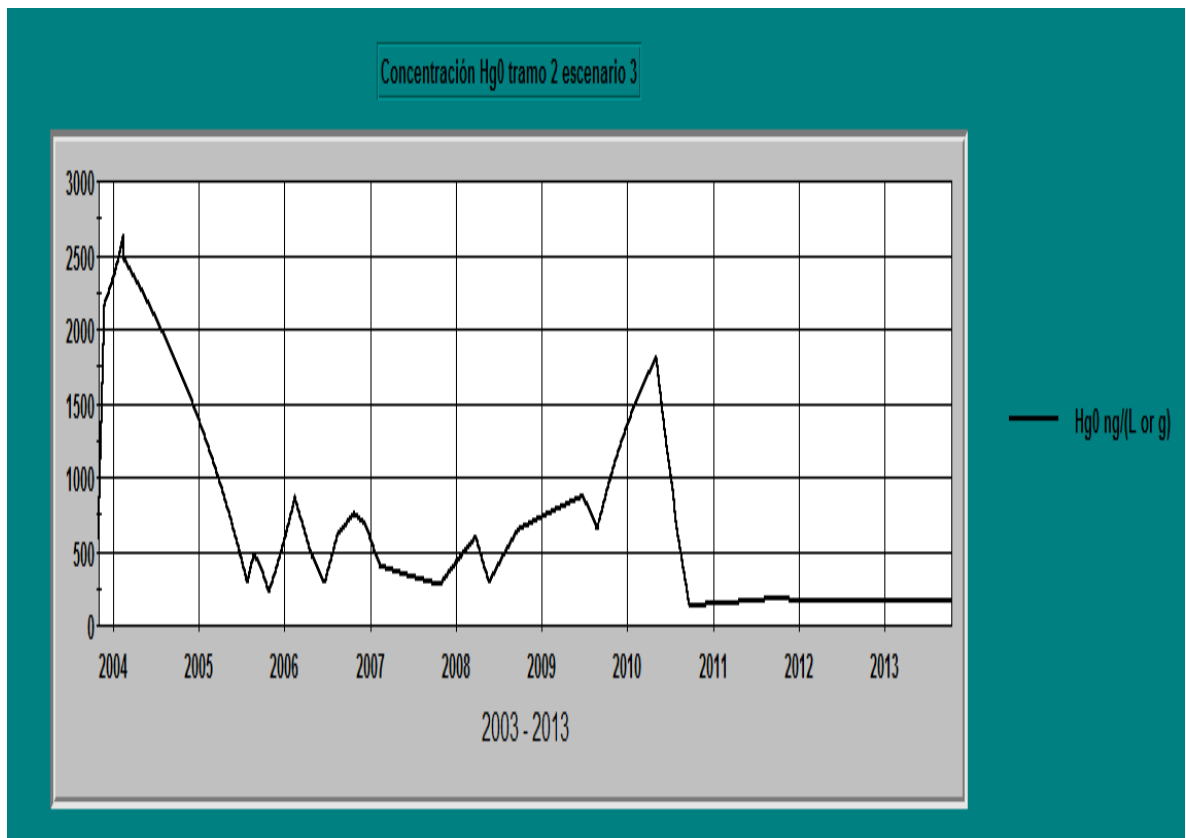
Fuente: El autor

Comparando las gráficas 24 con 15, 25 con 16 y 26 con 17, se observa que el modelo WASP refleja perfectamente la mayor concentración de mercurio. Es de resaltar que en el tramo 2 se supera ampliamente el límite de 2 microgramos por litro.

8.4.3 Escenario 3: Incremento al doble de las descargas de Hg0 (Aumento de la población minera)

8.4.3.1 Escenario 3 para el tramo 2, estación SA-05

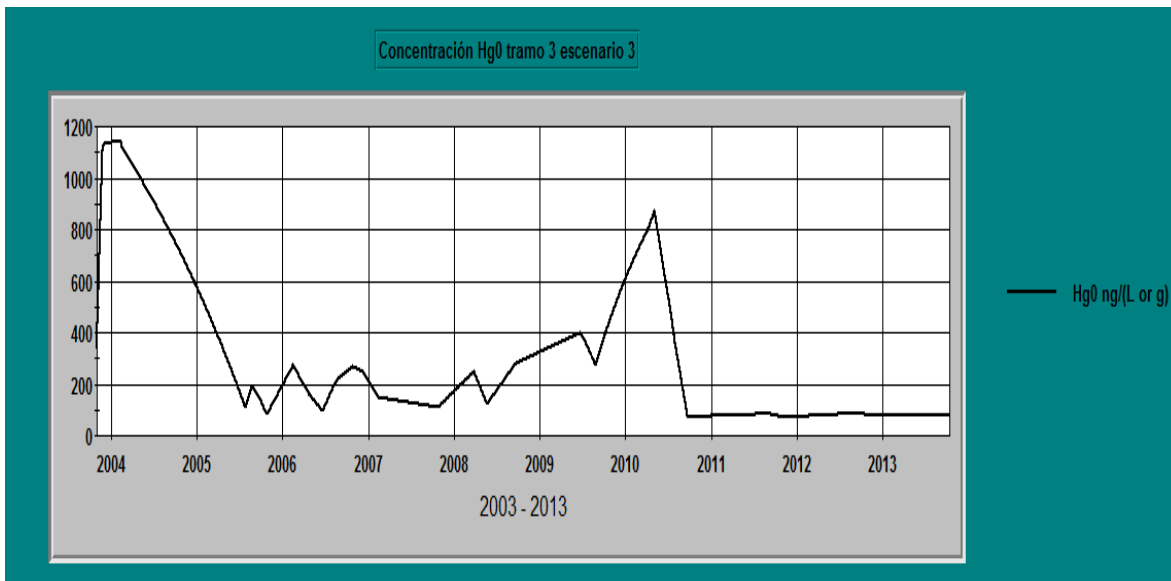
Figura 27: Concentración de Hg0 en el tramo 2 doblando las descargas



