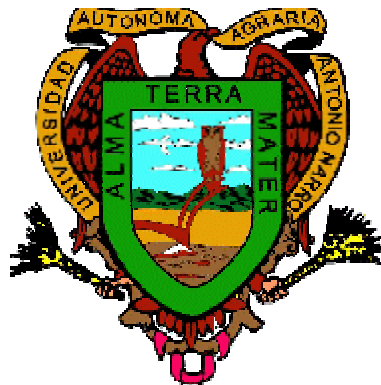


UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERIA



MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

POR:

YONNY RIVERA ZAVALA

MONOGRAFÍA

**Presentada Como Requisito Parcial Para
Obtener el Título de:**

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México

Mayo del 2005

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERIA

MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

MONOGRAFÍA

REALIZADA POR:

YONNY RIVERA ZAVALA

**Que Somete a Consideración de H. Consejo Examinador
Como Requisito Para Obtener el Título**

DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

COMITÉ PARTICULAR

**M. C. LUIS SAMANIEGO MORENO
(ASESOR PRINCIPAL)**

DR. JAVIER DE J. CORTES BRACHO
(SINODAL)

DRA. MANUELA BOLIVAR DUARTE
(SINODAL)

ING. LUIS EDMUNDO RAMÍREZ RAMOS
(COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA)

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Mayo del 2005

AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Luis Samaniego Moreno, por su apoyo incondicional, amistad, paciencia; y por brindarme parte de su valioso tiempo desinteresado en la realización de este trabajo.

Al DR. Javier de Jesús Cortés Bracho, por brindarme su tiempo para la revisión de este trabajo, por su dedicación como profesor en la formación de un egresado más en el departamento de riego y drenaje.

A la DRA. Manuela Bolívar Duarte, por participar en al revisión de este trabajo, por brindarme su confianza y por ayudarme a salir adelante en mi formación profesional.

A todos los maestros del departamento de riego y drenaje, por aportar sus conocimientos; y sobre todo por dedicarnos su tiempo y paciencia en las aulas.

A mi ALMA MATER, por abrirme sus puertas y haberme acogido en sus senos, y sobre todo por haberme dado la oportunidad de haberme formado como profesionalista en el ramo de la agronomía.

A todos aquellos que de alguna u otra manera me apoyaron para la culminación de este trabajo. A todos mil gracias.

DEDICATORIA

A DIOS

Por haberme dado la vida, por estar siempre a mi lado durante este largo camino, y por haberme permitido terminar esta carrera.

A mis padres

RADAMETH RIVERA VELASCO

DELMA ZA VALETA URBINA

Con cariño y respeto que se merecen cada uno de ellos, por haberme dado la vida y la dicha de existir en este mundo, por haberme brindado cariño, amor, paciencia, confianza, y sobre todo su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por sus sabios consejos que fueron y seguirán siendo un ejemplo ha seguir durante el tiempo que me reste de vida.

A mis hermanos

ROBERTO

LILIANA

JORGE ELI

Quienes me apoyaron y me brindaron su amistad en todo momento, por darme entusiasmo a salir adelante.

A mis abuelos

ADULFO RIVERA ESPINOSA (+)

CARMEN VELASCO PEREZ (+)

JORGE ZAVALA DOMINGUEZ

ISABEL URBINA CRUZ (+)

A mi esposa

Wendy Morales Hernández

Por ser un impulso más para poder terminar mi carrera profesional; por ser parte de mi vida, por brindarme su amor, cariño, comprensión y sobre todo por darme ánimos cuando yo me creía derrotado.

A mi hijo

Que me da la fuerza de seguir viviendo, de existir para luchar por el y de superarme a un mas para ser un ejemplo a seguir.

INDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUCCION	1
Objetivos	2
CALIDAD DEL AGUA	3
Fuentes de Contaminación del Agua	4

MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA	7
Análisis de Incertidumbre de la Modelación de la Calidad del Agua	11
Alternativas para Prevenir Errores en los Modelos	12
Consideraciones Previas a la Modelación de la Calidad del Agua ..	12
Finalidad de los Modelos de Calidad del Agua	14
Área de Aplicación de los Modelos de Calidad del Agua	15
ETAPAS IMPORTANTES DE LOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA	16
Desarrollo de los Modelos de Calidad del Agua	16
Diagrama de Flujo para el Procedimiento de la Modelación	18
TIPOS DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA.....	20
Parámetros de los Modelos de Calidad de Agua Unidimensional....	21
Parámetros de los Modelos de Calidad de Agua Bidimensional.....	22
Parámetros de los Modelos de Calidad de Agua Tridimensional.....	22
MODELOS MAS IMPLEMENTADOS EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE CALIDAD DEL AGUA	26
Modelo QUAL2K.....	26
Entrada del Modelo.....	26
Salidas del Modelo.....	29
Modelo RIOCAL.....	30
Descripción General del RIOCAL	30
Sistema Físico que el Sistema Puede Simular	31
Datos Ingresados por el Usuario.....	32
Requisitos del Sistema y Limitaciones del Modelo	33
Modelo CORMIX.....	33
Modelo WASP.....	36
Descripción de Wasp6/5 que Modela el Sistema	36
Modelo Básico de Calidad del Agua	37

Red del Modelo.....	37
Modelo SWMM	38
Limitaciones del Modelo	38
Requisitos de Datos.....	39
Salidas del Modelo.....	39
Modelo EPANET	40
Modelo MIKE 11	42
Modelo HSCTM2D.....	43
Modelo RIOS 4	44
Modelo QUAL2EU	45
Descripción del Modelo	45
Análisis de Incertidumbre.....	46
Modelo SWAT 2000.....	46
Modelo MOUSE	47
Modelo QUAL2E	48
Modelo SMPTOX3.....	49
Modelo HSPF.....	50
Modelo MINTEQA2.....	51
Modelo SWRRBWQ.....	51
Modelo SPAM.....	52
Modelo MULTI-SMP	52
Modelo CLARK	53
Modelo WASTOX.....	53
Modelo <u>LACAT</u>	53
CONCLUSIONES	54
LITERATURA CITADA.....	56

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Factores que causan cambios no deseables en las características del agua	5
Tabla 2: Ejemplo de indicadores de calidad del agua	14
Tabla 3: Características y aplicaciones de modelos usados en estudio de calidad del agua	23
Tabla 4: Consideraciones para la elaboración de un plan de muestreo	25
Tabla 5: Información y parámetros para condiciones de estado constantes y dinámicas de un modelo	27
Tabla 6: Lugares donde se ha probado el modelo QUAL2K en EU	29
Tabla 7: Parámetros que maneja el modelo QUAL2K	30

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Diagrama del estructural de un sistema.....	10
Figura 2: Etapas en el desarrollo de un modelo de calidad de aguas; Modificado de Thomamn y Mueller (1987).....	19
Figura 3: Red del cuerpo de agua del modelo WASP	38

I. INTRODUCCIÓN

El aumento poblacional y sus consecuentes necesidades materiales de desarrollo imponen progresivamente mayores exigencias a los sistemas hídricos, ya que la intensificación de la interacción del manejo del agua en una cuenca, considerando los sectores agrícola, urbano e industrial, se traducen en trastornos ambientales que modifican los sistemas acuáticos, manifestándose sobre la productividad de sistemas naturales y artificiales. Esta preocupación existente desde hace algunas décadas, se ha traducido en estudiar los sistemas hídricos, desde una perspectiva holística del manejo de hoyas hidrográficas, dando una especial significación a la dimensión ambiental, en particular en los aspectos de calidad del agua. Por ello desde una perspectiva integral del manejo de los recursos hídricos, es conveniente conocer la influencia o impacto ambiental, sobre el entorno y en particular en la calidad del agua de los cursos receptores que las obras de infraestructura, actos administrativos (otorgamiento de derechos de agua), manejo agrícola y silvícola o cualquier proyecto de inversión en una cuenca hidrográfica producen o eventualmente producirían. Esto significa conocer, en el caso de condiciones existentes y prever la alteración de la calidad del agua de un cuerpo

dulce-acuícola, que ocurriría posteriormente a la construcción de una obra de riego o hidroeléctrica, de la instalación de alguna industria, que evacue residuos

líquidos o la incorporación de alcantarillado de aguas servidas, cambio de uso del suelo desde lo agrícola a lo silvícola, viceversa o mejoramiento del sistema de evacuación de aguas servidas de algunas ciudades, traspaso de recursos hídricos de una cuenca a otra, entre muchas otras posibilidades. La herramienta adecuada para estos fines son los denominados genéricamente modelos de calidad de agua (Vargas, B. J., 2005).

Este autor expresa que los modelos de calidad de agua permiten simular condiciones actuales y futuras, de tal manera, que es posible simular escenarios que permitan anticipar las variaciones que sufrirán los diversos índices o parámetros de calidad, en un cuerpo acuático en estudio.

Objetivos:

- El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer la importancia que tiene en la actualidad la implementación y utilización de los modelos de calidad del agua en la vida cotidiana, así como también conocer una alternativa más para resolver de manera adecuada problemas de acondicionamiento de agua según la fuente y uso requerido.
- Por otro lado, describir las características con las que cuentan algunos de los modelos más utilizados por el ser humano para la resolución de este problema tan grave que esta azotando la calidad de vida de todo ser vivo.

II. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua de acuerdo a Dunne y Leopold (1978), Gosz et al., (1980) y Lee (1980); citado por Aceves (1991), es definida por los atributos físicos, químicos y biológicos que afectan la disponibilidad del agua para el consumo humano, para la agricultura, la industria, la recreación, y otros usos que se les destine.

Sin hacer referencia al uso que se le destine al agua Hewlett (1982) citado por Aceves (1991) señala que la calidad del agua incluye las propiedades físicas, químicas y biológicas asociadas con el material mineral y orgánico que se encuentre suspendido o disuelto en el agua.

Las propiedades físicas del agua incluyen el estudio de la dureza, la alcalinidad, los gases disueltos, los sólidos totales disueltos, la temperatura, la turbidez, el oxígeno disuelto y demanda de oxígeno biológico, los sedimentos orgánicos e inorgánicos en suspensión; las propiedades químicas incluyen el estudio de todos los elementos químicos contenidos en el agua, así como los compuestos que se deriven de ellos. Los más importantes son K, Na, Ca, Mg, CO₃, SO₄, Cl, HO₃, NO₃, NO₂; las propiedades biológicas hacen referencia al estudio y contenido de bacterias coliformes y no coliformes que se presentan en el agua (Carlson, 1971;

Davis y Dewiest, 1971; Dunne y Leopold, 1978; Gutiérrez et al., 1987; Leaf, 1974; Hewlett, 1982; Nelson y Hansen, 1984; Gosz, 1982; Jonson et al., 1978; USDA, 1982, citados por Aceves (1991).

Las características físicas, químicas y biológicas del agua son modificadas por diferentes factores de acuerdo a Gosz (1982) dichos factores pueden ser incluidos en diversos grupos destacando entre ellos los mencionados en la tabla 1.

