



Foto: Río Magdalena – Fuente: Mario Moreno

RESULTADO FINAL DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA ORIENTADA A LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE INTERÉS DE ECOPETROL EN EL VMM

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA

GRUPO DE MODELACIÓN Y PRONÓSTICO HIDROLÓGICO

2023



PRODUCTO FINAL

Resultado final de la modelación hidrológica e hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de interés de ECOPETROL en el VMM



	Versión	Nombre	Cargo	Fecha
Autor	1	Mario Moreno Castiblanco David Zamora Saul Buitrago	Contratistas IDEAM	01/06/2023
Revisó		Juan José Montoya Monsalve	Contratista IDEAM – Líder Técnico	01/07/2023
Aprobó		Fabio Andrés Bernal Quiroga	Subdirector de Hidrología	15/07/2023



Tabla de Contenido

1	Introducción	20
1.1	Antecedentes	20
1.2	Objetivo de la modelación hidrológica e hidráulica para pronóstico	20
1.3	Localización del área de interés	21
1.4	Estructura general del documento	22
2	Caracterización del Valle Medio del río Magdalena	24
2.1	Caracterización hidrológica.....	24
2.2	Caracterización morfodinámica	31
2.3	Conclusiones y recomendaciones.....	40
3	Evaluación de los modelos hidrológicos e hidráulicos	42
3.1	Esquematización de los modelos hidrológicos e hidráulicos asociados al VMM.....	42
3.2	Evaluación de los modelos hidrológicos	44
3.3	Evaluación de los insumos climáticos para la modelación hidrológica	52
3.4	Evaluación del modelo hidráulico	70
3.5	Propuesta de mejora de los modelos	90
4	Actividades de campo y productos topo batimétricos	93
4.1	Contexto	93
4.2	Levantamiento batimétrico.....	93
4.3	Levantamiento topográfico con tecnología aerotransportada	100
4.4	Definición de secciones transversales en el tramo del levantamiento topo batimétrico ...	112
5	Análisis de alternativas de modelos hidrológicos para el pronóstico	119
5.1	Conceptualización de los modelos hidrológicos	119
5.2	Estaciones de validación y períodos de modelación	120
5.3	Modelación a nivel diario en el río La Colorada, SZH Río Opón	124

5.4	Modelación a nivel diario en el río Sogamoso, SZH Río Sogamoso	133
5.5	Modelación a nivel horario en el río La Colorada, SZH Río Opón	142
6	Análisis de la configuración del modelo hidráulico para pronóstico.....	153
6.1	Modelo conceptual	153
6.2	Primer ajuste del modelo hidráulico.....	155
6.3	Evaluación del modelo hidráulico ajustado.....	159
6.4	Segundo ajuste del modelo hidráulico.....	170
6.5	Calibración y validación del modelo hidráulico – caudales.....	178
6.6	Calibración y validación del modelo hidráulico – niveles de agua.....	188
6.7	Validación de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico	208
6.8	Conclusiones y recomendaciones.....	212
7	Análisis de los umbrales de alerta.....	214
7.1	Umbrales incorporados en la plataforma FEWS-Colombia.....	214
7.2	Cotas cero de las miras en las estaciones sobre el río Magdalena	215
7.3	Metodología para determinar los umbrales de alerta	216
7.4	Umbrales de alerta para la estación Peñas Blancas.....	217
7.5	Umbrales de alerta para la estación Barrancabermeja.....	223
7.6	Umbrales de alerta para la estación Puerto Wilches	228
7.7	Umbrales de alerta para la estación San Pablo.....	234
7.8	Umbrales de alerta para la estación Sitio Nuevo.....	239
8	Adecuación del modelo hidráulico en la plataforma FEWS-Colombia.....	245
8.1	Descripción de los modelos hidráulicos configurados en la plataforma FEWS-Colombia	245
8.2	Ajustes del adaptador de la simulación hidráulica	247
8.3	Pruebas del acople del modelo hidráulico en la plataforma FEWS-Colombia	248

9 Bibliografía269



Índice de figuras

Figura 1.1 – Subzonas hidrográficas por considerar en la modelación hidrológica e hidráulica.....	22
Figura 2.1 – Localización de las estaciones hidrológicas asociadas al tramo de modelación hidráulica.....	24
Figura 2.2 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Puerto Berrío (río Magdalena).....	26
Figura 2.3 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Peñas Blancas (río Magdalena)	26
Figura 2.4 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Barrancabermeja (río Magdalena)	27
Figura 2.5 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Sitio Nuevo (río Magdalena)	27
Figura 2.6 – Régimen bimodal de caudales en el tramo del río Magdalena (estación Sitio Nuevo)	28
Figura 2.7 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación La Bodega (río San Bartolomé).....	28
Figura 2.8 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Barretero Finca (río Carare).....	29
Figura 2.9 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Puente Ferrocarril (río Opón)	29
Figura 2.10 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Puente Sogamoso (río Sogamoso) ...	29
Figura 2.11 – Serie de caudal medio diario en la estación El Bagre (río Cimitarra)	30
Figura 2.12 – Dinámica fluvial del río Magdalena: Puerto Berrío – Sitio Nuevo	33
Figura 2.13 – Análisis de barras aluviales en el río Magdalena: Puerto Berrío – Sitio Nuevo.....	36
Figura 2.14 – Zonificación de la resistencia relativa a la erosión fluvial en el área de interés	39
Figura 3.1 – Esquema conceptual de la modelación en el río Magdalena: (a) parte Alta y (b) parte Media.....	44
Figura 3.2 – Vista del modelo hidrológico Alto Magdalena – Programa HEC-HMS	45
Figura 3.3 – Vista del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica del río Negro	46
Figura 3.4 – Vista del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica del río Carare	46
Figura 3.5 – Vista del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica de los ríos Opón y Colorada.....	47
Figura 3.6 – Comparación de caudales observados y simulados en la estación de Puerto Salgar (Urrego, 2018)	48
Figura 3.7 – Desempeño BIAS en la estación de Puerto Salgar (Urrego, 2018).....	48
Figura 3.8 – Comparación de caudales observados y simulados en el río Negro (Urrego, 2018)	49
Figura 3.9 – Desempeño BIAS en el río Negro (Urrego, 2018).....	49
Figura 3.10 – Comparación de caudales observados y simulados en el río Carare (Urrego, 2018)	50
Figura 3.11 – Comparación de caudales observados y simulados en el río Opón (Urrego, 2018)	51
Figura 3.12 – Desempeño BIAS en el río Opón (Urrego, 2018).....	51
Figura 3.13 – Distribución espacial de las estaciones meteorológicas (cuadrados negros) con información de temperatura diaria máxima y mínima dentro de la zona de estudio (AC-4).....	54
Figura 3.14 – Distribución espacial mensual de la precipitación media diaria obtenida por el algoritmo RF-MEP en la SZH del río Opón para el período 2000 al 2019	55

Figura 3.15 – Comparación variabilidad de la precipitación diaria entre los datos observados en las estaciones Chucuri, El Carmen y El Centro con respecto a las estimaciones de RF, GSMAP y MSWEP para el período 2000 al 201956

Figura 3.16 – Evaluación del ajuste de las estimaciones de precipitación diaria (RF, GSMAP y MSWEP) con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBias y KGE – SZH del río Opón...57

Figura 3.17 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida por el producto GSMAP (izquierda) y WRF (derecha) en la SZH del río Opón para el periodo 01/08/2019 al 31/08/202058

Figura 3.18 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida del promedio entre GSMAP y WRF en la SZH del río Opón para el periodo 01/08/2019 al 31/08/2020.....59

Figura 3.19 – Evaluación de las estimaciones en la precipitación60

Figura 3.20 – Distribución espacial mensual de la precipitación media diaria obtenida por el algoritmo RF-MEP en la SZH del río Sogamoso para el periodo 2000 al 201961

Figura 3.21 – Comparación variabilidad de la precipitación diaria entre los datos observados en las estaciones San Vicente y Puente La Paz con respecto a las estimaciones de RF, GSMAP y MSWEP para el período 2000 al 2019.....62

Figura 3.22 – Evaluación del ajuste de las estimaciones de precipitación diaria (RF, GSMAP y MSWEP) con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBias y KGE – SZH del río Sogamoso63

