



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CUERPO ACADEMICO DE GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

**“GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE
DE MORELIA, MUNICIPIO DE CHUCÁNDIRO”**

**TESIS APOYADA POR EL CONSEJO ESTATAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEL ESTADO DE MICHOACAN**

**PRESENTADA POR:
RUBÉN BERMÚDEZ ORTUÑO**

**ASESOR:
SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE
Dra. Ingeniería de caminos, canales y puertos**



Morelia Michoacán, mayo de 2013

Dedicatoria

A dios, por la salud y las bendiciones brindadas a lo largo de mi vida.

A mis padres:

Ramón Bermúdez Duarte y M. Evelia Ortuño Duarte, quienes son el más grande ejemplo de perseverancia, sabiduría, motivación y amor que pude tener en esta maravillosa vida que me brindaron. Solo queda agradecer eternamente el apoyo incondicional ya que desde que emprendi este proyecto nunca midieron esfuerzos para brindarme lo necesario.

A mi hermana:

Por su cariño, comprensión y el gran apoyo que sabe brindarme que sin duda es ilimitado.

A mis padrinos:

Francisco Zendejas y Lilia Ortuño Quienes han confiado en mi, y me han regalado su amor y cariño en cada momento convivido.

Eloy Arzate y Jova Núñez quienes sin conocerme me abrieron las puertas de su casa y con ello de su corazón.

Enrique Peñaloza y Josefina Andaya por su cariño y confianza brindados.

A toda mi familia:

Que siempre estan ahí con su apoyo y cariño.

A mis amigos:

Quienes los contemplo como la familia que sin tener ningún lazo consanguineo estan ahí siempre que los he necesitado siempre sendo incondicionales en sus actos.

Agradecimientos

Al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del estado de Michoacán por la beca otorgada.

A los profesores que contribuyeron en mi desarrollo profesional con sus consejos y conocimientos transmitidos.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por todo la paciencia, el apoyo y la confianza que me otorgo.

A los amigos, que tengo a bien agradecer a dios por conocerlos y haber convivido con ellos en los años de mi formación profesional. Deseando que cada vez sea mas fuerte la amistad que nos une.

Al ing. Juan Rangel Camarena jefe del departamento de calidad del agua, por su disposición y apoyo.

Al Ing. Guillermo Eugenio Pérez-Negrón, Gerente Operativo de la Comisión de Cuenca del Lago de Cuitzeo, por su disposición y apoyo.

Al Doc. Javier Paredes Arquiola por su tiempo y atención brindada durante el desarrollo de esta tesis.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	2
2.1 Modelos de simulación convencional.....	2
2.2 Modelos enfocados a ríos	3
2.3 Modelos enfocados en lagos y embalses	3
2.4 Modelos enfocados en ríos y lagos.....	4
2.5 Modelación tipo caja	4
2.6 Modelos en conjunto de cantidad y calidad del agua	4
3. MODELO GESCAL	6
3.1 FORMULACIÓN DEL MODELO.....	6
3.1.1 MODELACIÓN EN CONDUCCIONES.....	7
3.1.1.1 Formulación general para conducciones.	7
3.1.1.2 Hidráulica de Ríos.	8
3.1.1.3 Dispersión longitudinal.....	9
3.1.1.4 Casos particulares.	9
3.2 MODELACIÓN EN EMBALSES.	10
3.2.1 Formulación general para embalses.	10
3.2.2 Hidráulica de Embalses.	11
3.2.3 Dispersión entre capas.	13
3.2.4 Casos particulares.....	13
3.3 LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RESTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA.	14
3.4 CONSTITUYENTES Y PROCESOS MODELADOS.	16
3.4.1 Temperatura.....	16
3.4.1.1 Método balance térmico.	16
3.4.1.2 Método de la linearización	19
3.4.1.3 Temperatura como dato de entrada.	19
3.4.2 Contaminantes arbitrarios.....	19
3.4.3 Materia orgánica, oxígeno disuelto y procesos de eutrofización.....	20
3.4.3.1 Materia Orgánica Carbonosa.	21
3.4.3.2 Nitrógeno orgánico.....	22
3.4.3.3 Amonio.....	22
3.4.3.4 Nitritos y Nitratos.	22
3.4.3.5 Oxígeno disuelto.....	23

3.5 Entorno AQUATOOL	24
3.6 Condicionantes del modelo SIMGES impuestas sobre GESCAL.....	26
4. CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA	27
4.1 Localización	27
4.2 Climatología	27
4.3 Corrientes superficiales	28
4.4 Almacenamientos superficiales	29
4.5 Río Grande de Morelia.	30
5. Aplicación del modelo GESCAL en el modelo de gestión de la cuenca en estudio.	31
5.1 Secciones tipo.....	33
5.2 Desarrollo del modelo GESCAL	35
5.2.1 Modelo SIMGES	35
5.2.2 Restructuración del modelo SIMGES	36
5.2.3 Características solicitadas por el modelo GESCAL	36
5.3 Calibración	42
5.4 Análisis de los resultados obtenidos.....	43
5.4.1 Análisis del DBO vs Oxígeno disuelto.....	45
5.4.1.1 Oxígeno disuelto a través del río grande	48
5.4.1.2 Análisis del DBO simulado respecto a los mapas nacionales del DBO de la CONAGUA.....	49
5.4.2 Análisis del Amonio vs Nitratos.....	50
5.4.2.1 Amonio y Nitratos a través del río grande.....	54
5.5 Sólidos Suspendidos Totales	56
5.6 Series completas de los distintos sitios de monitoreo.....	58
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	71
6.1 CONCLUSIONES.....	71
6.2 RECOMENDACIONES	72
7. Referencias	75

1. Introducción

La contaminación es la alteración nociva del estado natural de un medio como consecuencia de la introducción de un agente totalmente ajeno a ese medio (contaminante), causando inestabilidad, desorden, daño o malestar en un ecosistema, en el medio físico o en un ser vivo.

El crecimiento poblacional en las ciudades tiende a desarrollar una doble presión sobre los ríos, acuíferos y lagos primero para su abastecimiento con alimentos, como la demanda crece más rápido que la oferta de productos los cuerpos acuáticos son sobre explotados para cubrir la demanda. Como se requiere una rápida maduración del cultivo los campos son inundados por fertilizantes cada vez más potentes y como consecuencia son más difíciles de degradar.

Las calidades de las aguas son las que definen el uso que se les puede dar como ser destinadas para riego o uso humano ya sea en recreación (deportes acuáticos) o consumo.

Al lugar al que las aguas residuales van a para ya sea por disposición de las autoridades o por comodidad son los cuerpos acuáticos (ríos, lagos, mares) los cuales son responsables de diluir los residuos y demás contaminantes industriales presentes en el agua. El proceso natural denominado autodepuración ya no es suficiente para mitigar los efectos producidos por la industrialización y demografía urbana en crecimiento y a esto se le une la falta de tratamiento a las aguas antes de ser descargadas a los cuerpos receptores dando como resultado contaminaciones severas en los cuerpos acuáticos que en ocasiones se convierten en zonas donde solo proliferan las bacterias.

En México se han desarrollado normas como es el caso de la norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal y la NOM-001-SEMARNAT-1996 la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Estos límites en ocasiones no son cumplidos y como consecuencia se da el paso de cantidades mayores a las que podía manejar el cuerpo receptor elevando el grado de contaminación.

En lo que respecta a gestión del agua es imprescindible en nuestros días contar con la calidad del agua para en conjunto desarrollar el manejo más óptimo posible del vital líquido.

Con lo que un software (modelo) donde se modele la gestión y la calidad del agua es ideal. Observar la evolución de la contaminación a través de los años es esencial para implementar medidas donde se observa la mayor concentración de contaminantes. Analizando que es lo que sucedería si ciertos contaminantes dejaran de entrar y con qué medidas se podrían disminuir los presentes.

2. Antecedentes

Se realizó un breve análisis de los modelos que solo analizan la gestión de recursos hídricos y sus clasificaciones, después los modelos que analizan la calidad del recurso hídrico, y por ultimo algunos modelos en donde se analizan los dos casos gestión y calidad.

Se les denomina modelos a las herramientas informáticas que permiten la modelación.

-Los modelos que analizan gestión de sistemas de recursos hídricos se pueden diferenciar en modelos de simulación convencional los cuales no presentan ningún algoritmo de programación para resolver los problemas de distribución del recurso hídrico por lo que se deben indicar manualmente el modo de reparto del líquido entre los distintos elementos, y por ultimo encontramos a los basados en redes de flujo los cuales si incorporan algún algoritmo matemático para la resolución de los problemas presentados, por lo que tienen mayor aceptación y son más usados que los anteriores.

2.1 Modelos de simulación convencional

HEC-5 –Simulation of flood control and conservationsystems- el cual es uno de los de mayor uso este modelo permite la introducción de reglas de operación y la consideración de diferentes tipos de demandas.

Mike-Basin (DHI, 2000) es un modelo de simulación a escala diaria de la gestión de sistemas con múltiples embalses que dispone de una interfaz gráfica interactiva para la edición de datos y resultados, desarrollado en el entorno de GIS ArcView.

MITSIM (Strzepeky García, 1989) permite evaluar el rendimiento económico e hidrológico de una cuenca considerando diferentes tipos de demandas.

-Modelos basados en redes de flujo

MODSIM (Labadie, 1992), simula el almacenamiento y la transferencia de agua entre embalses, ríos y conducciones puede realizar simulaciones a escala mensual o semanal y la función objetivo está dada en términos de costos, y los repartos y almacenamientos de agua se hacen según una escala de prioridades dada por el modelador.

SIMGES (Andreu et al., 1992) desarrollado en el departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, está englobado en el Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) AQUATOOL. Realiza simulación de embalses, conducciones, centrales hidroeléctricas y los acuíferos pero en relación con el modelo AQUIVAL el cual se encuentra en el Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) AQUATOOL y se encarga de la modelación de acuíferos. Más adelante se dará la descripción de AQUATOOL.

El modelo GESCAL se encuentra muy relacionado con el modelo SIMGES ya que usa los resultados obtenidos por el modelo SIMGES para realizar la simulación de la calidad del recurso hídrico.

En lo que conlleva a la modelación de la calidad del agua superficial podemos encontrar una gran gama de modelos para su análisis los cuales una forma de clasificarlos es de acuerdo al sistema natural para el cual fueron diseñados. Existen modelos para zonas de mezclas; ríos, lagos, estuarios, zonas costeras, humedales, y cuenca. Y también los modelos tipo “caja” o “elemento” en donde el sistema natural se define mediante un conjunto de elementos o cajas relacionadas. Estas han sido usadas para todo tipo de sistemas naturales pero en lo que compete a ríos y lagos se prefieren las herramientas diseñadas específicamente para ese sistema natural.

La división de los modelos en los que analizan específicamente a los ríos, lagos o embalses y los que tienen capacidad de análisis conjunto que pueden analizar lagos-ríos y los modelos que se basan en la modelación tipo caja los cuales modelan cualquier sistema natural.

2.2 Modelos enfocados a ríos

QUAL2E-UNCAS (Brown and Barnell, 1987) fue desarrollado por la agencia de protección del medioambiente de Estados Unidos (EPA). Permite la modelación de los contaminantes arbitrarios, temperatura, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, nutrientes y fitoplancton. Considera los procesos de advección y dispersión, asume la hipótesis de unidimensionalidad. Tiene la posibilidad de calcular el incremento de caudal necesario para alcanzar un especificado nivel de oxígeno disuelto, también permite la incorporación de varios afluentes, vertidos y tomas de agua. Presenta algunas limitaciones como el no permitir la modelación de situaciones hidráulicas o de vertidos dinámicos y los sedimentos se han considerado de una forma excesivamente simplista.

MIKE-11 (DHL, 1992) es una de las herramientas más modernas desarrollado por el DanishHydraulicInstitute. Este modelo surgió como de análisis hidráulico pero se le incorporó un potente modelo de calidad. El modelo hidráulico admite diferentes elementos estructurales tales como compuertas, pasos inferiores, etc. El modelo de calidad permite modelar diferentes constituyentes como OD, DBO₅, zooplancton, nitrógeno, fitoplancton, temperatura, fósforo, metales pesados, coliformes y sedimentos cohesivos y no cohesivos.

2.3 Modelos enfocados en lagos y embalses

CE-QUALW-2 creado por el US Army Corps of Engineers (USACE) permite la modelación bidimensional de los embalses con lo que se puede modelar longitudinal y verticalmente todos los constituyentes. Permite la modelación de la temperatura, DBO, nutrientes, OD, algas, pH, alcalinidad, sólidos suspendidos, coliformes fecales e hierro.

BETTER Box ExchangeTransport Temperatura EcologyReservoir(Bender et al., 1990) permite la modelación bidimensional en lagos de la temperatura, OD, nutrientes, pH y biomasa de algas. Permite tener en cuenta la estratificación térmica así como la influencia de los procesos de advección de entradas y salidas de caudal.

2.4 Modelos enfocados en ríos y lagos

HEC5Q (USACE-HEC. 1986a) realiza la simulación de la gestión de sistemas de recursos hídricos, está enfocado en una modelación de la calidad convencional.

WORRS (USACE-HEC, 1986) permite la modelación de la calidad en sistemas de recursos hídricos en tramos de ríos y hasta diez embalses. Se enfoca en una modelación de aspectos ecológicos, dentro de sus constituyentes a modelar se encuentran la temperatura, tres tipos de peces, insectos acuáticos, animales bénticos, zooplancton, algas bénticas, detritus, sedimentos orgánicos, nutrientes, etc.

2.5 Modelación tipo caja

Suelen ser utilizadas en sistemas complejos como pueden ser los estuarios, lagos o ríos en donde interese estudiar la bidimensionalidad o tridimensionalidad del problema.

WASP (WaterQualityAnalysisSimulationProgram) permite analizar sistemas en uno, dos o tres dimensiones. Cada elemento puede definirse como hipolimnion, epilimnion, capa béntica superior o inferior. Este programa está compuesto por dos submodelos EUTRO y TOXI5. EUTRO, el EUTRO está diseñado para el análisis de la eutrofización y de la modelación de varios niveles de complejidad para los nutrientes, fitoplancton, materia orgánica carbonosa y oxígeno disuelto. Y el TOXI5 permite la modelación de hasta tres compuestos químicos con relación o no entre ellos y procesos en los sedimentos. En lo que respecta a la parte hidráulica puede ser suministrada como dato o ser modelada con el programa DYNHYD5 (Ambrose et al., 1993c). En lo que respecta a los constituyentes que pueden modelarse están, temperatura, salinidad, coliformes, nitrógeno, DBO, algas, fósforo, sílice, OD, sedimentos cohesivos y no cohesivos, arbitrarios, pesticidas y compuestos tóxicos.

EXAMSIL permite la modelación de compuestos sintéticos, orgánicos incluyendo pesticidas, materiales industriales, etc. Y tiene la capacidad de simular hasta tres dimensiones y realiza simulaciones estacionarias tanto como dinámicas.

2.6 Modelos en conjunto de cantidad y calidad del agua

Solo se analizó el modelo HEC-5 que presenta un amplio uso.

HEC-5 –Simulation of flood control and conservation systems- fue desarrollado en 1973, comprende las siguientes características en lo que respecta a la gestión del agua.

- Permite la modelación de la calidad en embalses y tramos de ríos.
- El programa asigna a las demandas teniendo en cuenta reglas de operación asignadas por el usuario y mediante el balance hídrico de la cuenca.
- Considera múltiples propósitos como el abastecimiento de agua, la generación hidroeléctrica, calidad del agua, y el impacto económico de daños por avenidas.

En lo que conlleva a la parte de calidad, resaltan algunas características como:

- Tiene la capacidad de modelar en horas, días y meses dependiendo de la escala de simulación.

- Los datos necesarios también comprenden las características físicas de los embalses y los tramos de río así como series de datos meteorológicos.
- Permite estimar la combinación de aperturas de embalses para obtener la calidad del agua requerida aguas abajo.
- Estima la combinación de caudales de dilución necesarios para obtener una calidad requerida en un punto aguas abajo del embalse.

Se contempla como uno de los mejores modelos para tratar la modelación conjunta presenta inconvenientes a la hora de su aplicación.

- La modelación de la temperatura es indispensable lo que requiere series de datos meteorológicos en diversos puntos de la cuenca. Esto es un grave problema para las cuencas medias o grandes ya que no se suele disponer de series de datos meteorológicos en todos los puntos necesarios.
- La introducción de los datos pasa por la modificación de archivos de texto sin que exista una interfaz de ayuda, esto con la cantidad de datos a introducir hace que el proceso de creación de un sistema sea muy laborioso.
- No considera, dentro de los elementos a modelar, los recursos subterráneos. Esto es un inconveniente debido a que pueden afectar la calidad de algunos tramos de ríos.

3. MODELO GESCAL

El programa GESCAL es una herramienta para la modelación de la calidad del agua a escala de cuenca. Se ha implementado sobre el Sistema Soporte Decisión (SSD) AQUATOOL (Andreu et al. 1996) y en su nueva versión AquaToolDMA (Solera et al. 2007) para la planificación y gestión de recursos hídricos. De este modo la aplicación conjunta permitirá, con una sola herramienta modelar la gestión y la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos.

No intenta representar la evolución de la calidad del agua frente a eventos puntuales, sino, reflejar la evolución espacio temporal de la calidad del agua en los sistemas modelados.

Este programa permite la modelación de los constituyentes convencionales teniendo en cuenta la sencillez a la hora de modelar de una manera coherente con la escala de trabajo pero sin perder de vista la representatividad ni capacidad de modelación.

Aunque el programa permite, la modelación de la calidad dl agua, en sistemas de recursos completos no deja de ser muy interesante la aplicación a pequeña escala como lo son los tramos de un río en específico o el análisis de un embalse. Esto gracias a la completa consideración de procesos que se realizan en su formulación.

Esta herramienta permite el desarrollo de modelos de calidad del agua en modelos de simulación de sistemas de recursos hídricos anteriormente desarrollados en el modelo SIMGES.

3.1 FORMULACIÓN DEL MODELO.

Un aspecto importante por señalar es que aunque la calidad del agua se ha considerado en todos los posibles elementos de modelación de la simulación de los procesos físicos – químicos y biológicos que intervienen en la calidad se considera exclusivamente en los elementos de tramos de río (o canales) y embalses (o lagos). Una característica a resaltar es que esta herramienta posee la capacidad de modelar tanto embalses como tramos de río en una sola aplicación y de una forma integrada con el resto de elementos del sistema. Por lo que la calidad en un tramo de río o en un embalse no sólo depende de los procesos que se producen sino también de la gestión del sistema y de la calidad de los diferentes elementos que tengan relación con el elemento en cuestión.

Está herramienta posee la capacidad de modelar los constituyentes:

- Temperatura.
- Contaminantes arbitrarios
- Oxígeno disuelto y Materia Orgánica Carbonosa (MOC).
- Ciclo del nitrógeno: nitrógeno orgánico, amonio y nitratos. Y su afección sobre el oxígeno disuelto.
- Eutrofización: ciclo del nitrógeno, fitoplancton (como clorofila-a, fósforo orgánico e inorgánico; y su afección sobre el oxígeno disuelto.

3.1.1 MODELACIÓN EN CONDUCCIONES.

El elemento conducción concebido en el modelo de simulación SIMGES sirve para modelar cualquier curso de agua, ya sea un tramo de río, un canal o cualquier otro tipo de conducción. En el programa GESCAL se modela el tramo de río bajo las siguientes características:

- Se considera unidimensional con homogeneidad de concentraciones tanto en el eje vertical como en el transversal.
- Estado estacionario: Para cada mes se estima las condiciones estacionarias de calidad del agua que alcanzaría el tramo de río si las condiciones se mantuvieran constantes dentro de ese intervalo de tiempo.
- Se consideran los procesos de advección y dispersión.
- En la modelación de los tramos de río también se tiene en cuenta la posible relación hidráulica con los acuíferos ya sea por aporte de agua desde el acuífero o por filtración del río.
- Permite la introducción de elementos de contaminación difusa.
- La hidráulica se puede modelar tanto por relaciones potenciales como por la ecuación de Manning asumiendo sección trapezoidal.
- Los vertidos puntuales se consideran en los nudos.

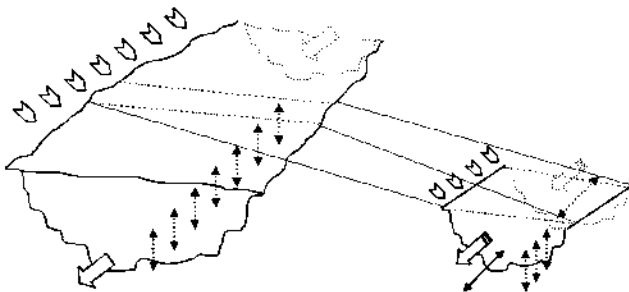


Figura 1. Esquema de modelación de las conducciones.

3.1.1.1 Formulación general para conducciones.

Independientemente del constituyente que se esté modelando la ecuación diferencial que se resuelve para simular la evolución de la calidad del agua en el tramo de río es la misma y viene definida por el siguiente balance de materia:

$$0 = \frac{dy}{dx} \left(E \frac{dC}{dx} \right) - \frac{d(uC)}{dx} + \frac{S_d + C_e q_e - C q_s + \sum W_i}{V} \quad (1)$$

En donde: E representa la dispersión ($\text{m}^2 \text{día}^{-1}$); C la concentración del constituyente (mg/l); C_e la concentración del constituyente en el acuífero al que está conectado el río (mg/l); x la distancia a lo largo del tramo de río (m); u la velocidad (m día^{-1}); V el volumen de la masa de agua (m^3); q_e es el caudal que aporta el acuífero ($\text{m}^3 \text{día}^{-1}$); q_s es el posible caudal filtrante al acuífero ($\text{m}^3 \text{día}^{-1}$); S_d cantidad de masa aportada de forma difusa al tramo de río (gr/día). $\sum W_i$ (M) representa el conjunto

de procesos que eliminan o aportan materia al elemento. Este término depende del constituyente que se esté modelando y se explica para cada caso más adelante.

3.1.1.2 Hidráulica de Ríos.

Bajo la hipótesis de unidimensionalidad en ríos es necesario establecer un modelo hidráulico que relacione los caudales circulantes con la velocidad, profundidad y ancho del río. Para el establecimiento de esta relación se dispone de dos métodos. El primero, desarrollado por Leopold and Maddock (1953) establece relaciones potenciales entre las distintas variables hidráulicas y el caudal:

$$U = \alpha_1 Q^{\beta_1} \quad (2)$$

$$h = \alpha_2 Q^{\beta_2} \quad (3)$$

$$b = \alpha_3 Q^{\beta_3} \quad (4)$$

Donde u representa la velocidad (ms^{-1}); Q es el caudal circulante (m^3s^{-1}); h es el calado (m); b el ancho del río (m). Los coeficientes α_1 , β_1 , α_2 , β_2 , α_3 y β_3 son parámetros que se establecen de forma empírica y que por continuidad deben cumplir:

$$\alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 = 1 \quad (5)$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1 \quad (6)$$

La tabla siguiente muestra valores típicos de la literatura.

Exponente	Valor Típico	Rango
β_1	0.43	0.4-0.6
β_2	0.45	0.3-0.5

Tabla 1. Valores típicos para los coeficientes hidráulicos.

El segundo método implementado en el programa es el cálculo hidráulico por la fórmula de Manning:

$$u = \frac{R_h^{2/3} I^{1/2}}{n} \quad (7)$$

En donde: R_h (m) representa el radio hidráulico que se obtienen como el cociente entre el área mojada y el perímetro mojado. I (m/m) representa la pendiente del canal y n es el número de Manning o de rugosidad. La velocidad se obtiene en ms^{-1} .

Se considera una sección trapezoidal con lo que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$u = \frac{\left(\frac{b_o y + sy^2}{b_o + 2y\sqrt{s^2 + 1}} \right)^{2/3} I^{1/2}}{n} \quad (8)$$

Dónde: b_o representa el ancho de la solera del río (m). “ s ” es la pendiente lateral (m/m). “ y ” representa el calado (m); “ n ” es el coeficiente de Manning.

La resolución de la ecuación de Manning pasa por aplicar un método de resolución numérica por iteración. Debido a las posibles relaciones de los tramos de río con los acuíferos, el caudal no tiene por qué ser el mismo a lo largo del tramo. Por ello, asumiendo que las pérdidas o ganancias de caudal son uniformes a lo largo del tramo, las relaciones hidráulicas se resuelven para cada uno de los “segmentos” o diferenciales en los que se divide el tramo para el cálculo. Por otra parte, cabe destacar que la elección de un método u otro no es global para todos los tramos de río permitiendo aplicar un método u otro de forma discrecional sobre los tramos.

3.1.1.3 Dispersión longitudinal.

Los valores de dispersión longitudinal para cada tramo de río pueden ser introducidos directamente por el usuario o calculados a través de la expresión establecida por Fischer et. al. (1979):

$$E = 0.011 \frac{u^2 b^2}{hu^*} \quad (9)$$

Donde u^* es la velocidad gravitacional (ms^{-1}) calculada como:

$$u^* = \sqrt{ghs} \quad (10)$$

Donde g es la aceleración gravitacional (ms^{-2}) y s la pendiente del canal. Esta opción sólo puede utilizarse en caso de estar modelando el tramo de río mediante el método de Manning.

Otra opción incluida en el programa es el cálculo de la dispersión para estuarios, una fórmula para obtener valores aproximados la define Thomman (1987):

$$E = \frac{uL}{\ln(s_2/s_1)} \quad (11)$$

Dónde: L es la longitud del tramo (m), s_2 y s_1 la salinidad al final y al inicio del tramo.

3.1.1.4 Casos particulares.

En este apartado se recogen algunas situaciones en donde las concentraciones de los diferentes constituyentes modelados no se estiman resolviendo las ecuaciones diferenciales desarrolladas. Estas situaciones son las siguientes:

- Caudales inicial y final, en un tramo de río, nulos. En este caso, de un cauce seco, se asumen que las concentraciones a lo largo de todo el tramo de río son nulas.

- Caudal inicial no nulo y caudal final nulo. Este es el caso de un río que debido a filtraciones en el mismo se seca en su trayecto. En este caso, al igual que el anterior, se consideran concentraciones nulas en todo el tramo.

- Caudal inicial nulo y caudal final no nulo. Este es el caso en donde el tramo de río no le llega recurso de los elementos de agua arriba pero por estar conectado con el acuífero gana caudal en su trayecto. Para este caso se considera que las concentraciones del río son iguales a las del acuífero aportante de caudal.

3.2 MODELACIÓN EN EMBALSES.

El programa GESCAL permite la modelación de la calidad del agua en los embalses con las siguientes características:

- Se ha concebido la posibilidad de modelarlos en dos capas representando el epilimnion y el hipolimnion o como un sólo elemento de mezcla completa. Esta consideración puede ser variable según el mes de simulación.
- En los embalses se establece, de forma variable mensualmente, la cota de la termoclina y el reparto de entradas y salidas entre ambas capas. Además el programa, de forma automática, estima si el volumen no es suficiente para que se produzca la estratificación térmica y la elimina.
- Cuando se modela de forma estratificada se considera la difusión entre las dos capas.
- Debido a la variabilidad del volumen de los embalses a lo largo del tiempo se realiza una estimación de la calidad de forma dinámica.
- Además se incluye, para todos los contaminantes, la posibilidad de introducir flujos de constituyentes desde el sedimento. Esto permite modelar demandas de oxígeno disuelto desde el sedimento, aporte de nutrientes, etc.

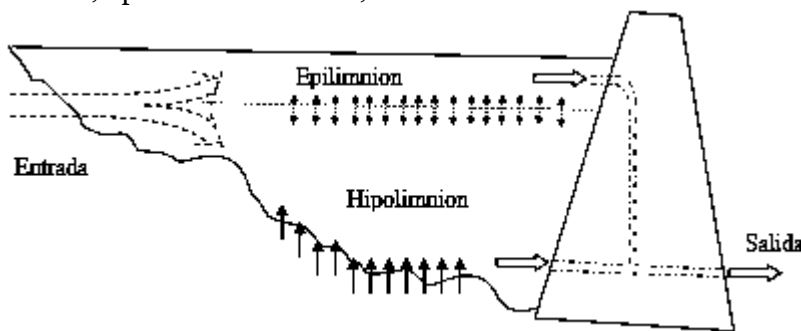


Figura 2. Esquema de la modelación de la calidad en embalses.

3.2.1 Formulación general para embalses.

La estimación de las concentraciones de cada constituyente pasa por la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales que es común para todos los constituyentes excepto un sumando. Este sistema de ecuaciones diferenciales es el siguiente:

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} + C_1 \frac{dV_1}{dt} + C_{1/2} \frac{dV}{dt} = Q_{1e}C_e - Q_{1s}C_1 + E'_{12}(C_2 - C_1) + \sum W_i \quad (12)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} + C_2 \frac{dV_2}{dt} - C_{1/2} \frac{dV}{dt} = Q_{2e}C_e - Q_{2s}C_2 + E'_{12}(C_1 - C_2) + Sed + \sum W_{i2} \quad (13)$$

Donde: El subíndice “1” representa el epilimnion o capa superior; el subíndice “2” el hipolimnion o capa inferior; V_1 y V_2 son los volúmenes de las capas (m^3); V es la ganancia o pérdida (si es negativo) de volumen del epilimnion sobre el hipolimnion debido al calentamiento o enfriamiento a lo largo del mes (m^3); C_1 y C_2 son las concentraciones de cada capa (M/V); $C_{1/2}$ es la concentración del hipolimnion si el incremento de volumen es negativo y del epilimnion si es

positivo (mg l^{-1}); C_e es la concentración del agua de entrada (mg l^{-1}); t representa la variable tiempo; Q_{1e} y Q_{2e} son las

$$E'_{12} = \frac{E_{12} A_{12}}{Z_{12}} \quad (14)$$

entradas de caudal en el intervalo de tiempo ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$); Q_{1s} y Q_{2s} son las salidas en el intervalo de tiempo ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$); S_{ed} es el flujo de constituyente desde el sedimento (M/T); W_{i1} y W_{i2} son el conjunto de procesos de degradación o aporte de constituyente en la masa de agua. E'_{12} representa el coeficiente de dispersión entre ambas capas ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$). El cual se estima de la siguiente forma:

Donde: E_{12} representa la difusión vertical ($\text{m}^2 \text{t}^{-1}$); A_{12} es el área entre las dos capas (m^2); Z_{12} es la cota de la termoclina (m).