Fuentes de Contaminación del Agua

Con el afán de clasificar de alguna manera el lugar de procedencia de lo que origina la contaminación del agua, algunos autores lo han denominado como fuente definida e indefinida de contaminación del agua (Millar, 1990; citado por Sifuentes (1993).

La fuente definida de contaminación es descargada específica y directamente sobre los afluentes. Por su parte la fuente indefinida de contaminación encierra a grandes áreas de tierras en las cuales se descargan contaminantes en su superficie y después se percolan al agua subterránea (Millar, 1990; citado por Sifuentes (1993).

Sin embargo, la lluvia y el deshielo acarrearán nitrógeno y fosfatos en forma de fertilizantes provenientes de campos agrícolas (Millar, 1990; citado por Sifuentes (1993), la contaminación derivada por esta última fuente es lo más

difícil de detectar y por lo tanto de controlar ya que se encuentra hasta cierto punto alejado de los cuerpos de agua.

Tabla 1. Factores que causan cambios no deseables en las características del agua (Gosz, 1982).

CARACTERÍSTICAS	FACTORES DE CAMBIO
FÍSICAS	
Penetración de la luz	Vegetación, sombra, polvo atmosférico, humo.
Transmisión de la luz en el agua	Sólidos suspendidos en la erosión, crecimiento de algas o sedimentos suspendidos de las cuencas.
Calentamiento del agua en los afluentes	Alteración de la energía de la cuenca causada a través de los cambios de vegetación y suelo, diversificación de la superficie y afloramientos de aguas.
Volumen y fluído del agua	Modificación por los índices de escorrentía por los cambios de vegetación y suelo; diversificación de la superficie y afloramientos de aguas.
Abrasión y fricción	Sólidos suspendidos y sedimentos en los bordes, especialmente en causes altos.
Circulación del agua	Impedimentos físicos y otros cambios morfológicos que causan cambios en la pendiente, relieve o radio hidráulico.
Tamaño de las partículas del sustrato	Cambios en la cuenca o índices de canales de erosión causadas por la alteración de la vegetación o suelo, cambios en los afluentes, lagos o diversificaciones de estos.
QUÍMICAS	
Salinidad	Alteración por erosión de sólidos disueltos totales y la importancia de estos en la cuenca.
Oxígeno, CO ₂ , N, y otros gases	La alteración por la carga de materia orgánica biodegradable de la cuenca, cambio en el afluente, su circulación y el nivel de fotosíntesis.
Nutrientes, elementos tóxicos y sus componentes	Alteración de la erosión por material disuelto y suspendido, importancia de la alteración en las cuencas, alteración por movimiento aéreo de los materiales.
BIOLÓGICAS	
Enfermedades causadas por organismos	Alteración por deposición de desechos animales en la cuenca incluyendo a los humanos; alteración por el contacto animal en el agua; alteración de los sedimentos.

Sobre la contaminación de las aguas pueden tener efecto las siguientes actividades o procesos (Vargas, B. J., 2005):

1. Efecto de deforestación
2. Erosión antrópica
3. Construcción de embalses
4. La canalización de ríos
5. El relleno de zonas húmedas
6. La agricultura tradicional
7. El tratamiento individual de aguas servidas
8. La agricultura industrializada
9. El riego masivo
10. Las aguas residuales industriales con o sin tratamiento
11. Contaminación atmosférica debido a la actividad industrial
12. Contaminación atmosférica debido a la actividad urbana
13. Contaminación atmosférica debido a vehículos de combustión interna
14. Las aguas residuales urbanas con o sin tratamiento
15. La contaminación de aguas subterráneas por actividad urbana e industrial
16. Las aguas residuales de actividades mineras con o sin tratamiento
17. La contaminación de aguas subterráneas por actividad minera
18. Las aguas residuales urbanas con o sin tratamiento de centrales nucleares
19. La contaminación atmosférica de múltiples orígenes vía precipitación pluvial.
20. Eutrofización de lagos y embalses
21. Eutrofización de ríos
22. Aguas pluviales de las ciudades
23. Accidentes en transporte de productos peligrosos

III. MODELOS DE CALIDAD DE AGUA

Para evaluar planes alternativos de ingeniería para el control y manejo de la calidad del agua pueden emplearse modelos matemáticos que relacionen la descarga de aguas residuales con la calidad de agua del cuerpo receptor. Los diversos grados de tratamiento, la reubicación de los puntos de descarga de aguas residuales, el aumento de los flujos mínimos, los sistemas de tratamiento regional en contraposición con las plantas múltiples, constituyen algunas de las alternativas de control, cuya influencia sobre la calidad del agua receptora puede evaluarse mediante la aplicación de los modelos de calidad del agua. Los modelos pueden ayudar a evaluar el mejoramiento o beneficio relativo que se obtiene para la calidad del agua mediante la eliminación de diferentes componentes de los contaminantes (Henry, S., 1984).

Al proceso de desarrollo de una comunidad humana, van ligadas tres etapas secuenciales de contaminación del agua. La primera es la contaminación por patógenos producto de descarga de aguas servidas domésticas no tratadas a cursos fluviales, la segunda corresponde a una contaminación a mayor escala debido a la progresiva industrialización de las cuencas, caracterizada fundamentalmente por niveles elevados de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y de SS (Sólidos en Suspensión). La tercera etapa corresponde al crecimiento industrial en las cuencas que va asociada a una contaminación

química, en la cual los contaminantes de interés son los metales pesados, sustancias no degradables y nutrientes entre otros (Streeter, H. W. et al., 1925).

Un modelo no es más que una representación formal de la realidad que se pretende describir, analizar y finalmente comprender (Loucks, D. P. 1982). La formalización puede adoptar varios niveles, desde el simplemente verbal, pasando por la conceptualización básica hasta la formalización matemática.

Este autor expresa que los modelos de calidad de agua son relaciones matemáticas que permiten entender y cuantificar las relaciones causa-efecto de los procesos físicos, químicos y biológicos de los compuestos descargados en cuerpos receptores, como ríos, lagos y estuarios.

Las ecuaciones están basadas fundamentalmente en la conservación de la masa y/o energía, de tal forma que existen tres fenómenos: ingreso de contaminantes al cuerpo de agua desde el exterior del sistema, el transporte y las reacciones en el cuerpo de agua (Loucks, D. P. 1982). El transporte puede ser por advección y/o dispersión, por lo tanto dependerá de las características hidrodinámicas e hidrológicas del cuerpo de agua.

Más importante aún, los modelos han sido utilizados para evaluar distintas alternativas de gestión para mejorar la calidad del agua. El enfoque clásico para llegar a esto es, una vez desarrollado y calibrado, utilizar el modelo para

predecir la concentración de los contaminantes para distintas alternativas de tratamiento o políticas de gestión de caudales (Loucks, D. P. 1982).

Para que un modelo de calidad de agua pueda ser aplicado confiablemente (Somlyódy, L., 1978), para la predicción de las condiciones de los diversos parámetros, tiene que cumplir, obviamente, con la condición básica de reproducir aceptablemente las condiciones actuales.

El problema, en sí, es fundamentalmente impermanente, (Somlyódy L., 1978), lo que lo hace difícil de abordar. Esta condición hace que el desarrollo de modelos de calidad del agua sea una ciencia y un arte (Loucks, D. P. 1982).

Los procesos fundamentales que rigen la calidad del agua de un cuerpo acuático, ya sea pluvial o lacustre, son los hidrológicos, térmicos y bioquímicos. Los procesos hidrológicos deben entenderse, como aquéllos exclusivamente relativos a la hidrología del cuerpo de agua, así como aquéllos referidos al comportamiento hidrodinámico (Vargas, B. J., 2005).

Los modelos utilizan el conocimiento obtenido a partir de los datos para predecir lo que ocurrirá en algún otro momento y lugar.

De esta forma la calidad del agua de los espacios naturales se ve alterada y los impactos sobre ella deben ser evaluados (Vargas, B. J., 2005), la forma más adecuada son los modelos de calidad del agua.

Los componentes de un sistema que define un problema de calidad de aguas son los que se mencionan a continuación y se ilustran en la el figura 1.

(<http://www.snet.gob.sv/Documentos/dac/documento.pdf>)

1. La entrada de descargas puntuales provenientes de las actividades del hombre y la naturaleza en la cuenca en análisis.
2. Las reacciones y transformaciones químicas y biológicas, así como el movimiento del agua que producen niveles diferentes de calidad de agua en determinado tiempo y espacio del ecosistema acuático.
3. La salida o concentración resultante de una sustancia, tal como el oxígeno disuelto o nutriente en una ubicación específica en el cuerpo de agua, durante un tiempo específico del día o del año.

Estos se tipifican en el siguiente esquema:

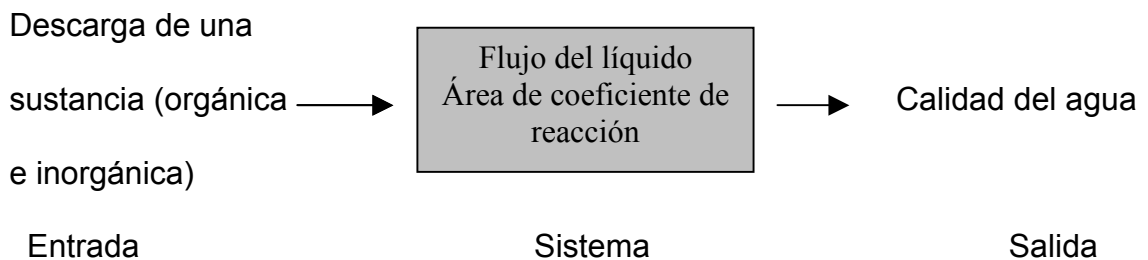


Figura 1: Diagrama estructural de un sistema.

Análisis de Incertidumbre de la Modelación de la Calidad del Agua

Generalmente las agencias reguladoras desean establecer no solamente las concentraciones promedio que se esperan de un contaminante en particular. También requieren saber que tan cierta es la respuesta con respecto a la distribución de cargas residuales (Henry S., 1993). Los modelos deben proporcionar la mejor estimación con respecto a la concentración promedio del contaminante, así como también, la variación esperada en dicha concentración. Dicha información sería útil para determinar la acción a tomar.

Los modelos suelen contener errores de diferentes tipos puesto que son aproximaciones simplificadas de la realidad, basado el modelo mismo en los datos de campo (Henry S., 1993). El análisis de dichos errores es importante puesto que son propagados a través de los modelos y causan incertidumbre en el resultado final.

Los siguientes tipos de errores pueden ser considerados:

1. Error del modelo
2. Error en las variables de entrada (variables dependientes y condiciones iniciales).
3. Error en los datos de entrada usados para correr el modelo
4. Errores de parámetros (constantes de velocidad, coeficientes y variables independientes).

- Error del modelo

Formulación incorrecta del modelo, es decir, la diferencia entre el medio ambiente real y las ecuaciones diferenciales en el modelo.