Fuente: El autor

8.4.3.2 Escenario 3 para el tramo 3, estación SA-04

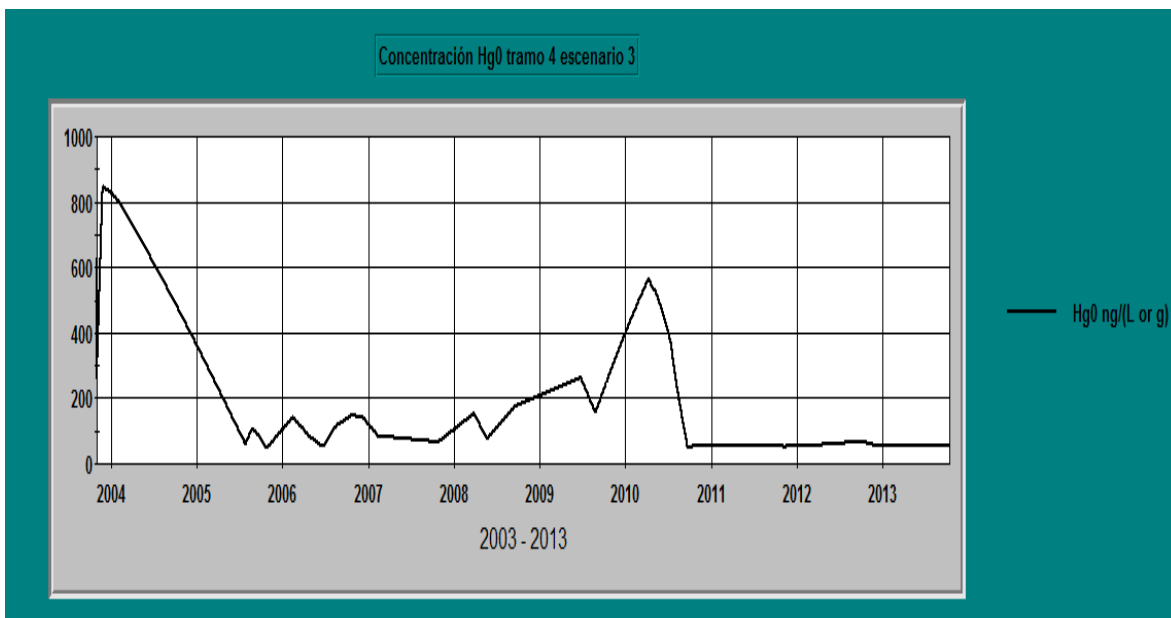
Figura 28: Concentración de Hg0 en el tramo 3 doblando las descargas



Fuente: El autor

8.4.3.3 Escenario 3 para el tramo 4, estación SA-03

Figura 29: Concentración de Hg0 en el tramo 4 doblando las descargas



Fuente: El autor

Comparando las gráficas 27 con 15, 28 con 16 y 29 con 17, se observa que el modelo WASP refleja el aumento en la concentración de mercurio, sin que se supere el límite de 2 microgramos por litro, excepto por un valor pico presentado en el tramo 2.

9. CONCLUSIONES

- Con la información suministrada por los entes involucrados en el control de la contaminación del río Suratá el tramo modelado por el software WASP quedó configurado como un sistema en el cual su límite inferior, los sedimentos, no intercambia mercurio con la columna de agua, solo recibe este metal por efecto de asentamiento pero no es devuelto al sistema gracias a la resuspensión. No obstante lo anterior, los argumentos expuestos en el ítem 9.3 “Validación de resultados obtenidos con el modelo WASP7” permiten afirmar que este software sí es aplicable para modelar el transporte y destino de mercurio en el río Suratá, ubicado en el departamento de Santander, Colombia.
- Para implementar el módulo mercurio de WASP7, se requiere especificar varias constantes en las ecuaciones de reacción de este metal. Las velocidades de reacción y los coeficientes son inciertos y exhiben una gama significativa de variabilidad entre los cuerpos de agua. Como consecuencia de ello, estos datos deben obtenerse para el sitio específico que se quiere modelar, si se desea obtener una precisión aceptable.
- Un buen conjunto de datos de calibración debe incluir muestras filtradas y sin filtrar de mercurio en la columna de agua y la capa superior de los sedimentos en diferentes lugares y épocas. La calibración del modelo debe reproducir lo mejor posible no sólo las tendencias generales de concentración de mercurio en el espacio y el tiempo sino también las relaciones internas importantes, como fracciones disueltas de mercurio en la columna de agua y sedimentos. Debido a la cantidad de parámetros y constantes del modelo WASP y la cantidad limitada de datos disponibles para la calibración, la modelación del transporte y destino de mercurio en el río Suratá resultó sub-determinada.

- Los resultados obtenidos por el modelo WASP7 en el escenario 2, muestran que la calidad del agua no cumpliría con lo establecido en el decreto 1594 de 1984 en cuanto a concentración de mercurio. Se hace imprescindible el compromiso de los entes involucrados en el control y administración del agua del río Suratá, implementando políticas y procedimientos efectivos para reducir la contaminación del río Suratá en tales circunstancias; de los mineros grandes y pequeños, adoptando tecnologías sostenibles que no requieran de mercurio para la explotación de oro y del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga en cuanto a la rigurosidad de los controles del agua que potabiliza en la planta Bosconia.

- Dada la considerable población que hace uso de las aguas del río Suratá y su tributario río Vetas, potabilizadas o no, sería importante desarrollar un estudio de monitoreo de los niveles de mercurio para dichas personas, especialmente mujeres en edad fértil.

- Es de suma importancia realizar campañas educativas, impulsadas desde el gobierno, que informen a la población acerca de los efectos potenciales que conlleva la ingesta prolongada de agua y/o alimentos que contengan trazas de mercurio

- Actualmente el entendimiento mecanístico de los procesos que sufre el mercurio en aguas naturales es limitado y se requiere el respaldo a la investigación de metodologías que puedan usarse para reducir la toxicidad del mercurio en nuestros ecosistemas acuáticos.