Figura 3.23 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida por el producto GSMAP (superior) y WRF (inferior) en la SZH del río Sogamoso para el período 01/08/2019 al 31/08/202064

Figura 3.24 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida del promedio entre GSMAP y WRF en la SZH del río Sogamoso para el periodo 01/08/2019 al 31/08/202065

Figura 3.25 – Evaluación de las estimaciones en la precipitación66

Figura 3.26 – Caracterización mensual de la temperatura máxima diaria estimada a partir de la temperatura horaria del producto MSWX para la zona de estudio67

Figura 3.27 – Caracterización mensual de la temperatura mínima diaria estimada a partir de la temperatura horaria del producto MSWX para la zona de estudio68

Figura 3.28 – Evaluación del ajuste de la temperatura máxima diaria obtenida de la temperatura horaria del producto MSWX con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBias y KGE en la zona de estudio (AC-4)69



Figura 3.29 – Evaluación del ajuste de la temperatura mínima diaria obtenida de la temperatura horaria del producto MSWX con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBias y KGE en la zona de estudio (AC-4)69

Figura 3.30 – Topología del modelo hidráulico del río Magdalena en el programa MIKE11.....71

Figura 3.31 – Visualización de las secciones transversales del modelo hidráulico.....71

Figura 3.32 – Condiciones de frontera en el modelo hidráulico del río Magdalena.....72

Figura 3.33 – Condición de frontera en la abscisa correspondiente a la estación de Sitio Nuevo73

Figura 3.34 – Definición de las rugosidades en el modelo hidráulico del río Magdalena.....73

Figura 3.35 – Condiciones de frontera incorporadas en el modelo hidráulico para hacer la validación.....75

Figura 3.36 – Condición de frontera en la abscisa correspondiente a la estación de Sitio Nuevo – validación75

Figura 3.37 – Características de simulación incluidas en el modelo hidráulico.....77

Figura 3.38 – Advertencia de la simulación77

Figura 3.39 – Perfiles de flujo en el tramo del río Magdalena para los caudales máximo y mínimo del período de análisis.....78

Figura 3.40 – Variación de niveles en la estación de Sitio Nuevo – resultados de la simulación79

Figura 3.41 – Variación de caudales en la estación de Sitio Nuevo – resultados de la simulación79

Figura 3.42 – Variación de niveles en diferentes secciones transversales para el caudal máximo del tiempo de análisis – resultados de la simulación80

Figura 3.43 – Irregularidades en las secciones transversales del modelo hidráulico.....81

Figura 3.44 – Localización de las 24 secciones transversales con desbordamiento del cauce82

Figura 3.45 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo....83

Figura 3.46 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo .83

Figura 3.47 – Desempeño de comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo84

Figura 3.48 – Variación de las orillas del río Magdalena en el tramo de modelación hidráulica85

Figura 3.49 – Localización de las estaciones del IDEAM que cuentan con información de aforos (secciones transversales).....87

Figura 3.50 – Variación de la sección transversal en el punto de medición de niveles en la estación de Peñas Blancas.....88

Figura 3.51 – Variación de la sección transversal en el punto de medición de niveles en la estación de Barrancabermeja88



Figura 3.52 – Variación de la sección transversal en el punto de medición de niveles en la estación de Sitio Nuevo.....	89
Figura 3.53 – Relación de las secciones transversales del modelo con las zonas de inundación de los eventos de 2010-2011.....	90
Figura 4.1 – Secciones transversales levantadas en el trabajo de hidrotopografía	94
Figura 4.2 – Equipos para el levantamiento batimétrico.....	95
Figura 4.3 – Puntos de la poligonal de topografía para dar cotas a las secciones	95
Figura 4.4 – Mediciones de cota de las secciones a partir de los puntos de topografía.....	96
Figura 4.5 – Mediciones batimétricas a través del equipo ADCP RS-M9 (Sontek).....	96
Figura 4.6 – Esquema de las mediciones realizadas en cada sección transversal.....	97
Figura 4.7 – Mediciones de las miras en las estaciones limnigráficas	97
Figura 4.8 – Topografía en la zona de las orillas e islas	98
Figura 4.9 – Programa RiverSurveyor.....	99
Figura 4.10 – Cotas de los puntos batimétricos de la sección 11	99
Figura 4.11 – Localización de los puntos batimétricos	100
Figura 4.12 – Localización del área del levantamiento LiDAR.....	101
Figura 4.13 – Fotografías de las mediciones en los BM de las estaciones de Barrancabermeja (izquierda), Puerto Wilches (centro) y San Pablo (derecha)	102
Figura 4.14 – Fotografías de las mediciones en las miras de las estaciones de Barrancabermeja (izquierda), Puerto Wilches (centro) y San Pablo (derecha)	102
Figura 4.15 – Actividades desarrolladas por INCIGE (fuente: informe del plan de trabajo de INCIGE) .	103
Figura 4.16 – Localización de los puntos de control terrestre.....	104
Figura 4.17 – Ortofoto de la zona del levantamiento LiDAR.....	106
Figura 4.18 – Emparejamiento de los datos LiDAR.....	108
Figura 4.19 – Ejemplo de clasificación automática errónea de la vegetación (parte superior) y ajuste luego de la clasificación manual (parte inferior) (Fuente: INCIGE)	109
Figura 4.20 – Modelo Digital de Superficie	110
Figura 4.21 – Verificación de la batimetría (parte izquierda) y corte de nube de puntos LiDAR clasificada (parte derecha). (Fuente: INCIGE).....	111
Figura 4.22 – Modelo Digital de Terreno con el acople de la batimetría y el levantamiento LiDAR	112
Figura 4.23 – Nuevas secciones transversales localizadas en el tramo del levantamiento topo batimétrico	113
Figura 4.24 – Perfil de la nueva sección transversal 7	114

Figura 4.25 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 31 – 29A	114
Figura 4.26 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 29 – 27	115
Figura 4.27 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 26 – 25	115
Figura 4.28 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 24 – 22	115
Figura 4.29 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 21A – 18B.....	116
Figura 4.30 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 18A – 15A.....	116
Figura 4.31 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 15 – 12E.....	116
Figura 4.32 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 12D – 12	117
Figura 4.33 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 11A – 9A	117
Figura 4.34 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 9 – 7C.....	117
Figura 4.35 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 7B – 6C.....	118
Figura 4.36 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 6B – 5C.....	118
Figura 4.37 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 5B – 5.....	118
Figura 5.1 – Resumen de los modelos, forzamientos y métodos de evaluación de simulaciones hidrológicas a nivel diario y horario en las SZH de los ríos Opón y Sogamoso.....	120
Figura 5.2 – Series de tiempo de caudal diario en las estaciones Ayacucho y Puente Sogamoso para el periodo 2000-2019	122
Figura 5.3 – Serie de tiempo de caudales cada 12 horas en la estación Ayacucho para periodo 2019-08 al 2020-08	123
Figura 5.4 – Definición de los periodos de calentamiento, calibración y validación para los ejercicios de modelación hidrológica nivel diario (SZH Opón y Sogamoso).....	123
Figura 5.5 – Definición de los periodos de calentamiento, calibración y validación para los ejercicios de modelación hidrológica nivel horario (SZH Opón).....	124
Figura 5.6 – Series de tiempo obtenidas en la etapa de calibración a nivel diario de las combinaciones de modelos y forzamientos (Izq.) y un zoom sobre el año 2006 (Der.) en la estación Ayacucho de la SZH del río Opón	125
Figura 5.7 – Serie de tiempo de caudales diarios de la mejor combinación (modelo-forzamiento), ensambles (media - color púrpura claro y mediana - color anaranjado) y valor observado para el año 2006 en la estación Ayacucho	126
Figura 5.8 – Gráficos de dispersión entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y la función objetivo obtenidos en la etapa de calibración (diaria) por medio del algoritmo PSO – Estación Ayacucho.....	128

Figura 5.9 – Gráficos de correlación, histogramas y coeficiente de correlación de Pearson entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y la función objetivo (KGE) de la calibración diaria en la estación Ayacucho 129

Figura 5.10 – Histograma de rango en las etapas de calibración (Der.) y validación (Izq.) para el ensamble de modelos hidrológicos (diario) en la estación Ayacucho..... 131

Figura 5.11 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) en el periodo de calibración diaria de la estación Ayacucho 132