Para el caso de una modelación como una sola celda completamente mezclada la ecuación a resolver es la siguiente:

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} + C_1 \frac{dV_1}{dt} = Q_{1e} C_e - Q_{1s} C_1 + \sum W_i \quad (15)$$

3.2.2 Hidráulica de Embalses.

Para la modelación de un embalse en dos capas, que representan el epilimnion y el hipolimnion, se necesita definir los siguientes datos:

- Tanto por uno de entrada al epilimnion. Definido de forma variable para cada mes.
- Tanto por uno de salidas desde el epilimnion. Definido de forma variable en cada mes.
- Cota de la termoclina. Definida de forma variable mes a mes.
- Evolución del coeficiente de difusión entre capas a lo largo del año (mensual).

El proceso hidráulico en los embalses consta de una serie de comprobaciones que define si la modelación se realiza como un tanque completamente mezclado o en dos capas. El proceso es el siguiente:

- Para cada mes si el dato de la cota de la termoclina es nulo el embalse se modelará como un único elemento completamente mezclado.
- Si por el contrario, la cota es superior a cero, la siguiente tarea es comprobar si hay suficiente volumen de agua para que se produzca esta estratificación. Cuando los volúmenes de embalse son muy bajos se rompe la estratificación debido a que las turbulencias inducidas por el viento, los aportes y el vaciado. Para tener en cuenta este efecto en el archivo de constantes se incluye un parámetro denominado “coeficiente de termoclina”. Este coeficiente, introducido en tanto por uno, se multiplica por la altura del embalse. Si la cota de la termoclina es inferior a ese valor entonces se considera que no hay suficiente volumen para que se produzca la estratificación por lo que ese mes se modelará como mezcla completa. Si por el contrario hay suficiente volumen para que se dé la estratificación térmica, el siguiente paso es la estimación de los volúmenes iniciales y finales de las capas del embalse. Para ello, a partir de los datos introducidos en el modelo de simulación de la curva cota – superficie – volumen del embalse se estima la altura de la termoclina y los volúmenes del epilimnion e hipolimnion tanto a inicio como a final de mes.

- Finalmente se hace la comprobación de que ninguno de los volúmenes finales sean nulos. Si se da este caso se modelará como mezcla completa.

La siguiente figura muestra un diagrama del proceso:

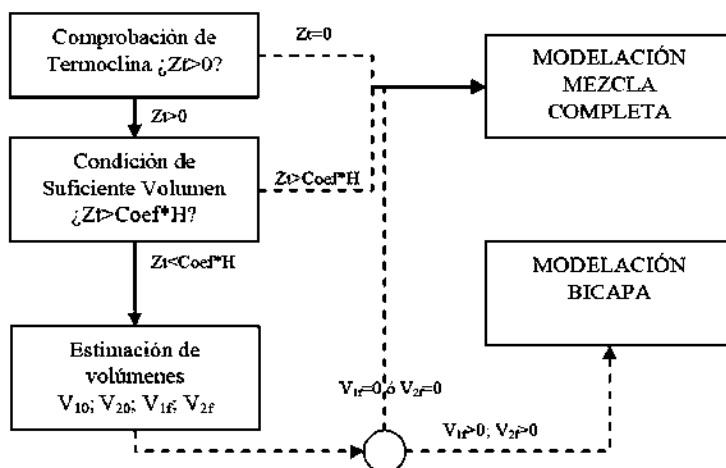


Figura 3. Estructura del cálculo hidráulico en los embalses considerada en GESCAL.

En la figura: Z_t es la altura de la termoclina definida por el usuario; Coef es el coeficiente definido como mínimo para que se produzca la estratificación; H es la profundidad del embalse; V_{10} es el volumen inicial del epilimnion; V_{20} es el volumen inicial del hipolimnion; V_{1f} es el volumen final del epilimnion; V_{2f} es el volumen final del hipolimnion.

La modelación de la calidad dentro de cada mes se realiza resolviendo las ecuaciones planteadas para cada constituyente en diferenciales de tiempo.

El volumen de embalse en cada intervalo de tiempo se obtiene asumiendo una evolución lineal entre el volumen inicial y final de cada mes.

Debido a que la modelación de la calidad del agua de los embalses se realiza de forma dinámica, en los tramos de río se consideran condiciones estacionarias. Por ello, una vez estimada la evolución de la calidad del embalse en un mes, a los tramos de río de aguas abajo se les introduce un sólo valor, correspondiente a la media de todos los valores calculados para el embalse en ese mes.

3.2.3 Dispersión entre capas.

El valor de la dispersión entre las dos capas puede ser estimado a través de la relación propuesta por Snodgrass (1974):

$$E_{12} = 7.07 * 10^{-4} H^{1.1505} \quad (16)$$

Donde H es la altura de la termoclina (m). Los coeficientes establecidos por Snodgrass pueden ser modificados en el archivo de constantes.

3.2.4 Casos particulares.

Se caracterizan como casos particulares las situaciones especiales en las que no se resuelve las ecuaciones diferenciales para obtener las concentraciones finales e intermedias del embalse en algún mes. Estas situaciones son:

- Volumen inicial y final de un mes nulos. En este caso se consideran las concentraciones finales (para epilimnion e hipolimnion) nulas. Las concentraciones parciales del epilimnion se consideran iguales a las de las posibles entradas que pudieran haber ese mes. Las concentraciones parciales del hipolimnion se consideran nulas

- Volumen inicial nulo y volumen final no nulo. En este caso, para el epilimnion tanto las concentraciones parciales como las finales se consideran iguales a las de la entrada al embalse. Para el hipolimnion ambos tipos de concentración se consideran nulos. El volumen final del embalse se consideran perteneciente al epilimnion.

- Volumen inicial no nulo y volumen final nulo. En este caso las concentraciones finales de ambas capas son nulas. Las concentraciones parciales del epilimnion se obtienen mediante un balance de masas entre la calidad del agua a inicio de mes y las de entrada. Para el hipolimnion se consideran concentraciones parciales nulas.

- El paso de un mes modelado como una sola capa al siguiente mes en donde se modelan dos capas se asumen que las dos capas comienzan el mes con la concentración final de la capa del mes anterior.

- Para el caso contrario, en el cual se pasa de un mes con modelación en dos capas a un mes con modelación con una sola capa, la concentración inicial se obtiene mediante un balance de masas entre el epilimnion y el hipolimnion.

Hay que tener en cuenta que el programa en caso de modelarse como una sola capa se considera que está modelando el epilimnion manteniendo el hipolimnion con valores nulos tanto en volumen como en concentración.

3.3 LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RESTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA.

Para el resto de elementos considerados la calidad del agua se ha tenido en cuenta de la siguiente forma:

- En los nudos se hace la hipótesis de que se produce una mezcla instantánea del agua de todos los elementos que confluyen a ese nudo: aportaciones, conducciones, retornos, centrales, vertidos puntuales, etc. Por ello se realiza un balance de masas de todas las entradas, obteniéndose la concentración de salida según la siguiente expresión:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (17)$$

Donde Q_i es el caudal de entrada de cada elemento “i”, que llegan al nudo; C_i es la concentración del constituyente a final del elemento de entrada “i”; “n” es el número de elementos que tienen como destino final ese nudo.

- La calidad de las diferentes aportaciones es una entrada al modelo. Se introduce una serie de concentraciones por constituyente a modelar y de longitud igual a las series de aportaciones modeladas en la gestión.

- La calidad del agua que llega a cada demanda se estima mediante la mezcla de la calidad del agua de salida de todas las tomas que suministran la demanda.

- La calidad del agua de entrada a una toma se corresponde con la calidad del agua del nudo donde se realiza la toma. La calidad de salida puede ser la misma o se puede definir una calidad de salida constante por algún proceso de tratamiento o contaminación que se da en la misma.

- La misma posibilidad se tiene en los retornos. La calidad del agua retornada puede ser estimada por balance de masas entre las diferentes tomas que retornan a ese elemento o una concentración definida que representa algún proceso de variación de la calidad en el retorno.

- Se asume que las centrales hidroeléctricas no realizan ningún cambio sobre la calidad del agua.

- Finalmente se asume que la calidad del agua de los acuíferos permanece constante y es definida como un dato para el modelo.

A continuación se adjunta un cuadro resumen con los procesos que se consideran en función de los diferentes elementos.

Elemento	Procesos
Tramos de río	Físicos: Advección y dispersión longitudinal. Químicos y biológicos: En función del constituyente modelado
Embalses	Físicos: Mezcla completa o estratificación en dos capas. Químicos y biológicos: En función del constituyente modelado
Aportaciones	Se introduce como dato las series temporales de concentración de entrada de cada uno de los constituyentes que se modelan.
Nudos	Se asume una mezcla completa en el nudo. Se estima la concentración de salida del nudo mediante un balance de masas.
Demandas	Se asume que la calidad del agua que llega a una demanda es producto de la mezcla de la calidad del agua de salida de cada una de sus tomas.
Tomas	Las concentraciones de salida de una toma son iguales a las del nudo de origen de la toma o introducidas como dato.
Retornos	Las concentraciones de salida de un retorno se obtienen por balance entre las diferentes tomas relacionadas con ese retorno o son introducidas como dato.
Centrales hidroeléctricas	Las concentraciones de salida son iguales a las del punto de entrada
Acuíferos	Concentraciones constantes proporcionadas como dato
	de entrada

Bombeos adicionales	Las concentraciones de salida son iguales a las del acuífero del que se bombea
Recargas Artificiales	No tienen efecto.

Tabla 2. Procesos considerados en los diferentes elementos.

3.4 CONSTITUYENTES Y PROCESOS MODELADOS.

Como se ha mencionado previamente los constituyentes que se pueden modelar son los siguientes: Temperatura, Arbitrarios, Materia Orgánica Carbonosa, Oxígeno disuelto, Nitrógeno orgánico, Amonio, Nitratos, Fitoplancton, Fósforo Orgánico y Fosfatos. Como se puede ver la herramienta se ha enfocado a la modelación de los constituyentes más comunes de aguas superficiales incluyendo procesos de eutrofización.

A continuación se explica para cada uno de ellos los procesos que se consideran y sus relaciones con el resto.

3.4.1 Temperatura.

Existen dos métodos muy utilizados para la modelación de la temperatura del agua en sistemas naturales. El primero es el método del balance en donde se plantea un balance térmico entre la atmósfera y la masa del agua. El segundo método consiste en asumir un comportamiento lineal de la masa de agua hacia un estado de equilibrio.

3.4.1.1 Método balance térmico.

Aunque inicialmente el programa Gescal no incluía este método actualización mes posteriores a diciembre de 2008 recogen esta posibilidad. Las ecuaciones en que se basa este método son las mismas que los balances de materia pero sustituyendo concentraciones (mg/l) por calor (cal/m³). Para un sistema natural el flujo neto de energía se puede estimar de la siguiente forma:

$$\phi_{net} = J_{sw} + J_{alw} - J_{wlw} - J_e + J_c \quad (18)$$

Donde: Φ_{net} es el flujo neto de calor; J_{sw} la radiación de onda corta; J_{alw} la radiación de onda larga atmosférica; J_{wlw} la radiación de onda larga emitida por la masa de agua; J_e representa la energía consumida en la evaporación; J_c la energía transmitida por convección desde o hacia el volumen de agua.

Todas las variables en (Wm⁻²). El modelo permite estimar todos los términos anteriores a partir de los datos de: temperatura del aire, humedad, radiación solar, velocidad del viento y nubosidad. Todos a excepción de la radiación solar que se introduce como un dato más. Diferentes estudios desarrollan

la estimación de los términos anteriores, siendo uno de los más conocidos y utilizados el desarrollado por Wunderlich (TVA, 1972). A continuación se explica el método utilizado para la estimación de cada uno de las componentes del balance de calor.

Flujo de radiación de onda larga que desciende de la atmósfera. Este flujo puede calcularse usando la Ley de Stefan-Boltzmann.

$$J_{alw} = \sigma (T_a + 273)^4 \varepsilon_{sky} (1 - R_L) \quad (19)$$

Donde: J_{alw} es la radiación atmosférica de onda larga. σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

$$\sigma = 11.702 \times 10^{-8} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{K}^4} \quad (20)$$

T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y R_L es el coeficiente de refracción de onda larga (adimensional con valor 0.03)

ε_{sky} representa la emisividad efectiva de la atmósfera.

$$\varepsilon_{sky} = \varepsilon_{clear} (1 + 0.17 C_L^2) \quad (21)$$

Donde C_L es la fracción de cielo cubierta de nubes.

ε_{clear} representa la emisividad de la atmósfera sin nubes. Se puede estimar por la expresión de Brunt (1932)

$$\varepsilon_{clear} = 0.6 + 0.031 \sqrt{e_a} \quad (22)$$

Finalmente, e_a es la presión vapor del aire (mmHg). La presión de vapor del aire se puede calcular con la siguiente expresión:

$$e_{air} = \frac{H_r e_{sat}}{100} \quad (23)$$

También se puede estimar a partir de la temperatura de rocío.

$$e_{air}(\text{mmHg}) = 4.596 * \exp\left(\frac{17.27 * T_d}{T_d + 237.3}\right) \quad (24)$$

Donde H_r (%) es la humedad relativa del aire, T_d es la temperatura de rocío y e_{sat} (mmHg) es la presión vapor de saturación del aire que se estima de la siguiente forma:

$$e_{sat}(\text{mmHg}) = 4.596 * \exp\left(\frac{17.27 * T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (25)$$

Donde T_a es la temperatura del aire. La radiación de onda larga que emite la superficie del agua es representada por la Ley de Stefan-Boltzmann

$$J_{wlw} = \sigma \varepsilon (T_w + 273)^4 \quad (26)$$

Donde: ε es la emisividad del agua (0.97) ya que no es un emisor perfecto. Y T_w la temperatura de la masa de agua ($^{\circ}\text{C}$).

Para condiciones naturales el calor perdido por evaporación puede ser representado por la Ley de Dalton. Entre los diferentes factores que afectan a la evaporación el viento es uno de los principales. En general es un proceso no muy entendido.

$$J_e = f(u_w) * (e_s(T_w) - e_{air}) \quad (27)$$

Donde $f(u_w)$ es una función dependiente del viento definida como

$$f(u_w) = a + b u_w^c \quad (28)$$

Donde a, b y c se pueden ajustar un valor muy común es: $a=19$, $b=0.95$ y $c=2$. Y u_w es el valor de la velocidad del viento medida a 2 metros de altura (m/s).

$e_s(T_w)$ es la presión vapor de saturación estimada para la temperatura del agua. e_{air} es la presión vapor del aire medida.

Conducción es el proceso de transferencia de calor de molécula a molécula cuando materiales a distintas temperaturas son puestos en contacto. Convección es el proceso de transferencia de calor que ocurre debido al movimiento de masa en los fluidos. Ambos pueden ocurrir en la interfase aire-agua y es posible describirlos con la expresión:

$$J_c = C_1 * f(u_w) * (T_w - T_a) \quad (29)$$

Donde c_1 es el coeficiente de Bowen (0.47 mmHg/°C). $f(u_w)$ es la misma función que para la evaporación. T_w es la temperatura de la superficie del agua.

Una vez que se ha estimado todas las componentes del balance de calor entre la atmósfera y la masa de agua se sustituye el término de fuente sumidero de las ecuaciones (1), (12) y (13) por la siguiente expresión:

$$\sum W_i = \frac{\phi_{net} * A_s}{\rho * C_{esp}} \quad (30)$$

De esta forma se asume que la densidad del agua y el calor específico son constantes y en las ecuaciones (1), (12) y (13) representativas del balance de masa en ríos y embalses las concentraciones se convierten en temperatura.

Para el caso de los tramos de río se realiza un proceso de convergencia ya que el término de calor entre la atmósfera y la masa de agua depende de la temperatura de la masa de agua.

Para los embalses cuando se modela con dos capas se estima la radiación que llega al hipolimnion asumiendo que solo penetra un 45% de la radiación de onda corta. El resto de tipos de radiación se absorben en los primeros centímetros de profundidad. Del 55% de la onda corta que penetra se asume que el agua va absorbiendo el calor en función de ley de Beer-Lambert. De esta forma la cantidad de calor que llega al hipolimnion es la siguiente:

$$H_{swh} = 0.55 H_{sw} A_s (1 - \beta) * e^{-KH_1} \quad (31)$$

Donde H_{swh} es la radiación de onda corta incidente en el hipolimnion, A_s el área de la superficie de la lámina del agua del embalse. β es la proporción de onda corta que se absorbe en la

capa más superficial del agua (se asume 0.45). K es la constante de atenuación lumínica. H_1 es la altura del epilimnion.

3.4.1.2 Método de la linearización

El segundo método que se puede utilizar en el programa para la estimación de la temperatura se basa en los trabajos de Edinger and Geyer (1965) que plantearon el flujo de calor neto como una función del intercambio de calor total y la temperatura de equilibrio, del siguiente modo:

$$\sum W_i = \phi_{net} = K_{eq} * A_s * (T_{eq} - T) \quad (32)$$

Donde: K^{eq} es el coeficiente de intercambio de calor ($Wm^{-2}C^{-1}$); T_{eq} es la temperatura de equilibrio ($^{\circ}C$), T es la temperatura del agua y A_s es el área de la superficie de la lámina de agua.

La temperatura de equilibrio se define como la temperatura que alcanzaría la masa de agua si las condiciones meteorológicas se mantuviesen constantes. Se puede obtener por métodos iterativos haciendo cero el flujo neto de energía en la ecuación 18. Esta aproximación se suele usar, o tiene validez, para escalas temporales de medio y largo plazo.

Para los embalses que se modelan en dos capas la formulación cambia de la siguiente forma. Para el epilimnion:

$$\sum W_{i_{ep}} = \phi_{net} = K_{eq} * A_s * (T_{eq} - T) - (1 - \beta) * I_o * e^{-KH_1} * A_s \quad (33)$$

Y para el hipolimnion:

$$\sum W_{i_{hip}} = (1 - \beta) * I_o * e^{-KH_1} * A_s \quad (34)$$

Donde: β es la proporción de onda corta que se absorbe en la capa más superficial del agua. I_o es la radiación solar de onda corta neta incidente en la masa de agua, K es la constante de atenuación lumínica del embalse, H_1 es la altura del epilimnion y A_s es la superficie del agua.

Con esta formulación lo que se hace es descontar la radiación de onda corta que no aporta calor al epilimnion porque atraviesa el mismo. Se asume que la atenuación de la luz sigue la ley de Beer-Lambert. En el programa todo el segundo término se introduce como un único dato denominado “radiación de onda corta en el hipolimnion”.

3.4.1.3 Temperatura como dato de entrada.

Finalmente, debido principalmente a la dificultad de disponer datos meteorológicos en toda la cuenca pero teniendo en cuenta la importancia de la temperatura en los distintos procesos se considera la posibilidad de introducir como dato y para cada elemento, tramo de río o embalse, la evolución de la temperatura dentro del año. De esta forma sin modelar la temperatura se permite tenerla en cuenta para el resto de procesos.

3.4.2 Contaminantes arbitrarios.

Para los contaminantes arbitrarios se considera un proceso de descomposición modelado mediante una cinética de primer orden y un proceso de sedimentación de la parte particulada.

$$\sum W_i = -K(\theta^{T-20})C - \frac{VS}{h}C \quad (35)$$

Donde: K representa la constante de descomposición a 20 °C (día⁻¹); θ es el coeficiente por corrección de temperatura; la sedimentación se considera mediante un parámetro VS que representa la velocidad de sedimentación del constituyente (m día⁻¹); h es el calado del río (m); C representa la concentración del contaminante en el río (mg l⁻¹).

Para considerar un contaminante como conservativo basta con considerar nulos la constante de descomposición y la velocidad de sedimentación. Por otra parte en los embalses que se modelen estratificados el término de sedimentación del epilimnion aparece como sumando para el hipolimnion.

3.4.3 Materia orgánica, oxígeno disuelto y procesos de eutrofización.

Para la modelación del oxígeno disuelto se consideran tres posibles niveles incrementales de complejidad. La opción más sencilla tiene en cuenta la modelación de la MOC y el oxígeno disuelto. El segundo grado de complejidad considera adicionalmente el ciclo del nitrógeno. Las diferentes formas consideradas son nitrógeno orgánico, amonio y nitratos. Finalmente el último nivel de complejidad permite la modelación de la MOC, el ciclo del nitrógeno, fitoplancton, el fósforo (orgánico y soluble reactivo), sus relaciones y las afecciones sobre el oxígeno disuelto.

De esta forma la modelación de la materia orgánica carbonosa queda englobada dentro de la modelación del proceso de eutrofización. Las diferentes formas de planteamiento pueden verse en los siguientes esquemas.

La siguiente figura muestra los procesos considerados en la opción de modelación básica en cuanto a oxígeno disuelto (OD) y materia orgánica carbonosa (MOC) se refiere. Nota DOS: Demanda de Oxígeno por parte del Sedimento.

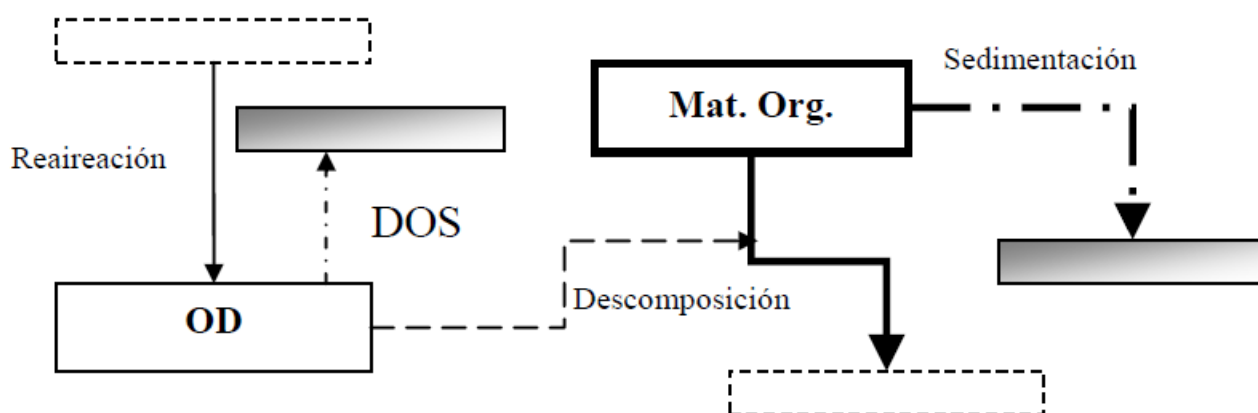


Figura 4. Procesos considerados en la hipótesis básica de modelación del oxígeno disuelto.

En la siguiente figura se muestran los procesos y constituyentes que se incluyen en la segunda opción de modelación del oxígeno disuelto, MOC y ciclo del nitrógeno.

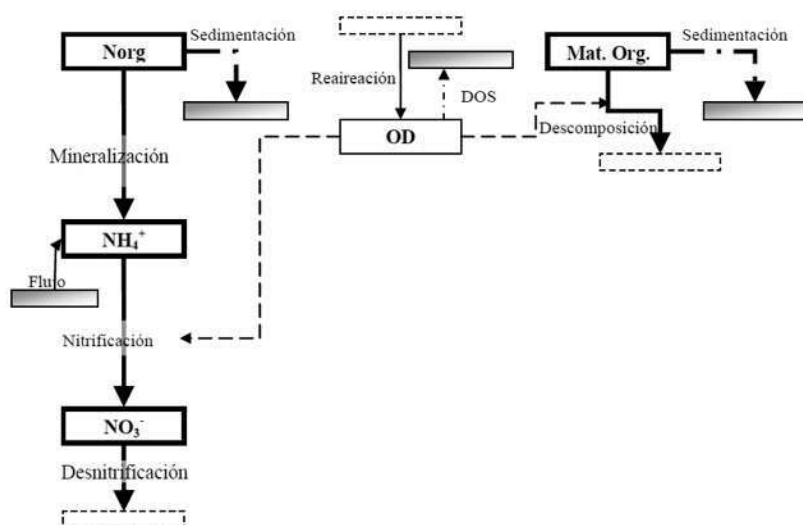


Figura 5. Procesos considerados en la modelación del oxígeno disuelto junto con el ciclo del nitrógeno

Finalmente la Figura 6 muestra todos los procesos que se tienen en cuenta con la modelación de un problema de eutrofización.

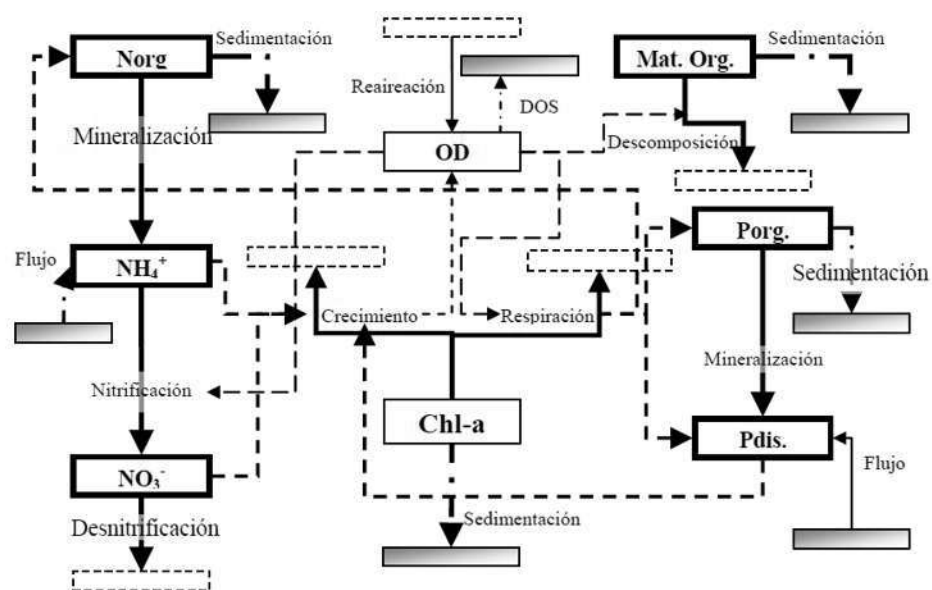


Figura 6. Procesos considerados en la modelación de un problema de eutrofización.

3.4.3.1 Materia Orgánica Carbonosa.

Para la modelación de la MOC se tiene en cuenta la degradación por microorganismos aeróbicos heterótrofos y la sedimentación de la parte particulada.

$$\sum W_i = -K_d \theta_d^{T-20} \frac{O}{O + K_{d1/2}} L - \frac{VS_L}{h} L \quad (36)$$

En donde: L es la concentración de MOC en el río (M/V); K_d es la constante de degradación (T^{-1}); θ_d es la constante por corrección de la temperatura de la constante K_d ; VS_L es la velocidad de sedimentación ($mdía^{-1}$); h es la altura de la masa de agua; T es la temperatura de la masa de agua.

3.4.3.2 Nitrógeno orgánico.

Para el nitrógeno orgánico se consideran los procesos de amonificación y sedimentación:

$$\sum W_i = -K_{Noa} \theta_{noa}^{T-20} N_o - \frac{VS_{No}}{h} N_o + r_{na} K_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A \quad (37)$$

Donde: K_{Noa} representa la constante de amonificación ($día^{-1}$); θ_{noa} representa el coeficiente de corrección de la constante anterior por temperatura; N_o es la concentración de nitrógeno orgánico en el río (MT^{-1}); VS_{NO} velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico ($mdía^{-1}$); r_{na} representa el contenido de nitrógeno en la algas (mgN/mgA). El último término sólo se considera en la opción en que se modele el fitoplancton representando la aportación debido a la respiración del mismo.

3.4.3.3 Amonio.

Los procesos considerados sobre el amonio han sido el incremento de concentración por la amonificación del nitrógeno orgánico y la disminución de la misma por la nitrificación. La nitrificación se ha considerado en su totalidad incluyendo el paso de amonio a nitritos y de estos a nitratos.

$$\sum W_i = +K_{Noa} \theta_{Knoa}^{T-20} N_o - \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{n1/2}} \right) N_a + -r_{na} F_n K'_g A \quad (38)$$

En donde: N_a representa la concentración de amonio (NH_4^+) en el río (mgL^{-1}); K_{Nai} es la constante de nitrificación de paso a nitritos ($día^{-1}$); θ_{nai} es la corrección por temperatura de la constante de nitrificación; $K_{n1/2}$ es la constante de semisaturación del nitrógeno (mgL^{-1}); O es la concentración de oxígeno disuelto. F_n representa el factor de preferencia por el amonio frente a los nitratos; r_{na} es el coeficiente estequiométrico (mgN/mgA); K'_g es la constante de crecimiento de fitoplancton teniendo en cuenta el factor corrector por temperatura, limitación de nutrientes y atenuación de la luz ($día^{-1}$); A es la concentración de clorofila-a (mgL^{-1}). El último término sólo se considera en la opción en que se modele el conjunto global. El efecto de la reducción de nitrificación por condiciones anóxicas se ha considerado corrigiendo la constante con un factor dependiente de la concentración del oxígeno disuelto y una constante de semisaturación.

3.4.3.4 Nitritos y Nitratos.

Los nitratos y nitritos se modelan de forma conjunta debido a la rapidez con que los primeros se oxidan a la forma más reducida. En el proceso de modelación de los nitratos se tiene en cuenta el

$$\sum W_i = \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{nai1/2}} \right) N_a - \left(K_{no3} \theta_{no3}^{T-20} \frac{O + K_{no31/2}}{O} \right) N_{o3} - r_{na} (1 - F_n) K'_g A \quad (39)$$

efecto del incremento de concentración por la transformación de amonio y la disminución de los mismos por posibles procesos de desnitrificación y crecimiento del fitoplancton.

Donde: N_{o3} es la concentración de nitratos ($\text{mg l}^{-1} \text{ -N}$); K_{no3} representa la constante de desnitrificación (día^{-1}); θ_{no3} es el factor de corrección de temperatura para la constante anterior; $K_{No3/2}$ representa la constante de semisaturación para tener en cuenta que la desnitrificación sólo se produce en momentos de anoxia.