Pueden ser causados por:

- Procesos incluidos u omitidos impropiaemente
- Requiere de unas variables de estado para describir el ecosistema
- Una reacción imprevista se hace importante en diversas partes del espacio a modelar

Indicador de error: Los datos de campo no consideran las predicciones del modelo.

Alternativas para Prevenir Errores en los Modelos

Una de las alternativas más conveniente es la de usar diferentes modelos para la misma aplicación y estimar el error del modelo por medio de la diferencia en predicción entre los modelos bajo varias circunstancias diferentes y así determinar la causa del error del modelo (Henry S., 1993).

Consideraciones Previas a la Modelación de la Calidad del Agua.

Al inicio del proceso de análisis de calidad del agua se deben identificar aquellos aspectos del proyecto que podrían afectar el medio ambiente hídrico,

considerando recursos superficiales y subterráneos, tanto en cantidad como en calidad (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 1994). Se deben definir los requerimientos de agua, así como las descargas residuales conjuntamente con sus obras asociadas. Estas descripciones se realizan generalmente en forma relativamente cualitativa.

Luego, la tarea siguiente consiste en seleccionar variables específicas que sean indicadores ambientales representativas factibles de cuantificar, de modo que cuando se realice el análisis de esta variable ambiental se pueda suponer sobre los valores en la línea de base a aquéllos estimados considerando el proyecto y así predecir los posibles impactos en la calidad del agua (CONAMA, 1994).

Según las siglas antes mencionadas la selección adecuada tanto del tipo como del número de los indicadores ambientales es una actividad de gran importancia de cuantificar una multitud de parámetros por una parte puede significar un esfuerzo demasiado grande y en cierto modo puede impedir concentrarse en los de mayor trascendencia. Por otra parte, un número limitado de indicadores puede no ser adecuado para un análisis completo del proyecto de los impactos reales en el medio.

La tabla 2 (CONAMA, 1994), contiene una lista de posibles indicadores. Esta tabla no pretende ser exhaustiva, ya que corresponde al evaluador seleccionar aquéllos de mayor significado para el proyecto en consideración. En todo caso en la lista adjunta se incluyen los parámetros que más frecuentemente son considerados en el análisis de calidad de agua. La selección final debe basarse

en la naturaleza del proyecto, así como también en las características locales y regionales del medio donde se insertará, entre otros aspectos.

Tabla 2: Ejemplo de indicadores de calidad del agua (CONAMA, 1994).

	Indicador
Aguas superficiales y aguas subterráneas.	Normas de calidad del agua, temperatura, pH, conductividad, turbiedad, sólidos disueltos, sólidos suspendidos totales, DBO ₅ , DQO, oxígeno disuelto, alcalinidad, nitratos, nitritos, amonio, nitrógeno Kjeldahl, fosfatos, sulfatos, cloruros, hierro, manganeso, calcio, magnesio, potasio, sodio, sílice, mercurio, cadmio, arsénico, plomo, cobre, coliformes fecales y totales, pesticidas.

Independientemente del número de indicadores ambientales seleccionados, ellos deben de permitir un adecuado análisis, tanto del medio ambiente afectado como de los impactos derivados del proyecto en estudio. Ambientes únicos o muy sensibles deben ser descritos con mayor grado de detalle a través de indicadores que permitan conocer con detenimiento el área en cuestión y posibles efectos del proyecto (CONAMA, 1994).

Finalidad de los Modelos de Calidad del Agua

La finalidad de un modelo de calidad del agua, es originar una herramienta que tenga la capacidad de determinar nuevas concentraciones de contaminantes en

un cuerpo de agua (Vargas, B. J., 2005), en cada punto y a lo largo del plazo de interés, cuando las condiciones de modificación y el estado primitivo son conocidas.

Así como también, tener la capacidad de simular el comportamiento de componentes hidrológicos de calidad de un cuerpo de agua. El desarrollo de esta herramienta para simular el comportamiento del prototipo, se hace aplicando un modelo matemático, producto de tres fases generales:

1. Representación conceptual.
2. Representación funcional.
3. Representación computacional.

Área de Aplicación de los Modelos de Calidad del Agua

Los modelos de calidad de agua sirven como herramientas imprescindibles en el planeamiento del uso de recursos hídricos para predecir el impacto de planes de ingeniería para el control y manejo del medio ambiente. La selección del tipo de modelo a aplicarse depende del problema de calidad de agua y de las inversiones propuestas (Henry, S., 1984).

IV. ETAPAS IMPORTANTES DE LOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

Desarrollo de los Modelos de Calidad del Agua

En la construcción de los modelos se identifican cinco etapas: desarrollo del modelo, calibración, validación, aplicación del modelo y análisis de sensibilidad (CONAMA, 1994).

La calibración y validación son las etapas más importantes en el desarrollo de modelos de calidad de aguas, ya que permite contar con valores de los parámetros para las condiciones específicas que están siendo modeladas.

1. Desarrollo del modelo. En la actualidad existen múltiples modelos para las más diversas aplicaciones. Muchos de ellos son extremadamente simples, mientras que otros son de una gran complejidad. La selección de un modelo para una aplicación específica depende fundamentalmente del alcance del análisis a realizar, del tipo y calidad de la información disponible y a obtener. Cabe resaltar nuevamente que a mayor complejidad del modelo, más es la cantidad y la calidad de la información requerida para su aplicación.

2. La calibración. Dentro de las etapas de construcción del modelo de un sistema, la calibración ha sido siempre importante dado que constituye una tarea de costo importante y demanda tiempo para su ejecución. Esta consiste en aplicar al modelo un conjunto conocido de datos y analizar los resultados

simulados. Luego se deben conciliar los valores observados con los estimados por el modelo. Esto se realiza ajustando los parámetros del modelo, de modo tal que los valores simulados coincidan con los observados dentro de un margen de error aceptable. Para calibrar un modelo existen diferentes técnicas, tales como ajuste de curvas y métodos numéricos de identificación de parámetros. La calibración debe realizarse hasta que haya una coincidencia de, a lo menos, un 80 por ciento entre los valores observados y los simulados.

La calibración es necesaria por múltiples razones:

- **Confianza:** los resultados de la modelación son usualmente utilizados para la toma de decisiones relativas a la operación o la optimización de un sistema de agua. La calibración demuestra la habilidad de un modelo de reproducir las condiciones existentes, brindándole seguridad al ingeniero que debe predecir un comportamiento.
- **Entendimiento:** el proceso de calibrar un modelo brinda conocimiento del comportamiento y funcionamiento de un sistema, pudiendo mostrar en particular a qué valores es más sensitivo el modelo.
- **Problemas:** mediante la calibración pueden identificarse errores de descripción del sistema. Esta precisión o ajuste se mide como puntos porcentuales entre los valores medidos y los modelados.

3. Validación. Una vez calibrado el modelo, éste debe ser aplicado a un segundo conjunto de datos conocidos. El modelo deberá ser capaz de reproducir estos valores, de otro modo su validez será dudosa.

4. Aplicación del modelo. Consiste básicamente en la utilización del modelo calibrado y validado en el análisis de los impactos en la calidad del agua de la acción en estudio. Primeramente se aplica el modelo a la situación sin acción y luego a la situación con acción. La diferencia entre ambos resultados representa el impacto de la acción.

5. Análisis de sensibilidad. Comúnmente se hace necesario evaluar las variaciones que presentan los resultados al alterar algunos parámetros del modelo. El análisis de sensibilidad indica los márgenes dentro de los cuales el modelo es confiable, es decir, establece los valores críticos de los parámetros en donde los valores simulados dejan de corresponder con los reales. Estos valores deben ser informados conjuntamente con los resultados del estudio.

Diagrama de Flujo para el Procedimiento de la Modelación

El desarrollo de un modelo de calidad de aguas, así como de cualquier otro, debe seguir las etapas que se muestran en la figura 2 (Thomamn y Mueller, 1987).

Los autores anteriores mencionan que la representación conceptual comprende una idealización gráfica del prototipo, considera la descripción de las propiedades geométricas que van a ser modeladas y la identificación de las condiciones de borde e interrelaciones entre las partes del prototipo. Normalmente, este proceso

impone divisiones del prototipo en elementos discretos de un tamaño compatible con los objetivos que el modelo debe servir, estos elementos se definen de acuerdo a algunas simples reglas geométricas, y se diseña el modo por el cual serán conectados, tanto física como funcionalmente, como parte integrante de un todo. Una parte de esta estructuración es la designación de aquellas condiciones de borde a ser consideradas en la simulación.

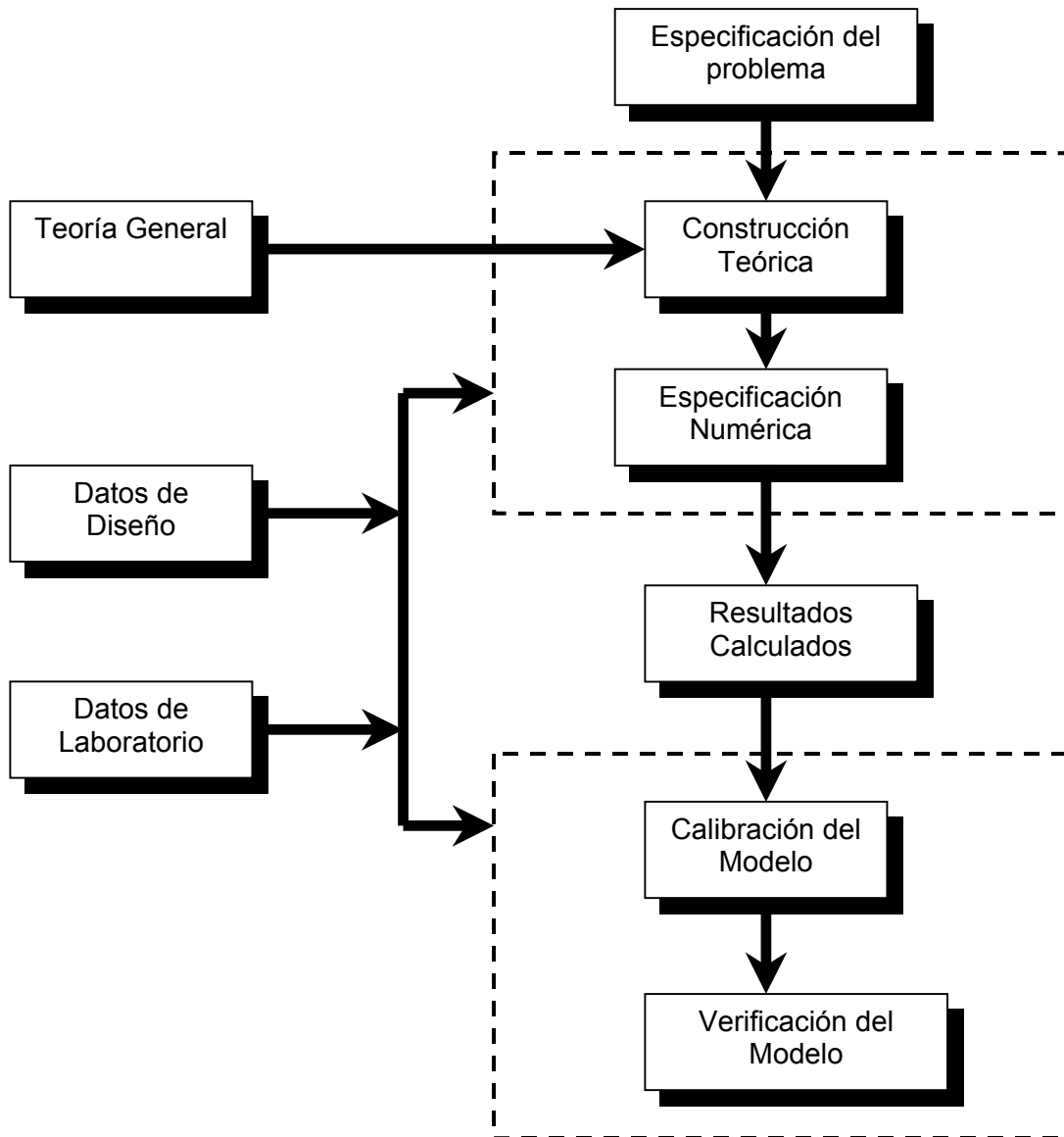


Figura 2: Etapas en el desarrollo de un modelo de calidad de aguas. Modificado de Thomamn y Mueller (1987).