Figura 5.12 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) a nivel diario durante el año 2006 en la estación Ayacucho 133

Figura 5.13 – Series de tiempo obtenidas en la etapa de calibración a nivel diario de las combinaciones de modelos y forzamientos (Izq.) y un zoom sobre el año 2006 (Der.) en la estación Puente Sogamoso de la SZH del río Sogamoso 134

Figura 5.14 – Serie de tiempo de caudales diarios de la mejor combinación (modelo-forzamiento), ensambles (media - color púrpura claro y mediana - color anaranjado) y valor observado para el año 2006 en la estación Puente Sogamoso..... 135

Figura 5.15 – Gráfico de dispersión entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y la función objetivo obtenidos en la etapa de calibración (diaria) por medio del algoritmo PSO – Estación Puente Sogamoso 137

Figura 5.16 – Gráficos de correlación, histogramas y coeficiente de correlación de Pearson entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y a la función objetivo (KGE) de la calibración diaria en la estación Puente Sogamoso 138

Figura 5.17 – Histograma de rango en las etapas de calibración (Der.) y validación (Izq.) para el ensamble de modelos hidrológicos (diario) en la estación Puente Sogamoso 140

Figura 5.18 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) en el periodo de calibración diaria de la estación Puente Sogamoso 141

Figura 5.19 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) a nivel diario durante el año 2006 en la estación Puente Sogamoso 142

Figura 5.20 – Series de tiempo obtenidas en la etapa de calibración a nivel horario de las combinaciones de modelos y forzamientos (Izq.) y un zoom sobre el mes de noviembre año 2019 (Der.) en la estación Ayacucho de la SZH del río Opón..... 143

Figura 5.21 – Serie de tiempo de caudales horarios de la mejor combinación (modelo-forzamiento), ensambles y valor observado durante noviembre de 2019 en la estación Ayacucho 144



Figura 5.22 – Gráficos de dispersión entre los parámetros del modelo GR4J-COMBI y la función objetivo obtenidos en la etapa de calibración (horaria) por medio del algoritmo PSO – Estación Ayacucho.....	147
Figura 5.23 – Gráficos de correlación, histogramas y coeficiente de correlación de Pearson entre los parámetros del modelo GR4J-COMBI y la función objetivo (KGE) de la calibración horaria en la estación Ayacucho	148
Figura 5.24 – Histograma de rango en las etapas de calibración (Der.) y validación (Izq.) para el ensamble de modelos hidrológicos (horario) en la estación Ayacucho	151
Figura 5.25 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) en el periodo de calibración horaria de la estación Ayacucho	152
Figura 5.26 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) a nivel horario durante el mes de noviembre de 2019 en la estación Ayacucho	152
Figura 6.1 – Archivos que componen el modelo hidráulico	154
Figura 6.2 – Topología del modelo hidráulico – Primer ajuste del modelo hidráulico	156
Figura 6.3 – Condición de frontera del río San Bartolomé – Primer ajuste del modelo hidráulico.....	157
Figura 6.4 – Condición de frontera del río Cimitarra – Primer ajuste del modelo hidráulico	157
Figura 6.5 – Esquema del vertedero lateral idealizado en cada sección que presenta desbordamiento.....	158
Figura 6.6 – Incorporación de las estructuras laterales en el modelo unidimensional.....	159
Figura 6.7 – Localización de estaciones en el tramo de estudio que cuentan con información de (a) caudales y (b) niveles.....	160
Figura 6.8 – Comparación de los caudales simulados en las estaciones de Puerto Berrío, Peñas Blancas y Sitio Nuevo – Primer ajuste.....	162
Figura 6.9 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Primer ajuste	163
Figura 6.10 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Primer ajuste	163
Figura 6.11 – Comparación de los caudales en las estaciones de (a) Peñas Blancas y (b) Sitio Nuevo – Primer ajuste	164
Figura 6.12 – Efecto de la incorporación de estructuras hidráulica (desbordamiento del cauce) en los caudales simulados en la estación de Sitio Nuevo – Primer ajuste	165
Figura 6.13 – Caudales de desborde en las secciones en donde se incorporaron las estructuras hidráulicas laterales – Primer ajuste	166
Figura 6.14 – Comparación de los niveles simulados en las estaciones de Peñas Blancas, Barrancabermeja, Puerto Wilches, San Pablo y Sitio Nuevo – Primer ajuste.....	167

Figura 6.15 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Primer ajuste	167
Figura 6.16 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – Primer ajuste	168
Figura 6.17 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – Primer ajuste	168
Figura 6.18 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – Primer ajuste	169
Figura 6.19 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Primer ajuste	170
Figura 6.20 – Comparación de niveles simulados y registrados en las estaciones: (a) Barrancabermeja y (b) Sitio Nuevo – Primer ajuste.....	170
Figura 6.21 – Alineamiento del río Magdalena incorporado en el modelo hidráulico de MIKE11	171
Figura 6.22 – Nuevo alineamiento del cauce por incorporar en el modelo hidráulico	172
Figura 6.23 – Incorporación de la nueva topología del modelo hidráulico (alineamiento) en el programa MIKE11	173
Figura 6.24 – Nomenclatura de las secciones incorporadas en la nueva topología del modelo hidráulico	174
Figura 6.25 – Incorporación de la nomenclatura y abscisas de las secciones en el programa MIKE11: sección existente (izquierda) y sección nueva (derecha)	176
Figura 6.26 – Incorporación de datos X Z de la sección 29 (nueva) en el programa MIKE11	177
Figura 6.27 – Límites de la sección 23 (izquierda) e incorporación de los límites en el programa MIKE11 (derecha)	178
Figura 6.28 – Localización de las estructuras hidráulicas (que simulan los desbordamientos) en el cauce: (a) tramo entre Puerto Berrío y Peñas Blancas y (b) tramo entre Peñas Blancas y Sitio Nuevo.....	179
Figura 6.29 – Incorporación de las estructuras hidráulicas (vertederos laterales) en el modelo hidráulico – segundo ajuste	180
Figura 6.30 – Factores de regulación de las estructuras hidráulicas para el tramo Puerto Berrío – Peñas Blancas.....	181
Figura 6.31 – Factores de regulación de las estructuras hidráulicas para el tramo Peñas Blancas – Sitio Nuevo	181
Figura 6.32 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Calibración.....	182

Figura 6.33 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Calibración	183
Figura 6.34 – Comparación de los caudales en las estaciones de (a) Peñas Blancas y (b) Sitio Nuevo – Segundo ajuste (calibración)	183
Figura 6.35 – Condición de frontera aguas arriba, estación Puerto Berrío – Validación	184
Figura 6.36 – Aporte del río San Bartolomé, estación La Bodega – Validación.....	185
Figura 6.37 – Aporte del río Carare, estación Barretero Finca – Validación	185
Figura 6.38 – Aporte del río Opón, estación Puente Ferrocarril – Validación	185
Figura 6.39 – Aporte del río Sogamoso, estación Puente Sogamoso – Validación.....	186
Figura 6.40 – Aporte del río Cimitarra – Validación	186
Figura 6.41 – Condición de frontera aguas abajo, estación Sitio Nuevo – Validación	186
Figura 6.42 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Validación	187
Figura 6.43 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Validación	188
Figura 6.44 – Tramos para la calibración de rugosidades.....	190
Figura 6.45 – Definición de rugosidades para una zona en cada abscisa: esquema (izquierda) y ventana del programa MIKE11 (derecha)	191
Figura 6.46 – Definición de rugosidades para 3 zonas en cada abscisa: esquema (izquierda) y ventana del programa MIKE11 (derecha)	191
Figura 6.47 – RMSE en función del coeficiente de rugosidad.....	193
Figura 6.48 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – calibración	195
Figura 6.49 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – calibración.....	195
Figura 6.50 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – calibración	196
Figura 6.51 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – calibración	197
Figura 6.52 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – calibración	197
Figura 6.53 – Variación de caudales en la estación de Puerto Berrío	198

Figura 6.54 – Incorporación de los niveles que definen las tres zonas para la calibración de los coeficientes de rugosidad199

Figura 6.55 – Comparación de resultados de las combinaciones 30 (coeficiente de rugosidad global) y la combinación 31 (el mismo coeficiente de rugosidad en las 3 zonas).....201

Figura 6.56 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – calibración202

Figura 6.57 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – calibración.....202

Figura 6.58 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – calibración203