3.4.3.5 Oxígeno disuelto.

Para la modelación del oxígeno disuelto se consideran los siguientes procesos:

- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de degradación de materia orgánica carbonosa.
- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de nitrificación
- Consumo de oxígeno en la respiración del fitoplancton.
- Producción del mismo en el proceso de crecimiento mediante la fotosíntesis.

$$\sum W_i = +K_a \theta_{Ka}^{T-20} (O_{sat} - O) - K_d \theta_d^{T-20} L - r_a \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{n1/2}} \right) N_a +$$

$$+ r_{ocrec} \left(K_{g \max} \theta_g^{T-20} F_l \text{Min} \left(\frac{N_{aio3}}{N_{aio3} + K_{NF1/2}}; \frac{P}{P + K_{P1/2}} \right) \right) A - r_{oresp} K_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A \quad (40)$$

Donde: O es la concentración de oxígeno disuelto en el río (mg l^{-1}); O_{sat} es la concentración de saturación de oxígeno disuelto (mg l^{-1}); K_a es la constante de reaireación (día^{-1}); θ_a se factor de corrección por temperatura; r_a representa el consumo de oxígeno por oxidación de amonio (mgO/mgN); r_{ocrec} y r_{oresp} representan el oxígeno producido y consumido por el crecimiento de las algas y la respiración.

Cada una de las líneas de la fórmula representa los términos que se añaden según la consideración de modelación que se realice: modo sencillo (sólo oxígeno disuelto y materia orgánica), modo medio en donde se incluye el ciclo del nitrógeno y modo completo en donde se incluye el efecto del fitoplancton y del fósforo.

La saturación de oxígeno disuelto se estima a partir de la temperatura del tramo de río utilizando la ecuación propuesta en (APHA, 1992)

$$\ln O_{satpo} = -139.34411 + \frac{1.575701 \cdot 10^5}{T_a} - \frac{6.642308 \cdot 10^7}{T_a^2} + \frac{1.2438 \cdot 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8.621949 \cdot 10^{11}}{T_a^4} \quad (41)$$

Donde: T_a es la temperatura del agua en grados Kelvin.

La constante de reaeración puede ser introducida como un dato u obtenerse mediante el método de Covar:

Si la H (profundidad) < 0.61 (m) entonces se utiliza la fórmula de Owens-Gibbs:

$$K_a = 5.32 \frac{u^{0.67}}{H^{1.85}} \quad (42)$$

Donde u es la velocidad en m/s. Si $H > 0.61$ (m) y $H > 3.44 * u^{2.5}$ entonces se utiliza la fórmula de O'Connor-Dobbins:

$$K_a = 3.93 \frac{u^{0.5}}{H^{1.5}} \quad (43)$$

En cualquier otro caso se utiliza la fórmula de Churchill:

$$K_a = 5.026 \frac{u}{H^{1.67}} \quad (44)$$

3.5 Entorno AQUATOOL

AQUATOOL es un sistema para la modelación de la gestión y planificación de sistemas de recursos hídricos, el cual cuenta con un modelo de optimización de cuencas, un modelo de simulación de cuencas, un modelo de simulación de acuíferos y un modelo de utilidades. Últimamente se han desarrollado postprocesadores de los modelos principales como lo son: un modelo de evolución de optimización económica y el modelo GESCAL que permite la simulación de la calidad en todo el sistema.

Los modelos principales:

- OPTIGES permite la resolución generalizada del problema de la asignación del agua en sistemas mediante la generación de una red de flujo y el uso de algoritmos de programación lineal para el cálculo de la asignación óptima de recursos. Realiza la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo.
- SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, donde se disponen de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. La simulación se efectúa a nivel mensual. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas. La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de

operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

- AQUIVAL (Andreu y Capilla, 1996) el cual permite el proceso y simulación de acuíferos por el método de los autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987). Este modelo permite la formulación de un modelo distribuido de simulación del flujo en un acuífero para su integración dentro de un modelo de simulación del uso conjunto desarrollado con SIMGES.
- SIMRISK este modelo está orientado a su uso en la fase de gestión a diferencia de los modelos anteriores, que se aplican en la fase de planificación.

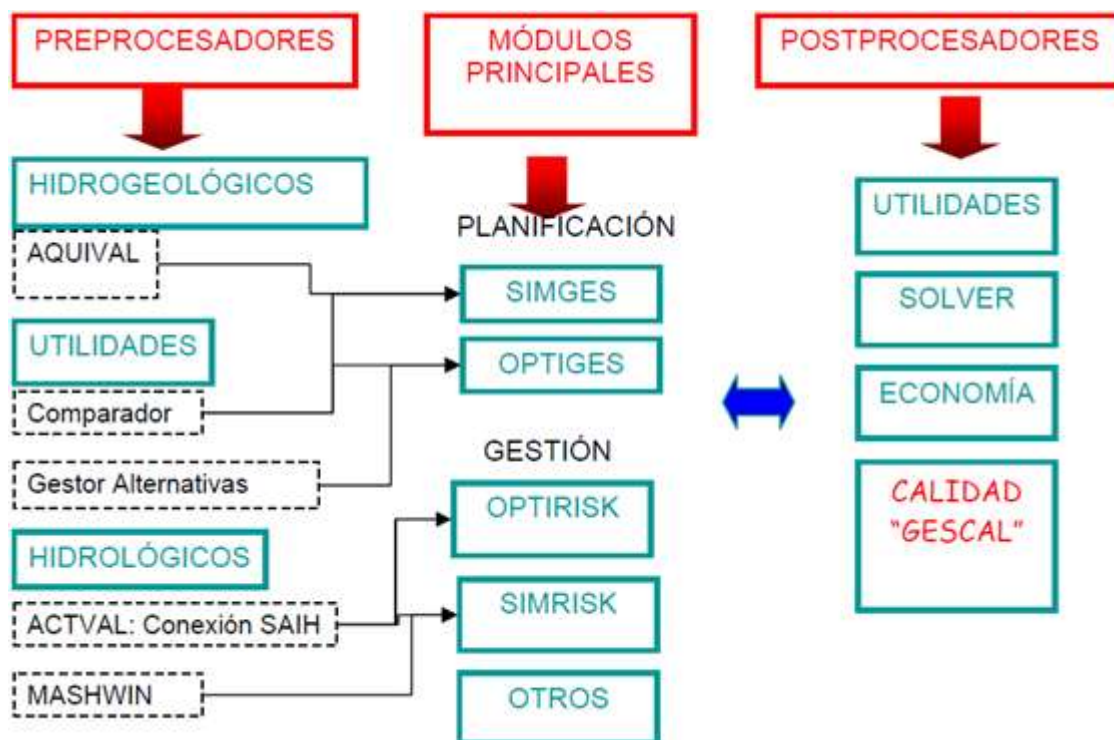


Figura 7. Componentes del sistema soporte de decisión AQUATOOL.

Imagen extraída de la tesis doctoral “INTEGRACIÓN DE LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UN SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS”

3.6 Condicionantes del modelo SIMGES impuestas sobre GESCAL

A continuación se describen los condicionantes que impone el módulo SIMGES sobre el módulo de simulación de la calidad desarrollado GESCAL:

- La escala de trabajo del módulo SIMGES, al igual que la mayoría de módulos de simulación de gestión de recursos hídricos, es mensual. Esto ha marcado las hipótesis y los objetivos del trabajo desde el principio.

- El segundo punto impuesto por el modelo de gestión son los elementos de modelación. Se ha trabajado con todos los elementos intentando tener en cuenta, en el nuevo módulo, el efecto de cada uno de ellos sobre la calidad del sistema. Además se ha tenido que añadir nuevos elementos propios de la modelación de la calidad como son los vertidos puntuales y la contaminación difusa.

- Respecto el punto anterior, hay que detallar que el elemento “aportación”, el cual representa el aporte de recurso de una subcuenca, marca los límites del modelo tanto de simulación como el de calidad. En algún caso en que, la subcuenca aportante tenga algún proceso de calidad que sea interesante modelar, éste aspecto puede ser una limitación.

- Otro condicionante que se presenta es la posibilidad de calibración o validación del modelo. El objetivo de un modelo de simulación no es reproducir el pasado sino estimar el comportamiento del sistema actual frente a diferentes escenarios. Ello implica el resto de datos de entrada al modelo sean las aportaciones históricas el resto de datos representa la actualidad del sistema y no su historia. Los resultados ni intentan, ni van, a dar los caudales históricos circulantes. Esto conlleva una dificultad adicional para la calibración o validación del modelo completo. La solución a este problema se explica en el apartado de calibración del caso de aplicación.

- Finalmente el último condicionante, aunque no es propio del módulo SIMGES, es el tipo de modelación simplificada que suele hacerse para los modelos de simulación de la gestión. En los modelos de gestión, no importa que la distribución de caudales dentro del sistema sea la real siempre que la distribución de caudales dentro del sistema sea real siempre y cuando la disponibilidad del recurso, en los puntos de toma, sea lo más sea lo más parecido a la realidad. Sin embargo, la circulación de caudales sí que influye en la modelación de la calidad. Debido a ello, a la hora de incorporar un modelo de calidad es normal que se deba realizar una labor de ampliación del detalle de la gestión.

Tomado de la tesis doctoral “INTEGRACIÓN DE LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UN SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS”

4. CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA

4.1 Localización

La cuenca del lago de Cuitzeo se encuentra en la región hidrológica número 12, la cual comprende a El Río Grande de Morelia teniendo una ubicación al norte del estado entre los 19°24'30'' y 19°57'46'' de latitud norte y los 100°55'52'' y 101°30'24'' de longitud este.

4.2 Climatología

En Morelia predominan tres tipos de clima según la clasificación de Köppen, modificada y propuesta para la república mexicana por Enriqueta García, los cuales pertenecen al grupo de templados subhúmedos con lluvias en verano, los cuales se distinguen por tener humedades distintas.

El clima C (W2)(W), el cual es el más húmedo de los climas templados subhúmedos con lluvias en verano se encuentra en el extremo sur del área en estudio, se contempla a partir de los 2,100 msnm aproximadamente, que sería por la sierra de Mil Cumbres. El clima C (W1) (W), es de humedad media, y es el que se presenta en la mayor parte de la zona en estudio, abarcando Morelia, Chucándiro, Copándiro, Queréndaro y Zinapécuaro. Por último el clima C (W0) (W), el cual presenta gran presencia en la planicie de Álvaro Obregón, abarcando la población del mismo nombre, también Felipe Carrillo Puerto, San Agustín del Maíz, Cuitzillo Grande, Estación Quirio y Benito Juárez.

Temperatura

Las temperaturas más elevadas que se presentan en el valle de Morelia se dan en las planicies y los bajíos, teniendo las de más bajas en las zonas montañosas, como por ejemplo en Zinapécuaro y sus alrededores encontramos temperaturas de alrededor de los 16 °C que es la zona ya de planicie junto al lago de Cuitzeo, y presentando una disminución hacia las cimas de la sierra de Mil Cumbres llegando a presentar 12,5 °C aproximadamente en lo más alto de la sierra. En lo que respecta a la zona de estudio se presentan temperaturas con una media anual de los 17,6 °C. Teniendo las temperaturas medias mensuales más altas en mayo y las más bajas en enero.

Precipitación

Así como la temperatura presenta variaciones de acuerdo a la influencia del relieve, también las lluvias dentro del valle de Morelia presentan rangos muy amplios que van desde 1,600 mm registrados en la cima de la sierra de Mil cumbres, hasta 650 mm en las cercanías de los poblados de Uruétaro, Cuitzillo Grande y San Pedro de los Sauces, que se localizan en la planicie de Álvaro Obregón. En los que respecta a Álvaro Obregón, Tarímbaro, El Lometón y San José de las Torres se tiene una precipitación media anual de entre 650mm y 700mm. En lo que respecta a la planicie de Morelia y su valla al suroeste, en la ciudad de Queréndaro y su valle situado al norte y noroeste así como la población de Zinapécuaro se tienen precipitaciones mayores a 700 mm al año. La altura de precipitación de 800 mm se registra entre las elevaciones 2000 y 2100 metros sobre el nivel del mar (msnm), Esta altura aumenta gradualmente hasta alcanzar el máximo de 1600 mm antes mencionado.

En los meses de mayo a octubre se presenta la temporada de lluvias, siendo julio y agosto los que mayor precipitación acumulan, siendo febrero el mes más seco del año.

Evaporación Potencial

Se presentan las cantidades más altas de evaporación en los lugares donde hay temperaturas elevadas, como lo son las planicies y bajíos de la zona de estudio. Y las más bajas se presentan en las zonas más altas o zonas montañosas. La evaporación también varía con respecto al tiempo es decir en los meses de enero hasta mayo aumenta y tiende a disminuir de junio a diciembre, siendo mayo el mes de mayor evaporación.

En Álvaro Obregón y Queréndaro desde la zona norte y sur de sus planicies se ha registrado una evaporación media anual de 1900 mm, tendiendo a aumentar hasta 2200 mm en el centro de la planicie y 2266 en las cercanías de la comunidad de Téjaro. En el valle ubicado al suroeste de Morelia, hay evaporaciones entre los 1,900 mm; y dentro de la zona urbana se han registrado 1,705 mm.

4.3 Corrientes superficiales

La zona de estudio está delimitada por la cuenca del Río Grande de Morelia donde vierten sus aguas diferentes drenes agrícolas, y drenajes de comunidades, también a este río confluye el Río Chiquito de Morelia, después nuevamente recibe aguas residuales de comunidades y de drenes agrícolas y finalmente vierte su caudal en el Lago de Cuitzeo. A continuación se hace una descripción de cada uno de estos escurrimientos: Es el más importante del valle y se origina en la unión de los ríos Tirio y Tiripetío aguas arriba de la población de Santiago Undameo. Se mueve con rumbo noroeste y su caudal es controlado aguas abajo, por la Presa Cointzio. Una vez que el Río Grande sale de la presa, recibe aportación de varios arroyos secundarios antes de llegar a la ciudad de Morelia, donde se le une por la margen derecha, el Río Chiquito de Morelia. Al salir de la zona urbana su rumbo es un poco variable, sin embargo predomina la dirección noreste. En las inmediaciones del pueblo de Quirio, originalmente su cauce natural cambiaba bruscamente hacia el norte, de la misma manera viraba al poniente y posteriormente al norte. En este último tramo recibía las aguas del Arroyo los Cueveros para después llegar al Lago de Cuitzeo. En la actualidad, las aguas del Río Grande cruzan la planicie de Álvaro Obregón de sur a norte por el llamado Río Rectificado de Morelia, mismo que tiene su origen al poniente de Zacapendo, específicamente en la estación hidrométrica El Plan y en su trayecto hacia el Lago recibe las aguas del Arroyo Guadalupe. (Extraído de la tesis de postgrado *“Simulación Numérica del Transporte de Contaminantes, en el Río Grande de Morelia”*)

Río Chiquito de Morelia.

Es el principal afluente del Río Grande de Morelia. Tiene su origen en la “Barranca de la liebre”, en los límites de la cuenca del Río Turicato, afluente del Río Balsas. Presenta un escurrimiento de dirección sureste-noroeste y así cruza casi en su totalidad la ciudad de Morelia para unirse todavía dentro de la zona urbana al Río Grande de Morelia.

(Extraído de la tesis de postgrado *“Simulación Numérica del Transporte de Contaminantes, en el Río Grande de Morelia”*)

4.4 Almacenamientos superficiales

Dentro del área de estudio se ubican dos grandes cuerpos de agua superficiales: La Presa de almacenamiento Cointzio y el Lago de Cuitzeo.

(Extraído de la tesis de postgrado *“Simulación Numérica del Transporte de Contaminantes, en el Río Grande de Morelia”*)

Presa Cointzio.

Fue construida de 1936 a 1940 sobre el cauce del Río Grande de Morelia con el objeto de regular el flujo del río y de esta manera dotar de agua potable a la ciudad de Morelia, así como satisfacer las demandas de riego agrícola en el valle Morelia-Queréndaro y proteger parcialmente contra inundaciones a dicho valle. Además, durante sus primeros años de vida útil, sirvió para generar energía eléctrica. Se puede llegar a esta presa después de un recorrido de 13 Km hacia el sur de la ciudad de Morelia por la antigua carretera a Pátzcuaro. Su cortina se ubica a la entrada del cañón Cointzio, en las coordenadas 19°37' 44" de latitud norte y 101°15' 32" de longitud al oeste del meridiano de Greenwich (WG), a una altitud de 1960 msnm al lecho del cauce en la boquilla. Tiene una capacidad de almacenamiento de 84,8 millones de metros cúbicos al nivel de aguas máximas ordinarias (o la parte superior de las compuertas cerradas) y de 95,6 Mm³ al Nivel de aguas máximas extraordinarias

(Extraído de la tesis de postgrado *“Simulación Numérica del Transporte de Contaminantes, en el Río Grande de Morelia”*)

Lago de Cuitzeo

El Lago de Cuitzeo es un almacenamiento natural de forma alargada en sentido este a oeste con una longitud aproximado de 51,4 km. Está ubicado dentro de los meridianos 19°53'25" y 20°04'34" de latitud norte y de los paralelos 100° 50 '20" al 101° 09' 54" de longitud al oeste de Greenwich. El lago se encuentra dentro de las jurisdicciones políticas de los municipios de Álvaro Obregón, Copándaro, Chucándiro, Cuitzeo, Huandacareo y Zinapécuaro del estado de Michoacán y el Municipio de Acámbaro perteneciente a Guanajuato.

La cuenca del lago, cuya extensión es de 3675 km², incluyendo el embalse, es cerrada en forma natural pero ha sido integrada de manera artificial, mediante el dren La Cinta, al Lago de Este sistema está comunicado con el Río Lerma y funciona para él como vaso regulador. Por esta condición a la cuenca del Lago de Cuitzeo se le considera como una parte del Conjunto de Sistemas Endorreicos del Sistema Volcánico Transmexicano pertenecientes a la región hidrológica No 12 Lerma-Santiago.

Las principales aportaciones que recibe el lago provienen de los Ríos: Grande de Morelia, Queréndaro, San Marcos, Los Naranjos y San Lucas, así como de los arroyos: El Tecolote y El Colorado.

(Extraído de la tesis de postgrado *“Simulación Numérica del Transporte de Contaminantes, en el Río Grande de Morelia”*)

4.5 Río Grande de Morelia.

Es el más importante del valle y se origina en la unión de los ríos Tirio y Tiripetío aguas arriba de la población de Santiago Undameo. Se mueve con rumbo noroeste y su caudal es controlado aguas abajo, por la Presa Cointzio.

Una vez que el Río Grande sale de la presa, recibe aportación de varios arroyos secundarios antes de llegar a la ciudad de Morelia, donde se le une por la margen derecha, el Río Chiquito de Morelia. Al salir de la zona urbana su rumbo es un poco variable, sin embargo predomina la dirección noreste. En las inmediaciones del pueblo de Quirio, originalmente su cauce natural cambiaba bruscamente hacia el norte, de la misma manera viraba al poniente y posteriormente al norte. En este último tramo recibía las aguas del Arroyo los Cueveros para después llegar al Lago de Cuitzeo.

En la actualidad, las aguas del Río Grande cruzan la planicie de Álvaro Obregón de sur a norte por el llamado Río Rectificado de Morelia, mismo que tiene su origen al poniente de Zacapendo, específicamente en la estación hidrométrica El Plan y en su trayecto hacia el Lago recibe las aguas del Arroyo Guadalupe.

García R. (2011)

5. Aplicación del modelo GESCAL en el modelo de gestión de la cuenca en estudio.

Se recopilaron los datos de calidad del río grande de Morelia, de los puntos de monitoreo de la CONAGUA delegación Michoacán. La cual proporcione las características de sus distintos puntos de monitoreo.

DATOS GENERALES	SITIOS DE MONITOREO			
SITIO	COINTZIO	PUENTE LA ALDEA	PUENTE EL FRIJOLAR	RÍO GRANDE DE MORELIA
Tipo de Red	Primaria	Secundaria	Secundaria	Primaria
Tipo de Sitio	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial
Clave SICA	00MI12GB0530001	00MI12GB0530003	00MI12GB0530002	00MI12GB0030001
Clave NOSEC	PSLSP-049	SSLSP-048	SSLSP-086	PSLSP-030
Nombre del Sitio	Cointzio	Puente La Aldea	Puente El Frijolar	Río Grande de Morelia
Longitud	101°15'36.6"	101°08'05.3"	101°15'19.7"	101°00'18.5"
Latitud	19°37'51.4"	19°44'02.0"	19°39'39.1"	19°53'30.2"
Altitud	1982	1886	1891	1838
Cuerpo de Agua	Río Grande de Morelia	Río Grande de Morelia	Río Grande de Morelia	Río Grande de Morelia
Tipo de Cuerpo	Río	Río	Río	Río
Año de Inicio	2001	2001	2001	2001
Laboratorio	Local Michoacán	Local Michoacán	Local Michoacán	Local Michoacán
Región Administrativa	Lerma-Santiago-Pacífico	Lerma-Santiago-Pacífico	Lerma-Santiago-Pacífico	Lerma-Santiago-Pacífico
Estado	Michoacán	Michoacán	Michoacán	Michoacán
Municipio	Morelia	Morelia	Morelia	Álvaro Obregón
Región Hidrológico	Lerma-Santiago	Lerma-Santiago	Lerma-Santiago	Lerma-Santiago
Localidad	Cointzio	Morelia	San Juanito Itzicuaró	Felipe Angeles
Cuenca	L. de Patzcuaro-Cuitzeo y L. de Yurira	L. de Patzcuaro-Cuitzeo y L. de Yurira	L. de Patzcuaro-Cuitzeo y L. de Yurira	L. de Patzcuaro-Cuitzeo y L. de Yurira
Subcuenca	L. de Cuitzeo	L. de Cuitzeo	L. de Cuitzeo	L. de Cuitzeo
Nombre Acuífero	Morelia-Queréndaro	Morelia-Queréndaro	Morelia-Queréndaro	Morelia-Queréndaro

Tabla 3. Características de los sitios de monitoreo.

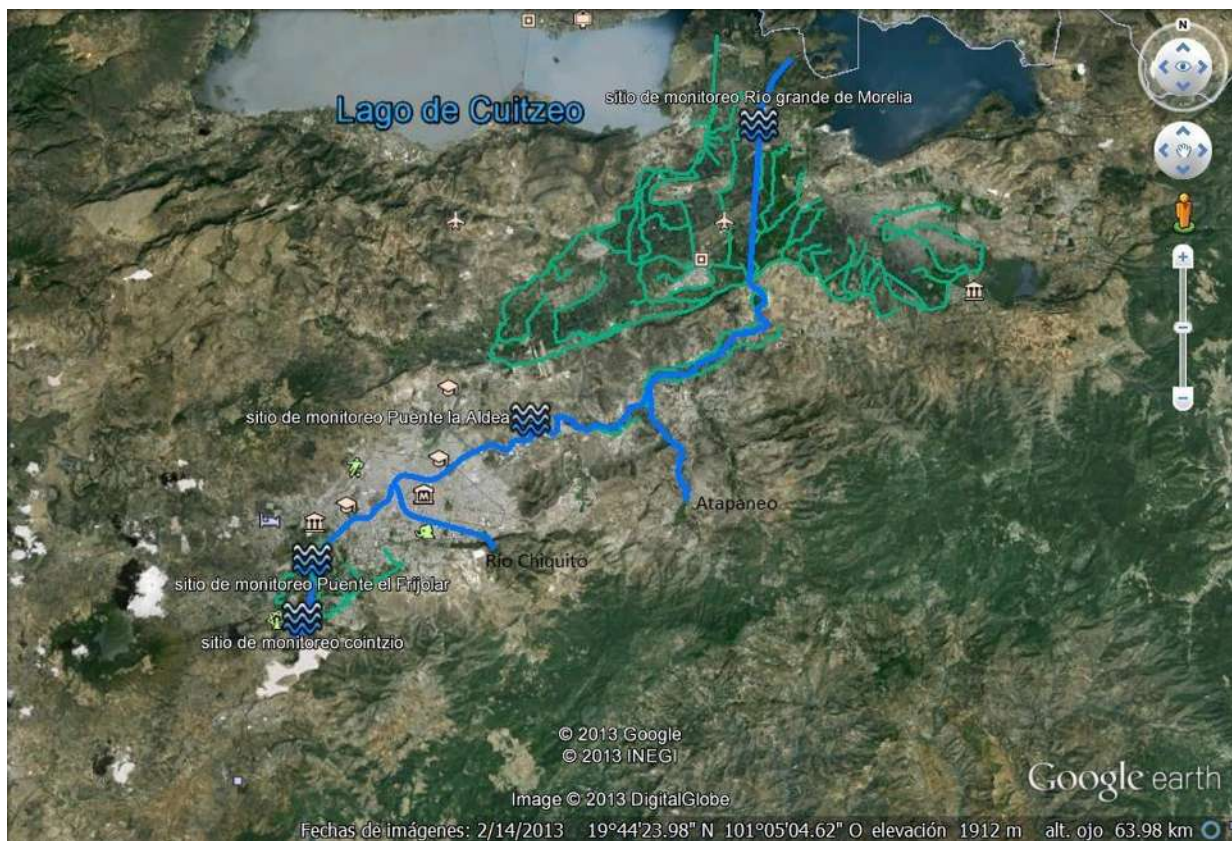


Figura 9. Ubicación espacial de los sitios de monitoreo en el trayecto del río grande.

Ubicación espacial de los sitios de monitoreo de la CONAGUA. En azul se aprecia el trayecto del río grande de Morelia, también en azul se visualizan dos aportaciones la primera es la aportación del río chiquito y la segunda la aportación de Atapaneo. Los ramales en verde son los canales de riego de los distritos de riego.

5.1 Secciones tipo

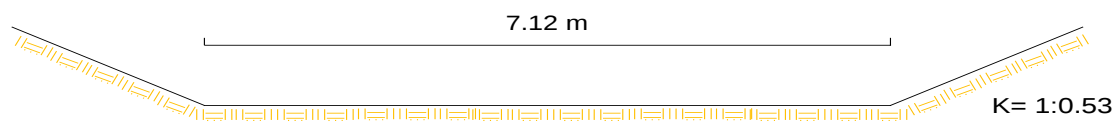


Figura 10. Sección tipo para los tramos grande1 y grande2

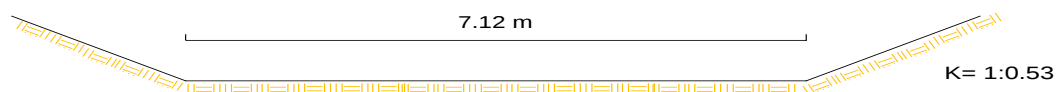


Figura 11. Sección tipo para los tramos grande3 y grande4

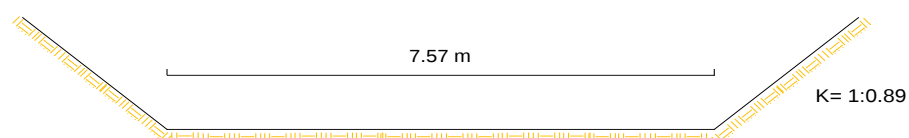


Figura 12. Sección tipo para los tramos grande5, grande6, grande7 y grande8

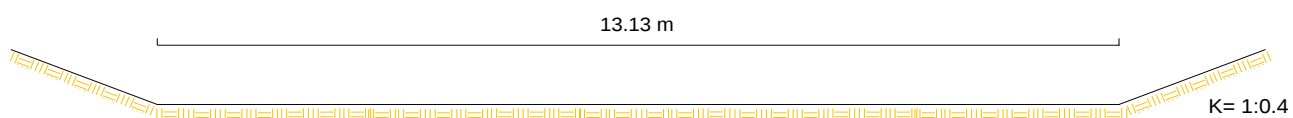


Figura 13. Sección tipo para el tramo grande9

Contando con esta información el siguiente paso es la aplicación de ella en el modelo ya diseñado de SIMGES. Como se explica a continuación.

- **Longitud:** La cual será la longitud del tramo de análisis en metros; para este caso particular el modelo SIMGES cuenta con nueve tramos entre los cuales se encuentran las estaciones de monitoreo de la calidad del agua. Por lo que se tomarán las distancias entre estaciones para asignar tramos y para este caso resultan cuatro tramos para el modelo GESCAL.

- **Diferencial de cálculo:** Es la división del tramo en estudio, es decir, si optamos por usar 50 indica 50 metros con lo que todo el tramo de estudio se dividirá en tramos de 50m para los cálculos pertinentes. El valor de 50 es un valor adecuado para la mayoría de los casos.

- **Tipo de Cálculo Hidráulico:** Bajo la hipótesis de unidimensionalidad en ríos es necesario establecer un modelo hidráulico que relacione los caudales circulantes con la velocidad, profundidad y ancho del río. En este caso se usó el método de Manning.

- **Coef. Manning:** Es el coeficiente de rugosidad con el que cuenta el río, para este caso se usó el libro de *Ven Te Chow* “Hidráulica de Canales Abiertos” de donde extrajeron los coeficientes.

- **Pte. Solera:** Es la pendiente del cauce en metros, en este caso se obtuvo una pendiente para cada uno de los cuatro tramos en los que se dividió.

- **Pte. Transversal:** Es el talud de la sección ya que se idealiza que el cauce cuenta con una sección trapezoidal. Para este caso se obtuvieron cuatro secciones tipo para cada tramo en estudio.

En lo que respecta a la salinidad al inicio y al final del estuario se pueden manejar valores nulos.

Figura 22. Aplicación modelo GESCAL

Dato	Tramo: Grande1	Tramo: Grande2	Tramo: Grande7
Dispersión	10	10	10
Longitud	2000m	2490m	7825m
Diferencial de cálculo	50	50	50
Coef. Manning	0.035	0.035	0.025
Ancho sección	7.12m	7.12m	7.57m
Pte. Solera	0.016%	0.016%	0.0014%
Pte. Transversal	0.53	0.53	0.89
	Tramo: Grande3	Tramo: Grande4	Tramo: Grande8
Dispersión	10	10	10
Longitud	8500m	8500m	7825m
Diferencial de cálculo	50	50	50
Coef. Manning	0.03	0.03	0.025
Ancho sección	7.12m	7.12m	7.57m
Pte. Solera	0.0003%	0.0003%	0.0014%

Pte. Transversal	0.53	0.53	0.89
	Tramo: Grande5	Tramo: Grande6	Tramo: Grande9
Dispersión	10	10	10
Longitud	10850m	7825m	5700m
Diferencial de cálculo	50	50	50
Coef. Manning	0.025	0.025	0.025
Ancho sección	7.57m	7.57m	13.13m
Pte. Solera	0.0014%	0.0014%	0.00035%
Pte. Transversal	0.89	0.89	0.4

Tabla 4. Datos generales de los tramos en estudio del Río Grande.