V. TIPOS DE MODELOS DE CALIDAD DE AGUA

Los modelos pueden ser uni, bi o tridimensionales dependiendo de las características físicas del medio a simular (CONAMA,1994), tal como se describe a continuación:

- Modelos unidimensionales: se utilizan generalmente para representar flujos de agua en ríos siendo la dirección considerada el sentido del escurrimiento.
- Modelos bidimensionales: se utilizan para ríos de gran ancho, en los cuales las concentraciones de contaminantes varían de un lado de la ribera al otro. En estos casos se usa un sistema cartesiano de coordenadas, en el cual una de ellas corresponde al sentido del flujo y la otra a la dimensión lateral.
- Modelos tridimensionales: estos encuentran aplicación en estudios de aguas subterráneas y en sistemas más complejos de aguas superficiales. Requieren de mayor información que los modelos uni y bidimensionales y también mayor tiempo computacional, por lo que su uso se restringe a problemas de gran magnitud cuando se dispone de recursos suficientes para su aplicación.

Los modelos pueden ser de estado dinámico o estacionario. Los dinámicos proveen información acerca de la calidad del agua tanto en la dirección (o distancia aguas abajo de una descarga) como en el tiempo y los estacionarios suponen que existe variación sólo en el espacio (no existen cambios de los indicadores en el tiempo), como por ejemplo una descarga continua y constante (CONAMA, 1994). Estos son de menor grado de dificultad y de menor costo de aplicación que los modelos dinámicos.

La comisión antes mencionada dice que los parámetros a modelar, al igual que el tipo de modelo a emplear, deben ser identificados antes de iniciar la aplicación del mismo. Debe tenerse presente que modelar un gran número de parámetros puede resultar no sólo muy laborioso sino también en muchos casos redundante e innecesario.

Parámetros de los Modelos de Calidad de Agua Unidimensional

Los parámetros de calidad del agua que pueden evaluarse mediante este tipo de análisis comprenden algunos sólidos disueltos, organismos coliformes, nutrientes, oxidación de compuestos carbonáceos y nitrogenados, y oxígeno disuelto (Henry, S., 1984). El análisis está estructurado de tal manera que es factible realizar cálculos sobre la calidad del agua con sólo tener conocimiento de las poblaciones actuales y futuras, del área de drenaje y de la profundidad del agua (para los estuarios también se requieren datos del área de la sección transversal). Sin embargo, el grado de validez de los cálculos es proporcional a la extensión de los datos de entrada.

Parámetros de los Modelos de Calidad de Agua Bidimensional

Los parámetros de calidad del agua que pueden ser evaluados mediante este enfoque incluyen ciertos sólidos disueltos, organismos coliformes, nutrientes, oxidación de compuestos carbonáceos y nitrogenados, oxígeno disuelto, temperatura y ciertas sustancias tóxicas (Henry, S., 1984).

Parámetros de los Modelos de Calidad de Agua Tridimensional

Los parámetros de calidad del agua que pueden evaluarse con este enfoque incluyen los organismos coliformes, los nutrientes, la oxidación de compuestos carbonáceos y nitrogenados, el oxígeno disuelto estacional y de las fuentes dispersas de desechos estacionales, estos constituyen algunos ejemplos de los problemas a los cuales puede aplicarse este tipo de análisis (Henry, S., J1984). Es posible llevar a cabo también un análisis simple de eutrofización. Todo esto en situaciones más complejas que los anteriores.

A continuación y en forma resumida, se muestran en la tabla 3 (CONAMA,1994) algunas características y aplicaciones típicas de los modelos más comúnmente usados en estudios de calidad del agua.

Tabla 3: Características y aplicaciones de modelos usados en estudio de calidad del agua (CONAMA,1994).

Modelo	Características y Observaciones
Modelo de zona de mezcla	Modelo muy simple de balance de masa. Estimación rápida de los impactos en la calidad del agua.
Modelos de oxígeno disuelto	Basados en la ecuación de Streeter-Phelps, incorporan múltiples términos que incluyen entre otros efectos del bentos y respiración de las algas. Gran aplicabilidad a descargas de residuos que demandan oxígeno. Generalmente unidimensionales, aunque también pueden ser bi y tridimensionales.
Modelos para descargas térmicas	Considera adiciones algebraicas de temperatura en forma de calor (energía). Permiten establecer zonas de impacto (bidimensional o tridimensional) producto de descarga de agua de enfriamiento.
Modelos de aguas subterráneas	<p>Gran variedad de modelos uni, bi y tridimensionales disponibles. Consideran tanto transporte de agua como de contaminantes. También pueden incluirse efectos térmicos.</p> <p>Aplicables a medios saturados y no saturados. Generalmente de mayor complejidad matemática que los modelos de aguas superficiales, requiriendo técnicas numéricas para la resolución de las ecuaciones sustentables.</p>
Modelos de calidad del agua	<p>Incluyen modelos hidrológicos y existen en gran número. Ejemplos de estos modelos son:</p> <p>Qual II. Estado estacionario y dinámico. Aplicable a ríos. Simula clorofila, amonio, nitratos, nitritos, fosfatos, DBO, oxígeno disuelto, coliformes, sustancias conservativas y temperatura.</p> <p>Similares al anterior son el WASP y varios otros desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y el United States Geological Survey (USGS). De los modelos hidrológicos de gran uso se pueden mencionar el Stanford Watershed Model, el Hydrocomp Model y los modelos SWMM, HEC-1 y HEC-2.</p>

La modelación constituye una herramienta poderosa en el análisis de calidad de agua. Sin embargo, la validez de los resultados de un modelo depende grandemente de la calidad de información disponible. No se puede pretender utilizar un modelo sin realizar primeramente un análisis crítico de datos y también de los resultados del mismo.

Trabajo en Terreno

La recopilación de antecedentes existentes tales como información bibliográfica, datos estadísticos históricos (escorrentía, pluviosidad, etcétera), entrevistas a lugareños y a autoridades regionales y gubernamentales, puede proveer datos valiosos para una adecuada descripción del medio a considerar. Sin embargo, en muchas ocasiones resulta necesario complementar la información histórica con programas de muestreo de calidad del agua (CONAMA, 1994), especialmente si ella es escasa o muy antigua o presenta deficiencias en cuanto a metodología de muestreo o de análisis. Un plan de monitoreo orientado a la caracterización de calidad del agua a través de un modelo debe incluir los siguientes elementos:

- Programa detallado de recolección de muestras que dé cuenta de las variaciones estacionales relevantes.
- Descripción de métodos de análisis a emplear.
- Metodología de recolección y conservación de las muestras.

En la tabla 4 (CONAMA, 1994) se resumen algunas consideraciones con respecto a los puntos antes mencionados.

Tabla 4: Consideraciones para la elaboración de un plan de muestreo (CONAMA, 1994).

Actividad	Consideraciones
Ubicación de los puntos de muestreo	<ul style="list-style-type: none"> • Proveer adecuada descripción de la calidad del agua • Tener en cuenta si los parámetros son conservativos o no conservativos • Características físicas del curso de agua • Acceso a los lugares de muestreo y distancia a laboratorios. (conservación de las muestras)
Frecuencia de muestreo	<p>Tres elementos básicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hora del día • Estación del año • Frecuencia del muestreo
Metodología de recolección	<ul style="list-style-type: none"> • Muestras puntuales o muestras compuestas • Empleo de equipos automáticos de muestreo • Mediciones de velocidad y caudales
Técnicas analíticas	<ul style="list-style-type: none"> • Preservación de las muestras • Uso de técnicas estandarizadas de análisis • Control de calidad de los laboratorios

Gran parte de lo anterior ha sido descrito en la bibliografía especializada. Se recomiendan para estos efectos los manuales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater en su última edición.

VI. MODELOS MÁS IMPLEMENTADOS EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE CALIDAD DEL AGUA

De los múltiples modelos existentes, se presentan a continuación en forma resumida algunas de sus características y capacidades de aquellos más versátiles y conocidos en el ámbito mundial.

Modelo QUAL2K

Entradas del Modelo

Este modelo requiere un cierto grado de experiencia en modelación de parte del usuario. A este se debe proveer más de 100 entradas individuales, algunas de las cuales requieren un juicio de estimación considerable (USEPA, 1995). Los datos de entrada se pueden agrupar en tres categorías: un sistema de corriente / río, variables globales y funciones forzadas. El primer grupo, datos de entrada para el sistema de corriente / río, describe el sistema de corriente en un formato que el modelo puede leer; el grupo variables globales o generales, describe los variables generales de simulación tales como unidades, tipo de simulación, componentes de la calidad del agua y algunas características físicas de la cuenca; por ultimo el grupo de funciones forzadas que son las entradas definidas por el usuario y que conducen al sistema que es modelado. Los

valores de los datos de entrada dependen del tipo de simulación y del número de las variables de estado usadas. La Tabla 5 (USEPA, 1995) posee listas de todos los parámetros e información de las entradas necesarias para simular las 15 variables para condiciones de estado constante y dinámicas de un modelo.

Tabla 5: Información y parámetros para condiciones de estado constantes y dinámicas de un modelo (USEPA, 1995).