Figura 6.59 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – calibración204

Figura 6.60 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – validación204

Figura 6.61 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – validación205

Figura 6.62 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – validación206

Figura 6.63 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – validación206

Figura 6.64 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – calibración207

Figura 6.65 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – calibración208

Figura 6.66 – Resultados de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico para la cuenca del río Opón209

Figura 6.67 – Resultados de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico para la cuenca del río Sogamoso209

Figura 6.68 – Incorporación de las series de caudales de los ríos Opón y Sogamoso (resultados de modelos hidrológicos) en el modelo hidráulico calibrado210

Figura 6.69 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – con las series de caudal de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico de los ríos Opón y Sogamoso211



Figura 6.70 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – con las series de caudal de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico de los ríos Opón y Sogamoso211

Figura 7.1 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Peñas Blancas.....218

Figura 7.2 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Peñas Blancas.....218

Figura 7.3 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Peñas Blancas.....219

Figura 7.4 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Peñas Blancas: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha).....220

Figura 7.5 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Peñas Blancas220

Figura 7.6 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Peñas Blancas.....221

Figura 7.7 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Peñas Blancas.....222

Figura 7.8 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Barrancabermeja223

Figura 7.9 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Barrancabermeja224

Figura 7.10 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Barrancabermeja224

Figura 7.11 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Barrancabermeja: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)225

Figura 7.12 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Barrancabermeja226

Figura 7.13 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Barrancabermeja.....227

Figura 7.14 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Barrancabermeja.....227

Figura 7.15 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Puerto Wilches229

Figura 7.16 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Puerto Wilches229



Figura 7.17 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Puerto Wilches230

Figura 7.18 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Puerto Wilches: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)231

Figura 7.19 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Puerto Wilches.....231

Figura 7.20 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Puerto Wilches232

Figura 7.21 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Puerto Wilches233

Figura 7.22 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de San Pablo234

Figura 7.23 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de San Pablo235

Figura 7.24 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de San Pablo235

Figura 7.25 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de San Pablo: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)236

Figura 7.26 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de San Pablo237

Figura 7.27 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de San Pablo.....238

Figura 7.28 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de San Pablo.....238

Figura 7.29 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Sitio Nuevo239

Figura 7.30 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Sitio Nuevo240

Figura 7.31 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Sitio Nuevo240

Figura 7.32 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha).....241

Figura 7.33 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Sitio Nuevo.....242

Figura 7.34 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Sitio Nuevo243



Figura 7.35 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Sitio Nuevo	243
Figura 8.1 – Tramos de modelación hidráulica del río Magdalena: (a) parte Alta, (b) parte Media y (c) parte Baja	246
Figura 8.2 – Explicación esquemática de los cambios en el archivo de configuración del adaptador.....	248
Figura 8.3 – Configuración de la cascada de procesos en la plataforma FEWS-Colombia.....	249
Figura 8.4 – Corrida de la cascada de procesos en modo “batch” en la plataforma FEWS-Colombia.....	250
Figura 8.5 – Condiciones de frontera de caudal de la plataforma FEWS.....	250
Figura 8.6 – Resultados de caudal en las estaciones de Barrancabermeja, Puerto Wilches y Sitio Nuevo, obtenidos en la plataforma FEWS-Colombia – Primera prueba	251
Figura 8.7 – Comparación de las series de caudal incorporadas como condiciones de frontera en los ríos tributarios: (a) San Bartolomé (arriba) y Cimitarra (abajo)	252
Figura 8.8 – Condiciones de frontera de caudal incorporadas en el modelo hidráulico como series de tiempo	253
Figura 8.9 – Tiempos de simulación del modelo hidráulico de MIKE11	253
Figura 8.10 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Primera prueba	254
Figura 8.11 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Sitio Nuevo a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Primera prueba	254
Figura 8.12 – Resultados de caudal en las estaciones de Barrancabermeja (arriba), Puerto Wilches (medio) y Sitio Nuevo (abajo), obtenidos en la plataforma FEWS-Colombia – Segunda prueba	255
Figura 8.13 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba	256
Figura 8.14 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Sitio Nuevo a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba	257
Figura 8.15 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba	258
Figura 8.16 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Puerto Wilches a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba	258
Figura 8.17 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Sitio Nuevo a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba	259
Figura 8.18 – Condiciones de frontera de caudal de la plataforma FEWS para los ríos tributarios San Bartolomé y Cimitarra.....	260

Figura 8.19 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Tercera prueba.....261

Figura 8.20 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Tercera prueba.....261

Figura 8.21 – Comparación de las series de caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo con los caudales de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia – Tercera prueba.....262

Figura 8.22 – Comparación de los caudales registrados y simulados en la estación de Sitio Nuevo y porcentaje de error de la simulación – Tercera prueba263

Figura 8.23 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Barrancabermeja (lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia (asociados al cero de la mira) – Tercera prueba.....263

Figura 8.24 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Puerto Wilches (lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia (asociados al cero de la mira) – Tercera prueba.....264

Figura 8.25 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo (lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia (asociados al cero de la mira) – Tercera prueba.....265

Figura 8.26 – Condiciones de frontera de caudal incorporadas en el modelo hidráulico como series de tiempo – Cuarta prueba266

Figura 8.27 – Comparación de las series de caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo con los caudales de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia – Cuarta prueba.....267

Figura 8.28 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Barrancabermeja (conversión de las lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico – Cuarta prueba267

Figura 8.29 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Puerto Wilches (conversión de las lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico – Cuarta prueba268

Figura 8.30 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo (conversión de las lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico – Cuarta prueba.....268



1 Introducción

1.1 Antecedentes

Este documento se construye con el objeto de establecer la modelación hidrológica e hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de interés de Ecopetrol en la zona del Valle Medio del río Magdalena (VMM) en el marco del Acuerdo de Cooperación – AC No. 4 (3034153) derivado del Convenio Marco de Colaboración No. 5212957, cuyo objeto es: *“aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para el intercambio de conocimiento científico e información, y el desarrollo de productos y servicios que contribuyan al cumplimiento de las funciones, objetivos e intereses de las partes”*.

Este documento se inscribe en la Actividad 2.3.3 del acuerdo: *realizar la modelación Hidrológica e Hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de interés de Ecopetrol en las subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo (incluido tramo río Magdalena). Así también, realizar la evaluación del pronóstico hidrológico en los modelos implementados en FEWS para tal fin en las áreas de interés en mención*. Estas actividades están asociadas a las actividades del Grupo de Modelación y Pronóstico Hidrológico de la subdirección de Hidrología del IDEAM. En particular el documento da respuesta a uno de los contenidos del Producto final *“Resultado final de la modelación hidrológica e hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de interés de ECOPETROL en el VMM”*.

1.2 Objetivo de la modelación hidrológica e hidráulica para pronóstico

El objetivo de un sistema de alerta temprana es poder emitir una alerta con suficiente antelación para que las entidades gubernamentales (nacional, regional o local) puedan emprender acciones que permitan evitar la pérdida de vidas humanas y reducir los daños en infraestructuras. En tal sentido, y teniendo en cuenta los eventos extremos de inundación ocurridos en el período 2010 – 2011, el gobierno de Holanda, a través de una misión holandesa que visitó el país, identificó la necesidad de que Colombia dispusiera de un Sistema de Alerta Temprana en el tema de inundaciones. A partir de cooperación de instituciones colombianas, lideradas por el IDEAM, y holandesas, liderada por DELTARES, se desarrolló un proyecto que dio origen a la plataforma

FEWS – Colombia, la cual es actualmente utilizada para la predicción de inundaciones (alertas) de forma operativa.

Para poder contar con un sistema de alerta temprana efectivo, en la plataforma FEWS – Colombia de pronóstico se debe contar con modelos hidrológicos e hidráulicos calibrados, los cuales permitirán simular niveles y caudales en estaciones hidrológicas instaladas en los cuerpos de agua del país. Los niveles de pronóstico son generalmente utilizados para definir los niveles de alerta de sequías, crecidas repentinas e inundaciones. Los modelos hidrológicos se basan en información hidrológica como precipitación, evapotranspiración, temperatura, características de las cuencas, etc., mientras que, los hidráulicos se basan en la escurrentía de los modelos hidrológicos, los caudales de los ríos y su configuración topológica (secciones transversales, rugosidades y estructuras hidráulicas).

