UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de la capacidad predictiva de un modelo dinámico de calidad del agua aplicando técnicas de computación evolutiva, optimización multiobjetivo y procesamiento recursivo de datos

Juan Sebastián Hernández Suárez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
2014

Análisis de la capacidad predictiva de un modelo dinámico de calidad del agua aplicando técnicas de computación evolutiva, optimización multiobjetivo y procesamiento recursivo de datos

Juan Sebastián Hernández Suárez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:
Ph.D., M.Sc., I.C. Luis Alejandro Camacho Botero
Codirector:
Ph.D., M.Sc., I.C. Carlos Arturo Duarte Agudelo

Línea de Investigación:
Modelación de fenómenos y amenazas naturales
Grupo de Investigación:
Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos (GIREH)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
2014

A Dios, mis padres Harvey y Mónica, Dennise, mi hermano Diego y mis amigos

Agradecimientos

El autor manifiesta sus agradecimientos a:

Dios, mis padres Harvey y Mónica, a Diego y a toda mi hermosa familia. Siempre me han motivado a mirar más allá e ir un paso adelante, con una paciencia y amor increíbles. A Dennise, por ser mi gran aliada en el camino de la vida, sin ti habría sido menos emocionante concluir esta etapa; llevo en mi corazón tus palabras de aliento en medio de momentos de duda.

El Ingeniero Luis Alejandro Camacho, a quien le debo no solo parte de mi crecimiento académico y profesional, sino el ideal de una buena causa a través de su edificante ejemplo.

El Ingeniero Carlos Duarte, por su dedicación a una excelente docencia y apoyo en la finalización de este trabajo de investigación.

Colciencias y las Vicerrectorías de Investigación y Académica de la Universidad Nacional de Colombia, por su apoyo económico a lo largo de este trabajo de investigación.

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá por el suministro de información para el desarrollo de esta tesis.

El excelente grupo de trabajo del proyecto de *Modelación Dinámica de la Calidad del Agua del Río Bogotá*, con quienes tuve la oportunidad de empezar mi camino profesional y aprender muchísimo. Comparto recuerdos especiales con Hugo, Manuel, Juan Diego, Sonia, Nathalia, Omar, Jairo, Ricardo y Miguel Ángel.

Los profesores de la Unidad Académica de Hidráulica, en especial a Rafael Ortiz, Leonardo Donado, Pedro Avellaneda, Erasmo Rodríguez y Carlos Cubillos. Muchas gracias por haberme dado la posibilidad de ser docente durante cinco períodos académicos y haber compartido pequeños momentos de gran enriquecimiento académico y personal.

Mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional y del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos (GIREH), en especial a Camilo, Hermann, Daniel Pérez, Jahir, Werner, William, Omar Cárdenas, Camilo Perdomo, Camilo González, Breitnner, Diana Chaves, Lorena Mendez, Andrés Rojas, Sergio Redondo, Adriana, Inés, Julio, Víctor, Albeiro, Eduardo, Mónica, Juan Camilo y Raúl, por darle más gracia a tanto estudio.

Resumen

En este trabajo se propone una metodología para la calibración de modelos dinámicos de calidad del agua, la cual se aplica utilizando datos de tres tramos del río Bogotá. Para este propósito, se hace una revisión detallada de la estructura del modelo unidimensional, agregado e integrado ADZ-MDLC-QUASAR (AMQQ, Camacho *et al*., 2012), que permite extender los resultados encontrados a marcos de modelación basados en la ecuación de advección–dispersión y viceversa. A partir de ejercicios sintéticos y utilizando datos reales en el río Bogotá con el modelo AMQQ, se describen y aplican diferentes algoritmos para la estimación de los parámetros de dicho modelo. Los resultados indican que se debe hacer una aplicación conjunta de diferentes formas de agregación de funciones objetivo y de técnicas de calibración que sirvan como marco de referencia, que sean efectivas y eficientes en la identificación de combinaciones óptimas de parámetros y que hagan una descripción apropiada de la incertidumbre paramétrica. En este sentido, se encuentra que el uso de GLUE, SCE-UA y SCEM-UA, en conjunto con un análisis multiobjetivo sencillo, permiten obtener un conocimiento amplio de la capacidad predictiva y obtener conjuntos de soluciones que expliquen consistentemente el comportamiento observado del sistema modelado y el orden de magnitud de los determinantes medidos.