- El mercurio disuelto en el agua y adsorbido al material particulado originado en los tributarios del río Vetas, pasa a través de varias poblaciones antes de conectarse directamente con el río Suratá. Esto sugiere una serie de vías para la transformación del mercurio que pueden tener mayor tiempo de retención y mayor contacto con superficies biológicamente activas. Se recomienda un estudio amplio

y riguroso de las grandes áreas superficiales bajo el agua de los ríos Vetás y Suratá para posibilitar una aplicación más exacta de modelos de destino y transporte de mercurio como el WASP.

BIBLIOGRAFIA

ALBA, M. Leonardo; GIRALDO, Eugenio. Modelación matemática de metales pesados en sedimentos de la cuenca media y baja del río Bogotá. Trabajo de Investigación de Maestría. Bogotá : Universidad de los Andes. Facultad de Ingenierías, 1994.

ALPERS CN, SALEH D, MEYER RW. In review. Mercury and methyl- mercury transport in a Sierra Nevada watershed contaminated by historical gold mining: the Bear River, California, Science of the Total Environment.

ALPERS CN, HUNERLACH MP, MAY JT, HOTHEM RL. Mercury contamination from historical gold mining in California, U.S. Geological Survey Fact Sheet 2005 – 3014, 6, <http://water.usgs.gov/pubs/fs/2005/3014/>.

ALPERS, C.N; HUNERLACH M.P; MARVIN-DIPASQUALE, M.C; ANTWEILER, R.C; LASORSA, B.K; De Wild, J.F; SNYDER, N.P. Geochemical Data for Mercury, Methylmercury, and Other Constituents in Sediments from Englebright Lake, California, 2002. US Geological Survey Data Series. [Online], 151,[cited: 2006-10-20] pp.95. Available from Internet: USGS Science for a changing world <http://pubs.water.usgs.gov/ds151/>.

AMBROSE RB JR, TSIROS IX, WOOL TA. Modeling mercury fluxes and concentrations in a Georgia watershed receiving atmospheric deposition load from direct and indirect sources. Journal of the Air & Waste Management Association 55(5): 547 – 558. 2005.

AMBROSE RB, WOOL TA. Modeling tools used for mercury TMDL's in Georgia rivers. In Proceedings of the 2001 Georgia Water Resources Conference, Hatcher K (ed.). University of Georgia: Athens, GA; 532 – 535. 2001.

ANDRADE, H. Pensamiento de sistemas y dinámica de sistemas para el modelamiento de fenómenos de diversa naturaleza. Programa de posgrado en ingeniería. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Bucaramanga, Colombia. 1997.

BABIARZ, C. L., HURLEY, J. P., HOFFMANN, S. R., ANDREN, A. W., SHAFER, M. M., & ARMSTRONG, D. E. Partitioning of Total Mercury and Methylmercury to the Colloidal Phase in Freshwaters. [doi: 10.1021/es010895v]. Environmental Science & Technology, 35(24), 4773-4782. 2001.

BEDOYA, J. Modelo de simulación de transporte de metales pesados en la cuenca baja del río Tunjuelo. Universidad de La Salle. 2007.

BENOIT, J. M., GILMOUR, C. C., HEYES, A., MASON, R. P., & MILLER, C. L. Geochemical and Biological Controls over Methylmercury Production and Degradation in Aquatic Ecosystems Biogeochemistry of Environmentally Important Trace Elements (Vol. 835, pp. 262-297): American Chemical Society. 2002.

BERTELLO, L. Oligoelementos en clínica-III-Mercurio. Revista asociación médica argentina. 109(1), 26-30, 1996.

BITAR, J; CAMACHO, L. Implementación de un modelo de transporte de metales pesados en el río Magdalena tramo Girardot – Honda. Universidad de Los Andes. 2005.

BROWN S, SAITO L, KNIGHTES CD, GUSTIN M. Calibration and evaluation of a mercury model for a western stream and constructed wetland. Water Air and Soil Pollution 182(1 – 4): 275 – 290. 2007.

BRUMBAUGH, W. G., KRABBENHOFT, D. P., HELSEL, D. R., & WIENER, J. G. A National Pilot Study of Mercury Contamination of Aquatic Ecosystems along Multiple Gradients: Bioaccumulation in Fishes: U.S. Geological Survey. 2001.

Carroll, R; Warwick, J; Heim, K; Bonzongo, J; Miller, J; Lyons, W. Simulation of mercury transport and fate in the Carson River, Nevada. Ecological Modelling. 125, 255-278. 2000.

CDMB. Plan de ordenamiento y manejo ambiental microcuenca rio Vetás. Bucaramanga, diciembre de 2006.

CHAPRA, S. C. Surface Water-Quality Modelling, The McGraw-Hill Companies. Inc., New York. U.S. 1997.

DIAZ, B. Modelación de la calidad del agua en el interceptor rio Bogotá en los tramos Fucha -Tunjuelo – Canoas. Tesis de maestría. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería civil, 2004.

FURUTANI A, RUDD JW. Measurement of mercury methylation in lake water and sediment samples. Appl Environ Microbiol. 40(4):770–776. 1980.

Grupo asesor de ordenamiento ambiental territorial, CDMB. Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca río Suratá. 2011.

HARRIS, R., KRABBENHOFT, D. P., MASON, R., MURRAY, M. W., REASH, R., & SALTMAN, T. Ecosystem responses to mercury contamination, Indicators of change. New York: SETAC. 2007.

HENNIG, W. Uso de mercurio en la pequeña minería y las implicaciones para el ambiente y la salud. 2004.

HEYES, A., MASON, R. P., KIM, E.-H., & SUNDERLAND, E. Mercury methylation in estuaries: Insights from using measuring rates using stable mercury isotopes. *Marine Chemistry*, 102(1-2), 134-147. 2005.

JIMÉNEZ, M. Desarrollo de métodos analíticos para especiación de mercurio y su aplicación a la comarca de Almadén. Tesis doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de Ciencias del medio ambiente, Departamento de química analítica y tecnología de alimentos, 2004.