1.3 Localización del área de interés

El tramo del río Magdalena en la zona del Valle Medio identificado para la modelación hidrológica e hidráulica corresponde al tramo comprendido entre las estaciones de Puerto Berrio [23097030] y Sitio Nuevo [23187280], como se muestra Figura 1.1 (línea de color rojo).

Con base en las cuencas hidrográficas de la zona se identificaron las Subzonas Hidrográficas (SZH) que tienen influencia directa en el tramo de modelación hidráulica, como se muestra Figura 1.1 (áreas de color verde). Estas Subzonas Hidrográficas son: Río San Bartolomé y otros directos al Magdalena (2310, código SZH), Río Carare (2312), Río Opón (2314), Río Cimitarra y otros directos al Magdalena (2317), Río Suárez (2401), Río Fonce (2402), Río Chicamocha (2403), y Río Sogamoso (2405).

De la Figura 1.1 se observa que en el tramo de modelación hidrológica e hidráulica del río Magdalena se tendrán los aportes de tres afluentes por la margen derecha del río: río Carare, río Opón y río Sogamoso (con los respectivos aportes de los ríos Suárez, Fonce y Chicamocha); mientras que, por la margen izquierda del río se tendrán los aportes de dos afluentes: río San Bartolomé y río Cimitarra.

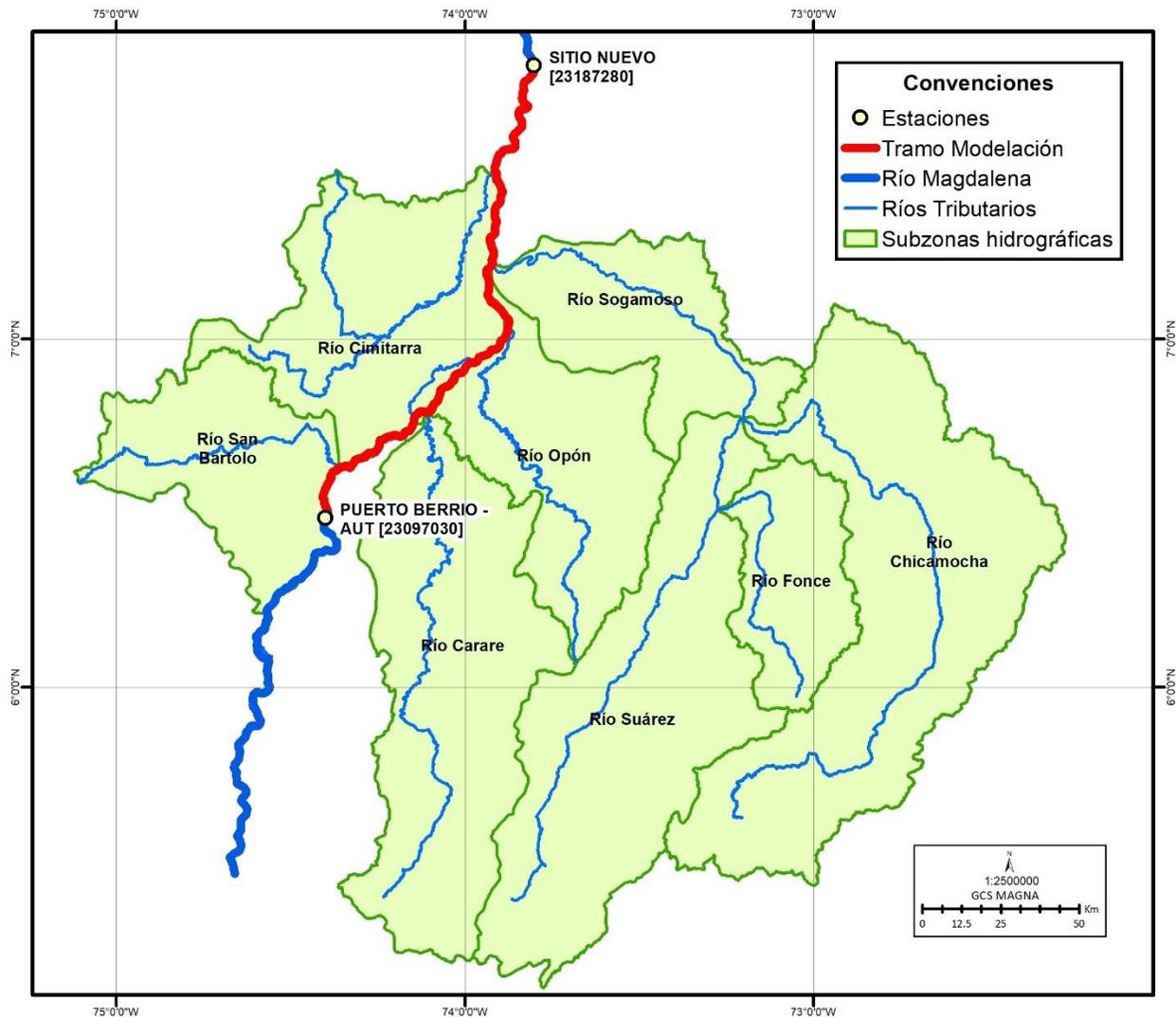


Figura 1.1 – Subzonas hidrográficas por considerar en la modelación hidrológica e hidráulica

1.4 Estructura general del documento

El presente documento se encuentra dividido en 9 capítulos, incluyendo esta introducción. En el capítulo 2 se presenta la caracterización hidrológica y morfodinámica del Valle Medio del río Magdalena. En el capítulo 3 se presenta la evaluación de los modelos hidrológicos e hidráulicos en el tramo de estudio del río Magdalena. En el capítulo 4 se describen las actividades de campo realizadas en el río Magdalena y los productos topo batimétricos. En el capítulo 5 se presenta un análisis de las alternativas de modelos hidrológicos. En el capítulo 6 se presenta un análisis de la configuración del modelo hidráulico en el programa MIKE11. En el capítulo 7 se presenta un análisis de los umbrales de alerta de las estaciones que se encuentran en el tramo del río Magdalena

analizado en el modelo hidráulico. En el capítulo 8 se presenta la adecuación del modelo hidráulico en la plataforma de FEWS-Colombia. Finalmente, en el capítulo 9 se presenta la bibliografía utilizada.

2 Caracterización del Valle Medio del río Magdalena

2.1 Caracterización hidrológica

En la Figura 2.1 se muestra el tramo de modelación hidráulica en el río Magdalena y las estaciones limnigráficas que históricamente han registrado información de caudales. También se incluyen los ríos tributarios, en el tramo de modelación, con las estaciones limnigráficas ubicadas antes de llegar a las respectivas desembocaduras en el río Magdalena, y que asimismo han registrado información de caudales.