Palabras clave: Modelación dinámica de la calidad del agua, modelo QUASAR extendido, GLUE, *Shuffled Complex Evolution Metropolis*, optimización multiobjetivo.

Abstract

A dynamic water quality model calibration procedure is proposed and is applied using data obtained at three reaches of the Bogota River. For this purpose, a detailed revision of the one-dimensional, lumped and integrated ADZ-MDLC-QUASAR (AMQQ, Camacho et al., 2012) model structure is performed, which allows the extension of the calibration results to modeling frameworks based on the advection–dispersion equation and vice versa. Using the AMQQ model with synthetic and real data from the Bogota river, different parameter estimation algorithms are described and executed. The results indicate that it is necessary to perform a joint application of different objective function aggregation approaches and calibration techniques that can be considered as a reference framework. Also, effective and efficient tools for optimal parameter identification and good parameter uncertainty descriptors are needed. In this order of ideas, it is found that GLUE, SCE-UA and SCEM-UA, together with a simple multi-objective analysis, allows the gain of a wide model predictive capacity knowledge and the realization of solution sets that properly explain the observed system behavior and the order of magnitude of measured water quality determinants.

Keywords: Dynamic water quality modeling, ADZ model, extended QUASAR model, GLUE, *Shuffled Complex Evolution Metropolis*, multi-objective optimization

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIV**

Lista de tablas ..... **XIX**

1 Introducción **1**
1.1 Generalidades 1
1.2 Justificación 3
1.3 Pregunta de investigación 4
1.4 Objetivos 5
1.4.1 Objetivo general 5
1.4.2 Objetivos específicos 5
1.5 Protocolo de modelación 5
1.6 Resumen del contenido 7

2 Comparación entre modelos de transporte de solutos no conservativos **9**
2.1 Ecuación de Advección-Dispersión-Reacción (ADE-R) 10
2.2 Modelo de Almacenamiento Temporal con Reacción (TS-R) 13
2.3 Modelo de Zona Muerta Agregada con Reacción (ADZ-R) 14
2.4 Relación entre los modelos TS, ADE y ADZ 17
2.5 Metodología de comparación 20
2.6 Resultados de la comparación entre modelos 22
2.6.1 Definición de las condiciones iniciales y de frontera, parámetros de los modelos y rangos de calibración 22
2.6.2 Parámetros del modelo ADZ obtenidos a partir de los modelos ADE y TS 23
2.6.3 Comparación entre los modelos de transporte reactivo utilizando los parámetros ADZ calibrados 24
2.6.4 Comparación entre los modelos de transporte reactivo utilizando los parámetros ADZ estimados a partir de los modelos ADE y TS 26
2.6.5 Soluciones para estado estable de los modelos ADE-R, TS-R y ADZ-R 27
2.6.6 Calibración del modelo ADZ con datos reales 30
2.7 Análisis de la comparación de modelos 33
2.7.1 Calibración y comparación de modelos de transporte reactivo 33
2.7.2 Soluciones para estado estable 36
2.7.3 Comportamiento teórico de la fracción dispersiva con el caudal 38
2.8 Conclusiones del capítulo 39

3 Revisión exploratoria del modelo integrado y dinámico de calidad del agua **41**

3.1 Generalidades ... 41
3.2 Relaciones matemáticas del modelo dinámico de calidad del agua ... 46
3.3 Implementación del modelo AMQQ ... 53
3.3.1 Características del sistema modelado ... 53
3.3.2 Resultados de la modelación ... 56
3.4 Conclusiones del capítulo ... 58