KELLY, C. A., RUDD, J. W. M., ST. LOUIS, V. L., & HEYES, A. Is total mercury concentration a good predictor of methyl mercury concentration in aquatic systems? *Water, Air, & Soil Pollution*, 80(1-4), 715-724. 1995.

KRABBENHOFT, D. P., HURLEY, J. P., OLSON, M. L., & CLECKNER, L. B. Diel variability of mercury phase and species distributions in the Florida Everglades. *Biogeochemistry*, 40(2-3), 311-325. 1998.

KRABBENHOFT, D. P., WIENER, J. G., BRUMBAUGH, W. G., OLSON, M. L., DEWILD, J. F., & SABIN, T. J. A National Pilot Study of Mercury Contamination of Aquatic Ecosystems Along Multiple Gradients. 1999.

LATORRE, E. Introducción al Enfoque de Sistemas. Departamento de Producción e Investigación de Operaciones. Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías. Santiago de Cali, Colombia. 1996.

MARTÍNEZ, A. Modelación Matemática de la Calidad del Agua del Río Cauca. Calibración, Verificación y Aplicación en el tramo La Balsa – Anacaro. Tesis de Pregrado. Universidad del Valle. Facultad de ingeniería. Santiago de Cali, Colombia, 2006.

MASON, R. P., Rolfhusb, K. R., & Fitzgeraldb, W. F. Mercury in the North Atlantic. Marine Chemistry, 61(1-2), 37-53. 1998.

ORTEGA, G. Evaluación de la exposición dietética a metilmercurio en poblaciones vulnerables de la región de Murcia (España). An Pediatr (Barc). 66(4), 426-8, Apr 2007.

OYARZÚN, R. Transporte de contaminantes en aguas subterráneas. CEAZA-Chile. 2007.

PALACIO BAENA, J. A. Ecotoxicología acuática. Medellin: Universidad de Antioquia. 2007.

RODRÍGUEZ, T. Modelación de la calidad del agua y transporte de contaminantes de la cuenca alta del río Bogotá. Tesis de maestría. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería civil, 2002.

Subdirección de ordenamiento y planeación integral del territorio. CDMB. Informe de la red hidroclimatológica año 2009.

THOMANN, R. y MUELLER, J. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper Collins Publishers Inc. United States. 1987.

TSIROS IX, Ambrose RB. An environmental simulation model for mercury transport and fate in small rural catchments. Chemo- sphere 39: 477 – 492. 1999.

TUCCI, C. Modelos Hidrológicos. Asociación Brasileira de Recursos Hídricos. Universidad Federal de Río Grande de Porto Alegre, Brasil. 1998.

TURIZO, A; VARGAS, A; JIMÉNEZ, M; VILLAMIL, M; RESTREPO, A; GONZÁLES, J; CHÁVEZ, J; RINCÓN, C; CARDOZA, G. Plan de manejo ambiental regional para la pequeña minería de oro de aluvión y filón en el sur del departamento de Bolívar. Corporación Autónoma Regional del sur de Bolívar (C.S.B). Cartagena. 1997.

VEN TE CHOW, D. M. Hidrología Aplicada. Texas: Mcgraw-Hill. 1999.

WANG, Q; KIM, D; DIONYSIOU, D; SORIAL, G; TIMBERLAKE, D. Simulation of mercury transport and fate in the Carson river, Nevada. Environmental Pollution. 131, 323-336, 2000.

WANG, Q; KIM, D; DIONYSIOU, DIONYSIOS; SORIAL, G; TIMBERLAKE, D. Sources and remediation for mercury contamination in aquatic systems-a literature review. Environmental Pollution. 131, 323-336. 2004

Water UK: Mercury. 2001. Retrieved from http://www.water.org.uk/static/files_archive/1Mercury-Water_UK.pdf.

WIENER, J. G., KRABBENHOFT, D. P., HEINZ, G. H., & SCHEUHAMMER, A. M. ECOTOXICOLOGY OF MERCURY. IN D. J. HOFFMAN, B. A. RATTNER, G. A. J. BURTON & J. J. Cairns (Eds.), Handbook of Ecotoxicology (Second ed., Vol. CONTAMINANT SOURCES AND EFFECTS, pp. 409-460): CRC Press. 2003.

WOLFF, E. Proyecto río Suratá: Líneas de acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería aurífera en Vetas y California. Jornada Internacional sobre el Impacto Ambiental del Mercurio, Lima. 2001

WOOL TA, AMBROSE RB, MARTIN JL, COMER EA. 2001. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 6·0 Draft: User's Manual. U.S.

Environmental Protection Agency,
athens/wwqtsc/html/wasp.html. Accessed April 2008.

<http://www.epa.gov/>

ANEXO 1

Valores de parámetros geométricos e hidrodinámicos medidos en estaciones ubicadas sobre el río Suratá

ESTACION SA-07 “Uña de gato”							
VARIABLE	Ancho	Area	Caudal	Vel. Media	Profundidad	Perímetro	Radio
FECHA	(m)	(m ²)	(m ³ /s)	(m/s)	media (m)	mojado (m)	hidráulico (m)
31/07/2012	7,7000	2,5910	1,3840	0,5460	0,3410	7,9070	0,3280
28/06/2012	7,6000	2,7600	1,4030	0,4420	0,3490	8,0590	0,3420
06/09/2011	8,2000	2,0210	1,2650	0,5690	0,2420	8,3930	0,2410
09/08/2011	8,0000	2,3120	1,2650	0,4960	0,2890	8,2120	0,2820
29/07/2010	8,7000	3,1650	3,0820	0,8530	0,3600	9,1600	0,3460
14/07/2010	6,2000	2,6300	2,2810	0,8560	0,4210	6,8380	0,3850
05/05/2010	9,9000	2,8300	2,1230	0,6680	0,3230	10,1850	0,2780
14/02/2006	7,7500	1,5400	0,8567	0,5000	0,2000	7,8703	0,2000
23/08/2005	8,2000	1,6800	1,4106	0,7200	0,2300	8,3087	0,2000
26/07/2005	8,1000	1,7200	1,3527	0,6500	0,2300	8,2538	0,2100
25/11/2003	8,0000	3,5700	3,6988	1,0500	0,4500	8,4476	0,4200
23/09/2003	7,3000	3,3900	3,2165	0,9100	0,4600	7,5970	0,4500
PROMEDIO	7,9708	2,5174	1,9449	0,6883	0,3246	8,2693	0,3068