Clase	Parámetros
Información geográfica e información temporal	Número de alcances, longitud del alcance, localizaciones del ensamblaje, cabecera o no, latitud, longitud, meridiano estándar, elevación de la cuenca, período de simulación dentro del calendario del año.
Variables generales	Estado constante o simulaciones casi dinámicas, unidades, tipo de simulación que se realizará (simulación, análisis de incertidumbre, tipos regulares de análisis de incertidumbre), variables que se modelarán, número máximo de interacciones, en caso de simulaciones dinámicas: tiempo, longitud total de la simulación, incremento del tiempo para los informes intermedios de los perfiles de concentración.
Compartimiento y características del flujo	Tamaño del compartimiento y tipo de flujo, coeficiente de dispersión, coeficiente y exponente de velocidad para el cálculo de flujo, el coeficiente y exponente del flujo para el cálculo de la profundidad de la corriente, coeficiente de Manning, incremento del afluente por cada alcance, las características de la calidad del agua de las fuentes puntuales.
Datos climáticos para la limitación ligera	Coficiente de atenuación de polvo, factor de radiación solar, factor promedio de luz, criterio para promedio de luz de radiación solar, fracción cubierta por nubes, radiación solar absoluta.
Datos climáticos para los cálculos de la temperatura	Dos coeficientes de evaporación, temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, presión barométrica, velocidad del viento.
Temperatura	Coficiente de la temperatura para: Decaimiento de DBO, fijación de DBO, re-aireación, decaimiento de N orgánico, fijación de N orgánico, decaimiento del amoníaco, fuente del amoníaco, decaimiento del nitrito, decaimiento orgánico de P, fijación de P orgánico, fuente de P disuelto, crecimiento de las lagas, respiración algal, fijación algal, decaimiento de coliformes y tres componentes no-conservadores arbitrarios, temperatura inicial de cada alcance.

Continuación...

Ciclo de Nitrógeno (valores por alcance).	El coeficiente de inhibición del amoníaco, coeficiente de la inhibición del nitrito, contenido del nitrógeno en el coeficiente de las algas, tasa para el nitrógeno amoníacal, tasa de inhibición nitrógeno orgánico en el bentos, tasa constante para la hidrólisis del nitrógeno orgánico a amoníaco, coeficiente de inhibición de nitrificación, valores iniciales por el alcance para los cuatro componentes del ciclo de nitrógeno y en la cabecera.
Ciclo del fósforo (valores por alcance).	Tasa de fijación de fósforo orgánico, tasa constante para el decaimiento del fósforo orgánico a fósforo disuelto, valores iniciales por cada alcance para los cuatro componentes del ciclo del fósforo.
Algas	Tasa de crecimiento máxima específica de las algas, tasa de respiración, constante de saturación media del nitrógeno de Michaelis-Menten, constante de saturación media del fósforo de Michaelis-Menten, constante de saturación media para la luz de Michaelis-Menten, coeficiente de extinción de luz no algal, coeficiente self-shading lineal, coeficiente self-shading no lineal, factor algal para el amoníaco, tasa de fijación algal, cociente de preferencia de clorofila a biomasa algal, fracción de la biomasa algal que es nitrógeno, fracción de la biomasa algal que es fósforo, coeficiente de saturación de luz, valores por alcance y en las cabeceras, tipos de funciones para limitación de luz y alimento.
Oxígeno disuelto	Producción de O ₂ por unidad de coeficiente de crecimiento algal, respuesta de O ₂ por unidad de reparación algal, demanda de oxígeno béntica, tasa constante de desoxigenación carbonosa, criterio por tipo de re-aireación, calculo de tipo de re-aireación, coeficiente de re-aireación y coeficiente y exponente asociado, oxígeno disuelto inicial por alcance y en la cabecera.
DBO	Tasa de pérdida de DBO debida a fijación, valor de DBO inicial por alcance y cabecera, tipo de DBO: BOD ₅ o DBO ultima carbonacea.
Constituyentes arbitrarios no constitutivos	Tasa de fijación de constituyentes arbitrarios no conservativos, coeficiente de decaimiento de constituyentes arbitrarios no conservativos.
Coliformes	Tasa de mortalidad de coliformes.

Salidas del Modelo

El modelo QUAL2K produce tres tipos de tablas; hidráulicas, coeficiente de reacción y calidad de agua. La versión Windows (USEPA, 1995) incluye un análisis gráfico de los resultados del modelo.

El modelo ha sido extensamente probado, calibrado y usado en muchas partes del mundo (Chapra, 1997). La siguiente tabla presenta algo del uso del QUAL2K.

Tabla 6: Lugares donde se ha probado el modelo QUAL2K (Chapra ,1997).

Área	Referencia
Georgia / Florida	Brown and Barnwell (1987).
Florida	Tsihrintzis et al., (1995).
Carolina del Norte	Little and Williams(1992).
Iowa	Tillman (1992).
New Jersey	Van Orden and Uchrin (1993); Melching and Yoon (1996).
Chile	Dussailant et al., (1997).
Italia	Odell (1992).
España	Cubillo et al., (1992); Suárez et al., (1995).
Slovenia	Drolc and Odell (1996).
India	Ghosh and McBean (1998).
Taiwan	Lo and Chen (1991).
Ghana	Larmie et al., (1989).
África del Sur	CSIR (1996).

En la tabla 7 (Camacho, L. A et al., 2001) se describen algunos de los parámetros que este modelo analiza en su aplicación a problemas de calidad del agua.

Tabla 7: Parámetros que maneja el modelo QUAL2K (Camacho L. A et al 2001).

ABREVIACIÓN	DESCRIPCION
DescC	Tasa de descomposición rápida de la materia orgánica
HydroIN	Hidrólisis de nitrógeno orgánico
NitrifA	Tasa de nitrificación de amonio
DenitN	Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas).
HydroIP	Hidrólisis de fósforo orgánico
HidroIPOM	Hidrólisis de la materia orgánica particulada
Velasent	Velocidad de la materia orgánica particulada

Modelo RIOCAL

Descripción General del RIOCAL

RIOCAL es un modelo desarrollado por el Centro Panamericano de ingeniería Sanitaria y ciencias del ambiente que va orientado a la simulación unidimensional de los procesos que intervienen en el balance de oxígeno disuelto en un sistema hídrico en estado de equilibrio (*Steady-State*).

Para simular el comportamiento de cualquier sustancia Riocal utiliza dos fases (Vargas, B. J. y Zambrano, B. M., 1999):

- **Balance hidrológico:** se realiza, en todos los elementos del sistema, un balance de los caudales que entran y salen, y una vez que estos son conocidos, se determina el resto de las variables hidráulicas de interés.
- **Simulación de calidad de aguas:** se aplican las relaciones de balance de masa en todos los elementos del sistema y posteriormente se aplican las ecuaciones que describen las variaciones de los distintos indicadores modelados.

Los resultados de la modelación se pueden ver en forma tabular, en un archivo de texto o en forma gráfica, siendo posible en este último caso que se pueda ver en un esquema del sistema simulado, distancia contra cualquier parámetro hidráulico simulado, o bien, distancia contra algún indicador de calidad de aguas (Vargas, B. J. y Zambrano. B. M., 1999).

Sistema Físico que el Modelo puede Simular

Los autores anteriores mencionan que RIOCAL puede simular, en condiciones de equilibrio, cualquier sistema hídrico unidimensional de tipo convergente, esto es, cursos de agua donde sólo las variaciones longitudinales son significativas y que se unen en algunos puntos, formando un nuevo curso. Pero nunca que un río se divida y de origen a dos o más nuevos ríos. El modelo sólo acepta que hasta dos cursos secundarios converjan en un mismo punto.

Datos Ingresados por el Usuario

Una vez que el usuario ha definido la geometría del sistema a modelar, es necesario que proporcione los datos que pueden ser en términos de caudal, indicadores de calidad de agua o datos climatológicos (Vargas, B. J. y Zambrano B. M., 1999). Riocal incorpora cuatro tipos de funciones de cargas forzadas por el usuario:

1. **Entradas de cabecera:** representan las condiciones de contorno de aguas arriba, en el inicio del sistema.
2. **Fuentes o extracciones puntuales:** estas cargas se usan para representar las descargas puntuales y pérdidas del sistema, las descargas puntuales pueden representar ya sea descargas crudas o tratadas. Si se usan descargas crudas, se puede simular el efecto del tratamiento aplicando un factor específico de remoción de DBO_c para cada descarga puntual.
3. **Flujo distribuido:** esta característica puede ser usada para simular los efectos de descargas no puntuales al sistema, o los efectos de pérdidas de caudal debidas a infiltración o percolación.
4. **Concentración de borde aguas abajo** (opcional): Riocal puede incorporar en el algoritmo de solución las condiciones de borde aguas abajo conocidas para cualquier indicador de calidad de aguas a simular.

Requisitos del Sistema y Limitaciones del Modelo

Los requisitos mínimos para el funcionamiento de RIOCAL son:

- PC 486 (recomendado Pentium 166 o superior).
- Sistema operativo Windows 95 o superior
- 8 MB de memoria RAM (32 recomendado).
- Resolución de pantalla: 600x800
- Color de alta densidad (16 bits).

Riocal puede ser usado para simular en estado estable (Vargas, B. J. y Zambrano. B. M., 1999), cualquier combinación de los siguientes parámetros o grupos de parámetros:

- Temperatura.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).
- Oxígeno Disuelto (OD).

Modelo CORMIX

El sistema experto de la zona de mezcla Cornell (CORMIX), desarrollado por la USEPA se puede utilizar para el análisis, predicción, diseño de las descargas tóxicas o convencionales acuosas del agente contaminador en diversos cuerpos de aguas. CORMIX clasifica ímpetu y la fluctuación de la descarga en lo

referente a condiciones de límite para predecir exactamente comportamiento que se mezcla (<http://www.cee.odu.edu/model/cormix.php>).

CORMIX esta basado en un modelo IBM-PC-DOS, de aproximadamente 2000 reglas, ligadas a un modelo hidrodinámico de simulación. CORMIX fue desarrollado para las predicciones de calidad del agua de la USEPA, y se puede aplicar a una amplia gama de problemas y condiciones ambientales que se extienden de los estuarios, océanos profundos, ríos bajos y rápidos, hasta los depósitos estratificados.

CORMIX tiene 3 subsistemas que dependen de las características de la descarga de la fuente (<http://www.cee.odu.edu/model/cormix.php>). Estos subsistemas se enumeran abajo:

1. CORMIX-1. Salidas de puerto sumergido

El sub-sistema CORMIX-1 trata con descargas portuarias variables sumergidas en corrientes ambientales no estratificadas y estratificadas de agua, tales como ríos, lagos, estuarios y aguas costeras. Esto incluye los casos de limitación de descargas no fluctuantes y de condiciones ambientales estancadas. A la vez también se ocupa de condiciones de flujo de corriente de marea y de perfiles de corrientes ambientales de densidades arbitrarias.

2. CORMIX-2. Salida sumergida de puerto múltiple

El subsistema CORMIX-2 trata con descargas fluctuantes de difusores de puertos múltiples sumergidos en ambientes y casos similares restrictivos al Cormix-1.

3. CORMIX-3. Descargas variables superficiales

El subsistema CORMIX3 trata con descargas superficiales fluctuantes en ambientes equivalentes a cormix-1. Sin embargo, es utilizado en descargas positivamente cambiantes o no cambiantes.