4 Técnicas de calibración y análisis de incertidumbre ... 59
4.1 Definición conceptual del problema inverso ... 59
4.2 Incertidumbre en el proceso de modelación ... 61
4.2.1 Identificabilidad y sensibilidad de un modelo ... 62
4.3 Representación estadística del problema inverso ... 62
4.4 Técnicas de calibración y análisis de incertidumbre ... 65
4.4.1 Estimación generalizada de incertidumbre por verosimilitud (GLUE) ... 66
4.4.2 Algoritmo genético (GA) ... 68
4.4.3 *Simulated Annealing* (SA) ... 70
4.4.4 *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) ... 72
4.4.5 *Shuffled Complex Evolution Metropolis – University of Arizona* (SCEM-UA) 74
4.4.6 Optimización multiobjetivo ... 77
4.5 La función objetivo (FO) ... 79
4.5.1 Función objetivo construida ... 81
4.6 Conclusiones del capítulo ... 82

5 Revisión exploratoria de técnicas de calibración y análisis de incertidumbre ... 83
5.1 Descripción del problema sintético ... 83
5.2 Implementación de las técnicas de calibración simple ... 87
5.2.1 GLUE ... 87
5.2.2 GA ... 93
5.2.3 SA ... 97
5.2.4 SCE-UA ... 101
5.2.5 SCEM-UA ... 106
5.2.6 Comparación de resultados ... 113
5.3 Optimización multiobjetivo ... 115
5.4 Implementación de la metodología DYNIA en el modelo MDLC ... 117
5.5 Conclusiones del capítulo ... 124

6 Propuesta metodológica para la calibración de modelos dinámicos de calidad del agua. Caso de estudio ... 127
6.1 Protocolo de calibración de modelos dinámicos de calidad del agua ... 128
6.1.1 Pre-procesamiento de series de entrada ... 131
6.1.2 Parametrización del modelo ... 133
6.1.3 Definición de la Función Objetivo (FO) ... 134
6.1.4 Estimación de parámetros y análisis de incertidumbre ... 136
6.1.5 Verificación del modelo ... 136
6.1.6 Evaluación del desempeño ... 137
6.2 Descripción del caso de estudio ... 137
6.3 Conclusiones del capítulo ... 141

7 Aplicación de la propuesta metodológica de calibración ... 143

7.1 Resultados del modelo hidrodinámico y de transporte ADZ-MDLC en el caso de estudio sobre el río Bogotá ... 144
7.2 Implementación de la metodología GLUE ... 145
7.3 Implementación de los algoritmos SCE-UA y SCEM-UA ... 154
7.4 Análisis multiobjetivo ... 164
7.5 Conclusiones del capítulo ... 167

8 Conclusiones y recomendaciones ... 173
8.1 Conclusiones generales ... 173
8.2 Conclusiones acerca de la estructura del modelo ADZ-MDLC-QUASAR ... 174
8.3 Conclusiones acerca de la Función Objetivo construida ... 175
8.4 Conclusiones acerca de los métodos de calibración objetiva implementados ... 176
8.5 Conclusiones acerca de la optimización multiobjetivo ... 178
8.6 Conclusiones acerca de la capacidad predictiva del modelo dinámico AMQQ ... 178
8.7 Conclusiones acerca de la propuesta metodológica para la calibración de modelos dinámicos de calidad del agua ... 180
8.8 Recomendaciones ... 181