El primer paso para la aplicación del modelo GESCAL es dar clic en la pestaña “modelos” y después seleccionar la opción de “Opciones del proyecto”



Figura 14. Aplicación modelo GESCAL

Una vez seleccionada la opción de “Opciones del proyecto”. En “Datos aportaciones SimGes” aparece el archivo de aportaciones de gastos de SIMGES. Para activar GESCAL se selecciona la casilla de “Modelar GesCal” al seleccionar esta casilla automáticamente se activará la sección de “Datos aportaciones GesCal” en donde seleccionamos “En base de datos” porque vamos a manejar la interfaz para agregar la base de datos de calidad, en cada aportación.

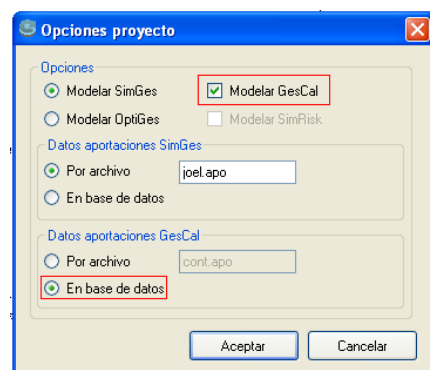


Figura 15. Aplicación modelo GESCAL

Una vez seleccionada la forma de acceso de los datos de calidad. Nos vamos a la pestaña “Modelos” damos la casilla “GesCal” en donde seleccionamos “Parámetros Modelo Calidad”.

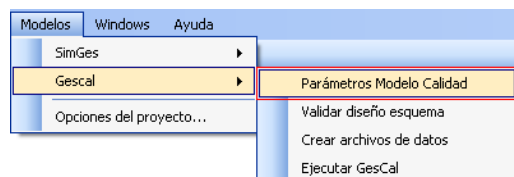


Figura 16. Aplicación modelo GESCAL

Desplegará la ventana “Opciones modelo calidad” donde se piden dos títulos los cuales son a decisión del usuario quien se encuentre modelando ya que solo son para identificar la modelación.

Después seleccionamos el nivel de modelación con la que se realizará la modelación, para nuestro caso usaremos el segundo grado de modelación el cual comprende el Oxígeno Disuelto y el ciclo del Nitrógeno. Y por último agregamos los contaminantes arbitrarios a modelar en este caso solo se modelarán los sólidos suspendidos totales.

Los contaminantes que comprende este grado de modelación son:

-  DBO5
-  Oxígeno Disuelto
-  Nitrógeno Orgánico
-  Amonio
-  Nitratos
-  Sólidos suspendidos totales

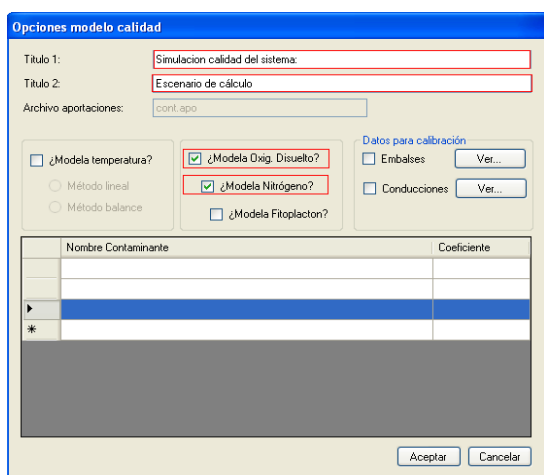


Figura 17. Aplicación modelo GESCAL

Una vez realizado este paso, inmediatamente se selecciona una aportación para asignar los datos de los contaminantes. Como ejemplo usaremos la aportación de “cointzio” seleccionamos la pestaña “Calidad” para después seleccionar el contaminante que se quiere agregar en este ejemplo es el “DBO5”.

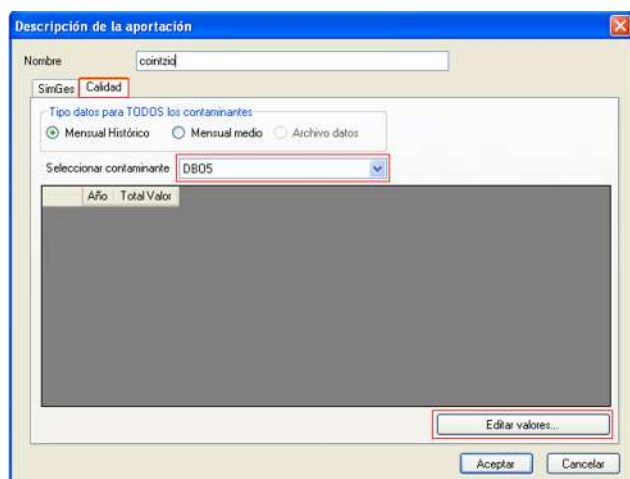


Figura 18. Aplicación modelo GESCAL

Para poder agregar los datos seleccionamos la pestaña “Editar valores...” la cual desplegará la siguiente ventana, en la cual se ingresarán los valores del contaminante seleccionado, estos valores pueden ser copiados directamente de una hoja de cálculo de Excel con el formato de “año”, “mes” y

“valor”. O ingresados directamente a la tabla de uno en uno. Se sigue este procedimiento para cada uno de los contaminantes.

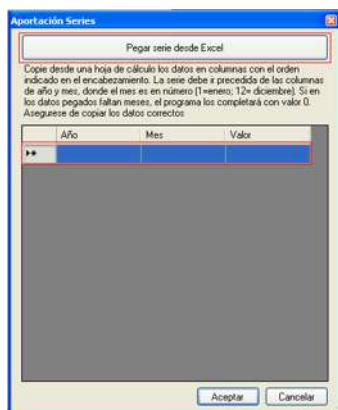


Figura 19. Aplicación modelo GESCAL

Una vez realizados estos pasos se vuelve a la visualización del modelo creado en SIMGES. El modelo SIMGES que se produjo para la gestión del recurso hídrico en el Río Grande de Morelia, maneja nueve tramos de estudio los cuales para el acceso de las características del río requeridas por el modelo GESCAL tendremos que dividirlo en una menor cantidad de tramos (esto es hipotéticamente) ya que no se cuenta con estaciones de monitoreo de la calidad del agua en todas las divisiones propuestas por el modelo SIMGES. Esto se logra copiando las características asignadas a un tramo asignándoselas a un tramo consecuente y llegar a donde se contempla la ubicación de otra estación de monitoreo en donde se repetirá el mismo proceso; completando así los tramos con los que se pretende modelar la calidad del agua en el modelo GESCAL.

Para realizar una corrida es necesario, determinar los años en los que se realizará la modelación. GESCAL está supeditado a los años de modelación en el modelo SIMGES, por lo que primero se reviza la cantidad de años con los que se cuenta información de calidad del agua para poder determinar el número de años que serán modelados en SIMGES.

Para ingresar el periodo de modelación en SIMGES nos vamos a la pestaña “Modelos” después a “SimGes” y a la opción de “Parámetros Modelo SimGes”

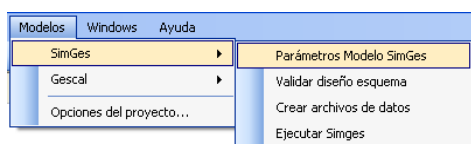


Figura 23. Aplicación modelo GESCAL

Desplegará la ventana siguiente donde se indica el nombre del modelo y el nombre del escenario que se están modelando, se indica el año de inicio de modelación en este caso es el 2001 y la cantidad de años en los que se realizará la modelación que en este caso son 9 años.

Y en la parte de archivo de aportaciones aparece el archivo de aportaciones de SIMGES.



Figura 24. Aplicación modelo GESCAL

Una vez asignados los años de modelación en SIMGES y como ya se tienen los parametros de GESCAL. Para realizar la modelación se va a la pestaña “Modelos” a la opción de “GesCal” donde se tiene que validar si la asignación de datos en GESCAL es correcta dando clic en la opción “validar diseño esquema” una vez validado el esquema se da clic en la tercer opción de “crear archivos de datos” y por último se da clic en “Ejecutar GesCal” después de dar clic en esta opción vuelve a aparecer la ventana de “Opciones modelo calidad” se da clic en aceptar. si no se desea modificar algún dato.

También debe verificarse que el modelo SIMGES no deje secas partes del río ya que el modelo SIMGES es muy eficiente y tiende a optimizar el uso del recurso hídrico que se la asigna.

Una vez realizado esto, se podrán visualizar los resultados de la modelación ya sea en la interfaz o en un gráfico dinámico visualizado en una hoja de cálculo de Excel.

Se recomienda la visualización en un gráfico dinámico ya que se cuenta con demasiadas variables al momento de calibrar.

5.3 Calibración

La calibración es el proceso por el cual se ajustan los parámetros del modelo para que el comportamiento del mismo sea lo más cercano a la realidad.

En la modelación de la calidad es bastante común calibrar los modelos en la situación más desfavorable de caudales.

En este modelo debido a que se realiza una modelación continua la calibración se realiza para todos los datos disponibles en los que se dan periodos secos y húmedos, lo que se intenta es obtener una representatividad del comportamiento del sistema en todas las situaciones.

La calibración se realizó para cada uno de los tramos hipotéticos.

Tramo	Grande 1	Grande 2	Grande 3	Grande 4	Grande 5	Grande 6	Grande 7	Grande 8	Grande 9
Constante de reaireación (1/d)	0.01	0.01	0.1	0.1	0.045	0.045	0.045	0.045	0.03
Constante de degradación de la materia orgánica (1/d)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica (m/d)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.36	0.02	0.02	0.02	0.02
Constante degradación nitrógeno orgánico (1/d)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Velocidad cimentación nitrógeno orgánico (m/d)	0.016	0.016	0.09	0.09	0.003	0.003	0.003	0.003	0.1
Constante nitrificación del amonio (1/d)	0.16	0.16	0.9	0.9	0.01	0.35	0.35	0.35	0.4
Constante de desnitrificación de los nitratos (1/d)	0.01	0.01	0.001	0.001	0.03	0.1	0.1	0.1	0.001

Tabla 5. Valores correspondientes a los tramos calibrados.

5.4 Análisis de los resultados obtenidos

Para conocer la cantidad de desecho que puede asimilar o diluir un cuerpo de agua, es preciso conocer el tipo de contaminantes descargados y la manera como éstos afectan la calidad del agua. Así como también como afectan factores naturales como la topografía, el clima de la región y los minerales presentes en la cuenca.

La temperatura es un factor importante en la capacidad del oxígeno para disolverse, ya que el oxígeno, al igual que todos los gases, tiene diferentes solubilidades a distintas temperaturas. Jugando ésta un papel importante en la descomposición de la materia orgánica, ya que las temperaturas bajas reducen e incluso llegan a detener la actividad de los organismos. Por lo que en el verano la descomposición tiene lugar de modo mucho más rápido que en el invierno. Pero el oxígeno es menos soluble en el agua caliente que en el agua fría, lo que tiende a reducir la velocidad de descomposición.

La luz solar actúa como desinfectante contra las bacterias patógenas y estimula también el desarrollo de las algas, las cuales producen oxígeno durante el día, ayudando de este modo a la oxidación de la materia inestable. Durante la noche quedan inactivas por lo que el contenido de oxígeno del agua tiende a ser mucho menor temprano en las mañanas que por las tardes.

El oxígeno disuelto en el agua es de vital importancia para la mayoría de los organismos acuáticos. La concentración de oxígeno disuelto (OD) en un ambiente acuático es un indicador importante de la capacidad que el elemento acuático posee para la proliferación de organismos acuáticos.

Los niveles bajos de OD afecta el nivel de actividad, alimentación, crecimiento, reproducción, aumenta la susceptibilidad a las enfermedades e incluso a los parásitos.

Si el nivel de OD está por debajo de 2ppm por períodos prolongados los peces pueden morir, pero aunque los niveles estén sobre las 2ppm sufren estrés y enfermedades.

La tasa de reaeración (K_a) en un tramo de un río es un parámetro fundamental en los modelos de calidad del agua. Los ríos de montaña presentan una gran capacidad de autodepuración, debido a las altas tasas de reaeración ocasionadas por la gran turbulencia del flujo. Las tasas de reaeración (K_a) miden la velocidad con la que el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua.

Principales fuentes de Oxígeno Disuelto

- Difusión de la atmósfera
- Oxigenación por el movimiento de las aguas sobre las rocas o los detritos
- Oxigenación por el viento o las olas
- Fotosíntesis de las plantas acuáticas

Factores que afectan los niveles de Oxígeno Disuelto

- ❖ Temperatura
- ❖ Poblaciones de plantas acuáticas
- ❖ Material orgánico en descomposición en el agua

- ❖ Flujo de corrientes
- ❖ Presión atmosférica y altura
- ❖ Actividad Humana

Se define como Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de un líquido a la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias, hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se expresa en mg / l.

La DBO es uno de los parámetros de mayor importancia en el estudio y caracterización de las aguas no potables. La determinación de DBO además de indicarnos la presencia y biodegradabilidad del material orgánico presente, es una forma de estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar el carbono orgánico y de saber con que rapidez este material va a ser metabolizado por las bacterias que normalmente se encuentran presentes en las aguas residuales. Se determina midiendo el proceso de reducción del oxígeno disuelto en la muestra de agua manteniendo la temperatura a 20 ° centígrados durante un periodo de 5 días. El obtener un DBO5 alto indica que se requiere una gran cantidad de oxígeno para descomponer la materia orgánica contenida en el agua.

Para efecto a análisis del Río Grande tomaremos tramos representativos como lo son los tramos 1, 3, 5, 6 y 9. con lo que tendremos un análisis satisfactorio de todo el río ya que se analizarán los tramos de mayor interes.

El tramo 1 es esencial para el análisis ya que el conocer la calidad del agua que presenta el río al momento de salir de la presa de Cointzio.

El tramo 3 en este ya son presentes los efectos de la industria papelera como tambien los de las primeras localidades al sur de la ciudad de Morelia.

El tramo 5 se presentan los efectos de la zona urbana de Morelia y la aportacion del rio chiquito.

El tramo 6 se presenta la aportacion de Atapaneo donde se observa una evidente mejora de la claidad del agua. Ya que con la aportacion de Atapaneo el rio grande aumenta su capacidad de dilucion.

El tramo 9 los efectos de todos los contaminantes se aprecian en este tramo ya que es el ultimo del modelo del rio grande. Con las características que sale el agua en este tamo llegaran al lago de Cuitzeo.

5.4.1 Análisis del DBO vs Oxígeno disuelto

El primer análisis será tomando los principales indicadores de la calidad del agua como son el DBO5 y el Oxígeno Disuelto.

Las graficas de los contaminantes para estos análisis son respecto al tiempo y la distancia. Ya que el modelo GESCAL no pretende representar la calidad del agua frente a eventos puntuales, si no por el contrario, lo que busca es representar la evolución espacio temporal de la calidad del agua. Es decir la evolución del contaminante en el tramo (distancia) a través del tiempo simulado.

Análisis del DBO5 vs Oxígeno Disuelto del tramo1 ya que es el primer tramo. Por lo que un análisis de la calidad con la que el agua entra al sistema es esencial.

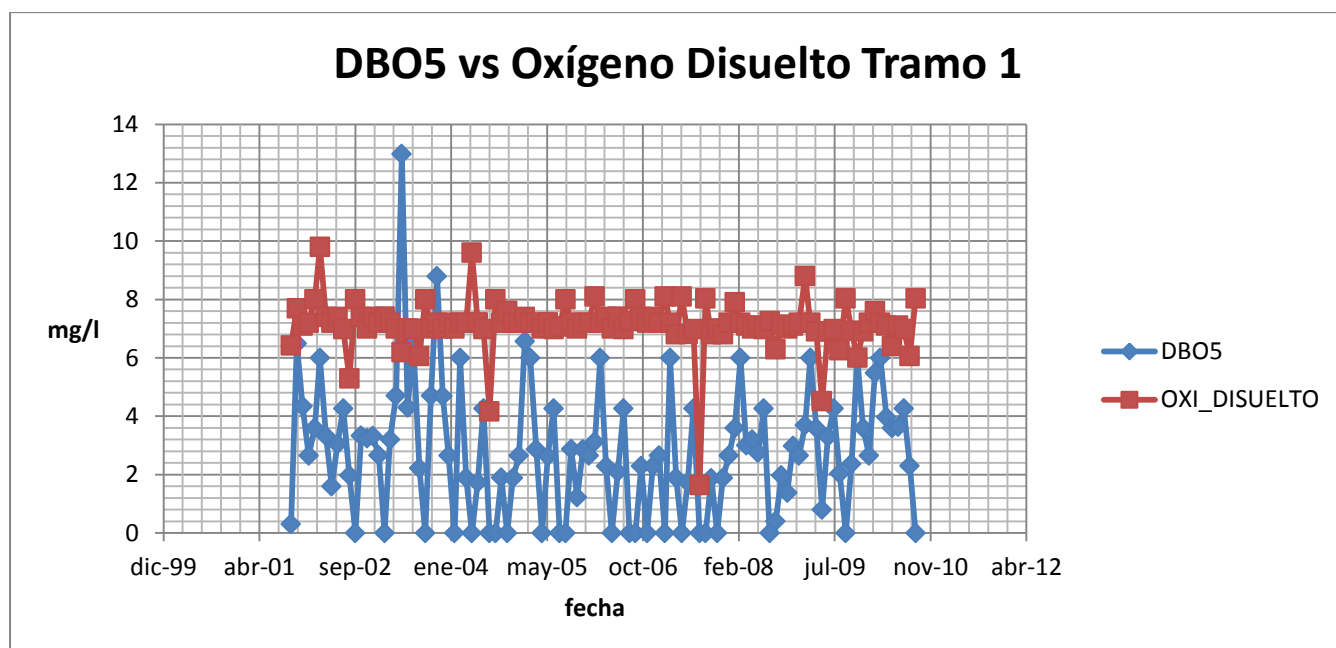


Figura 25. Resultados del modelo GESCAL, DBO Y OXÍGENO.

Se aprecia que el Oxígeno Disuelto se mantiene por lo general entre los 6 y 8 (mg/l) lo cual es indicador de que no hay gran presencia de contaminación antropogénica. Son excelentes rangos para la proliferación de la vida acuática superior.

En lo referente al DBO5 se encuentra mayormente en los rangos de 0 a 6 (mg/l) los cuales indican una nula presencia de materia orgánica. Los rangos sin presencia antropogénica se encuentran entre los 2 y los 10 (mg/l).

El comportamiento de estos parametros en el tramo 2 son de las mismas condiciones ya que no se ve afectado con cambios de caudales o aportaciones extra de contaminantes.

En lo referente a el tramo3 los cambios de la calidad del agua son sumamente apreciables, ya que se aprecia una disminución de los niveles óptimos de oxígeno manteniendo un promedio de 4.227 mg/l que se mantiene todavía en un promedio aceptable para la presencia de vida acuática superior como lo son las carpas. Un aumento en los niveles de DBO alcanzado un promedio de 25.616 mg/l lo que indica la presencia de contaminación antropogénica.

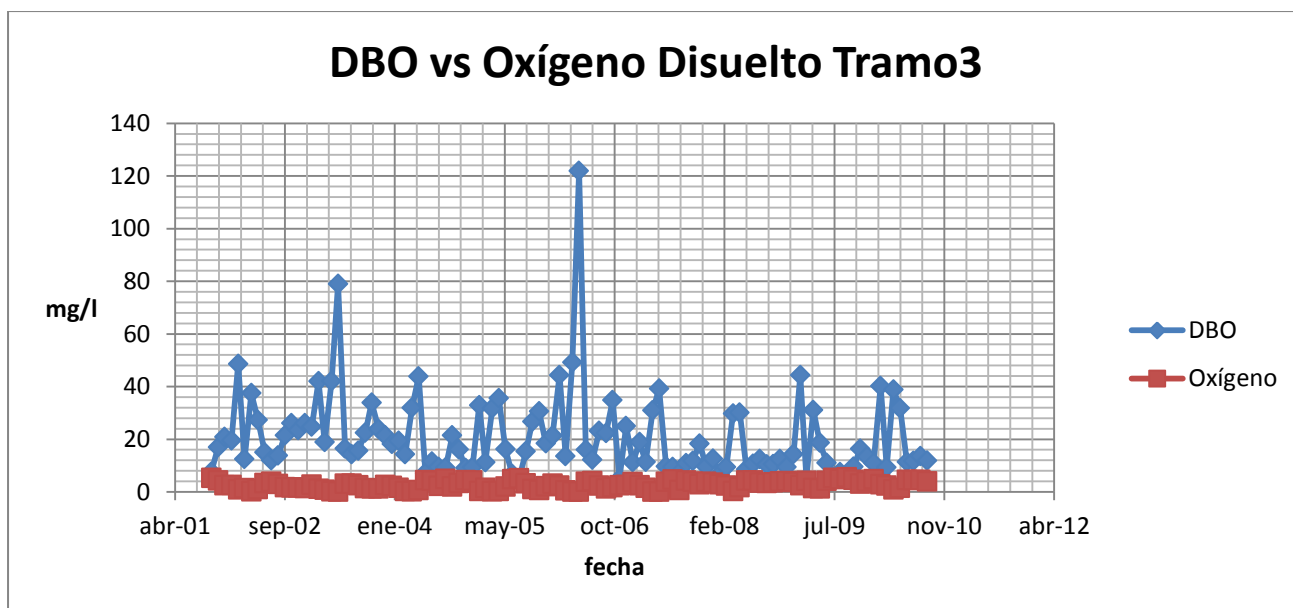


Figura 26. Resultados del modelo GESCAL, DBO Y OXÍGENO

El tramo5 presenta los niveles más bajos de oxígeno disuelto con respecto a todos los tramos simulados por lo que se considera un tramo crítico ya que los niveles de oxígeno se mantienen en el promedio de 0.127 mg/l.

Y a esto bajos niveles se les une los niveles de DBO que se mantienen en un promedio de 34.45 mg/l que si bien no son valores representativos de gran contaminación afectan la cantidad de oxígeno disuelto. A pesar de que en este punto ya se presentaron los efectos de los contaminantes de la ciudad de Morelia, incluyendo los municipios aledaños y las industrias presentes en ellos.

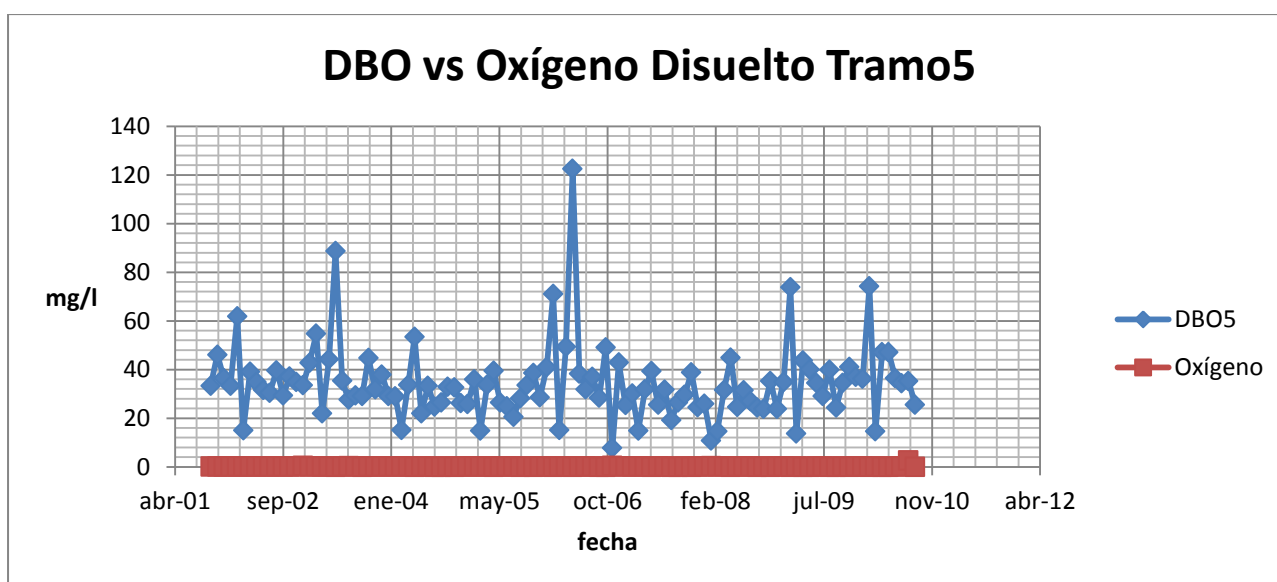


Figura 27. Resultados del modelo GESCAL, DBO Y OXÍGENO.

El tramo 6 presenta condiciones favorables, ya que se aprecia una recuperación del Oxígeno disuelto teniendo un promedio de 2.596 mg/l esto a efecto de la aportación proveniente de Atapaneo ya que aporta oxígeno al ya casi nulo proveniente del río grande.

Donde también se aprecia una disminución de la DBO llegando a promdios de 20.723 mg/l con lo que se asume que el cause esta recuperando su capacidad de dilución.

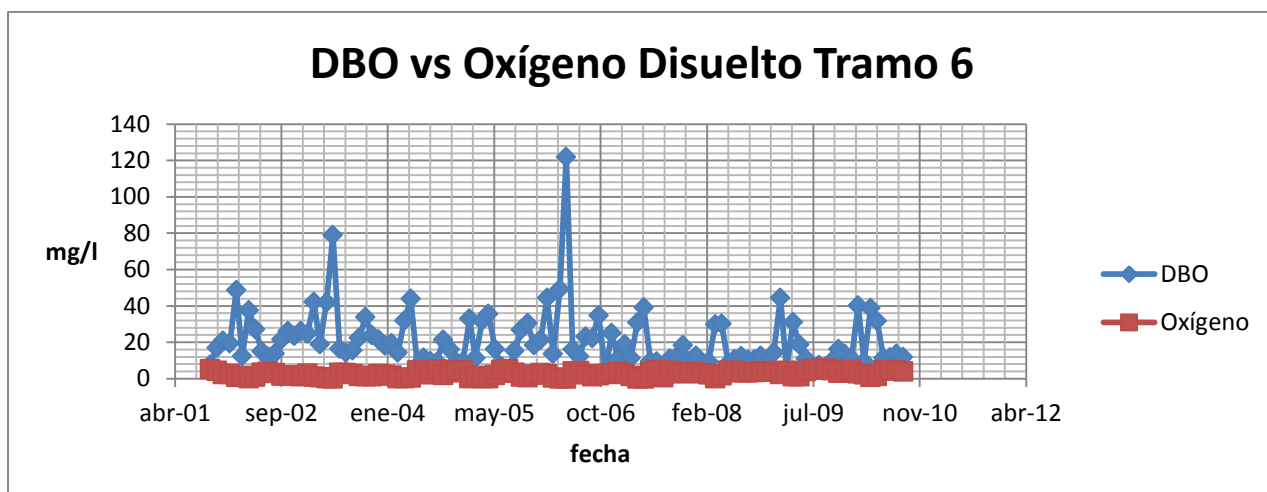


Figura 28. Resultados del modelo GESCAL, DBO Y OXÍGENO.

El tramo 9 presenta los valores finales de la simulación es decir con los que llegarán al lago de Cuitzeo. Los valores del tramo 6 en donde ya se apreciaba una recuperación de la capacidad de dilución, se pierde en este tramo, esto se debe a que resive los efectos de 2 módulos del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro. Dando como resultado la disminución del oxígeno disuelto a llegar a un promedio de 0.443 mg/l. los niveles de DBO tienden a bajar a niveles nulos esto es debido a que los caudales en este tramo tienden a ser muy pequeños en esas fechas donde se presentan los valores nulos de DBO, ya que el área donde se presenta la DBO disminuye, disminuyendo con ella la cantidad de materia susceptible a ser degradada.

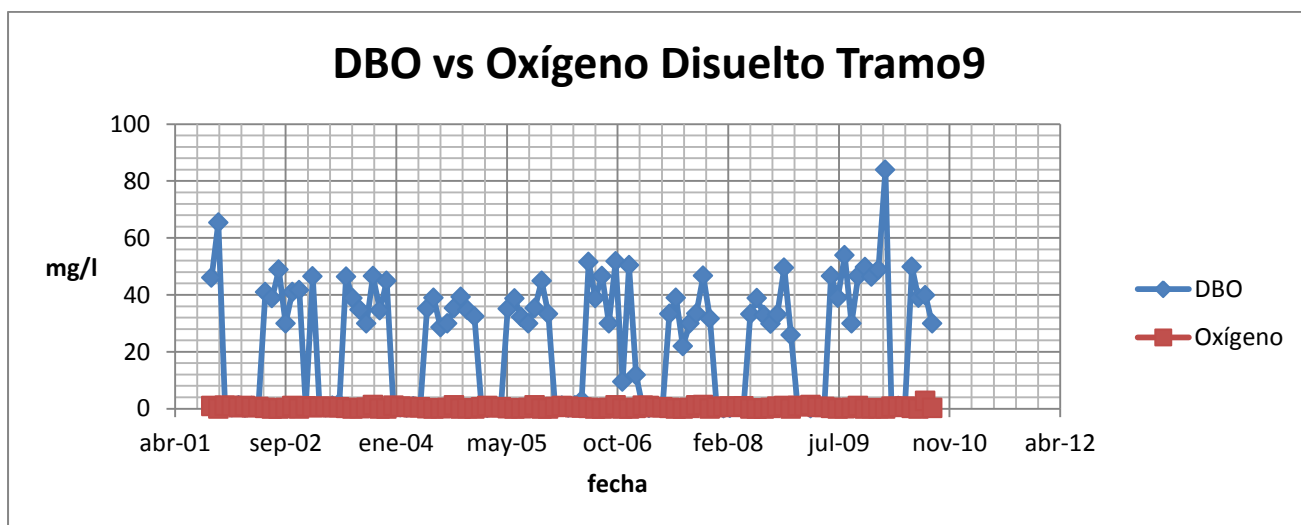


Figura 29. Resultados del modelo GESCAL, DBO Y OXÍGENO.

5.4.1.1 Oxígeno disuelto a través del río grande

decripción grafica de los valores del oxígeno disuelto a lo largo del río es un gran aporte para ubicar los puntos críticos donde se presentan los niveles más bajos de oxígeno disuelto y por lo tanto tomar las medidas necesarias para solucionar o reducir esos efectos.