En la dirección mencionada anteriormente establece que mientras que CORMIX al principio fue desarrollado bajo la suposición de condiciones estables ambientales, la versión actual también permite el uso de condiciones ambientales sumamente inestables, tales como condiciones de invasión de marea, en las cuales la recirculación transitoria y los efectos de desarrollo del agente contaminador pueden ocurrir en cualquier momento.

Dos modelos de post-tratamiento se ligan al sistema de CORMIX, estos se pueden utilizar de forma independiente. Uno de ellos es el CORJET (The Cornell Buoyant Jet Integral Model) para el análisis detallado del comportamiento de contaminantes en pequeñas extensiones, y el FFLOCATR (The Far-Field Plume Locator) para la delineación en grandes extensiones de la

pluma contaminante de las descargas en ambientes no uniformes del río o del estuario (<http://www.cee.odu.edu/model/cormix.php>).

Modelo WASP

Descripción de Wasp6/5

El sistema WASP6/5 fue desarrollado por la USEPA y consiste en dos programas independientes de computadora; DYNHYD6/5 y WASP6/5, que pueden funcionar en forma conjunta o por separado. El programa hidrodinámico, DYNHYD6/5, simula el movimiento del agua mientras que el programa de calidad de agua (http://www.cee.odu.edu/model/wasp_desc.php), WASP6/5, simula el movimiento y la interacción de agentes contaminantes dentro de la misma. Mientras que DYNHYD6/5 es entregado con WASP6/5, otros programas hidrodinámicos también han sido unidos al WASP, como el RIVMOD que maneja el flujo inestable en ríos unidimensionales y el SED3D maneja el flujo tridimensional inestable de lagos y estuarios.

WASP6/5 es suministrado de dos modelos cinéticos secundarios para simular dos de las principales clases de los problemas de la calidad del agua (http://www.cee.odu.edu/model/wasp_desc.php): contaminación convencional (oxígeno, DBO, alimentos) y contaminación tóxica (sustancias químicas orgánicas, metales y sedimento).

Modelo Básico de Calidad del Agua

Las ecuaciones que soluciona el WASP6/5 se basan en el principio clave de la conservación de la masa (http://www.cee.odu.edu/model/wasp_desc.php). Para realizar estos cálculos de equilibrio total de masa, el usuario debe de proporcionar a WASP6/5 de datos de entrada que definen siete características importantes:

1. Simulación y control de la salida.
2. Segmentación del modelo.
3. Transporte de advección y dispersión.
4. Concentraciones divisorias.
5. Punto y cargas difusas de gasto de la fuente.
6. Parámetros cinéticos, constantes y funciones de tiempo.
7. Concentraciones iniciales.

Red del Modelo

La red modelo, es un sistema de volúmenes o segmentos de control dilatados, que juntos representan la configuración física del cuerpo del agua (http://www.cee.odu.edu/model/wasp_desc.php). Como se ilustra en el diagrama de abajo, la red puede subdividir el cuerpo del agua lateral, vertical y longitudinalmente. Los segmentos bénticos pueden ser incluidos junto con segmentos de la columna del agua.

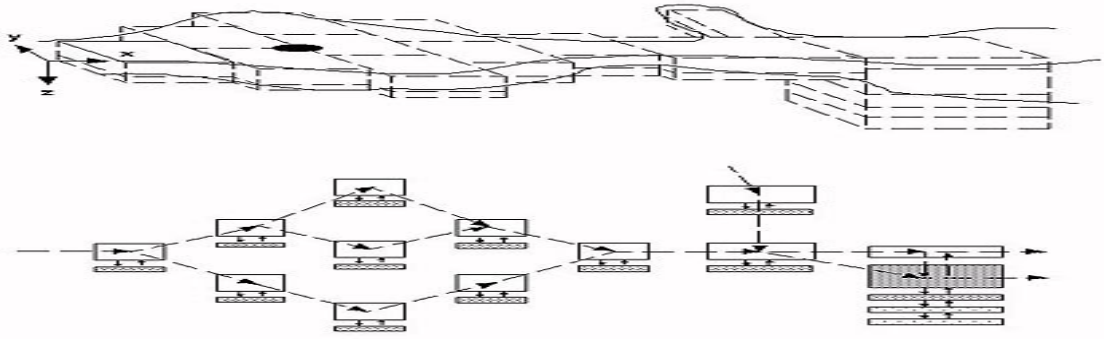


Figura 3: Red del cuerpo de agua del modelo WASP.

Modelo SWMM

El modelo de gerencia de aguas de lluvia (SWMM), fue desarrollado para la EPA entre 1969 y 1971 (Metcalf y Eddy, 1971) y era originalmente el primer modelo comprensivo de su tipo para el análisis de salida urbana. El mantenimiento y mejoras a SWMM condujeron a la versión 2 de 1975, la versión 3 en 1981, la versión 4 (Huber y Dickinson, 1988; Roesner et al., 1988). Y ahora la versión 4.3 de SWMM (Martín, J. L., 1993), es la última edición de este comprensivo modelo de computadora para el análisis de problemas de cantidad y calidad de agua asociados con salidas urbanas.

Limitaciones del Modelo

Las limitaciones técnicas incluyen: la carencia de encaminamiento de calidad sub-superficial (se utiliza una concentración constante), ninguna interacción de procesos de la calidad (aparte de la adsorción), la dificultad en la simulación de

procesos de calidad de pantanos (a menos que se pueda ser presentada como procesos de almacenaje), y una rutina débil de deposición en el bloque del transporte (Huber, 1986; Donigian and Huber, 1991).

El impedimento más grande para modelar es el uso de la interfaz de usuario, con su carencia de menús y de salidas gráficas.

Requisito de Datos

Los requisitos de datos incluyen área, impermeabilidad, la pendiente, la rugosidad del terreno, la anchura (un factor de la forma), el almacenaje por depresión y parámetros de infiltración tanto para las ecuaciones de Horton y las de Green-Ampt para hasta 100 sub-captaciones. (El número de sub-captaciones, tubos, etcétera, es variable dependiendo de la compilación). Dependiendo del objetivo de simulación los requisitos de datos de entrada pueden ir de mínimos a extensos.

Salida del Modelo

La salida básica de SWMM consiste en hidrográficos y gráficas de contaminantes (concentración contra tiempo) en cualquier punto deseado en el sistema de drenaje. La salida de calidad adicional incluye cargas, la identificación de la fuente, la continuidad, los residuos (ejemplo lodo), y otros parámetros. La mayoría de las salidas son tabulares. Los gráficos del

microordenador tienen la capacidad para ser exportados a las hojas de cálculo u otros paquetes de programas gráficos y para software para pre y post-tratamiento. El último incluye las opciones para los diagramas dinámicos de la línea hidráulica del grado producida por el bloque de Extran. Los acoplamientos también han estado preparados a sistemas de información geográfica (Huber et al., 1991; Curtis y Huber, 1993).

Modelo EPANET

EPANET fue desarrollado por la USEPA y es un programa de computadora que realiza la simulación extendida del período de comportamiento de calidad hidráulica y del agua dentro de redes de tuberías a presión (<http://www.cee.odu.edu/model/epanet.php>). Una red puede consistir en tuberías, nodos (uniones de tubos), bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o depósitos.

EPANET se puede utilizar para diversas clases de usos en análisis de sistemas de distribución. Probando el diseño del programa, la calibración hidráulica modela: el análisis residual, la pérdida desinfectante y el estudio de formación de los sub-productos, estos son algunos ejemplos. EPANET puede ayudar a evaluar estrategias y alternativas para mejorar calidad del agua en todas las partes de un sistema (<http://www.cee.odu.edu/model/epanet.php>).

El paquete de EPANET contiene dos módulos de programa, bajo DOS y Windows.

El analizador de la calidad del agua de EPANET puede:

- Modelar el movimiento de un material no reactivo a través de la red, en un cierto plazo.
- Modelar el movimiento y el destino de un material reactivo, como crece (por ejemplo, un sub-producto de desinfección) o se decae (por ejemplo, el cloro residual) con el tiempo.
- Modelar la edad del agua a través de una red.
- Rastrear el porcentaje de flujo de un nodo dado que alcanza al resto de los nodos con el tiempo.
- Modelar las reacciones tanto en el flujo a granel y en las paredes de las tuberías.
- Permitir el crecimiento de reacciones de decaimiento que procedan hasta una concentración restrictiva.
- Emplear los coeficientes globales de reacción que se pueden modificar sobre una base del tubo.
- Tener en cuenta la concentración que varía con el tiempo de las entradas de masas cualquier posición en la red.
- Modelar los tanques de almacenamiento siendo como cualquier mezcla completa, flujo de pistón, o reactores de dos compartimientos.

EPANET fue desarrollado por la División de Abastecimiento y Recursos de Agua (antes la División de la Investigación del Agua Potable) del Laboratorio Nacional de Investigación de Agencia de Riesgo de EU y la Agencia de Protección del Medio Ambiente.

Modelo MIKE 11

Es el modelo de flujo dinámico unidimensional más avanzado, potente y exhaustivo que permite la simulación de flujos hidrodinámicos, calidad de agua y transporte de sedimentos en estuarios, ríos, sistemas de irrigación, canales y otros cuerpos de agua(http://www.bossintl.co.uk/es/html/mike11_overview.html).

Características de MIKE 11 en el lado de los datos de entrada / edición:

- Entrada de datos / edición gráfica.
- Entrada de datos / edición simultánea de varios tipos de datos.
- Utilidad de copiar y pegar para importar y exportar directamente desde programas de cálculos.
- Ventanas tabulares y gráficas totalmente integradas.
- Importación de datos de red fluvial y topográfica desde archivos de texto ASCII.
- Disposiciones definidas por el usuario de todas las ventanas gráficas (colores, configuración de fuentes, líneas, tipos de marcadores, etcétera).

En el lado de los resultados se dispone de utilidades de presentación avanzadas, incluyendo:

- Gráficos planos horizontales coloreados para los datos del sistema y los resultados.
- Presentaciones animadas de resultados en trazado horizontal, vertical y series temporales.
- Animación sincronizada de resultados.
- Presentación de series temporales externas.
- Utilidad de pegar y copiar tablas de resultados o presentaciones de gráficos dentro de otras aplicaciones (hojas de cálculo, procesadores de texto u otros) para exportar.

Modelo HSCTM2D

El modelo hidrodinámico HSCTM2D desarrollado por la USEPA, es un elemento finito que modela sistemas de flujos de aguas bidimensionales verticalmente integradas, flujos superficiales de aguas (típicamente hidrodinámica de estuario), el transporte de sedimento y el transporte de contaminantes (<http://www.cee.odu.edu/model/hsctm2d.php>).

El sistema de este modelo consiste en dos módulos, uno para modelar lo hidrodinámico (HYDRO2D) y el otro para modelar del transporte del sedimento y contaminante (CS2D).