9 Bibliografía ... 183

A. Anexo: Descripción de la herramienta AMQual v.1.0 ... 196

B. Anexo: Modelo discreto de mezcla completa con reacción de primer orden ... 213

C. Anexo: Resultados gráficos de calibración de los tramos estudiados del río Bogotá (Digital) ... 217

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1: Protocolo de modelación. Modificado de Refsgaard *et al.* (2007) 6
Figura 2-1: Conceptualización del modelo ADZ para una sustancia conservativa 15
Figura 2-2: Representación de los mecanismos de transporte de acuerdo con *DF* 16
Figura 2-3: Comparación entre las relaciones teóricas para los momentos temporales de los modelos TS y ADZ 17
Figura 2-4: Resultados de calibración entre modelos ADZ y ADE a 10, 50 y 90 km para los canales 2 (izquierda) y 3 (derecha) a 10 y 100 m^3/s 23
Figura 2-5: Resultados de calibración entre modelos ADZ y TS a 10, 50 y 90 km para los canales 2 (izquierda) y 3 (derecha) a 10 y 100 m^3/s 24
Figura 2-6: Resultados de comparación entre los modelos ADZ-R y ADE-R a 10, 50 y 90 km para los canales 2 (izquierda) y 3 (derecha) a 10 y 100 m^3/s 25
Figura 2-7: Resultados de comparación entre los modelos ADZ-R y TS-R a 10, 50 y 90 km para los canales 2 (izquierda) y 3 (derecha) a 10 y 100 m^3/s 25
Figura 2-8: Comparación entre las respuestas del modelo ADZ-R con parámetros calibrados y estimados con las relaciones dadas por Lees *et al.* (2000) y el modelo ADE 26
Figura 2-9: Comparación entre las respuestas del modelo ADZ-R con parámetros calibrados y estimados con las relaciones dadas por Lees *et al.* (2000) y el modelo TS 26
Figura 2-10: Identificabilidad e incertidumbre paramétricas del modelo ADZ considerando a *n* como parámetro de calibración 32
Figura 2-11: Identificabilidad e incertidumbre paramétricas del modelo ADZ considerando *n* =1 32
Figura 2-12: Comparación mejor respuesta calibrada ADZ (caso 3) y simulación ADE 33
Figura 2-13: Ajuste entre tiempos medios de viaje calibrados y estimados con 35
Figura 2-14: Comparación entre soluciones en estado estable con el modelo ADE 36
Figura 2-15: Comparación entre soluciones en estado estable con el modelo TS 37
Figura 2-16: Comportamiento teórico de la *DF* con el caudal para los 5 canales estudiados 38
Figura 2-17: Comportamiento teórico de la *DF* con el caudal para diferentes valores de α 39
Figura 3-1: Marco jerárquico de modelación de la calidad del agua (Camacho 2000, Camacho *et al.*, 2003) 42
Figura 3-2: Esquema conceptual del modelo de calidad del agua. Procesos: hidrólisis (*h*), oxidación (*ox*), nitrificación (*n*), desnitrificación (*dn*), reaireación (*re*), sedimentación (*S*),