Fuente: CDMB

ESTACION SA-05							
VARIABLE	Ancho	Area	Caudal	Vel. Media	Profundidad	Perímetro	Radio
FECHA	(m)	(m ²)	(m ³ /s)	(m/s)	media (m)	mojado (m)	hidráulico (m)
06/09/2011	19,3000	5,4100	3,7326	0,5900	0,2700	19,4027	0,2800
09/08/2011	27,0000	6,1000	5,0480	0,6800	0,2300	27,1680	0,2200
25/08/2009	11,6000	3,7300	2,4722	0,5000	0,3100	11,7548	0,3200
23/08/2005	14,0000	4,2000	3,2603	0,6700	0,3100	14,1332	0,3000
26/07/2005	14,3000	4,3200	3,3257	0,6800	0,3000	14,4733	0,3000
16/02/2004	15,7000	4,4000	2,7424	0,5700	0,2800	15,7979	0,2800
25/11/2003	15,8000	6,7700	6,6107	0,9000	0,4300	15,8919	0,4300
23/09/2003	15,0000	6,0400	6,5528	1,0200	0,4000	15,1748	0,4000
26/06/2003	16,0000	4,1900	3,0061	0,6400	0,2600	16,0896	0,2600
21/04/1999	18,3000	7,0700	6,1010	0,8000	0,3800	18,4460	0,3800
17/03/1999	18,0000	5,9600	6,4933	0,9100	0,3300	18,0800	0,3300
17/02/1999	18,0000	5,1300	5,1680	0,8500	0,2900	18,0372	0,2800
18/11/1998	14,0000	4,3400	5,1359	0,9300	0,3100	14,0762	0,3100
16/09/1998	17,0000	5,5200	5,9050	0,8400	0,3100	17,0596	0,3200
PROMEDIO	16,7143	5,2271	4,6824	0,7557	0,3150	16,8275	0,3150

Fuente: CDMB

ESTACION SA-04 EL PALMAR							
VARIABLE	Ancho	Area	Caudal	Vmedia	Profundidad	Perímetro	Radio
FECHA	(m)	(m ²)	(m ³ /s)	(m/s)	media (m)	mojado (m)	hidráulico (m)
17/02/2004	19,0000	4,8500	3,6793	0,6900	0,2500	19,0667	0,2500
16/02/2004	19,0000	5,0800	3,6889	0,6600	0,2600	19,0700	0,2700
31/07/2003	19,7400	5,4200	4,0104	0,6800	0,2800	19,9042	0,2700
26/06/2003	18,0000	5,1200	4,9133	0,8700	0,2800	18,1246	0,2800
16/07/2001	16,1500	4,0500	2,9523	0,6700	0,2600	16,2511	0,2500
11/06/2001	16,7000	4,0000	2,5817	0,6200	0,2400	16,7863	0,2400
11/06/2001	16,7000	4,0000	2,5817	0,6200	0,2400	16,7863	0,2400
21/05/2001	17,1000	4,1700	2,9938	0,6500	0,2400	17,2315	0,2400
21/05/2001	17,1000	4,1700	2,9938	0,6500	0,2400	17,2315	0,2400
05/04/2001	17,0000	3,6700	2,0117	0,4900	0,2200	17,0589	0,2200
28/03/2000	17,5000	5,8800	6,7086	1,1100	0,3500	17,6419	0,3300
21/02/2000	16,0000	5,5900	5,3607	0,9000	0,3700	16,1215	0,3500
31/01/2000	16,0000	5,6300	10,8872	1,8000	0,3500	16,1580	0,3500
23/11/1999	20,5000	10,5900	28,5561	2,3500	0,5000	20,7421	0,5100
28/10/1999	20,5000	7,7900	19,3547	2,2200	0,3800	20,5541	0,3800
12/09/1999	25,0000	7,5000	9,3159	1,1600	0,3800	25,1451	0,3000
05/04/1999	18,9000	6,9200	4,0579	0,5600	0,3700	19,1652	0,3600
03/11/1998	17,8000	7,3300	5,7374	0,7700	0,4100	17,9319	0,4100
15/09/1998	17,2000	6,3900	3,6484	0,5400	0,3600	17,3469	0,3700
06/08/1998	16,6000	3,7100	3,4767	0,8200	0,2200	16,6703	0,2200
13/07/1998	17,9000	4,6700	5,3914	1,0000	0,2700	17,9886	0,2600
30/06/1998	17,5000	5,4300	5,8223	1,0100	0,3200	17,6360	0,3100
27/04/1998	18,2000	4,8900	5,0304	0,8700	0,2800	18,3150	0,2700
17/03/1998	17,6000	3,9500	2,6246	0,6400	0,2200	17,6860	0,2200
27/01/1998	17,9000	3,2100	1,9543	0,5600	0,1800	17,9351	0,1800
29/10/1997	18,7000	4,7700	3,9766	0,7800	0,2400	18,8005	0,2500
05/09/1997	18,5000	3,6100	2,5560	0,6600	0,1900	18,6145	0,1900
25/08/1997	19,0000	3,8900	2,9065	0,7100	0,2100	19,0944	0,2000
15/07/1997	18,5000	4,8900	5,3785	1,0600	0,2600	18,5754	0,2600
19/06/1997	18,2000	5,5300	5,5168	0,9600	0,3100	18,2911	0,3000
PROMEDIO	17,7726	5,1214	5,3419	0,8734	0,2891	17,8859	0,2849