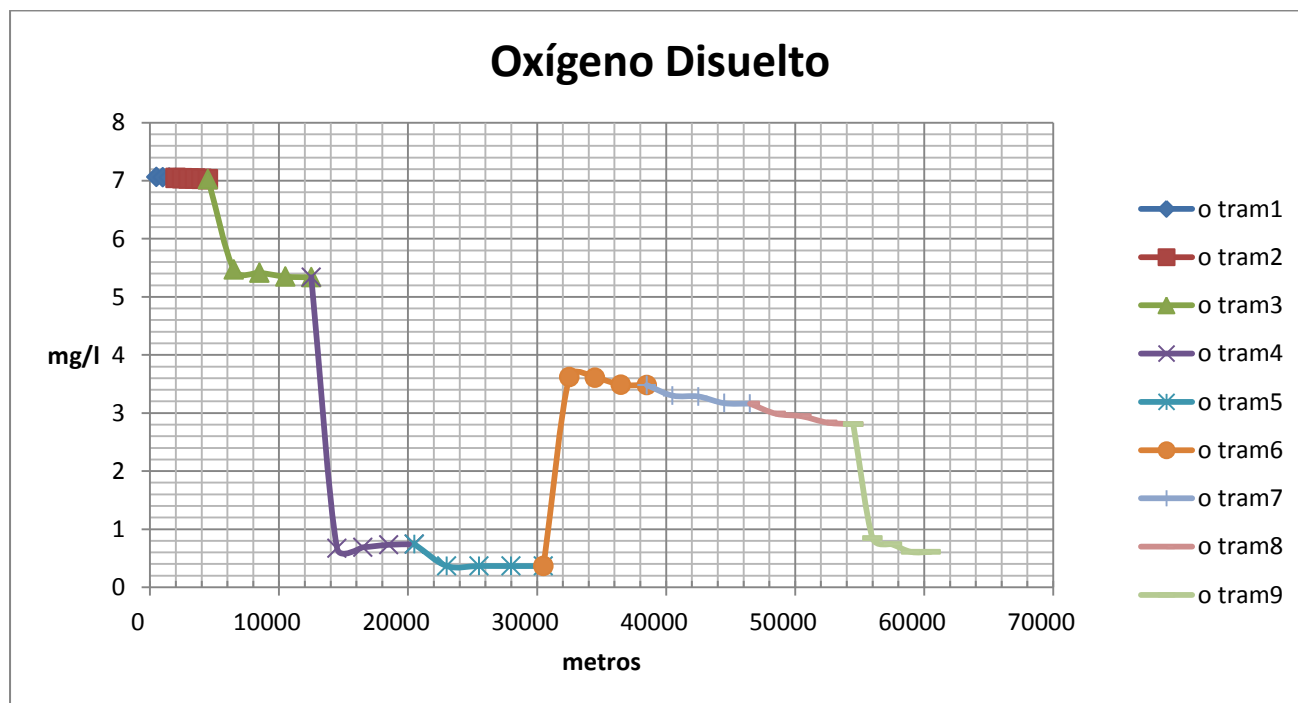


Figura 30. Resultados del modelo GESCAL, Oxígeno Disuelto a lo largo del río grande.

Como se aprecia a lo largo del río grande se presentan zonas en las que el oxígeno baja a niveles en los que ciertas especies de peces no sobreviven. La gran caída de concentración del oxígeno disuelto que se aprecia a partir del tramo 3, el cual tiene un inicio a 4500m de la presa Cointzio teniendo una longitud de alrededor de 8000m, después de este tramo ya se han recorrido aproximadamente 12500m desde esta distancia inicia el tramo 4 donde se aprecia la disminución más apreciable del oxígeno disuelto a niveles menores de 1 mg/l y continúan bajando. Estos efectos son la acción de los contaminantes vertidos por toda la zona urbana y las distintas industrias, como también por el módulo 1 del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro.

5.4.1.2 Análisis del DBO simulado respecto a los mapas nacionales del DBO de la CONAGUA

El DBO, DQO y Sólidos suspendidos totales (SST) son los parámetros que maneja la CONAGUA para indicar generalmente la calidad de un cuerpo acuático.

En el presente trabajo se simularon los SST y el DBO por lo que una comparación y análisis es fundamental.



Figura 31. Recorte extraído del mapa de la CONAGUA, donde se observa el lago de Cuitzeo y sus aportaciones de DBO en el 2008.

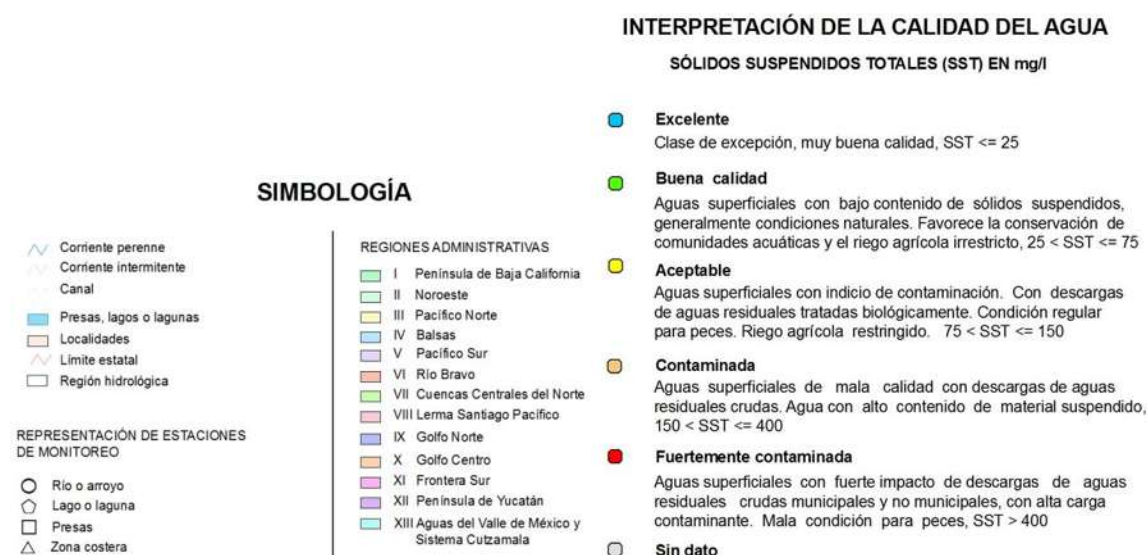


Figura 32. Simbología del mapa de SST y la interpretación de la calidad del agua.

El círculo anaranjado con el código **PSLSP-037** representa el río grande, lo que indica según la interpretación de la calidad del agua de la CONAGUA que los niveles de DBO son de aguas contaminadas.

Comparando esto con los resultados obtenidos de la simulación se corrobora que se encuentran en los parámetros que indica la CONAGUA en el 2008 para el DBO. La simulación se generó desde el 2001 al 2010, y hasta el 2010 siguen estando dentro de los rangos que indica la CONAGUA en sus mapas de distribución de DBO.

5.4.2 Análisis del Amonio vs Nitratos

Este estudio se analizara en dos partes, la anteriormente analizada la cual fue la comparación del DBO y el Oxígeno Disuelto, y la segunda en la cual se analizarán el Amoniaco y los Nitratos.

El Nitrógeno es de vital importancia para los seres vivos. El Nitrógeno no puede ser asimilado por todos los organismo en la forma gaseosa que se presenta, pero tiene la característica de que se fija en el suelo y es ahí cuando inicia su transformación por efecto de distintas bacterias y en algunos casos por algunas plantas en sustancias de facil asimilación para la mayoría de los organismos.

El Nitrógeno presente en la atmósfera es fijado en el suelo ya sea por fijación biológica (excremento de animales y asimilación de plantas) o fijación antropogénica (aguas residuales, abonos). Entra en decomposición y pasa a mineralizarse formando amoniaco, el cual pasa a ser nitrificado formando nitritos los que se oxidan dando paso a los nitratos. Los nitratos son desnitrificados por efecto de bacterias desnitrificantes que lo transforman de nuevo a nitrógeno el cual llega a la atmósfera y sigue el ciclo.

El amoníaco es una sustancia química producida tanto por los seres humanos como la naturaleza. Consiste de una parte de nitrógeno (N) y tres partes de hidrógeno (H₃). En agua, la mayor parte del amoníaco se transforma en la forma iónica del amoníaco, conocida como iones de amonio, representada por la fórmula NH₄⁺ (un ión es un átomo o grupo de átomos que ha adquirido una carga eléctrica neta al ganar o perder uno o más electrones).

El amoníaco se usa también para fabricar fibras sintéticas, plásticos y explosivos. Numerosos productos de limpieza también contienen amoníaco en la forma de iones de amonio.

La mayor parte del amoníaco en los mamíferos es producida en órganos y tejidos, aunque cierta porción es producida por bacterias que habitan el interior de los intestinos.

El amoníaco es esencial para los mamíferos y es necesario para la síntesis de material genético y proteínas. También juega un papel en el mantenimiento del equilibrio ácido-base en los tejidos de mamíferos.

Los Nitritos

La presencia de Nitritos en el agua es un indicativo de contaminación de carácter fecal reciente (Catalán L. *et al.*, 1971; Catalán A., 1981; Metcalf y Eddy, 1998).

El Nitrito se halla en un estado de oxidación intermedio entre el amoniaco y el nitrato. Los nitritos en concentraciones elevadas reaccionan dentro del organismo con aminas y amidas secundarias y terciarias formando nitrosamidas de alto poder cancerígeno y tóxico (OMS, 1980, 1985)

Las siguientes condiciones favorecen la reducción de nitratos a nitritos:

- pH elevado en el estómago
- Cierta flora microbiana intestinal
- Aclorhidria gástrica
- Algunas enteritis graves

A menos que existan estas condiciones, el nitrato ingerido se metaboliza y excreta sin producir efectos adversos aparentes.

El principal efecto toxico de los nitritos es la oxidación del ión ferroso (Fe^{3+}), lo que produce la methemoglobina, la cual no puede unirse de manera reversible al oxígeno ni transportarlo. Algunos síntomas que se presentan a causa de esta intoxicación son las anoxias con cianosis, disrritmias cardiacas y falla circulatoria, mareos ligero y leargia, hasta coma y convulciones.

Las fuentes ambientales más importantes de nitratos y nitritos son antropogénicas e incluyen:

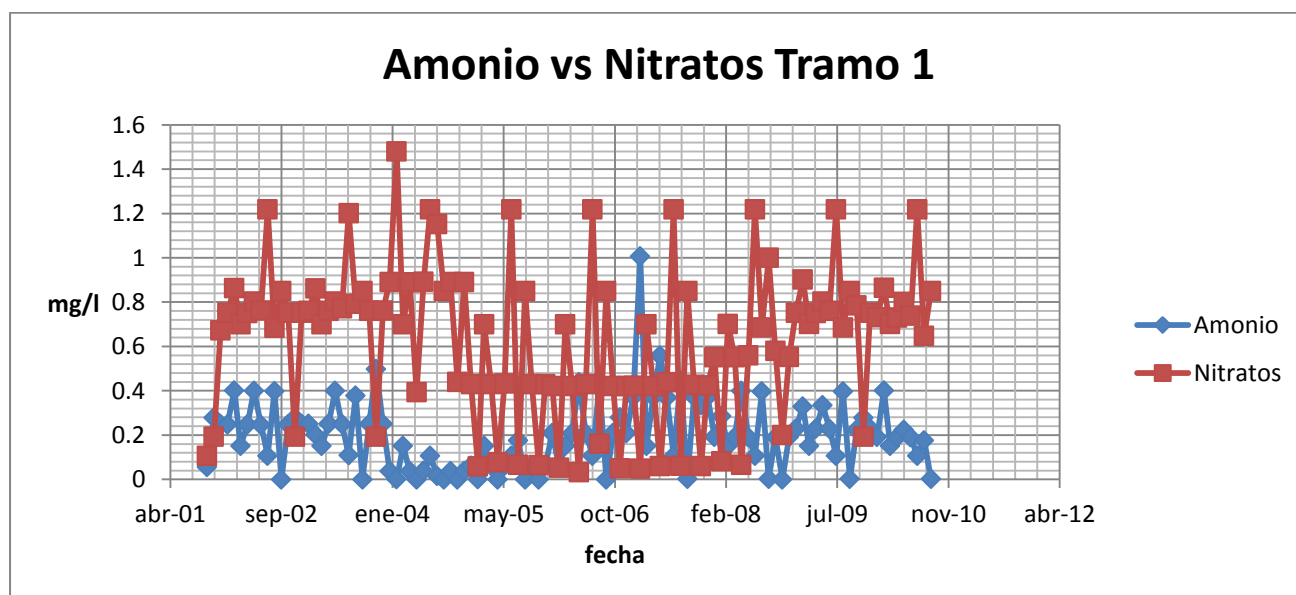
- El uso de fertilizantes nitrogenos
- La disposición de excretas
- La disposición de desechos municipales e industriales
- El uso de aditivos alimentarios (sal común mezclada con nitrato de potasio)

Como anteriormente se explico el análisis solo se realizará a los tramos 1, 3, 5, 6 y 9 los cuales son suficientes para visualizar el comportamiento de los contaminantes en el trayecto del río.

El tramo 1 el cual representa la salida del ambalse Cointzio.

Los niveles de amonio en el tramo 1 son los más bajos de todo el río grande ya que en este tramo no se presenta ningún aporte de nutrietes como son los fertilizantes nitrógenos y la disposición de desechos municipales. presentandoce promedios de 0.198 mg/l.

Los nitratos en este tramo se mantienen en un promedio de 0.636 mg/l lo que nos indica que no existen efectos de containación. En febrero del 2004 se presentan el más alto nivel de nitratos que es muy bajo para considerarse contaminado.



Figua 33. Resultados del modelo GESCAL, AMONIO Y NITRATOS.

El tramo 3 ya tiene efectos de los primeros nutrientes arrojados al río por las primeras poblaciones como la Tenencia Morelos y la industria papelera. Produciendo el aumento de los niveles de amonio, pero aún no en un grado significativo llegando a un promedio de 0.374 mg/l. Los nitratos siguen subiendo a la par del amoniaco, lo que nos indica que hay buena presencia de oxígeno en estos tramos ya que el amonio se esta oxidando y formando nitratos. Los nitratos se mantienen en un promedio de 1.089 mg/l.

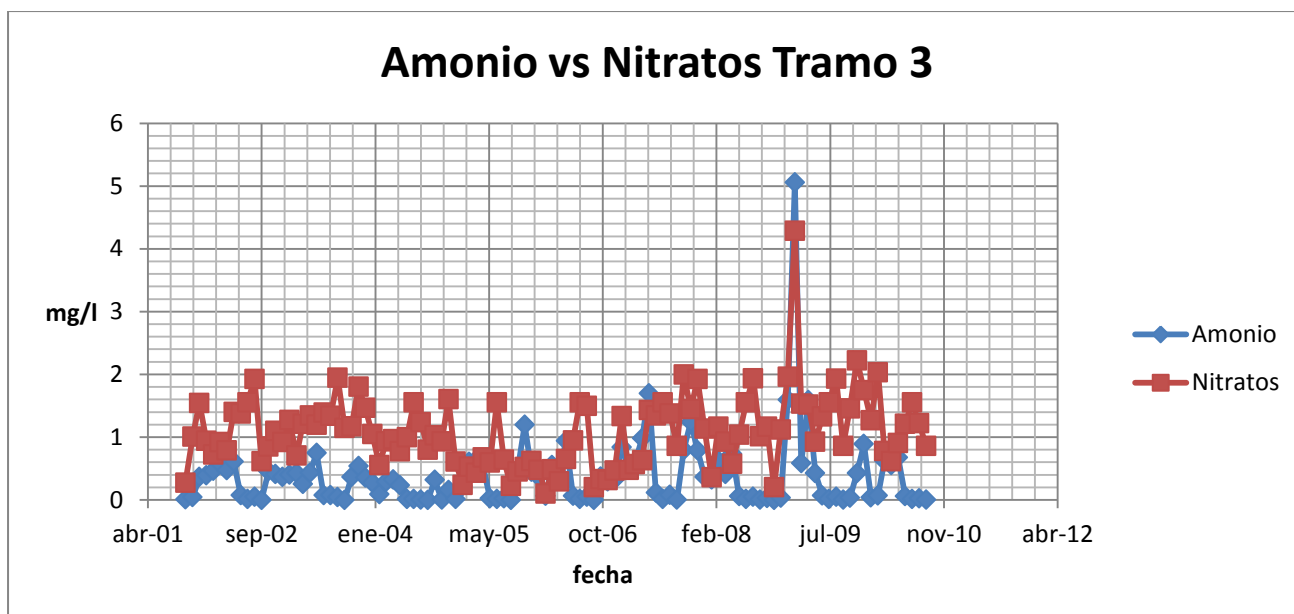


Figura 34. Resultados del modelo GESCAL, AMONIO vs NITRATOS.

El tramo 5 ya arroja una diferencia significativa respecto a los tramos anteriores, los niveles de amonio suben y se mantienen en un promedio de 7.6 mg/l en este tramo ya se observan los efectos de la zona urbana y un distrito de riego.

Los nitratos bajan a un promedio de 0.478 mg/l en esta zona debido a la baja presencia de oxígeno la cual no es la suficientemente alta para oxidar el amonio, presentandose la desnitrificación causada por los bajos niveles de oxígeno disuelto. La desnitrificación se presenta cuando no hay suficiente oxígeno en el agua y los nitratos usan su propio oxígeno para oxidarse.

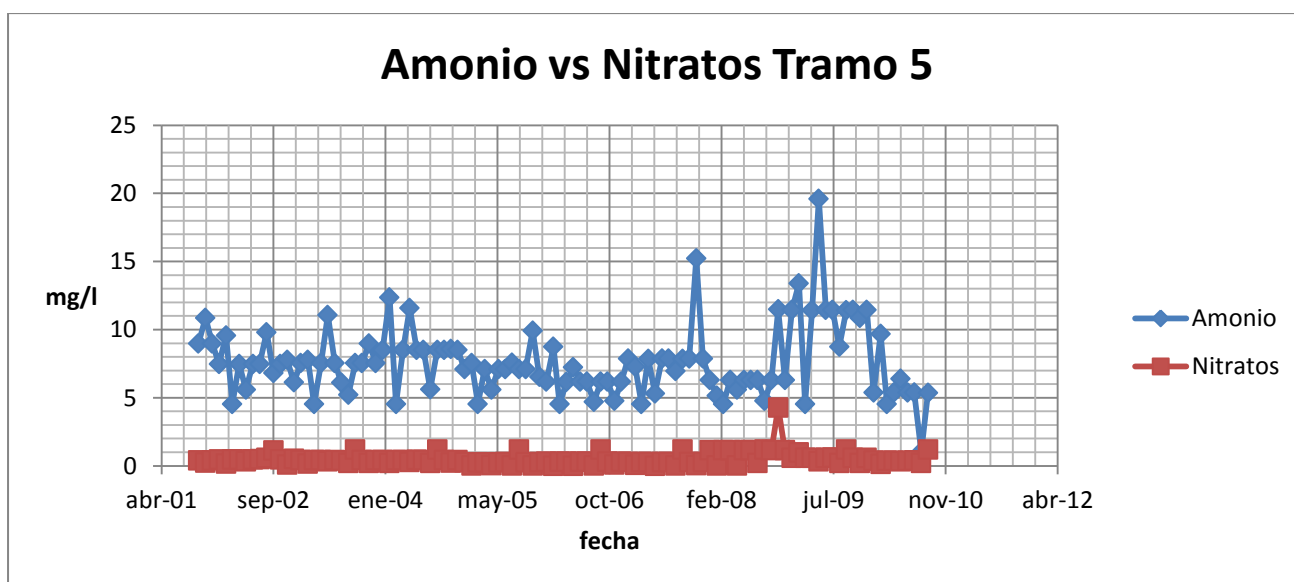
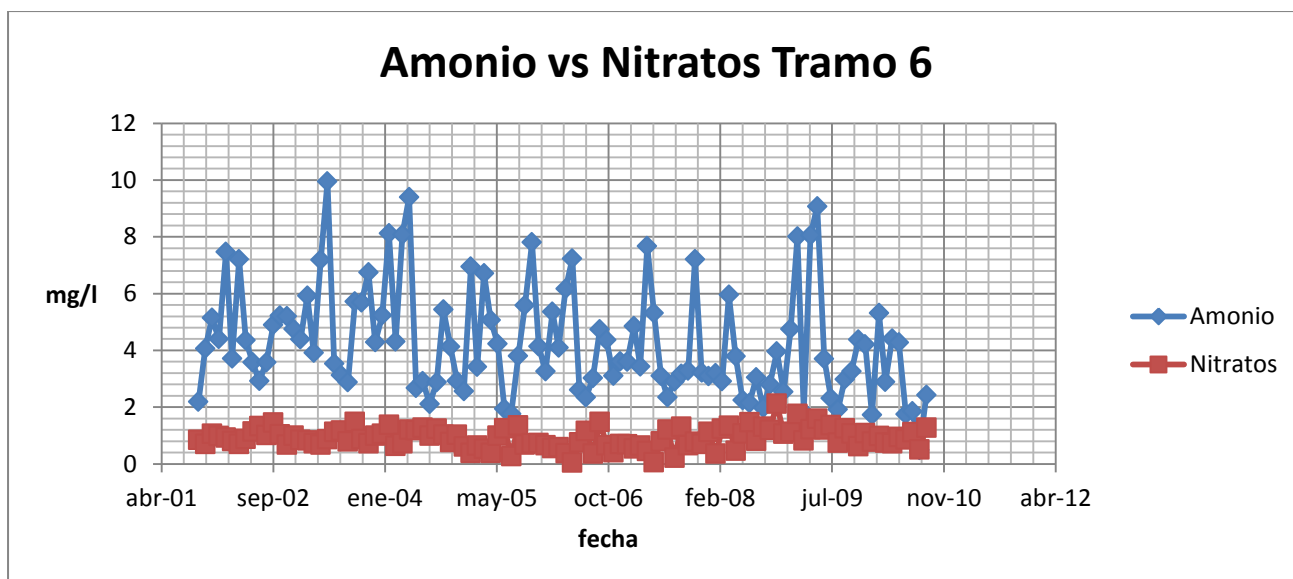


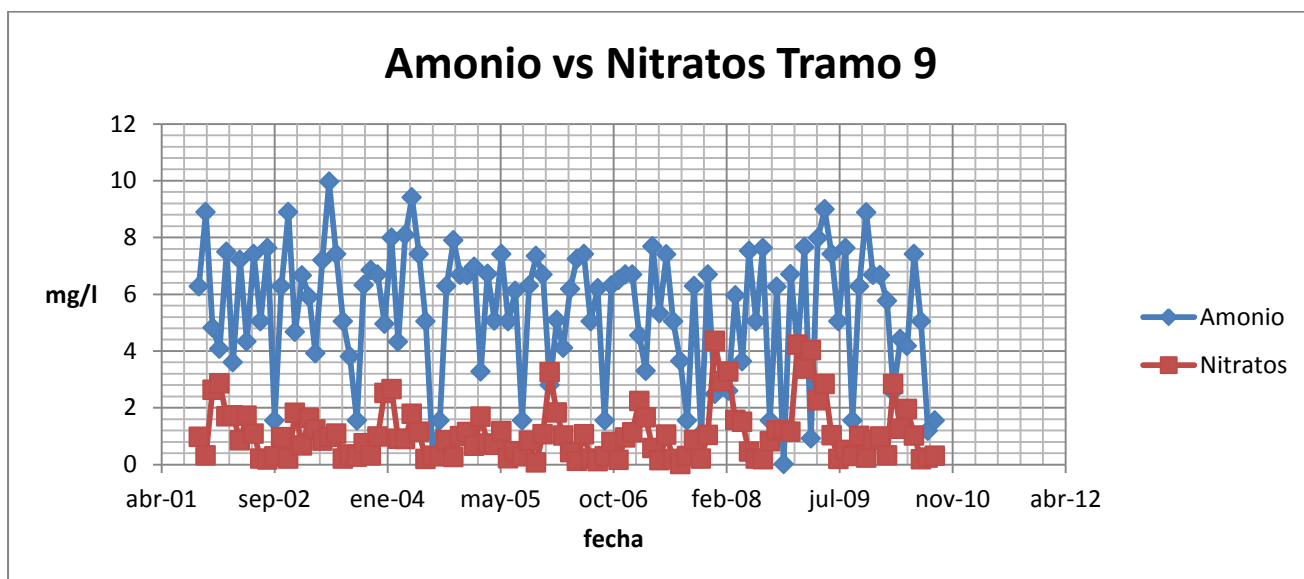
Figura 35. Resultados del modelo GESCAL, AMONIO vs NITRATOS.

El tramo 6 muestra indicios de presencia de oxígeno disuelto en el agua ya que los niveles de amonio bajan y niveles de nitratos suben. Este tramo es el que se encuentra después de la aportación de Atapaneo la cual provee de oxígeno estos tramos. El amonio se mantuvo en un promedio de 4.27 mg/l después de la aportación de Atapaneo. Los niveles de los nitratos también 0.905 mg/l



Figua 36. Resultados del modelo GESCAL, AMONIO vs NITRATOS.

El tramo 9 el cual representa los niveles con los que el río desemboca al lago de Cuitzeo. Se aprecia que los niveles de amonio se mantienen en un promedio de 5.43 mg/l lo que indica un aumento en la salida esto se le adjudica a los efectos de los fertilizantes de los módulos 3 y 4 del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro. Los niveles de nitratos se mantienen en un promedio de 1.08 mg/l los cuales son niveles muy bajos pero requieren de un tratamiento para su consumo.

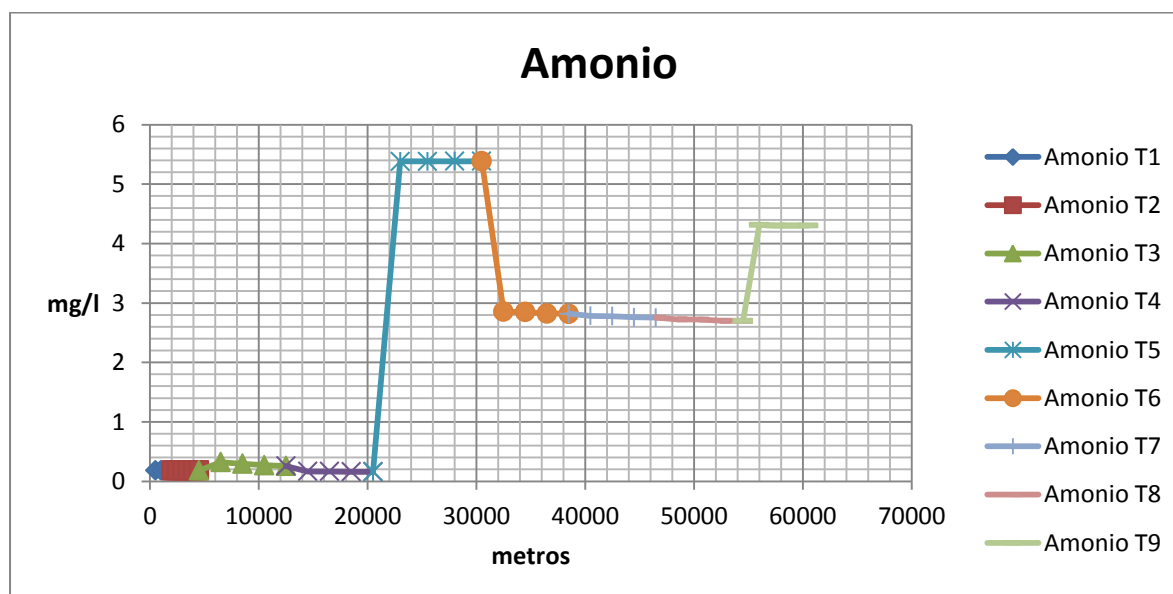


Figua 37. Resultados del modelo GESCAL, AMONIO vs NITRATOS.

5.4.2.1 Amonio y Nitratos a través del río grande

Una grafica de la evolución del contaminan en trayecto del río grande es de vital importancia y en este caso para visualizar la evolución del amonio y los nitratos.

El amonio presenta aumento aproximadamente a los 20500m (tramo 5) donde se observa un cambio abrupto en la grafica. A esta distancia ya se presenta el efecto de la ciudad y del módulo 1 del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro. Con esta información es facil identificar que los tratamientos para el agua del río grande serán más intensivos después de los 20km.



Figua 38. Resultados del modelo GESCAL. Amonio a través del Río Grande.

Los nitratos sufren una fuerte caída alrededor de los 12500m. este efecto se resume a una serie de factores como lo son la falta de oxígeno a esa distancia, lo que produce poca oxidación del nitrógeno lo que da como reslutado bajos niveles de amonio. Los nitratos dependen de la velocidad y cantidad de oxidación del amonio. Como se aprecia en el kilometro 30.5 donde baja el nivel del amonio lo cual ayuda a subir la cantidad de nitratos. Un desenso continuo de los niveles de amonio en condiciones aceptables de oxígeno disuelto es decir superiores a 2 mg/l conducen a una buena nitrificacion.

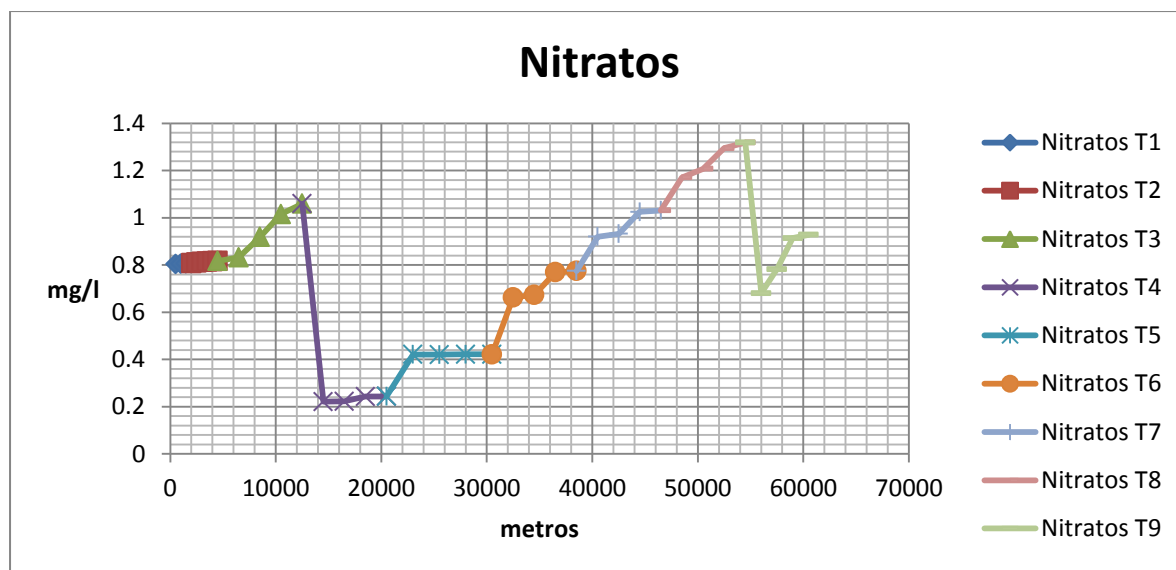


Figura 39. Resultados del modelo GESCAL. Nitratos a través del Río Grande.