demanda béntica de oxígeno (*SOD*), fotosíntesis (*p*), respiración (*r*), muerte (*d*) e intercambio de flujo con sedimentos (*se*)..... 45
Figura 3-3: Perfiles longitudinales simulados. Las líneas discontinuas corresponden al modelo AMQQ y los círculos al modelo QUAL2Kw. 57
Figura 4-1: Calibración de modelos. El *set* de parámetros del modelo está representado por θ. Adaptado de Gupta *et al.* (2005) 60
Figura 4-2: Representación gráfica de las reglas de evolución natural. a) Elitismo b) cruce y c) mutación. Tomado de The MathWorks (2009) 68
Figura 4-3: Representación del frente de Pareto para la optimización de dos FO (Adaptado de Madsen *et al.*, 2007) 78
Figura 5-1: Respuestas observadas sintéticas. Línea azul: condición de frontera; línea roja: respuesta simulada; puntos verdes: datos observados sintéticos..... 87
Figura 5-2: Diagramas de dispersión obtenidos utilizando GLUE. Los valores en las ordenadas corresponden a la función de verosimilitud normalizada. La mejor combinación (máxima verosimilitud) está denotada por los cuadros rojos..... 88
Figura 5-3: Distribuciones marginales *a posteriori* de probabilidad utilizando GLUE 89
Figura 5-4: Análisis de Sensibilidad Regional utilizando GLUE. Las curvas de color magenta corresponden al grupo con mejores FO (H) y la de color cian al de peores FO (L) ... 89
Figura 5-5: Bandas de incertidumbre con nivel de confianza del 95% utilizando GLUE. Los puntos rojos son los datos observados, la línea negra a trazos es la mejor solución y la línea verde punteada es la respuesta libre de error..... 90
Figura 5-6: Comparación de bandas de incertidumbre utilizando GLUE 91
Figura 5-7: Distribuciones marginales *a posteriori* de probabilidad utilizando GLUE sin definir umbral 92
Figura 5-8: Análisis de sensibilidad regional utilizando GLUE sin definir umbral 93
Figura 5-9: Evolución de la FO en el algoritmo genético 94
Figura 5-10: Diagramas de dispersión obtenidos utilizando GA. Los valores en las ordenadas corresponden a la función de verosimilitud normalizada. La mejor combinación (máxima verosimilitud) está denotada por los cuadros rojos..... 95
Figura 5-11: Distribuciones marginales *a posteriori* de probabilidad utilizando GA..... 95
Figura 5-12: Análisis de Sensibilidad Regional utilizando GA. Las curvas de color magenta corresponden al grupo con mejores FO (H) y la de color cian al de peores FO (L)..... 96
Figura 5-13: Bandas de incertidumbre con nivel de confianza del 95% utilizando GA. Los puntos rojos son los datos observados, la línea negra a trazos es la mejor solución y la línea verde punteada es la respuesta libre de error 97
Figura 5-14: Evolución de la FO en el algoritmo *Simulated Annealing* 98
Figura 5-15: Diagramas de dispersión obtenidos utilizando SA. Los valores en las ordenadas corresponden a la función de verosimilitud normalizada. La mejor combinación (máxima verosimilitud) está denotada por los cuadros rojos..... 99
Figura 5-16: Distribuciones marginales *a posteriori* de probabilidad utilizando GA..... 99
Figura 5-17: Análisis de Sensibilidad Regional utilizando SA. Las curvas de color magenta corresponden al grupo con mejores FO (H) y la de color cian al de peores FO (L)..... 100

Figura 5-18: Bandas de incertidumbre con nivel de confianza del 95% utilizando SA. Los puntos rojos son los datos observados, la línea negra a trazos es la mejor solución y la línea verde punteada es la respuesta libre de error 101
Figura 5-19: Evolución de la FO en el algoritmo SCE-UA 102
Figura 5-20: Diagramas de dispersión obtenidos utilizando SCE-UA. Los valores en las ordenadas corresponden a la función de verosimilitud normalizada. La mejor combinación (máxima verosimilitud) está denotada por los cuadros rojos 103
Figura 5-21: Distribuciones marginales *a posteriori* de probabilidad utilizando SCE-UA 103
Figura 5-22: Análisis de Sensibilidad Regional utilizando SCE-UA. Las curvas de color magenta corresponden al grupo con mejores FO (H) y la de color cian al de peores FO (L) . 104
Figura 5-23: Bandas de incertidumbre con nivel de confianza del 95% utilizando SCE-UA. Los puntos rojos son los datos observados, la línea negra a trazos es la mejor solución y la línea verde punteada es la respuesta libre de error 105
Figura 5-24: Bandas de incertidumbre con nivel de confianza del 95% utilizando SCE-UA y el criterio basado en el estadístico $\chi 2$ propuesto por van Griensven y Meixner (2007) 106
Figura 5-25: Evolución de las cadenas de Markov Monte Carlo del algoritmo SCEM-UA en la búsqueda de los parámetros asociados a Oxígeno Disuelto, DBO y Nitrógeno 108
Figura 5-26: Evolución de las cadenas de Markov Monte Carlo del algoritmo SCEM-UA en la búsqueda de los parámetros asociados a: a) Cadena de fósforo y b) SST y Coliformes Totales 109
Figura 5-27: Evolución del factor de reducción de escala de Gelman y Rubin con el número de evaluaciones del modelo AMQQ por el algoritmo SCEM-UA 109
Figura 5-28: Diagramas de dispersión obtenidos utilizando SCEM-UA. Los valores en las ordenadas corresponden a la función de verosimilitud normalizada. La mejor combinación (máxima verosimilitud) está denotada por los cuadros rojos 110
Figura 5-29: Distribuciones marginales *a posteriori* de probabilidad utilizando SCEM-UA 111
Figura 5-30: Análisis de Sensibilidad Regional utilizando SCEM-UA. Las curvas de color magenta corresponden al grupo con mejores FO (H) y la de color cian al de peores FO (L) . 111
Figura 5-31: Bandas de incertidumbre con nivel de confianza del 95% utilizando SCEM-UA. Los puntos rojos son los datos observados, la línea negra a trazos es la mejor solución y la línea verde punteada es la respuesta libre de error 113
Figura 5-32: Parámetros originales (líneas verticales rojas) en relación con las distribuciones posteriores marginales encontradas por el algoritmo SCEM-UA 114
Figura 5-33: Gráficas multiobjetivo para el grupo de OD, DBO y Nitrógeno. En color cian se indican los puntos del *set* de Pareto 116
Figura 5-34: Codificación visual de los resultados de DYNIA. Izquierda: distribución de gradientes. Derecha: diagrama final de θi vs tiempo (Tomado de Wagener *et.al.*, 2003) 119
Figura 5-35: Resultados de simulación en HEC-RAS para *n*=0.03. Hidrograma (1) corresponde a canal de L=120 km. Hidrograma (2) corresponde a canal de L= 130 km (sección de respuesta 10 km aguas arriba de la salida del canal) 120