ESTACION SA-03							
VARIABLE	Ancho	Area	Caudal	Vel. Media	Profundidad	Perímetro	Radio
FECHA	(m)	(m ²)	(m ³ /s)	(m/s)	media (m)	mojado (m)	hidráulico (m)
25/08/2009	13,4300	5,2600	3,6190	0,6400	0,3900	13,5479	0,3900
15/02/2006	12,4800	5,0400	3,6055	0,6600	0,4100	12,8493	0,3900
24/08/2005	12,8300	6,0800	4,2763	0,6500	0,4700	13,1454	0,4600
27/07/2005	13,0000	6,5900	4,8771	0,6900	0,5000	13,2806	0,5000
30/03/2005	12,5000	4,2400	2,3718	0,5000	0,3400	12,6797	0,3300
22/02/2005	13,1000	5,4200	5,1261	0,8500	0,4300	13,2840	0,4100
24/08/2004	11,5500	4,0600	2,7189	0,6400	0,3500	11,7912	0,3400
28/07/2004	12,1000	4,2800	2,7638	0,6100	0,3500	12,3276	0,3500
24/03/2004	13,5000	4,5500	3,1182	0,6200	0,3300	13,7124	0,3300
17/02/2004	14,2000	5,8200	4,1854	0,6600	0,4100	14,2697	0,4100
26/08/2003	13,1000	5,4800	3,7077	0,5900	0,3900	13,2412	0,4100
22/07/2003	13,4000	6,0000	4,3111	0,6400	0,4400	13,5888	0,4400
27/06/2003	14,5000	6,7700	4,3649	0,6300	0,4800	14,8316	0,4600
18/06/2003	13,3000	6,3700	5,0415	0,6900	0,4700	13,7524	0,4600
27/05/2003	13,4000	5,5900	3,4630	0,5500	0,4000	13,6018	0,4100
25/03/2003	8,0000	5,2600	3,0015	0,5400	0,3800	13,6962	0,3800
20/02/2003	13,6000	4,3800	2,4630	0,4900	0,3200	13,7152	0,3200
12/12/2002	13,5000	4,8900	2,9905	0,4800	0,3300	14,2271	0,3400
20/11/2002	13,5000	5,1100	3,6737	0,6800	0,3500	14,4199	0,3500
16/10/2002	12,9000	5,4100	3,4557	0,5800	0,4200	13,0147	0,4200
18/09/2002	13,0500	5,9900	3,7132	0,5600	0,4500	13,1683	0,4600
27/08/2002	13,2000	5,1500	3,5887	0,6100	0,3800	13,3089	0,3900
24/07/2002	14,0000	6,2500	4,4641	0,6100	0,4300	14,1411	0,4400
22/05/2002	13,5000	7,4800	4,9008	0,5700	0,5300	13,6562	0,5500
22/08/2001	13,5000	4,4200	2,4696	0,4800	0,3100	13,6079	0,3200
18/07/2001	13,2500	4,5600	3,0178	0,6000	0,3400	13,3808	0,3400
19/06/2001	13,0000	4,3700	2,4812	0,5300	0,3300	13,0779	0,3300
23/05/2001	13,4000	4,8200	3,9666	0,7800	0,3700	13,4985	0,3600
25/04/2001	14,2500	4,9000	2,4632	0,4900	0,3600	14,3311	0,3400
22/02/2001	13,5000	6,2500	5,7999	0,8000	0,4600	13,6238	0,4600
PROMEDIO	13,1583	5,5154	3,9305	0,6397	0,4077	13,5190	0,4071

ANEXO 2

Características de modelos preseleccionados

MODELO AQUATOX		
CARACTERÍSTICAS	FUENTE	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	a	Rios, lagos y embalses
Modelación transporte químicos orgánicos	a	Solo se utiliza la parte de bioacumulación del modelo y se ajusta con concentraciones observadas de metilmercurio
Modelación transporte y destino de mercurio	a	Los creadores no encontraron un algoritmo general para la metilación bajo condiciones locales variables
Modelo hidrodinámico integrado	a	Se puede acoplar con EFDC
Preprocesador y postprocesador incorporados	b	Datos introducidos directamente utilizando una ventana o a través de archivos importados
Interfase introducción datos/ejecución Windows	b	A partir de 1990
Estado	b	Estable y/o dinámico
Dimensionalidad	a	Solo modela destino
Transporte	a	Socavación, deposición y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	a	Se obtiene de la página www.epa.gov

Fuente a: AQUATOX short course. Richard A. Park, et al. 2010

Fuente b: Clough, Jonathan. AQUATOX user's manual. Volumen 1, 2009.

MODELO EPD-RIV1		
CARACTERISTICAS	FUENTE	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	b	Arroyos y ríos
Modelación transporte químicos orgánicos	b	Nitrógeno y fósforo orgánicos
Modelación transporte y destino de mercurio	b	Solo hierro y manganeso pueden simularse en sus formas reducidas
Modelo hidrodinámico integrado	a	Aplicable a sistemas fluviales con ramificaciones, influencia de mareas y efectos dinámicos en lagos
Preprocesador y postprocesador incorporados	a	Para construir, ver y editar archivos de entrada, análisis de resultados y gestión global del proyecto
Interfase introducción datos/ejecución Windows	a	Posterior a la versión de 1995 del CE-QUAL-RIV1
Estado	a	Estable y/o dinámico
Dimensionalidad	a	Unidimensional
Transporte	b	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	a	Se obtiene de la página www.epa.gov

Fuente a: Página web www.epa.gov

Fuente b: Burke, et al. EPD-RIV1 user's manual. Versión 1, 2002

MODELO QUAL2K		
CARACTERISTICAS	FUENTE	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	a	Arroyos y ríos
Modelación transporte químicos orgánicos	a	Carbono orgánico total, nitrógeno y fósforo
Modelación transporte y destino de mercurio	b	La bibliografía consultada no muestra que el modelo posea esta capacidad
Modelo hidrodinámico integrado	b	Computado el flujo de salida para cada tramo, la profundidad y velocidad son calculadas por presas, curvas promedio o ecuaciones de Manning
Preprocesador y postprocesador incorporados	b	Usa Excel como interfase gráfica para mostrar resultados
Interfase introducción datos/ejecución Windows	b	Usa Excel para la entrada de datos
Estado	a	Estable
Dimensionalidad	a	Unidimensional
Transporte	b	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	a	Se obtiene de la página www.epa.gov