El comportamiento del nitrógeno orgánico a través del Río Grande es como se esperaba en los tramos finales ya que tiende a subir, debido a los efectos de los módulos de riego que se encuentran antes de la desembocadura al lago de Cuitzeo. Estos módulos son el 3 y el 4 y son los más grandes por lo tanto los que mayor influencia tienen en el aumento del nitrógeno.

En el tramo 3 se aprecia un descenso esto se puede atribuir a que en esos tramos la presencia industrial y agrícola no son tan fuertes como en el tramo 5 el cual ya recibió la aportación del río chiquito el cual recibe la mayoría de las aguas residuales de la zona urbana de Morelia. Convirtiéndose en el principal aportador de aguas residuales al río grande. La curva continúa su ascenso y se mantiene justo en las aportaciones de los módulos de riego 3 y 4.

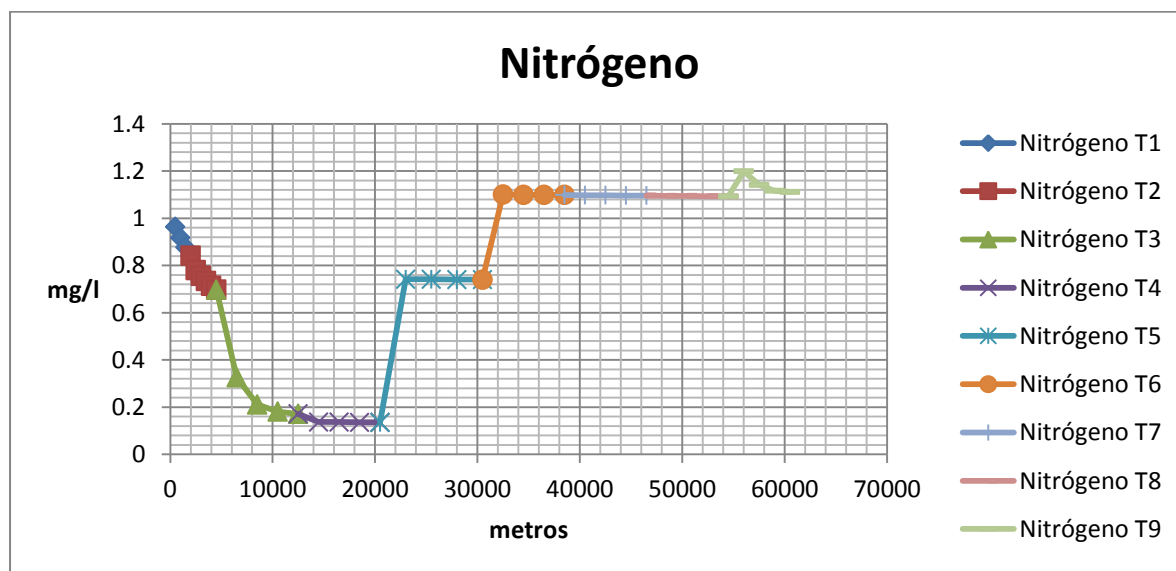


Figura 40. Resultados del modelo GESCAL. Nitrógeno a través del Río Grande.

5.5 Sólidos Suspendidos Totales

Los sólidos suspendidos están compuestos en su mayoría por limos, arcillas y finas partículas de materia orgánica e inorgánica, plancton y otros organismos microscópicos, sus orígenes son en las aguas residuales y la erosión del suelo. El contenido puede variar con respecto a la actividad biológica y con los eventos de tormenta por el incremento de sólidos suspendidos en la escorrientía. Los sólidos suspendidos tienen efectos tanto en la transparencia como la turbidez de las aguas y por ello a la vida acuática.

El incremento de los SST hacen que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática.

los sólidos suspendidos totales comprenden un parámetro que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) contempla como uno de los tres parámetros más importantes para determinar la calidad con la que cuenta un cuerpo acuático.



Figura 41. Recorte extraído del mapa de la CONAGUA, donde se observa el lago de Cuitzeo y sus aportaciones de sólidos suspendidos en el 2008.

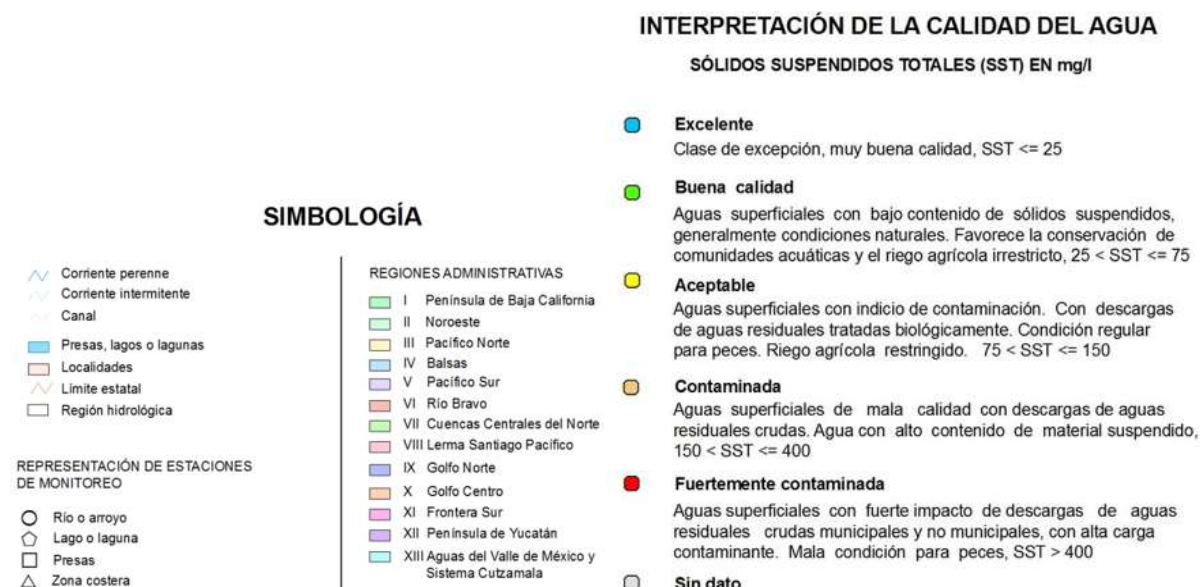


Figura 42. Simbología del mapa de SST y la interpretación de la calidad del agua.

De acuerdo con la simbología se aprecia que el lago de Cuitzeo presenta aportaciones y niveles de sólidos suspendidos entre las calidades de aceptable y contaminada.

Se observa que cerca del lago se ubica un círculo amarillo con la clave **PSLPS-037** el cual representa el Río Grande de Morelia, ofreciendo una aportación aceptable entre 75 y 150 mg/l.

En la evolución de los sólidos suspendidos a lo largo del Río Grande. Los primeros tramos inician con niveles aceptables en lo que respecta a la interpretación de la calidad del agua de la CONAGUA. El que no se presenten niveles más bajos a la salida de la presa Cointzio se debe a que la presa se encuentra en un estrato arcilloso lo que le da esa presencia elevada de SS.

En lo que respecta a todo el río, se presentan zonas en las que los niveles bajan a aceptables valores de calidad, pero en lo general se determina que los sólidos suspendidos modelados en el río se respalda como se esperaba con las mediciones que indica la CONAGUA en el 2008, a la desembocadura al lago es decir entre 75 y 150 mg/l lo que la hace aceptable.

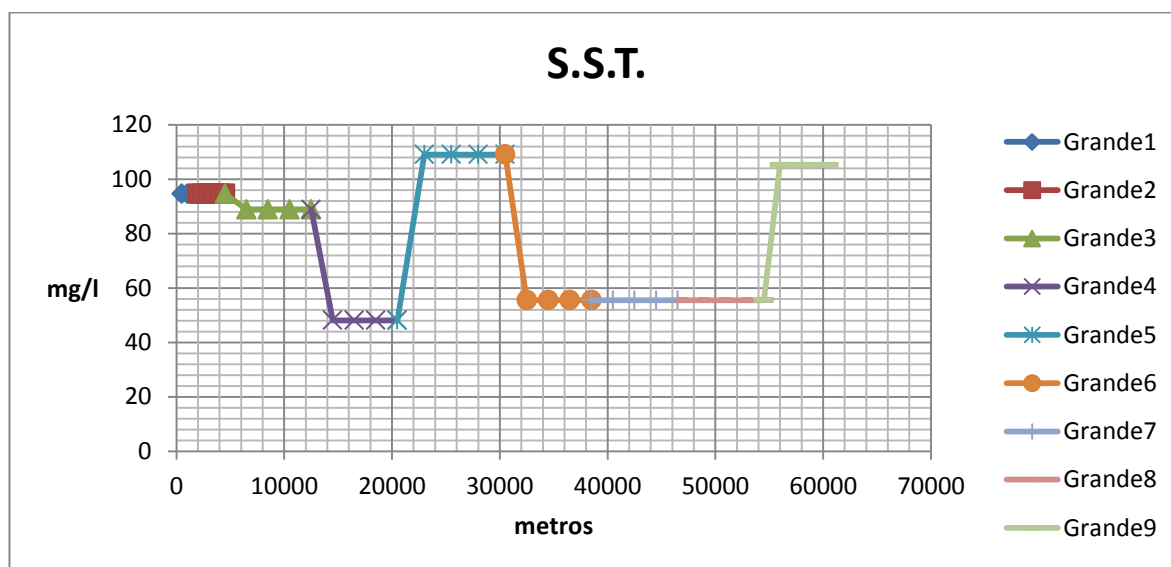


Figura 43. Evolución de los sólidos suspendidos a través del Río Grande

5.6 Series completas de los distintos sitios de monitoreo

Oxígeno Disuelto									
Fecha	Grande2	Grande4	Grande6	Grande7	Grande8	Grande1	Grande3	grande5	Grande9
01/10/2001	6.32732	0.41409	5.23908	4.97411	4.73322	6.33078	6.77009	0.11117	0.908594
01/11/2001	7.67747	0.4151	4.33782	3.75064	3.23739	7.68985	6.99653	0.1707	0.015676
01/12/2001	7.08399	1.58601	2.44638	1.86674	1.16196	7.09279	3.08385	0.11566	1.061647
01/01/2002	7.19196	1.15605	2.5774	2.13239	1.60022	7.19638	2.34139	0.11572	0.890088
01/02/2002	7.98713	3.75951	0.96784	0.3793	0.04879	7.99432	5.19885	0.10048	0.48773
01/03/2002	9.78899	4.16668	1.45547	1.15269	0.76797	9.79512	5.1014	0.13539	0.932589
01/04/2002	7.39388	1.28654	0.14177	0.04463	0.02542	7.39727	1.88181	0.10342	0.491196
01/05/2002	7.19027	0.63602	1.09497	0.59312	0.12854	7.19562	1.67774	0.10498	0.580597
01/06/2002	7.34328	0.59853	3.30025	2.7326	2.21435	7.37363	6.83181	0.1119	0.21026
01/07/2002	6.82441	0.41641	3.81702	3.38133	2.96372	6.90338	6.88454	0.16021	0.015172
01/08/2002	5.01944	0.40094	2.96107	2.54687	2.14402	5.11049	4.79567	0.09086	0.016728
01/09/2002	8.00037	0.72537	1.71549	1.29078	0.91598	8.00017	1.02895	0.07553	0.262768
01/10/2002	7.39049	0.93781	1.68797	1.15557	0.72581	7.39572	1.65865	0.11498	0.948331
01/11/2002	6.98743	0.27629	1.69847	1.09648	0.63705	6.99434	0.67752	0.10673	0.019487
01/12/2002	7.38813	1.98546	1.36944	0.92347	0.43576	7.39487	3.24305	0.35653	0.809365
01/01/2003	7.19536	2.12688	2.75549	2.41483	2.06528	7.19794	2.62995	0.1047	0.48402
01/02/2003	7.39744	4.76302	1.12624	0.59541	0.13229	7.39887	6.36068	0.11634	0.550235
01/03/2003	7.19408	0.96066	0.81013	0.5473	0.26934	7.19738	1.06294	0.12466	0.720655
01/04/2003	6.99242	1.41762	0.16277	0.04825	0.02548	6.99663	1.7948	0.099	0.48195
01/05/2003	6.17186	0.16037	0.07789	0.01613	0.02054	6.1876	0.36052	0.0546	0.413505
01/06/2003	6.93101	0.58367	3.16449	2.59612	2.0788	6.96779	6.41258	0.10375	0.190648
01/07/2003	6.97206	3.00685	3.07697	2.66598	2.27307	6.9874	6.78066	0.3136	0.018111
01/08/2003	5.81023	0.40598	2.45826	2.09831	1.75125	5.90432	5.47944	0.1119	0.109557
01/09/2003	8.00027	0.57475	1.43379	1.05728	0.72908	8.00012	0.62519	0.0348	0.28753
01/10/2003	6.99209	3.17404	1.32892	0.91499	0.58251	6.99644	3.52276	0.11011	1.193881
01/11/2003	7.17775	3.65919	1.27457	0.73677	0.34983	7.19008	4.59071	0.10933	0.013835
01/12/2003	6.98268	1.10142	2.57554	2.09897	1.49241	6.99262	2.11794	0.11571	0.031782
01/01/2004	7.19583	2.87278	2.23561	1.73938	1.16375	7.1982	4.71978	0.12123	1.039709
01/02/2004	7.00122	4.62396	1.54701	0.8461	0.1817	7.00056	6.44782	0.11327	0.655097
01/03/2004	7.1906	4.55579	0.3097	0.17334	0.07944	7.19583	5.22939	0.13376	0.588717
01/04/2004	7.19802	4.0448	0.16536	0.04728	0.01961	7.19912	4.60956	0.10864	0.499825
01/05/2004	9.59996	5.8212	0.64083	0.0722	0.01983	9.59998	7.87688	0.03984	0.473393
01/06/2004	7.18195	0.61379	4.42689	3.97542	3.55826	7.19146	7.22046	0.12706	0.171254
01/07/2004	6.82441	0.41641	4.25536	3.89675	3.54821	6.90338	6.88454	0.15995	0.026579
01/08/2004	4.03147	0.40276	2.25493	2.04862	1.84565	4.0152	5.02282	0.05285	0.093337
01/09/2004	8.00043	0.34071	4.94536	4.65838	4.38335	8.0002	0.25184	0.04748	0.267587
01/10/2004	7.19683	3.42253	2.04261	1.54978	1.12836	7.19858	4.40925	0.07435	1.103757
01/11/2004	7.60108	1.88606	3.36734	2.86587	2.40053	7.60049	3.98654	0.0531	0.005333
01/12/2004	7.19478	0.48259	4.38114	4.06491	3.66422	7.19766	3.50999	0.09018	0.0741
01/01/2005	7.19398	0.41604	4.36723	4.10537	3.77842	7.19729	7.4147	0.12837	0.018898
01/02/2005	7.39014	3.65323	0.25069	0.07445	0.02348	7.39564	4.68818	0.07118	0.504157

01/03/2005	7.18977	3.73884	1.53774	1.25637	0.89292	7.19548	4.68488	0.13647	0.898361
01/04/2005	7.19663	1.56863	0.22378	0.07497	0.032	7.1985	2.21078	0.10857	0.507707
01/05/2005	7.00095	2.29609	0.29907	0.08232	0.02229	7.00042	3.27442	0.04559	0.491953
01/06/2005	7.16976	0.6098	2.04975	1.37487	0.81755	7.18574	7.11592	0.08373	0.138407
01/07/2005	6.82441	0.41641	4.79216	4.47855	4.17664	6.90338	6.88454	0.16185	0.010779
01/08/2005	6.94926	0.4165	5.1978	4.96577	4.73578	6.97742	6.89891	0.07249	0.090854
01/09/2005	8.00033	0.62309	3.28517	2.93962	2.61103	8.00015	0.81003	0.04359	0.275638
01/10/2005	7.19571	2.8876	1.04709	0.64506	0.35307	7.19807	3.54117	0.0728	1.124363
01/11/2005	6.99845	0.0683	0.67026	0.16399	0.03744	6.9993	0.07305	0.04903	0.002373
01/12/2005	7.19286	1.64074	2.17455	1.74228	1.20062	7.19694	3.01549	0.16372	0.014573
01/01/2006	7.19176	1.14772	3.10572	2.73965	2.29137	7.19629	2.46843	0.10609	0.564632
01/02/2006	8.09342	3.35188	2.33551	1.68375	0.84384	8.09704	5.17993	0.04021	0.921413
01/03/2006	7.19043	4.22894	0.59254	0.37665	0.1734	7.19575	5.02397	0.13431	0.668256
01/04/2006	7.3956	2.71913	0.04076	0.02305	0.02292	7.39804	3.16767	0.09603	0.466845
01/05/2006	6.99343	0.27619	0.01281	0.01465	0.0087	6.9971	0.71555	0.02977	0.341216
01/06/2006	7.3579	0.60401	3.84701	3.39809	2.98152	7.38047	6.97615	0.07053	0.182427
01/07/2006	6.82441	0.41641	4.01826	3.68422	3.36088	6.90338	6.88454	0.16272	0.018683
01/08/2006	7.05377	0.41244	2.34507	1.98364	1.63541	7.13314	6.36004	0.10045	0.014798
01/09/2006	8.00036	1.10387	1.34014	0.96994	0.65211	8.00016	1.23563	0.0411	0.269423
01/10/2006	7.39483	3.37015	1.76833	1.36679	1.02186	7.39768	3.8169	0.06465	1.108551
01/11/2006	7.19495	4.54513	2.49819	2.16278	1.86367	7.19777	6.25426	0.44375	0.015723
01/12/2006	7.39088	2.54585	2.66033	2.23862	1.70929	7.39608	3.96959	0.07738	0.044328
01/01/2007	7.18852	0.46602	3.69326	3.32659	2.87508	7.19483	1.2374	0.12795	0.173897
01/02/2007	8.08114	2.73408	2.54554	2.03088	1.33053	8.09152	4.27558	0.182	1.053466
01/03/2007	7.18962	3.68929	1.51079	1.22944	0.86692	7.19535	4.67445	0.13332	0.900336
01/04/2007	6.79433	1.9065	0.09528	0.03392	0.02379	6.79747	2.60165	0.10981	0.504478
01/05/2007	8.09109	1.90089	0.0244	0.02375	0.02524	8.09605	3.32795	0.04435	0.485794
01/06/2007	6.74468	0.57233	3.77454	3.32455	2.90433	6.77454	6.09763	0.08394	0.283003
01/07/2007	6.82441	0.41641	4.62901	4.3247	4.02852	6.90338	6.88454	0.15988	0.027083
01/08/2007	1.32417	0.3795	0.69936	0.53456	0.3906	1.36513	1.88912	0.05253	0.016492
01/09/2007	8.00745	0.42562	4.34655	4.00741	3.6841	8.00349	8.20049	0.04818	0.258436
01/10/2007	6.77643	0.33775	3.78793	3.45508	3.15278	6.78938	0.38305	0.08109	1.099708
01/11/2007	6.99296	0.27442	2.89361	2.08711	1.37571	6.99683	1.06795	0.04907	1.20842
01/12/2007	6.78479	0.35078	3.8026	3.4461	2.97773	6.79315	0.4808	0.09291	0.042231
01/01/2008	7.19209	0.7915	3.43211	3.11242	2.71919	7.19644	1.80599	0.12819	0.403989
01/02/2008	7.88811	4.48233	2.84843	2.53373	2.08902	7.89465	6.72393	0.23258	0.65037
01/03/2008	7.18928	3.33285	2.37823	2.11051	1.74683	7.19518	4.45846	0.13548	0.69513
01/04/2008	7.09499	1.90487	0.25277	0.09744	0.03842	7.09777	2.39623	0.11101	0.516146
01/05/2008	6.98705	0.24086	1.75319	1.19902	0.48587	6.99417	0.57034	0.04541	0.808478
01/06/2008	7.05381	0.59506	4.29587	3.95651	3.63714	7.07847	6.71979	0.08713	0.027342
01/07/2008	6.82441	0.41641	4.35454	4.05546	3.76506	6.90338	6.88454	0.16237	0.019343
01/08/2008	7.06452	0.41304	3.47802	3.08369	2.69808	7.13813	6.43942	0.11453	0.009771
01/09/2008	6.20745	0.41519	3.31395	3.06568	2.83084	6.20196	6.78234	0.05842	0.234544
01/10/2008	6.98407	0.41498	3.575	3.1602	2.79121	7.04007	6.90008	0.09218	0.708535
01/11/2008	6.99619	0.4182	4.00974	3.47899	3.01624	6.99826	7.39662	0.05871	0.941716

01/12/2008	7.0823	0.41365	4.02061	3.72424	3.33637	7.09201	6.933	0.09545	0
01/01/2009	7.19022	0.23569	3.7642	3.27262	2.67136	7.19559	0.08733	0.10972	0.850338
01/02/2009	8.78629	0.03629	2.51866	1.61399	0.53322	8.79383	0	0.04098	0.821421
01/03/2009	7.18662	2.51403	4.2462	4.06597	3.8155	7.19398	4.26882	0.14294	1.284252
01/04/2009	6.89323	0.13496	1.35957	0.72279	0.18418	6.89696	0.4231	0.06753	0.608549
01/05/2009	4.49418	0.17965	1.32374	0.40225	0.01374	4.49738	0.10334	0.04789	0.526759
01/06/2009	6.84427	0.58455	4.14191	3.60563	3.1049	6.87402	6.42893	0.07104	0.25734
01/07/2009	6.82441	0.41641	5.31263	5.0252	4.74507	6.90338	6.88454	0.15148	0.0269
01/08/2009	6.00709	0.40657	4.8147	4.60071	4.38708	6.10455	5.56128	0.05321	0.077184
01/09/2009	8.00745	0.42562	5.5367	5.21541	4.9085	8.00349	8.20049	0.05628	0.255871
01/10/2009	6.76145	0.41306	4.59238	4.18827	3.8233	6.82805	6.64129	0.07501	0.860864
01/11/2009	5.98122	0.21302	3.14978	2.66041	2.21205	5.99154	0.34119	0.04939	0.017386
01/12/2009	6.88644	0.87721	3.97044	3.54569	3.04883	6.89389	1.95408	0.07605	0.1579
01/01/2010	7.19211	0.41362	4.85026	4.66629	4.43497	7.19645	7.09568	0.08395	0.100817
01/02/2010	7.57631	0.41172	2.80689	2.1661	1.33532	7.58934	6.68627	0.04176	0.004509
01/03/2010	7.18882	3.30432	2.4173	2.1508	1.78829	7.19497	4.45199	0.13559	0.681557
01/04/2010	7.09362	1.14762	0.91965	0.56868	0.24362	7.09713	1.7834	0.06741	0.620561
01/05/2010	6.39009	0.09299	1.4859	0.90598	0.24908	6.39554	0.05074	0.04442	0.646611
01/06/2010	7.04459	0.5933	4.62154	4.3409	4.07502	7.07409	6.67384	0.09491	0.24838
01/07/2010	6.82441	0.41641	4.42749	4.20423	3.98532	6.90338	6.88454	0.16236	0.026669
01/08/2010	5.88261	0.40992	4.59244	4.50955	4.42562	5.9387	6.00502	2.57038	2.660845
01/09/2010	8.00745	0.42562	3.98297	3.68389	3.39977	8.00349	8.20049	0.05369	0.242824

Tabla 6. Valores del oxígeno disuelto de todos los tramos.

Amonio									
Fecha	Grande2	Grande4	Grande6	Grande7	Grande8	Grande1	Grande3	grande5	Grande9
01/10/2001	0.05337	5.9E-05	2.18501	2.11843	2.05777	0.05595	0.0077	8.98443	6.27265
01/11/2001	0.27804	0.00032	4.06065	3.9144	3.78631	0.27912	0.04231	10.8652	8.88357
01/12/2001	0.24897	0.17875	5.13904	4.9945	4.81725	0.24899	0.36327	8.98357	4.81943
01/01/2002	0.24868	0.20042	4.3951	4.28523	4.15294	0.24886	0.39149	7.48304	4.07117
01/02/2002	0.40194	0.31211	7.47226	7.47626	7.48232	0.40198	0.461	9.55755	7.48583
01/03/2002	0.15088	0.44235	3.71514	3.6343	3.59537	0.15095	0.58438	4.53854	3.59731
01/04/2002	0.24859	0.39418	7.20424	7.20587	7.20813	0.24882	0.4714	7.47814	7.21001
01/05/2002	0.39985	0.43182	4.35032	4.32939	4.33215	0.39993	0.60717	5.60047	4.33355
01/06/2002	0.24417	0.00276	3.57659	3.43492	3.3052	0.24693	0.07543	7.48428	7.40892
01/07/2002	0.1021	9.4E-05	2.91858	2.80817	2.70205	0.10711	0.01222	7.48429	5.04484
01/08/2002	0.38499	0.00038	3.58019	3.47857	3.37954	0.39771	0.04908	9.80787	7.62599
01/09/2002	0	0	4.89963	4.79169	4.71739	0	0	6.82414	1.54079
01/10/2002	0.24848	0.34762	5.22629	5.09613	5.0595	0.24877	0.45638	7.48274	6.26831
01/11/2002	0.27817	0.28371	5.2006	5.04952	5.02617	0.27917	0.41065	7.77274	8.88346
01/12/2002	0.24897	0.22426	4.74994	4.6612	4.66422	0.24899	0.36561	6.13829	4.66608
01/01/2003	0.25081	0.31795	4.38899	4.3091	4.22704	0.25092	0.39955	7.5432	6.65703
01/02/2003	0.20294	0.28958	5.91727	5.89285	5.89895	0.20242	0.42734	7.77783	5.90249
01/03/2003	0.15103	0.22473	3.91122	3.91364	3.91723	0.15101	0.25372	4.5396	3.91968
01/04/2003	0.25069	0.36012	7.18987	7.19218	7.19539	0.25086	0.4326	7.53903	7.19806

01/05/2003	0.39815	0.60895	9.95275	9.95431	9.957	0.39918	0.74528	11.0779	9.95836
01/06/2003	0.24613	0.0028	3.52635	3.38621	3.25831	0.24892	0.0764	7.54645	7.41151
01/07/2003	0.10957	0.02525	3.12426	3.02137	2.92274	0.10981	0.07548	6.11163	5.0445
01/08/2003	0.35789	0.00034	2.87545	2.78911	2.70563	0.37864	0.04413	5.21322	3.79675
01/09/2003	0	0	5.72126	5.62426	5.60936	0	0	7.54	1.54061
01/10/2003	0.25065	0.31726	5.68439	5.60714	5.60892	0.25084	0.36609	7.54289	6.31676
01/11/2003	0.4966	0.40962	6.7419	6.67267	6.67424	0.49793	0.54065	8.98302	6.84255
01/12/2003	0.25033	0.16443	4.28452	4.16926	4.02162	0.25072	0.35668	7.5448	6.68808
01/01/2004	0.03771	0.14474	5.22881	5.10184	4.95312	0.03731	0.27277	8.49947	4.95514
01/02/2004	0.00206	0.06342	8.11658	7.97456	7.9809	0.00093	0.089	12.3659	7.98456
01/03/2004	0.1509	0.22985	4.31183	4.31365	4.31634	0.15095	0.29015	4.53883	4.31819
01/04/2004	0.03728	0.26495	8.07921	8.08091	8.08327	0.03713	0.32375	8.49754	8.08523
01/05/2004	0.00016	0.14187	9.40158	9.4035	9.4068	7.2E-05	0.23352	11.5914	9.40848
01/06/2004	0.03901	0.00051	2.66893	2.55084	2.44125	0.03804	0.01379	8.5056	7.40819
01/07/2004	0.1021	9.4E-05	2.91477	2.82384	2.7353	0.10711	0.01222	8.50376	5.0439
01/08/2004	0.02457	2.7E-05	2.10554	2.05496	2.00514	0.01602	0.00351	5.60515	0.29946
01/09/2004	0.00026	0	2.87354	2.79877	2.72695	0.00012	0	8.5	1.54076
01/10/2004	0.03799	0.22508	5.43971	5.31554	5.2089	0.03745	0.31873	8.50252	6.2857
01/11/2004	1.5E-05	0.00178	4.13117	4.00409	3.88574	7E-06	0.00231	8.57408	7.89904
01/12/2004	0.03879	0.00597	2.92159	2.84018	2.73656	0.03781	0.15428	8.50391	6.68337
01/01/2005	0.06209	0.0001	2.55701	2.49053	2.40704	0.06149	0.01349	7.10369	6.66459
01/02/2005	0.00177	0.16505	6.94519	6.949	6.95478	0.00079	0.21652	7.5446	6.95813
01/03/2005	0.15089	0.4495	3.4133	3.33788	3.26953	0.15095	0.60471	4.53837	3.27161
01/04/2005	0.06121	0.52664	6.7083	6.71	6.71237	0.06109	0.63723	7.09844	6.71434
01/05/2005	0.00015	0.36566	5.06312	5.06463	5.06722	6.5E-05	0.53766	5.5947	5.06854
01/06/2005	0.06223	0.00077	4.22534	4.05264	3.95729	0.06169	0.02077	7.10464	7.41061
01/07/2005	0.1021	9.4E-05	1.93732	1.85582	1.77711	0.10711	0.01222	7.10561	5.04528
01/08/2005	0.1755	0.00016	1.76425	1.70729	1.65079	0.17613	0.02125	7.56785	6.11073
01/09/2005	0	0	3.79826	3.71021	3.62629	0	0	7.1	1.5407
01/10/2005	0.0617	0.38963	5.58828	5.57808	5.5798	0.06132	0.47491	7.10229	6.29064
01/11/2005	0	0.77346	7.80563	7.80776	7.80979	0	1.19424	9.92413	7.33957
01/12/2005	0.06227	0.2397	4.14415	4.03634	3.90006	0.06155	0.44793	6.53	6.68533
01/01/2006	0.20887	0.14398	3.2581	3.17447	3.07164	0.20894	0.37135	6.17329	2.79311
01/02/2006	0.05784	0.04399	5.36279	5.22486	5.08155	0.05683	0.0614	8.73609	5.08528
01/03/2006	0.1509	0.43298	4.09893	4.1008	4.10358	0.15095	0.55391	4.53885	4.10549
01/04/2006	0.20872	0.3373	6.17052	6.17216	6.17444	0.20888	0.40561	6.169	6.17634
01/05/2006	0.43704	0.80074	7.2348	7.23581	7.23756	0.43813	0.94258	7.23386	7.23844
01/06/2006	0.20546	0.00233	2.61077	2.50566	2.40812	0.20752	0.06374	6.17469	7.41231
01/07/2006	0.1021	9.4E-05	2.35156	2.26947	2.1899	0.10711	0.01222	6.17412	5.04443
01/08/2006	0.41094	0.00038	3.02033	2.94045	2.86319	0.42584	0.04967	4.69288	6.20593
01/09/2006	0	0	4.74226	4.65619	4.65633	0	0	6.17	1.54074
01/10/2006	0.20907	0.31172	4.36257	4.27329	4.19656	0.20903	0.37183	6.17226	6.30185
01/11/2006	0.27827	0.17832	3.09849	3.00296	2.91659	0.27923	0.2934	4.77637	6.49931
01/12/2006	0.20924	0.18303	3.60925	3.51358	3.39299	0.2091	0.32313	6.17327	6.68574
01/01/2007	0.37215	0.23198	3.60379	3.50895	3.39138	0.37262	0.83664	7.86351	6.69171