Figura 5-36: Relación entre el coeficiente *n* de St. Venant (simulado) y el coeficiente *n* del modelo MDLC (calibrado) para *a*=0.2 en un canal con L=120 km 121
Figura 5-37: Variación temporal del coeficiente *n* de acuerdo con el hidrograma de entrada 122
Figura 5-38: Resultados DYNIA para *n* variable con el tiempo. Un solo parámetro de calibración, *a*=0.2 123
Figura 5-39: Resultados DYNIA para n variable con el tiempo. Calibración de *n* y *a* 124
Figura 6-1: Diagrama de flujo del protocolo de estimación de parámetros de modelos detransporte para la modelación dinámica de la calidad del agua. Basado en Jiménez (2014) y Camacho (2000) 129
Figura 6-2: Diagrama de flujo del protocolo de calibración de un modelo dinámico de calidad del agua (basado en Madsen *et al.*, 2007) 130
Figura 6-3: Definición del dominio de tiempo 131
Figura 6-4: Extensión de valores de concentración: a) Alternativa 1 y b) alternativa 2 132
Figura 6-5: Obtención de FO agregadas para análisis multiobjetivo o calibración simple con entrada única y salida múltiple. 135
Figura 6-6: Fotografías del río Bogotá en los sectores seleccionados (la flecha roja indica el sentido del flujo) a) R.B. Puente Hacienda [Punto intermedio] b) R.B. Puente vía Chocontá – Cucunubá c) R.B. Pte. Humedal Jaboque [Parque La Florida] d) R.B. Pto intermedio aeropuerto. Tomadas de UNAL-EAAB (2011). 139
Figura 7-1 Resultados para Sólidos Disueltos Totales (TDS) y temperatura 145
Figura 7-2: Distribuciones posteriores utilizando GLUE bajo diferentes estrategias de calibración simple. Tramo 5-6-7, Campaña 1 146
Figura 7-3: Distribuciones posteriores utilizando GLUE bajo diferentes estrategias de calibración simple. Tramo 5-6-7, Campaña 2 147
Figura 7-4: Bandas de incertidumbre del 95% de nivel de confianza para el Oxígeno Disuelto y la DBO última. Tramo 9-10-11, Campaña 2. 148
Figura 7-5: Cambio en la amplitud de las bandas de incertidumbre con la longitud entre la entrada y salida del tramo modelado. Tramo 5-6-7, Campaña 1 149
Figura 7-6: Diagramas de dispersión resultantes de aplicar GLUE. Tramo 9-10-11, Campaña 2 150
Figura 7-7: Bandas de incertidumbre del 95% de nivel de confianza, obtenidas a partir de la implementación del algoritmo SCE-UA en el tramo 5-6-7, Campaña 1 157
Figura 7-8: Bandas de incertidumbre del 95% de nivel de confianza, obtenidas a partir de la implementación del algoritmo SCE-UA en el tramo 5-6-7, Campaña 1. 158
Figura 7-9: Evolución del criterio de Gelman – Rubin para el tramo 5-6-7, Campaña 1159
Figura 7-10: Diagramas de dispersión con el algoritmo SCEM-UA para el tramo 5-6-7, Campaña 1 159
Figura 7-11: Distribuciones posteriores de probabilidad inferidas a partir del SCEM-UA. Tramo 5-6-7, Campaña 1. 160
Figura 7-12: Bandas de incertidumbre del 95% de nivel de confianza, obtenidas a partir de la implementación del algoritmo SCEM-UA en el tramo 5-6-7, Campaña 1 163