Fuente a: Página web www.epa.gov

Fuente b: Chapra, et al. Q2K documentation and user's manual. 2003

MODELO WASP7		
CARACTERISTICAS	FUENTE	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	b	Ríos, embalses y estuarios
Modelación transporte químicos orgánicos	a	Posee módulo independiente para modelar químicos orgánicos
Modelación transporte y destino de mercurio	b	Posee módulo independiente para modelar mercurio
Modelo hidrodinámico integrado	b	A partir de la versión 7 de WASP
Preprocesador y postprocesador incorporados	a	Introduce parámetros y constantes cinéticas al modelo y permite comparar con datos obtenidos en campo
Interfase introducción datos/ejecución Windows	a	El preprocesador corre bajo Windows
Estado	a	Estable y/o dinámico
Dimensionalidad	b	Modela sistemas en una, dos o tres dimensiones
Transporte	b	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	a	Se obtiene de la página www.epa.gov

Fuente a: Página web www.epa.gov

Fuente b: Ambrose, et al. WASP 7 Stream transport - Model theory and user's guide. 2009

MODELO CE-QUAL-ICM		
CARACTERISTICAS	FUENTE	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	b	Ríos, bahías y estuarios
Modelación transporte químicos orgánicos	a	Utiliza el submodelo ICM/TOXI resultado de la incorporación de las subrutinas TOXI WASP
Modelación transporte y destino de mercurio	a,b	La bibliografía consultada no muestra que el modelo posea esta capacidad
Modelo hidrodinámico integrado	a	Flujos, coeficientes de difusión y volúmenes deben ser especificados por otro modelo como CH3D-WES que no es gratuito
Preprocesador y postprocesador incorporados	a	El usuario debe proveer procesadores tanto para archivos de entrada como los de salida para presentación de resultados
Interfase introducción datos/ejecución Windows	b	El usuario debe proveer programas que lean y procesen la información del modelo
Estado	b	Estable
Dimensionalidad	b	Modela sistemas en una, dos o tres dimensiones
Transporte	a	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	a	Se suministra previo contacto con Dr. Carl F. Cerco: cercoc@wes.army.mil

Fuente a: U.S. Army Corps of Engineers: <http://el.erdc.usace.army.mil/elmodels/icminfo.html>

Fuente b: Cerco, C.F., and Cole, T. (1995). "User's guide to the CE-QUAL-ICM three dimensional eutrophication model, release version 1.0"

MODELO MEXAMS		
CARACTERISTICAS	FUENTE	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	c	Ríos, lagos y estuarios
Modelación transporte químicos orgánicos	b	Químicos orgánicos sintéticos como pesticidas
Modelación transporte y destino de mercurio	b	Modela arsénico, cadmio, cobre, plomo, níquel, plata y zinc
Modelo hidrodinámico integrado	a	La migración y destino de un metal es manejada por EXAMS
Preprocesador y postprocesador incorporados	b	Los archivos de entrada y salida son creados a través de MISIP (MEXAMS interactive software program)
Interfase introducción datos/ejecución Windows	c	Windows 2000 operating system
Estado	a	Estable. MINTEQ no debe ser usado para modelar soluciones a temperaturas mayores de 100 °C
Dimensionalidad	c	Modela sistemas en una, dos o tres dimensiones
Transporte	c	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	b	Puede ser obtenido escribiendo a EPA, Environmental Research Laboratory, College Station Road, Athens, Goergia 30613

Fuente a: Felmy, et al. Modeling the transport, speciation and fate of heavy metals in aquatic systems. 1984

Fuente b: Felmy, et al. The Metals Exposure Analysis Modeling System (MEXAMS), 1984

Fuente c: Burns, Lawrence. Exposure Analysis Modeling System (EXAMS): User Manual and System Documentation. 2000

MODELO HSPF		
CARACTERISTICAS	FUENTE	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	c	Quebradas y embalses
Modelación transporte químicos orgánicos	b	Nitrógeno orgánico, pesticidas, entre otros
Modelación transporte y destino de mercurio	a, b c	Ninguna de las fuentes consultadas menciona que el software tenga esta capacidad
Modelo hidrodinámico integrado	c	Simulación integrada de escorrentía hacia la corriente hidráulica y su interacción química con sedimentos
Preprocesador y postprocesador incorporados	b	Programas creados por el USGS y EPA en los años 80, disponibles por separado
Interfase introducción datos/ejecución Windows	b	La versión más desarrollada es la 11.0 bajo D.O.S.
Estado	c	Estable
Dimensionalidad	a	Unidimensional
Transporte	c	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	c	Puede ser obtenido escribiendo a ceam@epamail.epa.gov

Fuente a: www.epa.gov/athens/research/ftable/

Fuente b: Campillo, et al. Utilización de datos de lluvia distribuidos en estudios hidrológicos de inundación. Tesis de especialización. 2009

Fuente c: www.epa.gov/ceampubl/swater/hspf/index.html

ANEXO 3

Tablas de puntuación para los modelos preseleccionados

▪ Modelo AQUATOX

CARACTERISTICAS	P U N T O S	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	3	Rios, lagos y embalses
Modelación químicos orgánicos	1	Solo se utiliza la parte de bioacumulación del modelo y se ajusta con concentraciones observadas de metilmercurio
Modelación transporte y destino de mercurio	0	Los creadores no encontraron un algoritmo general para la metilación bajo condiciones locales variables
Modelo hidrodinámico integrado	0	Se puede acoplar con EFDC
Preprocesador y postprocesador incorporados	2	Datos introducidos directamente utilizando una ventana o a través de archivos importados
Interfase introducción datos/ejecución Windows	2	A partir de 1990
Estado	2	Estable y/o dinámico
Dimensionalidad	0	Solo modela destino
Transporte	3	Socavación, deposición y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	1	Se obtiene de la página www.epa.gov
TOTAL PUNTOS =	14	