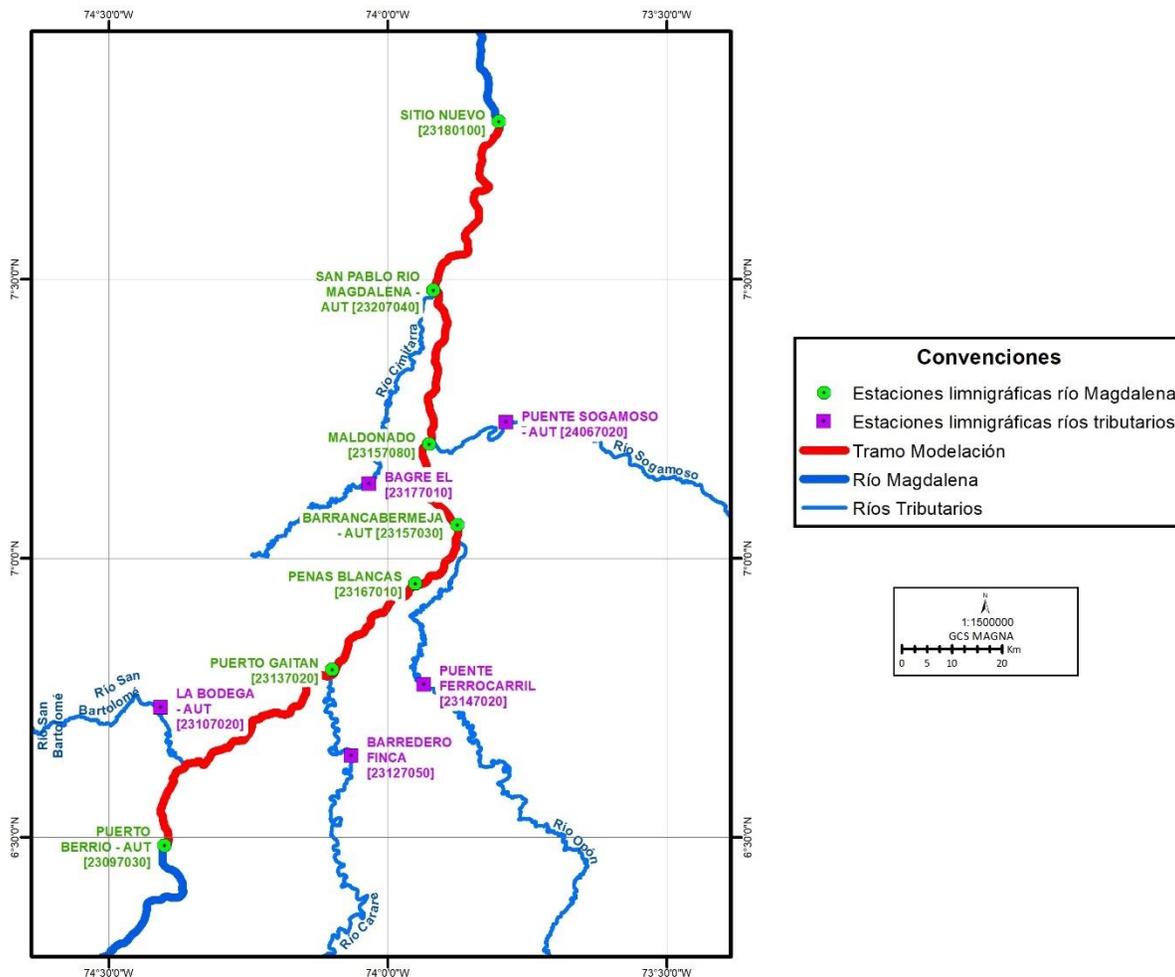


Figura 2.1 – Localización de las estaciones hidrológicas asociadas al tramo de modelación hidráulica

En la Tabla 2.1 se muestran las características más relevantes de las 12 estaciones presentadas en la Figura 2.1, indicando aquellas que se encuentran activas o suspendidas. Adicionalmente, se

indica si la información de caudales registrada en las estaciones se encuentra disponible en la plataforma FEWS – Colombia.

Tabla 2.1 – Características de las estaciones limnigráficas en la zona de estudio

Estación	Río	Período de registros de caudal	Estado	Información incorporada en la plataforma FEWS – Colombia
Puerto Berrío [23097030]	Magdalena	01/01/1936 – actual	Activa	En la plataforma se pueden visualizar los caudales medidos y simulados de esta estación
Puerto Gaitán [23137020]	Magdalena	01/01/1980 – 31/07/1981	Suspendida	No aplica
Peñas Blancas [23167010]	Magdalena	01/02/1977 – actual	Activa	La estación no se encuentra incorporada en la plataforma
Barrancabermeja [23157030]	Magdalena	01/01/1974 – actual	Activa	En la plataforma se pueden visualizar los niveles medidos y simulados de esta estación
Maldonado [23157080]	Magdalena	01/04/1979 – 31/12/2001	Suspendida	No aplica
San Pablo [23207040]	Magdalena	01/07/1977 – 31/12/1995	Activa Sin registro de caudal	En la plataforma se pueden visualizar los niveles medidos y simulados de esta estación
Sitio Nuevo [23187280]	Magdalena	01/02/1979 – actual	Activa	En la plataforma se pueden visualizar los caudales medidos y simulados de esta estación
La Bodega [23107020]	San Bartolomé	01/03/1976 – actual	Activa	La estación no se encuentra incorporada en la plataforma
Barretero Finca [23127050]	Carare	01/03/1976 – actual	Activa	La estación no se encuentra incorporada en la plataforma
Puente Ferrocarril [23147020]	Opón	01/09/1974 - actual	Activa	En la plataforma se pueden visualizar los caudales medidos y simulados de esta estación
Puente Sogamoso [24067020]	Sogamoso	01/08/1992 - actual	Activa	La estación no se encuentra incorporada en la plataforma
El Bagre [23177010]	Cimitarra	01/04/1977 – 31/08/1990	Suspendida	No aplica

De acuerdo con la Tabla 2.1 hay 4 estaciones limnigráficas activas en el tramo del río Magdalena que registran caudales a saber: Puerto Berrío, Peñas Blancas, Barrancabermeja y Sitio Nuevo. En la Figura 2.2 se muestra la serie de caudales medios diarios de los últimos 15 años en la estación Puerto Berrío, mientras que, en la Figura 2.3 se muestra la misma serie para la estación Peñas Blancas, en la Figura 2.4 se muestra la misma serie para la estación Barrancabermeja y en la Figura 2.5 se muestra la misma serie para la estación Sitio Nuevo.

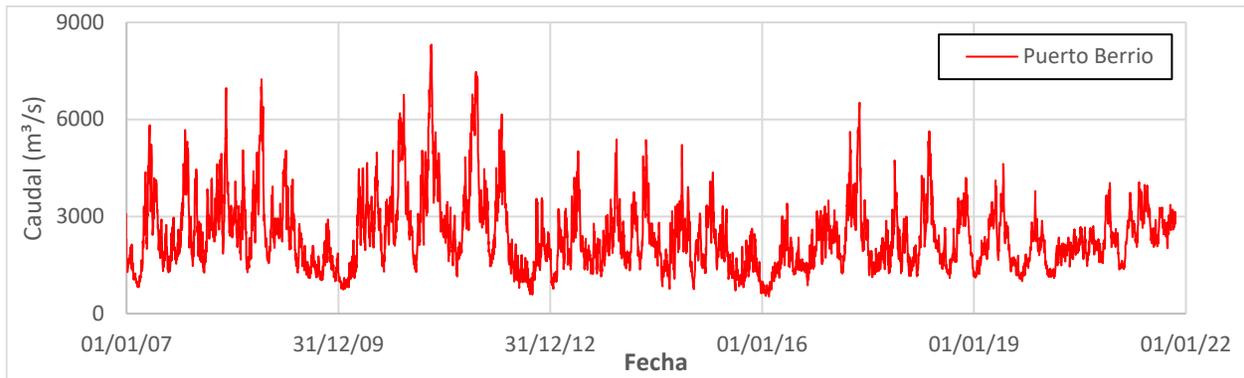


Figura 2.2 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Puerto Berrío (río Magdalena)

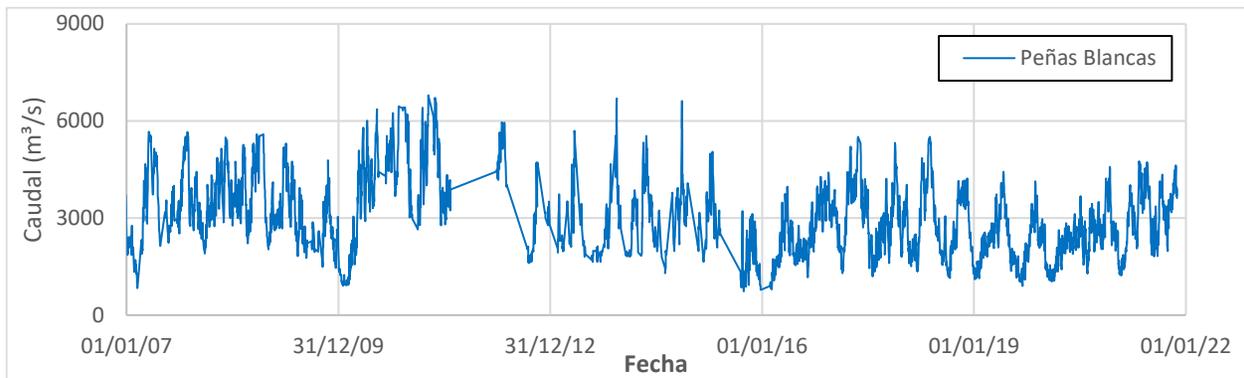


Figura 2.3 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Peñas Blancas (río Magdalena)



Figura 2.4 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Barrancabermeja (río Magdalena)