01/02/2007	1.00462	0.2962	4.84653	4.71897	4.54427	1.00648	0.50091	7.28608	4.54799
01/03/2007	0.15089	0.44174	3.43135	3.35589	3.29468	0.15095	0.60223	4.54259	3.29675
01/04/2007	0.3722	0.81596	7.6709	7.67257	7.67489	0.37264	0.98335	7.85828	7.67682
01/05/2007	0.55749	1.22165	5.31746	5.31847	5.32022	0.55889	1.69813	5.31652	5.3211
01/06/2007	0.36423	0.00411	3.10419	2.98781	2.87876	0.36915	0.11245	7.8645	7.40305
01/07/2007	0.1021	9.4E-05	2.35032	2.27316	2.19794	0.10711	0.01222	7.86416	5.04408
01/08/2007	0.43693	0.00061	2.89526	2.90004	2.90489	0.44751	0.07886	6.94496	3.64521
01/09/2007	0.00297	3E-06	3.17514	3.08724	3.00323	0.00194	0.00041	7.86	1.54082
01/10/2007	0.37103	0.0823	3.28353	3.19913	3.12231	0.37212	0.79465	7.86305	6.28273
01/11/2007	0.33363	0.75079	7.20507	6.99311	6.80502	0.33493	1.24376	15.2341	1.07521
01/12/2007	0.37189	0.07388	3.21201	3.11913	2.99639	0.37251	0.79067	7.86395	6.68598
01/01/2008	0.19199	0.15905	3.09101	3.0104	2.91059	0.192	0.36727	6.30283	2.48026
01/02/2008	0.28558	0.19111	3.19238	3.1074	2.98634	0.28526	0.32465	5.14614	2.74379
01/03/2008	0.15092	0.435	2.91258	2.8412	2.74324	0.15096	0.62636	4.5423	2.5989
01/04/2008	0.19178	0.34089	5.95116	5.95262	5.95464	0.1919	0.41236	6.29844	5.95632
01/05/2008	0.39805	0.52089	3.79145	3.66644	3.62596	0.39912	0.73086	5.6015	3.62832
01/06/2008	0.18902	0.00216	2.24103	2.15525	2.07432	0.19078	0.05899	6.30395	7.52196
01/07/2008	0.1021	9.4E-05	2.13971	2.06564	1.99362	0.10711	0.01222	6.30354	5.04435
01/08/2008	0.38397	0.00036	3.04055	2.94435	2.85007	0.39724	0.04637	6.30577	7.62653
01/09/2008	0.00298	3E-06	1.97143	1.90819	1.84813	0.00194	0.00043	4.76	1.54099
01/10/2008	0.18432	0.0002	2.79893	2.69314	2.59858	0.19052	0.02657	6.30373	6.26012
01/11/2008	0	0	3.957	3.81833	3.69678	0	0	11.4816	0.00943
01/12/2008	0.19258	0.00026	2.53318	2.45753	2.35799	0.19227	0.03438	6.3034	6.69812
01/01/2009	0.22946	0.35145	4.75063	4.62367	4.46747	0.22976	1.59484	11.4338	4.09064
01/02/2009	0.32831	3.3225	8.00686	7.7957	7.6535	0.32924	5.05723	13.4048	7.65516
01/03/2009	0.15085	0.30532	1.83245	1.78374	1.71548	0.15093	0.58383	4.54347	0.90949
01/04/2009	0.22961	1.41719	8.05645	7.96716	7.96944	0.22983	1.58716	11.4325	7.97134
01/05/2009	0.33335	0.21014	9.07427	8.9884	8.99093	0.33426	0.42785	19.6044	8.99222
01/06/2009	0.22581	0.00257	3.69465	3.55533	3.42482	0.22823	0.07029	11.435	7.40797
01/07/2009	0.1021	9.4E-05	2.31604	2.23986	2.16544	0.10711	0.01222	11.435	5.04403
01/08/2009	0.38441	0.00037	1.91638	1.86599	1.81567	0.39744	0.04757	8.74673	7.62544
01/09/2009	0.00297	3E-06	2.97999	2.89389	2.81138	0.00194	0.00041	11.43	1.54083
01/10/2009	0.21341	0.00024	3.25972	3.15475	3.0596	0.2234	0.03079	11.4345	6.27333
01/11/2009	0.27811	0.27571	4.38147	4.25648	4.14151	0.27915	0.42523	10.8641	8.8828
01/12/2009	0.22925	0.47454	4.20471	4.09556	3.96733	0.22966	0.89	11.4337	6.68221
01/01/2010	0.19144	0.00031	1.72858	1.6867	1.63393	0.1912	0.04015	5.37373	6.66176
01/02/2010	0.40192	0.00055	5.30785	5.16972	4.99025	0.40197	0.07135	9.67625	5.75852
01/03/2010	0.15088	0.43036	2.89025	2.81957	2.72251	0.15095	0.62491	4.54276	2.56625
01/04/2010	0.19077	0.44984	4.41206	4.41398	4.41665	0.1909	0.55099	5.37224	4.41887
01/05/2010	0.22302	0.48286	4.2752	4.16474	4.16934	0.22356	0.67444	6.38149	4.17168
01/06/2010	0.18805	0.00215	1.74524	1.68107	1.62035	0.18979	0.05872	5.37477	7.40802
01/07/2010	0.1021	9.4E-05	1.85351	1.80044	1.74839	0.10711	0.01222	5.37345	5.04357
01/08/2010	0.1757	0.00017	0.48423	0.47563	0.46694	0.17622	0.02176	1.01326	1.18774
01/09/2010	0.00297	3E-06	2.42795	2.35287	2.28138	0.00194	0.00041	5.37	1.54093

Tabla 7. Valores del amonio de todos los tramos.

DBO5									
Fecha	Grande2	Grande4	Grande6	Grande7	Grande8	Grande1	Grande3	grande5	Grande9
01/10/2001	0.18203	0.00023	7.59608	7.55886	7.52231	0.305	0.03088	33.3191	46.0451
01/11/2001	6.4624	0.0083	16.9646	16.8378	16.7142	6.48308	1.09715	46.1212	65.4169
01/12/2001	4.32081	27.2551	20.9064	20.7508	20.4355	4.33686	47.3482	36.4714	0.48484
01/01/2002	2.64489	34.8322	19.4977	19.3676	19.1148	2.6532	59.8684	33.3515	0.45318
01/02/2002	3.58854	20.2569	48.6214	48.3989	47.7347	3.5951	26.2556	61.8488	1.13253
01/03/2002	5.98954	15.9102	12.4181	12.3631	12.2388	5.99544	18.3199	15.0053	0.29037
01/04/2002	3.32645	66.8147	37.5123	37.4293	37.1941	3.32843	72.5466	39.0791	0.88245
01/05/2002	1.59535	64.3029	27.2436	27.1094	26.4981	1.59791	85.1456	34.9408	0.62868
01/06/2002	2.73193	0.06622	15.08	14.9697	14.8616	3.04652	1.84007	31.6171	40.9046
01/07/2002	2.54235	0.00325	12.0113	11.9388	11.8669	4.26236	0.43029	30.4472	38.8096
01/08/2002	1.17444	0.00151	13.794	13.729	13.6644	1.96803	0.19902	39.6221	48.819
01/09/2002	0	56.104	21.5176	21.4512	21.3926	0	62.9366	29.3675	29.9288
01/10/2002	3.32295	61.0665	26.1314	26.017	25.9285	3.32683	72.872	37.1288	40.9798
01/11/2002	3.23499	58.6277	23.4654	23.3073	23.1824	3.24325	85.6563	34.8651	41.6591
01/12/2002	3.31367	35.8862	26.1349	25.9765	25.6745	3.32329	50.7419	33.5142	0.60914
01/01/2003	2.65566	27.9144	24.6893	24.6095	24.5102	2.65809	31.7269	42.825	46.4965
01/02/2003	0	9.8477	42.055	41.8506	41.2762	0	12.7396	54.7167	0.9793
01/03/2003	3.1946	7.64393	18.9151	18.856	18.6791	3.19764	8.70199	22.0145	0.44317
01/04/2003	4.69498	34.2916	42.0315	41.9386	41.675	4.69779	37.2564	44.2521	0.98876
01/05/2003	12.9675	46.73	79.0127	78.6452	76.8742	12.986	57.4795	88.7213	1.82388
01/06/2003	3.85593	0.09347	16.4757	16.3532	16.2331	4.29992	2.59743	35.3802	46.3582
01/07/2003	6.42532	2.60746	14.2877	14.2195	14.1521	6.46633	6.24442	27.5759	38.8431
01/08/2003	1.32301	0.00169	15.5819	15.496	15.411	2.21717	0.22407	29.3235	34.7399
01/09/2003	0	33.4714	22.3865	22.3424	22.3161	0	35.4853	29.0287	29.9641
01/10/2003	4.69542	25.1243	33.9198	33.8497	33.8059	4.69794	26.3145	44.7772	46.5642
01/11/2003	8.77958	27.8913	23.8914	23.8146	23.7447	8.79099	31.9542	31.8355	34.5762
01/12/2003	4.66572	17.4725	21.4702	21.3289	21.0333	4.68665	32.6839	37.938	44.8459
01/01/2004	2.64592	13.2197	18.1888	18.0684	17.8347	2.65424	21.4414	29.1139	0.42314
01/02/2004	0	13.0479	19.4086	19.298	19.0309	0	18.0686	28.9932	0.45152
01/03/2004	5.99083	15.2556	14.3306	14.2858	14.1518	5.99598	17.0065	15.1641	0.33576
01/04/2004	1.88798	21.7915	31.8987	31.8282	31.6281	1.88911	23.6938	33.6345	0.75039
01/05/2004	0	11.6375	43.8439	43.6398	42.6558	0	15.3179	53.3737	1.01203
01/06/2004	1.55057	0.03758	7.07018	7.00791	6.94655	1.72911	1.04431	21.9262	35.1875
01/07/2004	2.54235	0.00325	11.4494	11.4042	11.3592	4.26236	0.43029	33.2589	38.8936
01/08/2004	0	0	9.47489	9.43834	9.40194	0	0	24.6803	28.6175
01/09/2004	0	12.4981	9.17316	9.14348	9.11404	0	24.2937	26.5158	29.9365
01/10/2004	1.88588	20.0796	21.4345	21.364	21.2966	1.88815	24.4414	32.9274	35.3577
01/11/2004	0	26.7401	16.0939	16.0031	15.9013	0	53.9483	32.6171	39.2747
01/12/2004	1.87038	0.64815	9.11829	9.06149	8.95542	1.88115	17.0099	26.1695	34.6524
01/01/2005	2.63292	0.00339	9.33822	9.27787	9.15878	2.64779	0.44873	25.8362	32.4165
01/02/2005	6.55311	32.1832	32.9402	32.7896	32.3396	6.56268	38.7014	35.9656	0.76727
01/03/2005	5.9891	16.2101	11.2803	11.2301	11.1106	5.99526	18.9493	14.8881	0.2636

01/04/2005	2.86691	55.6102	31.7018	31.6317	31.4329	2.86864	60.5037	33.6403	0.74576
01/05/2005	0	25.8432	35.6147	35.4491	34.6508	0	31.5366	39.5381	0.82211
01/06/2005	2.35456	0.05707	16.1782	16.0237	15.8854	2.62569	1.58583	26.4214	35.142
01/07/2005	2.54235	0.00325	6.74906	6.69961	6.6505	4.26236	0.43029	24.8444	38.7591
01/08/2005	0	0	4.58382	4.5556	4.52744	0	0	20.5899	32.1365
01/09/2005	0	50.1364	15.3489	15.3065	15.2646	0	54.6989	28.1001	29.9479
01/10/2005	2.86591	41.1245	26.7434	26.6903	26.6403	2.86816	44.6785	33.5031	35.3646
01/11/2005	1.22381	80.2155	30.5316	30.3689	30.207	1.22722	124.653	38.5052	44.9006
01/12/2005	2.85261	28.7846	18.4436	18.3233	18.0712	2.86304	46.0367	28.6102	33.2795
01/01/2006	2.64153	13.1614	21.382	21.2379	20.9582	2.65168	29.5032	40.9811	0.49531
01/02/2006	3.11751	25.6913	44.344	44.0683	43.3832	3.12438	38.1799	71.0087	1.02929
01/03/2006	5.99049	15.4265	13.5418	13.4995	13.3729	5.99584	17.3408	15.1029	0.31728
01/04/2006	2.28765	25.7209	49.1928	49.0841	48.7755	2.28896	27.7312	49.2953	1.15722
01/05/2006	0	41.7167	121.951	121.384	118.65	0	49.2981	122.488	2.81503
01/06/2006	1.87871	0.04553	16.0239	15.9056	15.789	2.09505	1.26536	38.3502	51.5276
01/07/2006	2.54235	0.00325	12.1712	12.1095	12.0482	4.26236	0.43029	31.8543	38.8496
01/08/2006	0	0	23.1454	23.0457	22.9473	0	0	37.0071	46.6318
01/09/2006	0	22.6223	22.2588	22.1985	22.1605	0	25.3123	28.4252	29.9392
01/10/2006	2.28739	22.1792	34.8215	34.7245	34.6319	2.28883	23.7416	49.0607	51.7221
01/11/2006	0	3.41394	4.95988	4.9288	4.89579	0	4.67227	7.70797	9.43162
01/12/2006	2.27731	14.2648	24.9842	24.8264	24.5168	2.28487	21.5192	42.838	50.3822
01/01/2007	2.64153	12.2131	11.1982	11.1227	10.9756	2.65168	44.7332	25.3945	11.8107
01/02/2007	0	15.1199	18.9355	18.817	18.513	0	22.1897	30.111	0.43923
01/03/2007	5.98877	16.0333	11.3354	11.285	11.1665	5.995	18.9424	14.894	0.26493
01/04/2007	1.88804	40.1652	30.9234	30.855	30.6611	1.88914	43.393	31.7902	0.72745
01/05/2007	0	25.7422	39.1722	38.99	38.112	0	30.0977	39.3446	0.90422
01/06/2007	1.55059	0.03759	9.64053	9.57982	9.51905	1.72912	1.04461	25.4837	33.2985
01/07/2007	2.54235	0.00325	9.45041	9.40943	9.36858	4.26236	0.43029	31.6972	38.8794
01/08/2007	0	0	7.20172	7.18645	7.17121	0	0	19.1979	21.9443
01/09/2007	0	0	10.9245	10.8836	10.8432	0	0	26.3931	29.9213
01/10/2007	1.85568	4.18571	11.7672	11.7255	11.6846	1.8745	41.0617	29.5488	33.3618
01/11/2007	0	46.5097	18.3264	18.2273	18.118	0	77.6003	38.7769	46.6442
01/12/2007	1.87038	3.72079	9.52884	9.46267	9.32536	1.88116	40.4443	24.488	31.6033
01/01/2008	2.64153	18.8382	12.5458	12.4609	12.2962	2.65168	44.4125	25.9058	0.28985
01/02/2008	3.58568	6.46273	6.6266	6.58476	6.4773	3.59356	9.58514	10.8224	0.15316
01/03/2008	5.98797	16.0617	9.40007	9.35672	9.2491	5.99459	19.8508	14.6401	0.21897
01/04/2008	2.99678	40.4247	29.7736	29.7077	29.521	2.99858	43.961	31.642	0.7004
01/05/2008	3.19009	34.4064	30.1477	29.9534	29.2582	3.19554	48.6173	44.9006	0.69416
01/06/2008	2.46122	0.05966	8.5321	8.47654	8.42077	2.74462	1.65781	24.5545	33.217
01/07/2008	2.54235	0.00325	10.6395	10.5874	10.5356	4.26236	0.43029	31.4098	38.8571
01/08/2008	0	0	12.4565	12.3857	12.3154	0	0	26.9536	32.8464
01/09/2008	0.23874	0.00031	10.3835	10.3273	10.2718	0.40012	0.04044	24.3969	29.8685
01/10/2008	1.17449	0.00151	10.4797	10.3932	10.3084	1.96807	0.19925	23.809	33.0896
01/11/2008	1.35484	0.00174	12.4812	12.393	12.3069	1.37952	0.23	35.272	49.5066
01/12/2008	2.94005	0.00378	9.37077	9.30099	9.15819	2.97291	0.50003	23.8471	25.894

01/01/2009	2.63309	11.9782	14.3488	14.2516	14.0631	2.64787	55.0572	34.8237	0.3325
01/02/2009	3.68463	27.6625	44.3691	44.093	43.4336	3.69309	42.3311	73.84	1.03048
01/03/2009	5.98054	12.4015	5.34876	5.3234	5.26082	5.99125	19.7207	13.6509	0.12189
01/04/2009	3.59521	51.4364	31.0767	30.9884	30.7936	3.59785	57.7853	43.6985	0.73059
01/05/2009	0.79747	30.3496	18.6264	18.5302	18.1124	0.79886	63.0346	39.9881	0.42973
01/06/2009	2.95349	0.07159	11.0373	10.97	10.9028	3.29356	1.98953	34.4757	46.6309
01/07/2009	2.54235	0.00325	5.83867	5.81383	5.78905	4.26236	0.43029	29.0426	38.8835
01/08/2009	1.21337	0.00155	7.48192	7.45202	7.42208	2.03347	0.20549	39.9294	53.8459
01/09/2009	0	0	6.51795	6.49232	6.46688	0	0	24.3758	29.9166
01/10/2009	1.40942	0.00181	9.60386	9.55238	9.50189	2.36171	0.23913	34.5282	46.6192
01/11/2009	5.96983	43.0677	16.304	16.2248	16.1385	5.98642	67.0071	41.0638	49.7719
01/12/2009	3.57539	21.749	13.405	13.3346	13.225	3.58892	38.3288	36.9351	46.346
01/01/2010	2.64153	0.0034	10.9439	10.8809	10.7575	2.65168	0.45024	36.129	48.8129
01/02/2010	5.46096	0.00702	40.2179	39.9803	39.4395	5.48242	0.92874	74.2769	83.9319
01/03/2010	5.98685	15.9461	9.31399	9.271	9.16428	5.99408	19.8473	14.6267	0.21692
01/04/2010	3.96535	64.0896	38.8339	38.748	38.5043	3.96791	70.8454	47.1155	0.91353
01/05/2010	3.58887	63.5988	31.812	31.6193	30.9064	3.59499	89.4764	47.0832	0.73327
01/06/2010	3.25702	0.07895	11.3321	11.2626	11.1928	3.63205	2.19385	36.4777	49.8123
01/07/2010	2.54235	0.00325	11.7038	11.6645	11.6254	4.26236	0.43029	34.3511	38.9163
01/08/2010	1.36997	0.00175	13.5357	13.4889	13.442	2.29588	0.23199	35.2782	39.8319
01/09/2010	0	0	11.8664	11.8096	11.7534	0	0	25.5556	29.8892

Tabla 8. Valores del DBO de todos los tramos.

Nitratos									
Fecha	Grande2	Grande4	Grande6	Grande7	Grande8	Grande1	Grande3	grande5	Grande9
01/10/2001	0.11771	0.00214	0.84496	1.08409	1.30247	0.10724	0.2754	0.41169	0.96937
01/11/2001	0.19702	0.00787	0.6953	1.20258	1.64694	0.19316	1.00972	0.22504	0.31836
01/12/2001	0.6762	1.02227	1.05863	1.56515	2.18667	0.67279	1.5445	0.40904	2.63032
01/01/2002	0.75425	0.66622	0.98003	1.36628	1.83175	0.75191	0.94007	0.47556	2.85683
01/02/2002	0.86691	0.758	0.92641	1.40366	1.69609	0.86305	0.72407	0.15523	1.6927
01/03/2002	0.70217	1.04402	0.80235	1.08673	1.45462	0.70096	0.92294	0.47342	1.72349
01/04/2002	0.75281	0.88427	0.70164	0.80175	0.84733	0.75125	0.78724	0.47412	0.84546
01/05/2002	0.80747	1.32126	0.88407	1.30818	1.72012	0.80336	1.40257	0.33488	1.71602
01/06/2002	0.77784	0.05193	1.14396	1.64266	2.09969	0.76258	1.37603	0.48025	1.08446
01/07/2002	1.24224	0.01195	1.32967	1.7152	2.08579	1.2194	1.55318	0.48565	0.20659
01/08/2002	0.76195	0.01494	1.01144	1.38141	1.74253	0.6846	1.92787	0.58959	0.1663
01/09/2002	0.85	0.55055	1.45934	1.83095	2.16096	0.85	0.61661	1.13399	0.28602
01/10/2002	0.75442	0.88047	1.03374	1.48876	1.85939	0.75199	0.84979	0.47626	0.9567
01/11/2002	0.19632	0.85098	0.67156	1.19553	1.60114	0.19284	1.09986	0.09762	0.20245
01/12/2002	0.75542	0.79775	0.99254	1.37111	1.79578	0.75234	0.92052	0.52001	1.81804
01/01/2003	0.76246	1.25228	0.8458	1.12675	1.41558	0.76109	1.27019	0.42386	0.67004
01/02/2003	0.86345	0.73335	0.81896	1.24199	1.62644	0.86152	0.70419	0.15446	1.62319
01/03/2003	0.7021	1.14568	0.72129	0.96086	1.22694	0.70093	1.21043	0.42338	1.22961
01/04/2003	0.76282	1.38568	0.67596	0.78772	0.83476	0.76126	1.34354	0.42445	0.83292
01/05/2003	0.80689	1.12605	0.86901	0.93715	0.97254	0.80304	1.19684	0.33796	0.97022

01/06/2003	0.78796	0.05241	1.12372	1.61646	2.06657	0.77264	1.38959	0.43016	1.07807
01/07/2003	1.20465	0.59529	1.17044	1.53054	1.8758	1.20209	1.33956	0.4014	0.20173
01/08/2003	0.86564	0.01507	0.79529	1.10654	1.40794	0.79218	1.94685	0.21573	0.35381
01/09/2003	0.85	1.07969	1.48159	1.81533	2.10838	0.85	1.14367	1.19797	0.26615
01/10/2003	0.76301	1.24229	0.86682	1.20958	1.48749	0.76135	1.16876	0.4245	0.74011
01/11/2003	0.19826	1.80545	0.72043	1.20256	1.55722	0.19369	1.80085	0.2065	0.31946
01/12/2003	0.7664	0.89728	0.99633	1.40161	1.92104	0.76273	1.46556	0.42702	0.98619
01/01/2004	0.89061	0.74778	1.05555	1.50049	2.02207	0.89026	1.04678	0.42672	2.51494
01/02/2004	1.48001	0.44449	1.37811	2.02611	2.65632	1.48	0.55418	0.22096	2.65102
01/03/2004	0.702	0.95273	0.63066	0.77665	0.89915	0.70089	0.93091	0.42327	0.89728
01/04/2004	0.89042	1.01867	0.71866	0.84049	0.89724	0.89019	0.9654	0.42513	0.89526
01/05/2004	0.394	0.72613	1.20452	1.70513	1.78284	0.394	0.77488	0.28169	1.77858
01/06/2004	0.89427	0.03674	1.17928	1.59897	1.98899	0.89189	0.99813	0.43612	1.14797
01/07/2004	1.24224	0.01195	1.27201	1.58951	1.89868	1.2194	1.55318	0.43536	0.18771
01/08/2004	1.15652	0.0095	0.99097	1.18182	1.3702	1.15248	1.23796	0.20209	0.30221
01/09/2004	0.85	0.41433	1.23596	1.49485	1.74353	0.85	0.79985	1.19798	0.2825
01/10/2004	0.89067	0.99255	1.02665	1.46064	1.83363	0.8903	1.0264	0.42334	0.84869
01/11/2004	0.44	0.46842	0.76501	1.20671	1.61818	0.44	0.93138	0.23179	0.25923
01/12/2004	0.89113	0.06442	1.02491	1.31458	1.68362	0.8905	1.6022	0.42564	0.98736
01/01/2005	0.43134	0.00472	0.60677	0.84482	1.14428	0.4306	0.61099	0.26708	1.14126
01/02/2005	0.05901	0.29061	0.3888	0.56225	0.65175	0.059	0.23951	0.02411	0.65045
01/03/2005	0.70218	0.70378	0.63786	0.90422	1.25413	0.70096	0.53011	0.26388	1.68107
01/04/2005	0.43069	0.62086	0.52568	0.67121	0.73845	0.43031	0.43351	0.26435	0.73682
01/05/2005	0.078	0.83099	0.38929	0.58548	0.68636	0.078	0.67654	0.04327	0.68472
01/06/2005	0.43695	0.02226	0.99783	1.60373	2.11002	0.43311	0.59679	0.26667	1.17879
01/07/2005	1.24224	0.01195	1.25397	1.54027	1.81683	1.2194	1.55318	0.27944	0.21346
01/08/2005	0.10251	0.005	0.27094	0.49065	0.70908	0.06673	0.64276	0.02624	0.467
01/09/2005	0.85	0.20154	1.35374	1.6577	1.94731	0.85	0.2196	1.19779	0.27667
01/10/2005	0.43089	0.60064	0.68114	1.03162	1.29185	0.4304	0.45336	0.26267	0.83142
01/11/2005	0.064	0.41328	0.72745	1.18509	1.32175	0.064	0.52401	0.03318	0.06333
01/12/2005	0.43147	0.5512	0.73528	1.11443	1.59414	0.43062	0.61944	0.28204	1.06098
01/01/2006	0.42401	0.3039	0.65647	0.95296	1.31806	0.4218	0.47658	0.30472	3.25371
01/02/2006	0.05409	0.09591	0.54906	1.03841	1.67451	0.05348	0.0998	0.00891	1.82756
01/03/2006	0.70204	0.65628	0.58726	0.80089	1.01892	0.70091	0.4894	0.30342	1.0168
01/04/2006	0.42231	0.42284	0.36742	0.4036	0.43519	0.42103	0.29469	0.30326	0.43423
01/05/2006	0.03725	0.83369	0.04407	0.06797	0.12122	0.03321	0.65181	0.01207	0.12093
01/06/2006	0.44341	0.03607	0.76004	1.13356	1.48068	0.43057	0.94854	0.30487	1.06401
01/07/2006	1.24224	0.01195	1.16514	1.45284	1.73181	1.2194	1.55318	0.31229	0.20075
01/08/2006	0.24599	0.01166	0.35752	0.64633	0.92614	0.16108	1.49928	0.01351	0.11293
01/09/2006	0.85	0.17988	1.47864	1.80208	2.08263	0.85	0.20044	1.19763	0.28117
01/10/2006	0.42273	0.44594	0.6547	0.96797	1.23757	0.42123	0.32818	0.30196	0.79228
01/11/2006	0.05397	0.3633	0.40316	0.73742	1.03994	0.05064	0.31173	0.09415	0.1587
01/12/2006	0.4248	0.43763	0.70446	1.04222	1.46837	0.42206	0.46473	0.30303	0.94398
01/01/2007	0.42716	0.46316	0.69144	1.0269	1.44329	0.42322	1.33463	0.27749	1.1315
01/02/2007	0.05905	0.53038	0.5384	0.99207	1.61477	0.04857	0.47778	0.07363	2.23449

01/03/2007	0.70221	0.73104	0.64406	0.91051	1.25979	0.70099	0.56656	0.27333	1.66039
01/04/2007	0.42413	0.93177	0.45577	0.53123	0.57439	0.42184	0.63063	0.27495	0.57313
01/05/2007	0.06513	2.06025	0.05902	0.09187	0.14931	0.06004	1.43233	0.01047	0.14896
01/06/2007	0.4614	0.05157	0.79284	1.20454	1.59074	0.43873	1.34564	0.27723	1.05411
01/07/2007	1.24224	0.01195	1.21218	1.48234	1.7458	1.2194	1.55318	0.28592	0.18802
01/08/2007	0.13245	0.01077	0.21132	0.38378	0.53825	0.06243	1.37462	0.02833	0.01552
01/09/2007	0.85066	0.0066	1.3073	1.61129	1.9018	0.85017	0.86052	1.19781	0.28919
01/10/2007	0.43714	0.23349	0.65441	0.95289	1.22487	0.42772	1.99442	0.27436	0.8591
01/11/2007	0.06417	1.17034	0.77434	1.50803	2.15897	0.05968	1.44356	0.03645	0.20556
01/12/2007	0.43112	0.20212	0.70351	1.03302	1.46887	0.425	1.92338	0.27581	1.03717
01/01/2008	0.55369	0.56518	1.12916	1.41477	1.76889	0.55166	1.13267	1.15353	4.3503
01/02/2008	0.08442	0.38245	0.35972	0.66695	1.10563	0.08144	0.35814	0.01943	2.93638
01/03/2008	0.70229	1.21138	1.24081	1.49305	1.83955	0.70103	1.16475	1.15186	3.27157
01/04/2008	0.55217	1.00031	1.34781	1.49497	1.56899	0.55096	0.9246	1.15216	1.56552
01/05/2008	0.07067	0.60354	0.46324	0.90258	1.47927	0.06645	0.57644	0.01759	1.50118
01/06/2008	0.57146	0.03915	1.07667	1.38281	1.67207	0.55969	1.03633	1.15227	0.44844
01/07/2008	1.24224	0.01195	1.46197	1.72142	1.97375	1.2194	1.55318	1.16084	0.19961
01/08/2008	0.76548	0.01501	0.81229	1.16237	1.50599	0.68621	1.93725	0.21757	0.18296
01/09/2008	1.00061	0.00775	1.31111	1.53028	1.73837	1.00015	1.01043	1.19648	0.81698
01/10/2008	0.61645	0.009	1.1908	1.56565	1.90126	0.58024	1.16364	1.15197	1.19303
01/11/2008	0.2	0.00153	2.11877	2.59671	3.01539	0.2	0.19999	4.28299	1.20075
01/12/2008	0.55768	0.00866	1.06612	1.33601	1.69155	0.55345	1.11786	1.15153	1.14697
01/01/2009	0.75499	0.50144	1.13151	1.57463	2.12001	0.75224	1.96299	0.59966	4.21882
01/02/2009	0.90641	2.9962	1.75527	2.48811	3.37457	0.90289	4.28541	0.99917	3.36784
01/03/2009	0.70285	1.2032	0.82713	1.00041	1.2436	0.70128	1.53335	0.59369	4.02526
01/04/2009	0.75289	1.59983	1.21681	1.7754	2.25807	0.7513	1.51626	0.5937	2.25308
01/05/2009	0.80627	0.49927	1.59067	2.45245	2.84321	0.80282	0.92681	0.33538	2.83643
01/06/2009	0.77561	0.05004	1.20636	1.69295	2.14895	0.76157	1.3283	0.59895	1.02289
01/07/2009	1.24224	0.01195	1.36358	1.63013	1.8906	1.2194	1.55318	0.61562	0.18797
01/08/2009	0.76395	0.01498	0.74918	0.94227	1.13538	0.68552	1.93308	0.21286	0.50713
01/09/2009	0.85066	0.0066	1.24996	1.54824	1.83407	0.85017	0.86052	1.19905	0.29108
01/10/2009	0.8277	0.01128	1.06958	1.43717	1.77055	0.78567	1.45867	0.5978	1.00534
01/11/2009	0.1965	1.50518	0.61543	1.04903	1.44789	0.19293	2.2224	0.20246	0.23323
01/12/2009	0.75576	1.26682	1.08756	1.46892	1.91702	0.75259	1.74882	0.59596	0.85587
01/01/2010	0.73367	0.00983	0.77646	0.93074	1.12576	0.73165	1.269	0.38263	0.97735
01/02/2010	0.87016	0.01578	0.98487	1.47483	2.11272	0.86457	2.03324	0.14183	0.31362
01/03/2010	0.70238	0.89336	0.74573	0.99704	1.34274	0.70107	0.77981	0.38337	2.82793
01/04/2010	0.73225	0.74244	0.7226	0.99603	1.25972	0.73101	0.6122	0.38142	1.25694
01/05/2010	0.80426	0.70575	0.9529	1.4191	1.96105	0.80192	0.90387	0.33044	1.95637
01/06/2010	0.75134	0.04562	0.86281	1.09647	1.3181	0.73963	1.21381	0.38633	1.01817
01/07/2010	1.24224	0.01195	1.1192	1.30597	1.4892	1.2194	1.55318	0.38879	0.18629
01/08/2010	0.68373	0.00945	0.51196	0.55737	0.6033	0.64839	1.22289	0.21514	0.23797
01/09/2010	0.85066	0.0066	1.28015	1.53996	1.78733	0.85017	0.86052	1.19679	0.30076

Tabla 9. Valores de Nitratos de todos los tramos.