HYDRO2D soluciona las ecuaciones de movimiento y continuidad para los componentes nodales de promedios de las velocidades horizontales y de las profundidades de los flujos. CS2D soluciona la ecuación de advección-dispersión para las concentraciones nodales verticalmente integradas de sedimentos suspendidos, de los contaminantes disueltos y absorbidos, y de las elevaciones superficiales.

HSCTM-2D puede funcionar en un modo desacoplado o semi-acoplado. En el modo desacoplado, HYDRO2D funciona por separado de CS2D. En el modo semi-acoplado, HYDRO2D y CS2D funcionan de la siguiente manera. Primero, HYDRO2D calcula el campo del flujo de la corriente para el paso del tiempo. En segundo lugar, el campo de flujo predicho se utiliza en CS2D para calcular el transporte de sedimentos y contaminantes durante el mismo paso del tiempo. HYDRO2D funciona para controlar el paso del flujo y para explicar si predijo cambios en las profundidades de flujo debido a la erosión y la deposición.

Modelo RIOS IV.

Modelo matemático de calidad del agua de estado permanente y unidimensional para oxígeno disuelto, DBO carbonácea y nitrogenada, coliformes y análisis simplificados de sustancias tóxicas conservativas y no

conservativas en ríos. Tiene la capacidad de analizar situaciones anaeróbicas. Permite interacción con el usuario y tiene capacidad gráfica. Elaborado por el CEPIS (1995).

El programa RIOS 4.0 se puede aplicar para el análisis en el estado permanente de Oxígeno Disuelto en ríos donde la dispersión no es significativa en comparación con el transporte advectivo. Se puede evaluar el efecto de fuentes puntuales o dispersas de contaminantes en relación a la Demanda Bioquímica de Oxígeno carbonácea (DBO_C) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno nitrogenada (DBO_N). También se incluyen fuentes puntuales de déficit de oxígeno disuelto, demanda de oxígeno disuelto de los sedimentos, fotosíntesis y respiración de las algas. La característica más significativa de este modelo es su capacidad de operar en situaciones de bajos niveles de Oxígeno o en ausencia del mismo (CEPIS, 1995). Esta modificación fue introducida basándose en estudios realizados por Gundelach y Castillo, y se basa en la aseveración que aún en condiciones de bajos o nulos niveles de oxígeno disuelto se produce una degradación de la DBO_C (carbonácea) pero con cinéticas de reacción mucho más lentas.

Modelo QUAL2EU

Descripción del Modelo

Fue desarrollado inicialmente por la Oficina del Desarrollo del Agua de Texas en el año 1960. Varias versiones mejoradas del modelo fueron desarrolladas por la

EPA. El programa simula hasta 15 componentes de calidad del agua y cambios en condiciones del flujo a lo largo de la corriente calculando una serie de perfiles fijos superficiales. El equilibrio de masas determina las concentraciones de minerales conservadores, las bacterias coliformes y los componentes no conservativos en cada elemento computacional.

Además de flujos materiales, procesos principales incluidos en el equilibrio de masas, transformación de sustancias nutritivas, producción algal, demanda béntica carbonosa, aireación atmosférica, y el efecto de estos procesos en el equilibrio del oxígeno disuelto.

Análisis de Incertidumbre

Tres técnicas de análisis de incertidumbre se emplean en QUAL2E-UNCAS: análisis de la sensibilidad, análisis del error de primer orden y simulación de Monte Carlo (http://www.cee.odu.edu/model/q2_desc.php).

Modelo SWAT 2000

SWAT 2000 (Soil & Water Assessment Tool), es una herramienta del gravamen del suelo y del agua, en la cuenca de un río, o en la línea divisoria de las aguas, modelo de escala desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el Servicio Agrícola de la Investigación de la USDA (ARS). Swat 2000 fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en el agua, sedimentos y las

producciones químicas agrícolas en líneas divisorias de las aguas complejas y amplias, con tipos de suelos muy variables y con grandes cambios en sus usos.

Para satisfacer este objetivo, el modelo:

- Está basado físicamente.
- Incorpora la regresión de las ecuaciones que describen la relación entre las variables de entrada y las de salida.
- SWAT requiere la información específica sobre el tiempo, las características del suelo, topografía, vegetación y las prácticas de gerencia de la tierra que ocurren en la línea divisoria de las aguas.
- Los procesos de la comprobación se asocian al movimiento del agua, al movimiento del sedimento, al crecimiento de cosecha, al cierre de un ciclo de nutrientes, etcétera.
- La modelación se hace directamente usando los anteriores datos de entrada.

Modelo MOUSE

El modelo MOUSE es un sistema avanzado, potente y completo de modelaje de escorrentía superficial, flujo de canales abiertos, flujo en tuberías, calidad del agua y transportes de sedimentos para sistemas de drenaje urbano, y sistemas colectores de agua de lluvia y sanitarios. Desarrollado por la USEPA (http://www.bossintl.co.uk/es/html/mouse_overview.html).

Las aplicaciones más usuales del MOUSE incluyen estudios de Descarga de Redes Unitarias (DSU), Descargas de Sistemas Separativos (DSS), Desarrollo y Análisis de Complejos Esquemas de Control en Tiempo Real (RTC), diseño de nuevas escenarios de desarrollo, procedimientos reguladores admisibles y análisis y diagnóstico de sistemas colectores sanitarios y de aguas de lluvia (Mouse 2002).

Proporciona varios módulos, tales como calidad de escorrentía superficial, transporte de sedimentos por tuberías, dispersión-advención por tuberías y calidad del agua por tubo para la simulación del transporte de sedimentos y calidad del agua tanto para escorrentía superficial como para sistemas de alcantarillado (http://www.bossintl.co.uk/es/html/mouse_overview.html)

Modelo QUAL2E

QUAL2E es un comprensivo y versátil modelo de calidad de agua, desarrollado por Masch y Texas Water Development Board y Asociados en 1970. El modelo está estructurado con un programa principal y 51 diferentes subrutinas, está escrito en ANSI FORTRAN 77. Es un modelo unidimensional, que puede usarse en condiciones de régimen permanente, como no permanente. Puede simular, numerosos parámetros de calidad de aguas, como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, temperatura, nitrógeno orgánico, amonio, nitrito, nitrato, fósforo orgánico, fósforo disuelto, clorofila a, coliformes, etcétera.

La ecuación básica que resuelve QUAL2E, es la ecuación de transporte de masa advección-dispersión unidimensional, la cual es numéricamente integrada, en espacio y tiempo, para cada constituyente de calidad de agua. Esta ecuación incluye los efectos de advección, dispersión, dilución, reacción e interacción de constituyentes, fuentes y sumideros. QUAL2E asume, que la corriente de agua está en régimen permanente (Vargas, B. J., 2005).

Modelo SMPTOX3

SMPTOX3 fue desarrollado por la USEPA, es un modelo que proporciona el acceso fácil a una técnica para calcular la columna de agua y las concentraciones de sustancias tóxicas que son el resultado de las descargas en punto de corrientes y ríos (<http://www.cee.odu.edu/model/smptox3.php>). Predice concentraciones de agentes contaminantes disueltos, de partículas de sedimentos de la columna de agua y sólidos suspendidos totales.

SMPTOX3 proporciona un programa microordenador fácil de usar para realizar el modelado de sustancias tóxicas. Este contiene editor de pantalla completa para facilitar la entrada y la modificación de las mismas. Las rutinas separadas de simulación son proporcionadas por la calibración del modelo, la asignación de la carga y el análisis de la sensibilidad. Cada rutina proporciona los gráficos de alta resolución de los resultados modelados durante la operación del

programa. Las entradas y los resultados se pueden también dirigir a una impresora (<http://www.cee.odu.edu/model/smptox3.php>).

Modelo HSPF

Programa de Simulación Hidrológica de lenguaje FORTRAN (HSPF), es un paquete comprensivo de programas para la simulación hidrológica de la línea divisoria de aguas y de la calidad de la misma, tanto para agentes contaminantes orgánicos convencionales y tóxicos desarrollado por la USEPA; además permite la simulación integrada de los contaminantes del suelo con interacciones de corriente hidráulica y químicas del sedimento (<http://www.cee.odu.edu/model/hspf.php>).

HSPF incorpora la escala de la línea divisoria de las aguas (*ARM* y *NPS*), donde los modelos tienen un marco del análisis que incluye el transporte y destino en canales de corriente dimensionales. El resultado de esta simulación es una historia del tiempo del caudal de salida, de la carga del sedimento, las sustancias nutritivas y las concentraciones del pesticida, con una historia del tiempo también de cantidad y calidad del agua en cualquier punto en una línea divisoria de agua. HSPF simula tres tipos de sedimentos (arena, limo y arcilla) además de una sola sustancia química orgánica y de la transformación de las mismas([http://www.cee.odu.edu/ model/hspf.php](http://www.cee.odu.edu/model/hspf.php)).

Modelo MINTEQA2

MINTEQA2 es un modelo geoquímico de especificación del equilibrio para los sistemas diluidos acuosos, se puede utilizar para calcular la composición de equilibrio de soluciones diluidas en el laboratorio o sistemas naturales acuáticos. También puede ser utilizado para calcular la distribución de masas entre las fases sólidas disueltas, absorbidas, y múltiples sólidos bajo una variedad de condiciones (<http://www.cee.odu.edu/model/minteq.php>).

MINTEQA2 es acompañado por un programa interactivo PRODEFA2. Con PRODEFA2, se puede crear archivos de entrada en MINTEQA2. Con este el usuario puede tener acceso a una base de datos termodinámicos MINTEQA2 y puede definir a otra especie acuosa, sólida, y/o de la adsorción no presente en la base de datos.

Modelo SWRRBWQ

SWRRBWQ para Windows fue desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente (EPA) en junio de 1993, incluye cinco componentes principales: tiempo, hidrología, sedimentación, sustancias nutritivas y pesticidas. Los procesos considerados incluyen la salida superficial, el flujo de vuelta, la filtración, la evapotranspiración, pérdidas de transmisión, el almacenaje del depósito y la sedimentación (<http://www.cee.odu.edu/model/swrrbwq.php>).

La producción del sedimento esta basada en la ecuación universal de pérdida de suelo (MUSLE). Las producciones nutritivas fueron tomadas del modelo EPIC. El componente del modelo del pesticida es una modificación del CREAMS. SWRRBWQ tiene cálculos simultáneos para cada sub-cuenca, y rutas de agua, sedimentos, sustancias nutritivas y pesticidas desde las salidas de la sub-cuenca hasta la salida de la cuenca.

Modelo SPAM.

Modelo matemático de calidad de agua de estado permanente, segmentos finitos y multidimensional para oxígeno disuelto, DBO carbonácea y nitrogenada, coliformes y análisis simplificados de sustancias tóxicas conservativas y no conservativas en aguas superficiales. Elaborado por Hydroqual, Mahwah, N. J. (1984). Estados Unidos.

Modelo MULTI-SMP.