Figura 7-13: Verificación de los resultados de calibración utilizando SCEM-UA en la campaña 1 del tramo 5-6-7. Resultados a la salida del subtramo 5. 164
Figura 7-14: Gráficas multiobjetivo para la campaña 1 del tramo 5-6-7 164
Figura 7-15: Bandas de incertidumbre del 95% de confianza, obtenidas con la población de Pareto para el Oxígeno Disuelto y la DBO a la salida del tramo 5-6-7, Campaña 1. 167

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Canales analizados para la comparación de los modelos ADE, TS y ADZ..... 21
Tabla 2-2: Profundidad normal y área transversal por tipo de canal (1 a 5) y caudal..... 22
Tabla 2-3: Velocidad y coeficiente de dispersión por tipo de canal y caudal..... 22
Tabla 2-4: Coeficiente α y área de la zona de almacenamiento por tipo de canal y caudal 23
Tabla 2-5: Resultados de calibración con los modelos ADZ y ADE para los canales 2 y 3.. 24
Tabla 2-6: Resultados de calibración con los modelos ADZ y TS para los canales 2 y 3..... 24
Tabla 2-7: Resultados de comparación para los canales 2 y 3 utilizando el modelo ADE-R 25
Tabla 2-8: Resultados de comparación para los canales 2 y 3 utilizando el modelo TS-R. 25
Tabla 2-9: Resultados de estimación de parámetros del ADZ a partir de las relaciones de Lees *et al.* (2000) y el modelo ADE 26
Tabla 2-10: Resultados de estimación de parámetros del ADZ a partir de las relaciones de Lees *et al.* (2000) y el modelo TS..... 27
Tabla 2-11: Resultados de calibración del modelo ADZ para el río Subachoque..... 32
Tabla 2-12: Comparación de parámetros calibrados y estimados utilizando el modelo ADE para el río Subachoque..... 33
Tabla 2-13: Resumen de resultados de calibración y comparación a partir del modelo ADE 35
Tabla 2-14: Resumen de resultados de calibración y comparación a partir del modelo TS 35
Tabla 3-1: Significado de las variables de las ecuaciones que integran la forma general del modelo AMQQ 43
Tabla 3-2: Determinantes de la calidad del agua y los respectivos procesos simulados por el modelo AMQQ 44
Tabla 3-3: Parámetros del modelo de calidad del agua..... 45
Tabla 3-4: Valores de los determinantes de calidad del agua sobre la cabecera y el vertimiento en el sistema modelado..... 53
Tabla 3-5: Parámetros de los modelos de calidad del agua..... 54
Tabla 3-6: Ajuste entre la respuesta de los modelos AMQQ y QUAL2Kw en estado estable 56
Tabla 4-1: Estadísticos de error. Tomada de Madsen *et al.* (2007) 79
Tabla 5-1: Parámetros de calidad del agua para generar la respuesta a la salida del sistema (los parámetros de calibración están resaltados)..... 83