Nitrógeno Orgánico									
Fecha	Grande2	Grande4	Grande6	Grande7	Grande8	Grande1	Grande3	grande5	Grande9
01/10/2001	0.03114	0	1.15687	1.15408	1.15136	0.06996	0	0.75448	1.07658
01/11/2001	0.05948	0	0.36767	0.36651	0.3654	0.05976	0	0.89328	0.77214
01/12/2001	1.26697	0.46567	0.97433	0.9714	0.96661	1.27413	0.85038	0.75572	2E-06
01/01/2002	0.83273	0.50505	0.95161	0.94902	0.94498	0.83672	0.91208	0.72636	2E-06
01/02/2002	2.00054	1.81639	1.55178	1.5476	1.53969	2.00596	2.41835	1.4358	3E-06
01/03/2002	0.65837	0.27673	0.81869	0.81682	0.81347	0.65929	0.32369	0.72714	2E-06
01/04/2002	0.65903	0.92862	0.74779	0.74628	0.74381	0.65957	1.01861	0.72817	1E-06
01/05/2002	2.00144	0.30398	0.51774	0.51613	0.51222	2.00615	0.41576	0.10951	0
01/06/2002	0.48207	0.00062	1.01005	1.00672	1.00343	0.57309	0.01944	0.72507	5.20966
01/07/2002	0.10329	0	0.55757	0.55595	0.55431	0.2322	0	0.72516	1.19655
01/08/2002	0.64539	0	2.34291	2.33725	2.33151	1.45038	3E-06	1.49123	1.76239
01/09/2002	0	0	0.08992	0.08975	0.08958	0	0	0	0.27608
01/10/2002	0.83745	0.83098	0.88719	0.88509	0.88306	0.83885	1.01226	0.72724	1.07768
01/11/2002	0	0.19535	0.42936	0.42806	0.4268	0	0.2976	0.60693	0.77502
01/12/2002	1.27057	0.72494	0.82859	0.82629	0.8225	1.27614	1.06113	0.70769	2E-06
01/01/2003	0.83801	0.57496	0.97413	0.97246	0.97057	0.83913	0.66316	1.07473	0.97806
01/02/2003	2.0006	1.8197	1.56224	1.55804	1.55007	2.00598	2.41751	1.43633	3E-06
01/03/2003	0.83798	0.30777	1.03927	1.0369	1.03265	0.83912	0.3568	1.07378	2E-06
01/04/2003	0.83876	0.58131	1.06156	1.05942	1.05592	0.83946	0.63807	1.07487	2E-06
01/05/2003	0.15942	0.21403	0.50441	0.50284	0.49904	0.15975	0.27045	0.32845	0
01/06/2003	0.48207	0.00062	0.945	0.94185	0.93873	0.57309	0.01944	1.0705	5.20523
01/07/2003	0.44211	0.14347	0.67178	0.67008	0.66837	0.44644	0.36763	0.87927	1.20199
01/08/2003	0.03905	0	1.52088	1.51679	1.51265	0.08775	0	2.70578	2.09517
01/09/2003	0	0	0.07715	0.07704	0.07692	0	0	0	0.27786
01/10/2003	0.83889	0.66966	1.01713	1.01549	1.01391	0.8395	0.70547	1.07537	1.08968
01/11/2003	0	0.14283	0.68916	0.68766	0.68614	0	0.16616	0.89701	0.79369
01/12/2003	0.83067	0.30164	0.96972	0.96703	0.96258	0.83638	0.59623	1.07241	0.65831
01/01/2004	0.83324	0.41686	0.94677	0.94419	0.94017	0.83724	0.70704	0.75419	2E-06
01/02/2004	1.99921	1.68009	1.61726	1.61288	1.60459	2.00514	2.40321	1.43337	3E-06
01/03/2004	0.65857	0.3188	0.78091	0.77913	0.77594	0.65938	0.35983	0.75527	2E-06
01/04/2004	0.65903	0.67867	0.78049	0.77891	0.77634	0.65957	0.7452	0.75594	2E-06
01/05/2004	0.15933	0.20208	0.61953	0.6176	0.61293	0.1597	0.27355	0.32857	1E-06
01/06/2004	0.48207	0.00062	1.10372	1.09964	1.09561	0.57309	0.01944	0.75061	5.16582
01/07/2004	0.10329	0	0.55386	0.55263	0.55139	0.2322	0	0.75407	1.2103
01/08/2004	0.64539	0	2.15186	2.14723	2.14253	1.45038	3E-06	1.11459	1.77005
01/09/2004	0.2582	0	0.22158	0.22117	0.22076	0.25869	0	0	0.27646
01/10/2004	1.276	0.5917	0.9357	0.93387	0.9321	1.2782	0.73566	0.75557	1.0846
01/11/2004	0.01118	0.11419	0.47331	0.47206	0.47074	0.01124	0.24438	0.89539	0.78484
01/12/2004	1.25961	0.00124	1.0924	1.08952	1.08512	1.2708	0.03657	0.75304	0.7151
01/01/2005	1.05441	0	1.08553	1.08267	1.07819	1.06365	5E-06	0.75313	0.6325
01/02/2005	2.00243	1.95017	1.47973	1.47575	1.46821	2.00672	2.39249	1.43795	3E-06
01/03/2005	0.65828	0.25773	0.87845	0.87645	0.87286	0.65926	0.30652	0.75486	2E-06

01/04/2005	0.65902	0.67834	0.78364	0.78205	0.77947	0.65957	0.74568	0.75593	2E-06
01/05/2005	0.15944	0.21481	0.48725	0.48573	0.48206	0.15976	0.26788	0.32846	0
01/06/2005	0.48207	0.00062	0.95008	0.9463	0.94255	0.57309	0.01944	0.75253	5.13121
01/07/2005	0.10329	0	0.53056	0.52882	0.52707	0.2322	0	0.7508	1.18843
01/08/2005	0.64539	0	2.42216	2.41532	2.40841	1.45038	3E-06	1.10971	1.74974
01/09/2005	0	0	0.15351	0.15324	0.15298	0	0	0	0.27704
01/10/2005	1.27745	0.82026	0.85877	0.85715	0.85557	1.27886	0.89998	0.75586	1.08552
01/11/2005	0	0.13584	0.71394	0.71171	0.70957	0	0.22119	0.88234	0.77221
01/12/2005	1.26827	0.49323	0.91788	0.91533	0.91112	1.27532	0.82449	0.72578	0.58336
01/01/2006	0.8366	0.26957	1.001	0.99827	0.99403	0.84153	0.64502	0.75395	2E-06
01/02/2006	1.99803	1.57032	1.64306	1.63862	1.63019	2.00461	2.4245	1.43311	3E-06
01/03/2006	0.65851	0.30778	0.80625	0.80441	0.80112	0.65935	0.35059	0.75518	2E-06
01/04/2006	0.65907	0.68133	0.75458	0.75305	0.75057	0.65959	0.74127	0.75599	1E-06
01/05/2006	0.15948	0.21666	0.3276	0.32658	0.32411	0.15978	0.26194	0.32854	0
01/06/2006	0.48207	0.00062	1.05446	1.05098	1.04754	0.57309	0.01944	0.75245	5.20899
01/07/2006	0.10329	0	0.56508	0.56361	0.56213	0.2322	0	0.75352	1.20305
01/08/2006	0.64539	0	1.6585	1.65468	1.65081	1.45038	3E-06	0.98312	1.76332
01/09/2006	0	0	0.07285	0.07272	0.07259	0	0	0	0.2766
01/10/2006	1.278	0.80382	0.90539	0.90378	0.90222	1.2791	0.86754	0.75589	1.08728
01/11/2006	0	0.1456	0.57239	0.57077	0.56911	0	0.20563	0.85377	0.77874
01/12/2006	1.2693	0.54258	0.96885	0.96624	0.96211	1.27568	0.85152	0.75425	0.69535
01/01/2007	0.9945	0.13433	1.04348	1.04065	1.03623	1.00036	0.53823	0.75353	0.00833
01/02/2007	1.99822	1.58897	1.64054	1.63611	1.62769	2.0047	2.42069	1.43314	3E-06
01/03/2007	0.65823	0.25436	0.87706	0.87506	0.87147	0.65921	0.30605	0.75538	2E-06
01/04/2007	0.65906	0.68063	0.76776	0.7662	0.76368	0.65958	0.74229	0.75597	1E-06
01/05/2007	0.15951	0.21762	0.32761	0.32659	0.32412	0.15979	0.25895	0.32855	0
01/06/2007	0.48207	0.00062	1.07609	1.07288	1.06968	0.57309	0.01944	0.75278	5.24209
01/07/2007	0.10329	0	0.53959	0.53833	0.53705	0.2322	0	0.75346	1.20795
01/08/2007	0.64539	0	2.16827	2.16387	2.15941	1.45038	3E-06	1.11488	1.77331
01/09/2007	0.07809	0	0.19833	0.19793	0.19752	0.17549	0	0	0.27572
01/10/2007	1.24415	0.0229	1.06806	1.06594	1.06388	1.26376	0.25093	0.75484	1.08406
01/11/2007	0	0.13462	0.45581	0.45464	0.4534	0	0.23658	0.89538	0.7859
01/12/2007	1.25961	0.01817	1.07049	1.06745	1.06244	1.2708	0.22085	0.75295	0.60208
01/01/2008	0.86365	0.25056	0.96073	0.95812	0.95404	0.86874	0.63483	0.63046	2E-06
01/02/2008	1.99806	1.5735	1.65005	1.64559	1.63713	2.00463	2.42384	1.43303	3E-06
01/03/2008	0.70416	0.22154	0.85993	0.85797	0.85446	0.70528	0.28007	0.63161	2E-06
01/04/2008	0.65902	0.67852	0.66806	0.66671	0.6645	0.65957	0.74541	0.63233	1E-06
01/05/2008	0.26884	0.19219	0.87141	0.8687	0.86213	0.26952	0.28258	0.32841	2E-06
01/06/2008	0.48207	0.00062	1.04925	1.04607	1.04289	0.57309	0.01944	0.62931	5.23684
01/07/2008	0.10329	0	0.51	0.50871	0.50741	0.2322	0	0.63011	1.20428
01/08/2008	0.64539	0	2.01595	2.01049	2.00496	1.45038	3E-06	1.11363	1.75348
01/09/2008	0.07809	0	0.194	0.19349	0.19298	0.17549	0	0	0.27316
01/10/2008	0.29409	0	0.98791	0.98453	0.98124	0.66078	1E-06	0.62931	1.05596
01/11/2008	0	0	0.09876	0.09846	0.09817	0	0	0.27794	2.14347
01/12/2008	1.24038	0	1.01954	1.0165	1.01154	1.26204	6E-06	0.62958	0.22897

01/01/2009	0.6497	0.06347	0.71247	0.71053	0.70751	0.65535	0.32123	0.79109	1E-06
01/02/2009	0.15901	0.15941	0.7352	0.73321	0.72944	0.15955	0.25523	1.11452	1E-06
01/03/2009	0.65684	0.16102	0.71043	0.70881	0.70591	0.65858	0.26741	0.79209	1E-06
01/04/2009	0.65877	0.43739	0.75391	0.75239	0.7499	0.65945	0.49973	0.7936	1E-06
01/05/2009	0.15925	0.27242	0.475	0.47352	0.46994	0.15966	0.60486	0.83504	0
01/06/2009	0.48207	0.00062	0.69988	0.69784	0.69581	0.57309	0.01944	0.79011	5.24883
01/07/2009	0.10329	0	0.51747	0.51628	0.51507	0.2322	0	0.79016	1.20862
01/08/2009	0.64539	0	2.48511	2.47978	2.47438	1.45038	3E-06	1.11196	1.77026
01/09/2009	0.07809	0	0.2482	0.24768	0.24716	0.17549	0	0	0.27549
01/10/2009	0.15164	0	0.69474	0.69295	0.69122	0.34071	0	0.79047	1.07373
01/11/2009	0	0.13582	0.39235	0.39141	0.39043	0	0.22144	0.89532	0.78955
01/12/2009	0.65315	0.27143	0.70632	0.70465	0.7024	0.65691	0.50473	0.79151	0.76122
01/01/2010	1.22479	0	1.2694	1.26631	1.26151	1.23201	6E-06	0.75304	0.87561
01/02/2010	1.98833	0	1.69126	1.68687	1.67921	2.00023	0.00001	1.43284	0.40659
01/03/2010	0.65791	0.21959	1.02132	1.01899	1.01481	0.65906	0.27974	0.75513	2E-06
01/04/2010	0.65893	0.7904	0.88323	0.88144	0.87853	0.65952	0.88443	0.75587	2E-06
01/05/2010	0.24729	0.19326	0.86434	0.86166	0.85514	0.24791	0.28281	0.32841	2E-06
01/06/2010	0.48207	0.00062	1.26262	1.25894	1.25527	0.57309	0.01944	0.75229	5.24867
01/07/2010	0.10329	0	0.55299	0.55189	0.55078	0.2322	0	0.75452	1.2141
01/08/2010	0.64539	0	2.15315	2.14893	2.14466	1.45038	3E-06	1.11515	1.7752
01/09/2010	0.07809	0	0.18093	0.1805	0.18006	0.17549	0	0	0.27416

Tabla 10. Valores de Nitrógeno orgánico de todos los tramos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

6.1 CONCLUSIONES

Se hace énfasis en que los resultados son obtenidos solo de los cuatro puntos de monitoreo de la CONAGUA. Los resultados son muy congruentes y apegados a la realidad con lo que se obtiene un análisis satisfactorio de la evolución de los contaminantes en el río grande. Si se contara con la información de la calidad del agua de las aportaciones al río grande se podría realizar una modelación muy fina en la cual habría menos variación en los resultados arrojados por el modelo.

Se propusieron los valores de calidad del agua de la aportación de Atapaneo. Esto debido a la escases de información. Los valores mas cercanos a los presentes en Atapaneo son los presentes en el embalse de Cointzio esto debido a que se considera que la aportación de Atapaneo no sufre efectos por contaminación como es el caso del ambalse Cointzio. Se tomo esta decisión debido a que la modelación de la aportación de Atapaneo es de vital importancia para determinar una correcta evolución de los contaminantes a través del río grande. Se realizaron modelaciones sin contemplar esta aportación y los resultados no se apegaron a la situación actual y al realizar modelaciones con valores de calidad en la aportación Atapaneo los resultados arrojados se ajustaban a los esperados medidos.

Los niveles de oxígeno disuelto hacen que el río grande no sea apto en toda su longitud para la reproducción de peces, ya que se presentan zonas donde el oxígeno baja hasta niveles menores a los 2 mg/l lo que no permite la proliferación de la mayoría de los peces.

Los efectos de los retornos agrícolas y los aportes de la zona urbana los cuales incluyen descargas domésticas e industriales han afectado en puntos específicos los niveles de oxígeno disuelto, y también han aportado nutrientes en exceso lo que da como consecuencia la eutrofización de partes del río, este efecto no queda relegado solo al río sino que al desembocar al lago la presencia de nutrientes es alta lo que es un aporte a los problemas de eutrofización presentes en el lago de Cuitzeo.

Los graves efectos presentes antes y después de la aportación el río chiquito son debidos en gran parte por la aportación de la zona urbana aunándosele a esto la aportación de un módulo de riego lo que da como resultado la zona más crítica en el tramo del río ya que se presentan los niveles de oxígeno más bajos e insuficientes para una buena calidad de la vida acuática. Bajo este análisis se puede determinar que los efectos producidos por la contaminación a partir de estos tramos indican que se pierde la capacidad de asimilación o dilución del río, aunque se aprecia un aumento en el oxígeno disuelto después de la aportación de Atapaneo los efectos de los contaminantes continúan bajando los niveles de oxígeno disuelto. Presentándose esto hasta la desembocadura del río grande.

Los nitratos se mantienen muy por debajo de los límites marcados por La Organización Mundial de la Salud (OMS) la cual fija el límite de nitratos en el agua de consumo humano en 50 mg/l de nitrato (como N). En cambio, la Agencia para la Protección del Medio Ambiente Norteamérica (EPA) sitúa este límite en 10 mg/l de nitrato.

En un agua donde esta presente el amoníaco se desarrollan microorganismo y se encuentran problemas de corrosión y de cloración, a causa de la formación de cloraminas.

Los niveles de BDO5 en los tramos del río en análisis se encuentran un poco arriba del promedio mensual que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales) para uso público urbano el cual es de 75 mg/l y por debajo del promedio mensual que se determina para uso en riego agrícola proveniente de la misma norma el cual es de 150 mg/l. Lo que indica que cumple la norma el río grande para descargar al lago de Cuitzeo en lo que respecta a la demanda bioquímica de oxígeno.

En lo que respecta al Nitrógeno revisando la NOM-001-SEMARNAT-1996 los niveles de nitrógeno promedio principalmente de los sitios de monitoreo son tan bajos que se consideran nulos ya que el promedio mensual que indica la norma se encuentran en los 40 mg/l y los niveles presentes en los sitios de monitoreo de la CONAGUA se encuentran en un promedio de 0.9 mg/l de nitrógeno orgánico.

6.2 RECOMENDACIONES

A falta de sitios de monitoreo en el trayecto del río no se cuenta con la suficiente información para proveer una modelación muy fina en todo el río por lo que una red de monitoreo mensual de los contaminantes es una aportación de gran importancia ya que los monitoreos son solo en pocos puntos y se realizan cada tres meses lo que lo que deja mucho espacio en donde no se analiza la evolución de los conrtaminantes.

El modelo cuenta con la característica de que ofrece una representación de la evolución de los contaminantes durante todo el año es decir incluyendo meses de estiaje y lluvia lo que ofrece la evolución en los tiempos mas críticos y en los mas favorables lo que se resumen en una representación mas apegada a la realidad. Tomando en cuenta esto se recomienda el modelo ya que es una excelente forma de conocer lo que pasa durante todo el año.

Con respecto a los monitoreos para la aplicación eficiente del modelo GESCAL se recomienda que se hagan en las aportaciones que tenga el río, lago o tramo que se desea modelar esta aportación debe contar con un gasto medido al momento de realizarse las pruebas de calidad del agua, este gasto debe ser introducido en el modelo junto con la calidad constituyendo una aportación, la cual debe ser en ocasiones acoplada al modelo ya diseñado en SIMGES esto se debe a que no siempre se cuenta con la información de las aportaciones al río sino de las mediciones directamente en el trayecto del río lo que no es muy útil para modelar ya que es complicado transformar esos puntos de medición del río a aportaciones. Estos puntos son solo útiles al momento de calibrar el modelo ya que ahora si es esencial conocer la evolución que tiene el contaminante en el río. Para la aplicación del modelo GESCAL es importante que los monitoreos se lleven a cabo cada mes en todas las aportaciones o esencialmente en las de mayor importancia. Ya que el modelo GESCAL esta sujeto a las imposiciones del modelo SIMGES al cual se le ingresan y arroja valores mensuales. De realizarse esto se evitan los errores por rellenados a falta de información.

Los efectos de los cocontaminantes pueden disminuirse tomando las medidas necesarias como la aplicación sin excepción de las normas para descargas en aguas y bienes nacionales como lo es la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

Para las zonas donde se presentan los niveles más altos de contaminación esto tomando en cuenta los efectos que producen en el oxígeno disuelto. Se propone que se de un tratamiento secundario y con ello reducir las grasas, arenas, aceites y sólidos gruesos en lo que respecta al

tratamiento primario para después con el tratamiento secundario degradar el contenido biológico del agua residual.

Aplicando este tratamiento secundario a los tramos donde se aprecian los mayores efectos de la contaminación. Ayudaría en gran medida al río a recuperar su capacidad de depuración.

En lo que respecta a la desembocadura al lago de Cuitzeo se recomienda un tratamiento terciario ya que lo que es de vital importancia evitar que lleguen al lago en una gran cantidad los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo ya que son los principales responsables de la eutrofización del lago.

La recomendación general en lo que respecta al tratamiento del agua del río grande que desemboca al lago de Cuitzeo y evitar la continua eutrofización del lago. Sería un tren de tratamiento el cual nos permita remover el nitrógeno, amoníaco, nitratos y el fósforo como también reducir la demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos suspendidos ya que estos contaminantes son los principales causantes de los efectos de eutrofización presentes en el lago de Cuitzeo.

Se recomienda un tren de tratamiento compuesto por un proceso anaerobio al inicio para remover el DBO con el menor costo posible como también remover nitrógeno y fósforo, después se recomiendan un proceso anóxico en el cual se busca remover lo que son los nitratos (nitrógeno), consecuentemente se pasa a un proceso aerobio en el cual se removerá el carbono y se consumirá el fosfato y el amonio.

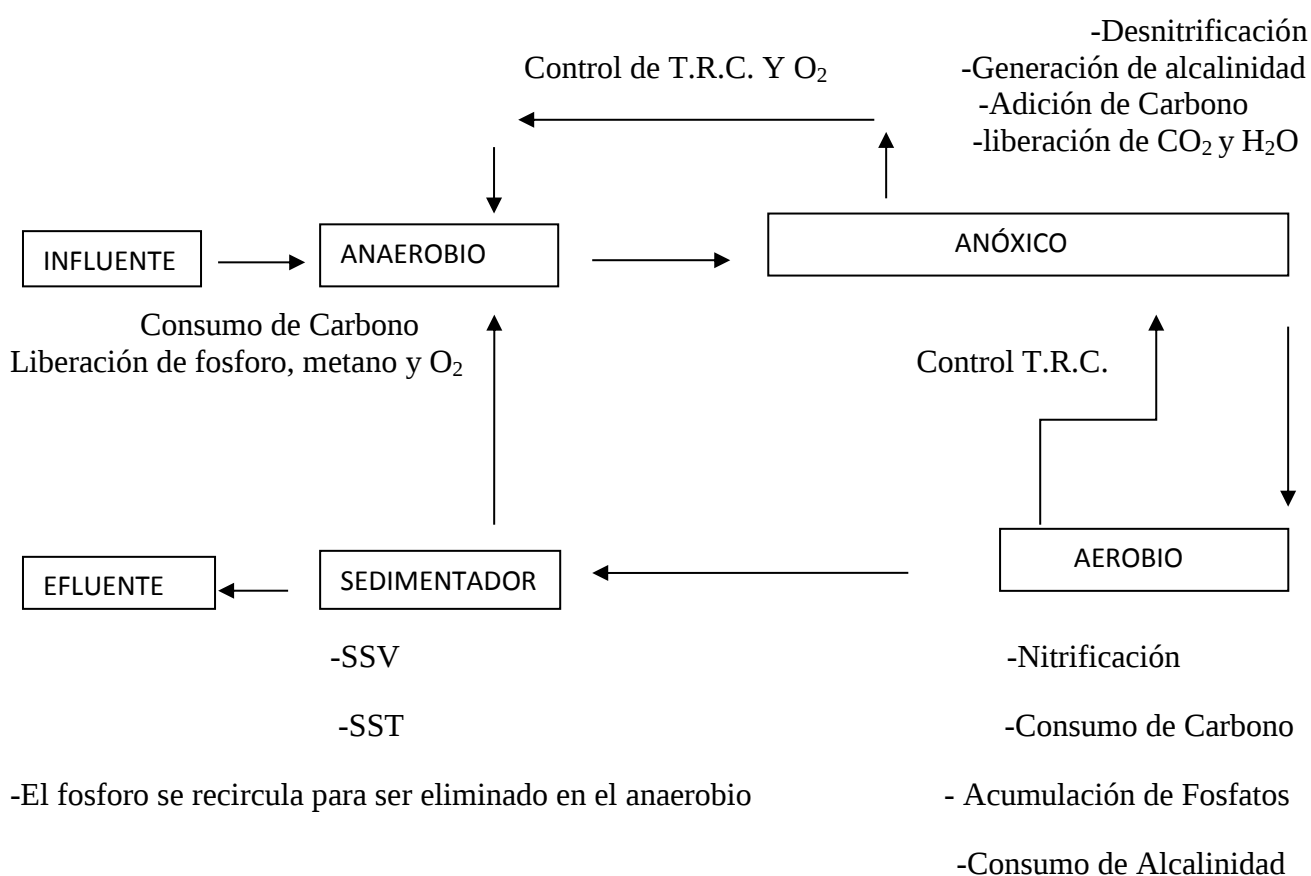


Figura 44. Recomendación general de tren de tratamiento.

Los procesos que se llevan acabo en el tren de tratamiento son los que darán como resultado una calidad superior del agua y con ello contribuir a aumentar la capacidad de dilución del lago de Cuitzeo.

7. Referencias

Andreu, J.; Solera, A.; Capilla, J.; Ferrer, J. 2012. Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Versión 3.00. Manual del Usuario. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Solera A. Paredes J. Andreu J. 2007. AQUATOOLDMA Entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas. MANUAL DE USUARIO Versión 1.00. UPV España.

Bravo M. Barrera G. Mendoza M. Sáenz J. Bahena F. Sánchez R. Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. Marzo de 2012.

García R. 2011. Simulación numérica del transporte de contaminantes, en el Río Grande de Morelia (Modelo QUAL-2E) Instituto Politécnico Nacional. Tesis de posgrado. México D.F.

Chow, Ven Te. 1966. Hidráulica de canales abiertos, Edit. McGRAW-HILL.

J. Paredes, A. Solera, J. Andreu. 2009. Modelo GESCAL para la simulación de la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos. Manual de usuario. Versión 1.1. Instituto de ingeniería del agua y medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

J. Paredes, A. Solera, M. Monerris. 2011. Ejercicios de modelación de la calidad del agua. Desarrollo de ejercicios prácticos de modelación de la calidad del agua elaborados con el programa GESCAL del entorno de ayuda a la decisión AQUATOOL. Instituto de ingeniería del agua y medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

J. Paredes. 2004. Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

J. Hernández. 2011. Evaluación Del Cambio Climático En La Gestión De Sistemas De Recursos Hídricos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.

A. Correa. 2012. Modelación hidrológica distribuida incluyendo aspectos medioambientales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.

R. Gaytán. 2005. Reglas de operación del sistema del río grande de Morelia, enfocadas al uso agrícola. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.

R. Ruiz. 2011. Evaluación de la contaminación en cuencas por medio de un sistema de información geográfico. Caso de estudio: cuenca del Río Grande de Morelia. Instituto Politécnico Nacional. Tesis de posgrado. México D.F.

Departamento de salud y servicios humanos de EE. UU., Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR por sus siglas en inglés). Resumen de salud pública. Amoníaco. CAS#: 7664-41-7. Septiembre de 2004.

Albert, Lilia A. 1985. Curso básico de toxicología ambiental. Edit. Limusa S. A. de C.V. 2ª ED. Cfr. vid p. 276.

NOM-001-SEMARNAT-1996

<http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=63&n3=98&n4=98>