Modelo matemático de calidad de agua de estado permanente y unidimensional para oxígeno disuelto, DBO carbonácea y nitrogenada y toxicidad amoniacal en ríos. Este modelo es fácil de usar, permite interacción con el usuario y tiene capacidad gráfica. Elaborado por LTI, Limno-Tech, Inc. (1992) para la EPA.

Modelo CLARK.

Modelo matemático para calcular el aporte de nutrientes a lagos, basado en los datos de campo de los tributarios. El programa es interactivo. Elaborado por Sonzogny, W. C. et al. (1978). Great Lakes Tributary Loadings, EPA y U.S. Task D. Committee.

Modelo WASTOX.

Modelo matemático variable en tiempo y multidimensional para la evaluación de sustancias tóxicas en aguas superficiales. Elaborado por el Manhattan College (1994), Nueva York, N.Y., Estados Unidos, para la EPA.

Modelo LACAT.

Modelo matemático simplificado para la evaluación de estados tróficos y el manejo de macro-nutrientes en lagos / embalses cálidos tropicales. El programa es interactivo con el usuario. Elaborado por el CEPIS (1990).

Otros Modelos

Otros Modelos que destacan son: DOSAG, QUAL I, PIONEER I, RECEIV, WODA, QUAL II, MIKE21, DUFLOW, QUASAR, FGETS, LC50, OXYREF, PLUMES, VPLUME, PRZM3, SMPTOX3, WTP, HEC-1, HEC-2, FEMWATER, PATRIOTA, etcétera.

VII. CONCLUSIONES

Hoy en día la contaminación del agua es uno de los principales factores que afecta al sector humano y ambiental. Por ello es necesario implementar medidas que ayuden a controlar esta problemática que va en progreso; una alternativa es el uso de los modelos de calidad del agua.

Para llevar a cabo la implementación y utilización de un modelo únicamente se debe de cumplir con las características específicas de aplicación, que básicamente depende de la calidad de análisis que se llevara acabo en el lugar, del tipo de información que se disponga de las características del afluente y del alcance de la información que se desea obtener. En la aplicación de modelos de calidad de aguas, también se requiere conocer muy bien la variabilidad temporal del sistema natural a estudiar, de tal forma que permita identificar de una manera clara y precisa los efectos de contaminantes de una nueva actividad. Los modelos son relaciones que nos permiten conceptualizar un sistema complejo para facilitar su estudio, los cuales son fáciles de manejar, la mayoría no necesita de experiencia para su manejo y aplicación; en sus desventajas son muy sensibles a errores impropriamente incluidos ya sea al formular el modelo, al manejar parámetros o datos de entrada erróneos para echar a correr el mismo, otra gran desventaja es de que existen modelos muy completos capaz de simular

innumerables situaciones, pero que solo puede calibrarse para una situación particular.

Por otro lado, la utilización de los modelos de calidad del agua están tomando gran importancia a nivel mundial ya que, sirven como herramientas elementales en la planificación en el aspecto de calidad de aguas, así como también para predecir el impacto de planes de ingeniería para el control y manejo del medio ambiente.

VIII. LITERATURA CITADA

Aceves, M. L. A., 1991. Recreación y calidad del agua en el cauce los "CHOROS" de Arteaga, Coah. UAAAN. Pp 5-7.

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).
Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/hspf.php>

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).
Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/epanet.php>

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).
Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/cormix.php>

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA),
1993. Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/swrrbwq.php>

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).
Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/smptox3.php>

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los estados Unidos (USEPA).
Citado en http://www.cee.odu.edu/model/wasp_desc.php

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).
Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/hsctm2d.ph>

Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).
Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/minteq.php>

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater en su última edición. Citado en <http://lauca.usach.cl/ima/orientac.htm>

Camacho, L. A. Díaz G. M; Giraldo E. 2001. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia, A. A. Contribución al desarrollo de un modelo de calidad del agua apropiado para evaluar alternativas de saneamiento del río bogota. Citado en <http://www.cirf.org/kyoto/colombia2.pdf>

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS ,1990). Contaminación del agua. Modelos matemáticos de calidad del agua. En <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaca/e/modemate.html>

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). En <http://www.cepis.ops-oms.org/>

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 1995). Contaminación del agua. Modelos matemáticos de calidad del agua. En <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaca/e/modemate.html>

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), 1994. Orientación metodológica para la medición de variables ambientales; basada en manual de evaluación de impacto ambiental. Citado en la siguiente dirección <http://lauca.usach.cl/ima/orientac.html>

Curtis, T. G., and W. C., Huber. 1993, SWMM AML -| An ARC/INFO Processor for the Storm Water Management Model (SWMM), Proc. 1993 runoff quantity and quality modeling conference, Reno, NV, (NTIS, in press), USEPA, Athens, GA, 30605. En <http://www.cee.edu/model/swmm.php>

Chapra, S. C., 1997. Surface water-quality modelling. The McGraw-Hill companies. Inc., New., En http://nchp.epf.fr/article.php3?id_article=198

División de Abastecimiento y Recursos de Agua (antes la División de la Investigación del Agua Potable) del Laboratorio Nacional de Investigación de Agencia de Riesgo de EU y la Agencia de Protección del Medio Ambiente. Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/epanet.php>

Donigian, A.S., Jr. and W. C., Huber. 1991. Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-Urban Areas, EPA/600/3-91/039, USEPA, Athens, GA, 30605. En <http://www.cee.odu.edu/model/swmm.php>

Gundelach y Castillo. Características principales del modelo RIOS 4. Pp. 12
Citado en <http://www.snet.gob.sv/Documentos/dac/documento.pdf>

Henry, S., 1984. Criterios para seleccionar modelos matemáticos de calidad de agua. Citado en <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt021.html>

Henry S., 1983. Resumen del segundo encuentro del proyecto regional. Desarrollo.html de metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos, CEPIS/OPS. Citado en la dirección <http://www.cepis.opsoms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt021>

Huber, W. C., 1986. Deterministic Modeling of Urban Runoff Quality, In: H. C., Torno et. al., (eds.) Urban Runoff Pollution, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Urban Runoff Pollution, Montpellier, France. Springer-Verlag, New York, Series G: Ecological Sciences, 10:167-242. Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/swmm.php>

Huber, W. C., and Dickinson R. E.,1988. Storm Water Management Model, version 4, User's Manual, EPA/600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS), USEPA, Athens, GA, 30605. Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/swmm.php>

Huber, W. C., Zollo A. F., Tarbox T. W., and J. P., Heaney (1991), Integration of the SWMM Runoff Block with ARC/INFO and AutoCAD: A Case Study. Final Report to Foster-Wheeler Enviresponse, Inc. and U.S. EPA, Edison, NJ, Contract VN1-320-420000, from Dept. of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville. Citado en la dirección <http://www.cee.odu.edu/model/swmm.php>

Hydroqual, Mahwah, N. J., 1984. Contaminación del agua. Modelos de calidad del agua. En <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaca/e/modemate.html>

Jeff A., SWAT (Soil & Water Assessment Tool), para el Servicio Agrícola de la Investigación de la USDA. En http://nchp.epf.fr/article.php3?id_article=179

Loucks, D. P. 1982. Water resource systems planning and analysis. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. Citado en <http://eias.atalca.cl/Seminario/Resumenes/Jvargas.doc>

LTI, Limno-Tech, Inc. Para la EPA. 1992. Contaminación del agua. Modelos de calidad del agua. En <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaca/e/modemate.html>

Martin, J. L.,1993. Modification of the Storm Water Management Model's (SWMM's) Transport Submodel for Creation of a Hydrodynamic Linkage to the Water Analysis Simulation Program (WASP), Report to Camp, Dresser and McKee, Inc. by AScl Corp., Athens, GA, 30605. En <http://www.cee.odu.edu/model/swmm.php>

Manhattan College (1994), Nueva York, N. Y., Estados Unidos, para la EPA. Contaminación del agua. Modelos matemáticos de calidad del agua. En <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaca/e/modemate.html>

Masch, F. D; Texas Water Development Board y asociados en 1970. Citado por Vargas B. J., en <http://eias.entalca.cl/Seminario/Resumenes/Jvargas.doc>

Metcalf and Eddy, Inc., 1971. University of Florida, and water resources Engineers, Inc. Storm Water Management Model, vol. I. Final report, 11024DOC07/71 (NTIS PB-203289), USEPA, Washington, DC, 20460. En <http://www.cee.odu.edu/model/swmm.php>

MOUSE 2002. Breve versión introducción y tutorial. Citado en <http://www.dhi-es.com/software/URBANO/MOUSEIntroAndTutorial2002sp.pdf>

Oficina del Desarrollo del Agua de Texas.1960. Citado en http://www.cee.odu.edu/model/q2_desc.php

Sifuentes, L. C. A., 1993. Monitoreo de calidad del agua e impacto ambiental en el río San Rodrigo en el Noreste de Coah. UAAAN. Pp 9.

Somlyódy, L., 1978. Calidad del agua en espacios naturales: Impacto y Modelación. En <http://eias.entalca.cl/Seminario/Resumenes/Jvargas.doc>

Sonzogny, W. C., et al., (1978). Great Lakes Tributary Loadings, EPA y U.S. Task D. Committee. Contaminación del agua. Modelos matemáticos de calidad del agua. En <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaca/e/modemate.html>

Streeter, H. W. and Phelps E. B., 1925. A study of the pollution and natural purification of the Ohio river. Vol. III, Public Health Bulletin, N° 146, U.S. Public Health Service. Citado por Vargas B. J., Citado en <http://eias.utralca.cl/Seminario/Resumenes/Jvargas.doc>

Roesner, L. A., Aldrich, J. A., and R. E., Dickinson, (1988), Storm Water Management Model, version 4, user's manual: extran addendum, EPA/600/3-88/001b (NTIS PB88-236658/AS), USEPA, Athens, GA, 30605. Citado en <http://www.cee.odu.edu/model/swmm.php>

Thomann R., and Mueller J., 1987. Principles of water quality modeling and control. Harper & Row, Publishers, New York. Citado en <http://eias.utralca.cl/Seminario/Resumenes/Jvargas.doc>

USEPA. 1995. Qual2K Windows interface user's guide, tomado de la página WEB oficial de la EPA, modelo QUAL2K. Citado <http://www.cirf.org/kyoto/colombia2.pdf>

Vargas, B. J., 2005. El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción. Calidad del agua en espacios naturales: impacto y modelación. En <http://eias.utralca.cl/Seminario/Resumenes/Jvargas.doc>

Vargas, B. J., y Zambrano, B. M., 1999. Congreso de ingeniería sanitaria y ambiental, Antofagasta. Riocal , un modelo unidimensional de calidad de aguas en ríos. En <http://www.cepis.ops-oms.org/>

http://www.bossintl.co.uk/es/html/mike11_overview.html

http://www.bossintl.co.uk/html/hec-2_overview.html

http://www.bossintl.co.uk/es/html/mouse_overview.html

<http://www.snet.gob.sv/Documentos/dac/documento.pdf>