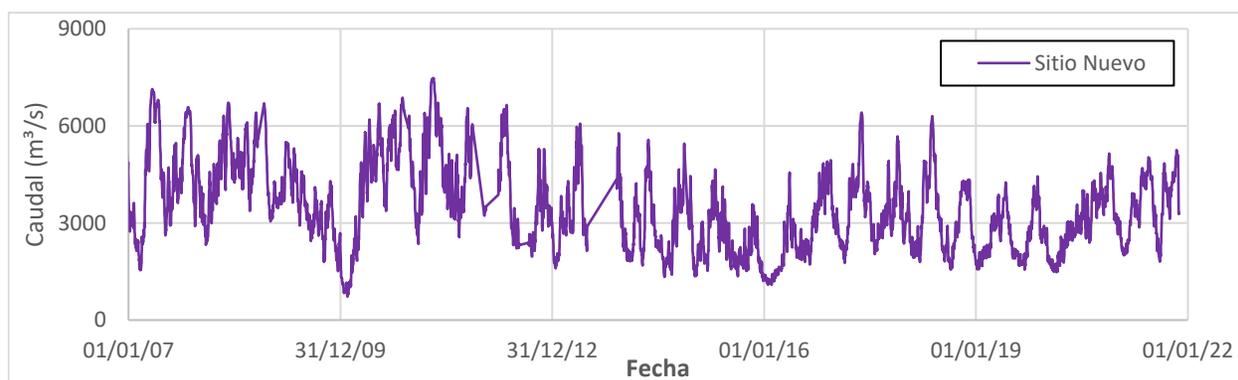


Figura 2.5 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Sitio Nuevo (río Magdalena)

De acuerdo con la serie de caudales medios diarios registrados en la estación de Puerto Berrío, se puede decir que en los últimos 15 años el caudal medio del río Magdalena en ese punto es 2398 m³/s, con un mínimo de 532 m³/s (6 de febrero de 2016) y un máximo de 8317 m³/s (26 de abril de 2011).

Al comparar las figuras, se observan patrones similares en las estaciones de Puerto Berrío, Peñas Blancas y Sitio Nuevo; sin embargo, se observa que los caudales picos mayores a 6000 m³/s registrados en la estación de Puerto Berrío se ven atenuados en la estación de Sitio Nuevo. Esto último puede obedecer a desbordamientos del cauce del río Magdalena e inundación de la planicie de inundación del Valle Medio del río Magdalena. En el caso de la estación de Barrancabermeja solo se tiene información de caudales medios diarios de los últimos 3 años, con comportamiento similar a las otras estaciones.

De las series se observa un régimen bimodal, con caudales máximos en los meses de mayo y noviembre, y caudales mínimos en los meses febrero y agosto, como se muestra en la Figura 2.6.



Figura 2.6 – Régimen bimodal de caudales en el tramo del río Magdalena (estación Sitio Nuevo)

De manera similar se hizo la caracterización de caudales en los ríos tributarios del tramo de estudio del río Magdalena, teniendo en cuenta la información incluida en la Tabla 2.1. En la Figura 2.7 se muestra la serie de caudales medios diarios de los últimos 15 años en la estación La Bodega (sobre el río San Bartolomé), mientras que, en la Figura 2.8 se muestra la misma serie para la estación Barretero Finca (sobre el río Carare), en la Figura 2.9 se muestra la misma serie para la estación Puente Ferrocarril (sobre el río Opón) y en la Figura 2.10 se muestra la misma serie para la estación Puente Sogamoso (sobre el río Sogamoso).

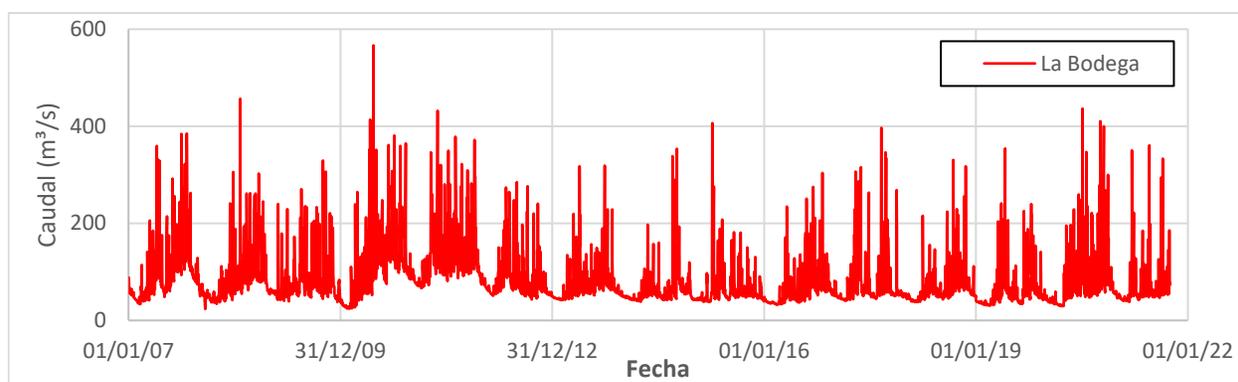


Figura 2.7 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación La Bodega (río San Bartolomé)

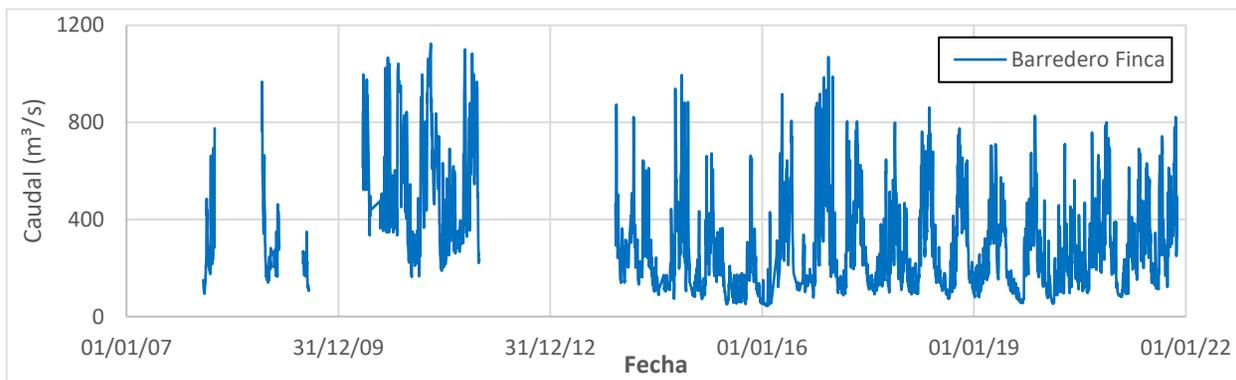


Figura 2.8 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Barretero Finca (río Carare)

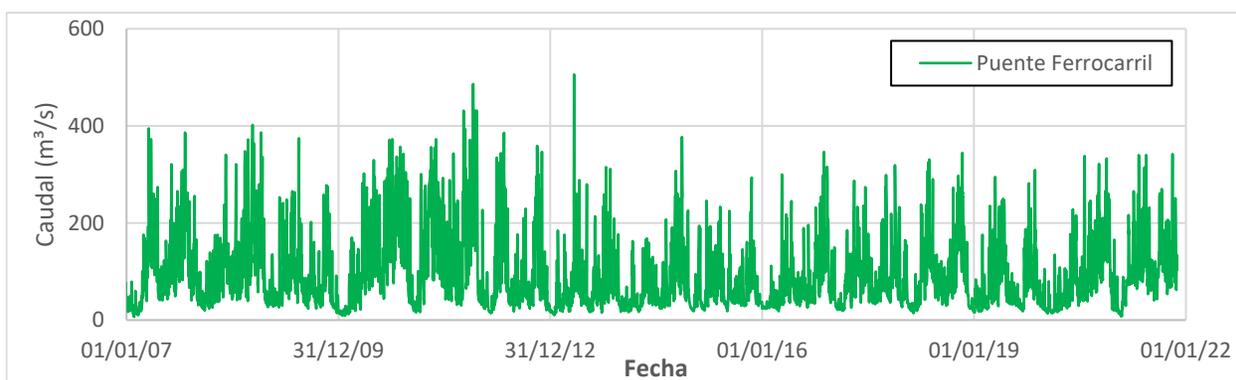


Figura 2.9 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Puente Ferrocarril (río Opón)