▪ **Modelo EPD-RIV1**

CARACTERISTICAS	P U N T O S	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	2	Arroyos y ríos
Modelación químicos orgánicos	1	Nitrógeno y fósforo orgánicos
Modelación transporte y destino de mercurio	0	Solo hierro y manganeso pueden simularse en sus formas reducidas
Modelo hidrodinámico integrado	1	Aplicable a sistemas fluviales con ramificaciones, influencia de mareas y efectos dinámicos en lagos
Preprocesador y postprocesador incorporados	2	Para construir, ver y editar archivos de entrada, análisis de resultados y gestión global del proyecto
Interfase introducción datos/ejecución Windows	2	Posterior a la versión de 1995 del CE-QUAL-RIV1
Estado	2	Estable y/o dinámico
Dimensionalidad	1	Unidimensional
Transporte	3	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	1	Se obtiene de la página www.epa.gov
TOTAL PUNTOS	15	

▪ **Modelo QUAL2K**

CARACTERISTICAS	P U N T O S	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	2	Arroyos y ríos
Modelación químicos orgánicos	1	Carbono orgánico total, nitrógeno y fósforo
Modelación transporte y destino de mercurio	0	La bibliografía consultada no muestra que el modelo posea esta capacidad
Modelo hidrodinámico integrado	1	Computado el flujo de salida para cada tramo, la profundidad y velocidad son calculadas por presas, curvas promedio o ecuaciones de Manning
Preprocesador y postprocesador incorporados	1	Usa Excel como interfase gráfica para mostrar resultados
Interfase introducción datos/ejecución Windows	2	Usa Excel para la entrada de datos
Estado	1	Estable
Dimensionalidad	1	Unidimensional
Transporte	3	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	1	Se obtiene de la página www.epa.gov
TOTAL PUNTOS =	13	

▪ **Modelo WASP 7**

CARACTERISTICAS	P U N T O S	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	3	Ríos, embalses y estuarios
Modelación químicos orgánicos	1	Posee módulo independiente para modelar químicos orgánicos
Modelación transporte y destino de mercurio	1	Posee módulo independiente para modelar mercurio
Modelo hidrodinámico integrado	1	A partir de la versión 7 de WASP
Preprocesador y postprocesador incorporados	2	Introduce parámetros y constantes cinéticas al modelo y permite comparar con datos obtenidos en campo
Interfase introducción datos/ejecución Windows	2	El preprocesador corre bajo Windows
Estado	2	Estable y/o dinámico
Dimensionalidad	3	Modela sistemas en una, dos o tres dimensiones
Transporte	3	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	1	Se obtiene de la página www.epa.gov
TOTAL PUNTOS =	19	

▪ **Modelo CE-QUAL-ICM**

CARACTERISTICAS	P U N T O S	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	3	Ríos, bahías y estuarios
Modelación químicos orgánicos	1	Utiliza el submodelo ICM/TOXI resultado de la incorporación de las subrutinas TOXI WASP
Modelación transporte y destino de mercurio	0	La bibliografía consultada no muestra que el modelo posea esta capacidad
Modelo hidrodinámico integrado	0	Flujos, coeficientes de difusión y volúmenes deben ser especificados por otro modelo como CH3D-WES que no es gratuito
Preprocesador y postprocesador incorporados	0	El usuario debe proveer procesadores tanto para archivos de entrada como los de salida para presentación de resultados
Interfase introducción datos/ejecución Windows	0	El usuario debe proveer programas que lean y procesen la información del modelo
Estado	1	Estable
Dimensionalidad	3	Modela sistemas en una, dos o tres dimensiones
Transporte	3	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	0	Se suministra previo contacto con Dr. Carl F. Cerco: cercoc@wes.army.mil
TOTAL PUNTOS =	11	

▪ **Modelo MEXAMS**

CARACTERISTICAS	P U N T O S	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	3	Ríos, lagos y estuarios
Modelación químicos orgánicos	1	Químicos orgánicos sintéticos como pesticidas
Modelación transporte y destino de mercurio	0	Modela arsénico, cadmio, cobre, plomo, níquel, plata y zinc
Modelo hidrodinámico integrado	1	La migración y destino de un metal es manejada por EXAMS
Preprocesador y postprocesador incorporados	1	Los archivos de entrada y salida son creados a través de MISP (MEXAMS interactive software program)
Interfase introducción datos/ejecución Windows	1	Windows 2000 operating system
Estado	1	Estable. MINTEQ no debe ser usado para modelar soluciones a temperaturas mayores de 100 °C
Dimensionalidad	3	Modela sistemas en una, dos o tres dimensiones
Transporte	3	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	0	Puede ser obtenido escribiendo a EPA, Environmental Research Laboratory, College Station Road, Athens, Goergia 30613
TOTAL PUNTOS =	14	

▪ **Modelo HSPF**

CARACTERISTICAS	P U N T O S	OBSERVACIONES
Cuerpos de agua	2	Quebradas y embalses
Modelación químicos orgánicos	1	Nitrógeno orgánico, pesticidas, entre otros
Modelación transporte y destino de mercurio	0	Ninguna de las fuentes consultadas menciona que el software tenga esta capacidad
Modelo hidrodinámico integrado	1	Simulación integrada de escorrentía hacia la corriente hidráulica y su interacción química con sedimentos
Preprocesador y postprocesador incorporados	0	Programas creados por el USGS y EPA en los años 80, disponibles por separado
Interfase introducción datos/ejecución Windows	0	La versión más desarrollada es la 11.0 bajo D.O.S.
Estado	1	Estable
Dimensionalidad	1	Unidimensional
Transporte	3	Advectivo, difusivo y benthos
Código ejecutable y manuales de distribución gratuita	0	Puede ser obtenido escribiendo a ceam@epamail.epa.gov
TOTAL PUNTOS	9	