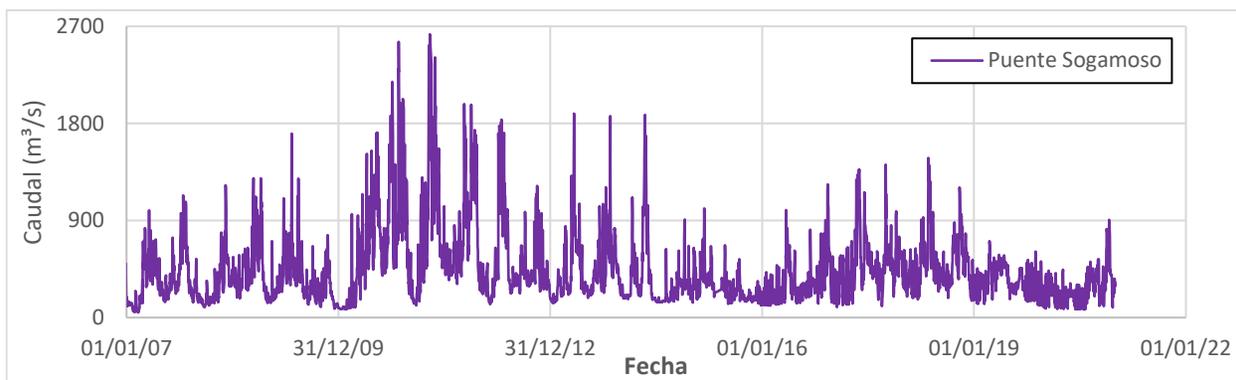


Figura 2.10 – Serie de caudal medio diario registrada en la estación Puente Sogamoso (río Sogamoso)

De las figuras se observa el régimen bimodal en los cuatro ríos: San Bartolomé, Carare, Opón y Sogamoso; sin embargo, en los tres primeros ríos se observan varios picos de caudal en la época

invernal lo cual puede obedecer a crecientes súbitas en los ríos, con duraciones de uno o dos días. Por otro lado, el caudal registrado en la estación de Puente Sogamoso se encuentra condicionado con la regulación de niveles (caudal de descarga) de la represa de Hidrosogamoso.

A pesar de que la estación El Bagre, sobre el río Cimitarra, se encuentra suspendida, en la Figura 2.11 se muestra la serie de caudal medio diario registrada (período de 1977 a 1990) con el fin de tener un comparativo en cuanto a aporte de caudal de este río sobre el tramo de análisis del río Magdalena.

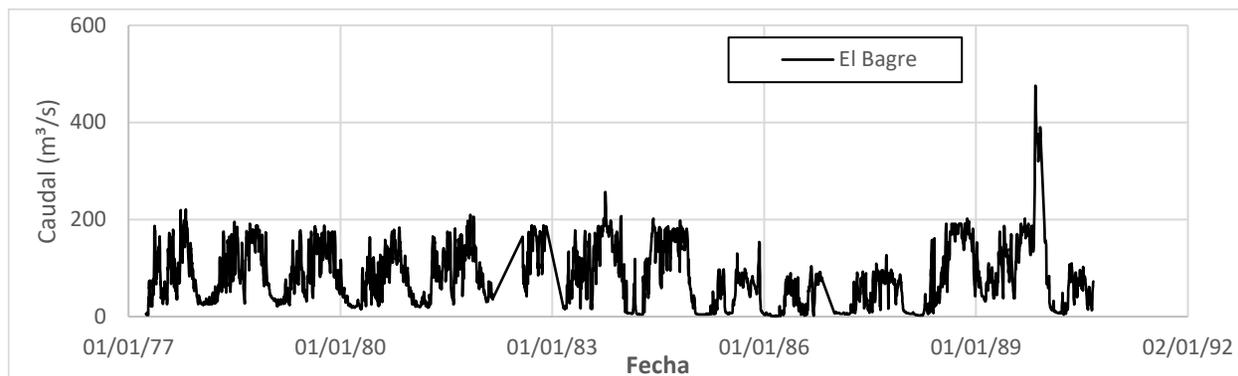


Figura 2.11 – Serie de caudal medio diario en la estación El Bagre (río Cimitarra)

En la Tabla 2.2 se presenta la relación de caudales medios, mínimos y máximos para los 5 ríos tributarios del tramo analizado de río Magdalena. De la Tabla 2.2 se observa que en promedio el aporte de caudal de los 5 ríos tributarios en el río Magdalena es 985.5 m³/s, lo que equivaldría aproximadamente al 29% del caudal que transporta el río Magdalena en el tramo de estudio.

Tabla 2.2 – Relación de caudales en los ríos tributarios del río Magdalena (tramo de estudio)

Estación	Río	Período	Caudal mínimo (m ³ /s)	Caudal medio (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)
La Bodega [23107020]	San Bartolomé	01/01/2007 – 17/11/2011	23.6	79.0	566.7
Barretero Finca [23127050]	Carare	01/01/2007 – 17/11/2011	42.5	301.2	1124.0
Puente Ferrocarril [23147020]	Opón	01/01/2007 – 17/11/2011	6.6	90.3	506.0

Estación	Río	Período	Caudal mínimo (m³/s)	Caudal medio (m³/s)	Caudal máximo (m³/s)
Puente Sogamoso [24067020]	Sogamoso	01/01/2007 – 17/11/2011	73.7	433.2	2625.0
El Bagre [23177010]	Cimitarra	01/01/1977 – 24/08/1990	0.5	81.9	475.5

Los datos de la caracterización hidrológica se encuentran en el Anexo 1 de este informe.

2.2 Caracterización morfodinámica

2.2.1 Metodología

Para realizar el análisis multitemporal que describa los patrones de flujo y deposición de sedimentos, así como las condiciones geomorfológicas del río Magdalena, se consideraron aproximadamente 230 km de recorrido del cauce entre el sector aguas arriba de la estación de Puerto Berrío y aguas abajo de la de estación de Sitio Nuevo. Sobre esta distancia se digitalizaron imágenes satelitales de 6 períodos, como se muestra en la Tabla 2.3.

El trabajo de digitalización de las orillas y barras aluviales se realizó sobre la plataforma ArcGIS con una escala variable entre 1:6000 y 1:12500. El sistema de coordenadas utilizado fue el nuevo origen Magna Colombia – CTM12.

Tabla 2.3 – Descripción de las imágenes utilizadas en el análisis multitemporal

Período	Fechas	Sensores	Path/Row
1	22/03/1985, 09/03/1986, 15/07/1986, 16/12/1986, 31/05/1987, 17/12/1987	LANDSAT 5 y 4	8/54, 8/55, 8/56, 7/55 y 7/56
2	11/08/1996, 30/08/1997, 20/12/1977	LANDSAT 5	8/54, 8/55, 8/56, 7/56, 7/55
3	04/08/2002	LANDSAT 7	8/54, 8/55, 8/56
4	27/07/2005, 20/02/2006, 05/12/2006	LANDSAT 7	8/54, 8/55, 8/56

Período	Fechas	Sensores	Path/Row
5	12/05/2015, 01/09/2015	LANDSAT 8	8/54, 8/55, 8/56
6	04/01/2021, 20/01/2021	LANDSAT 8	8/54, 8/55, 8/56

2.2.2 *Análisis multitemporal de orillas*

Aguas abajo de la desembocadura del río San Bartolomé, la pérdida más pronunciada del cauce se debe al estrangulamiento de un caño que se identificó para el año 1986 y que para el 2021 ya no tenía agua identificable, por lo menos no en todo su trayecto, de hecho, para el período 2015-2016 varios tramos denotaban una alta presencia de sedimentos, como se observa en la Figura 2.12 (a). Sobre el sector de la desembocadura del río Carare, el río Magdalena ha tenido una importante dinámica fluvial en ambas márgenes, con una disminución del cauce en el sector norte de la estación Puerto Gaitán de 860 metros en 35 años, pero debido a los cambios en ambas orillas la sinuosidad del río ha permanecido relativamente estable. En esa zona se viene erodando fuertemente la margen izquierda generando una “punta” como en el tramo anterior, que revela una unidad litológica mucho más dura que las circundantes, como se muestra al norte de la estación Puerto Gaitán de la Figura 2.12 (a).

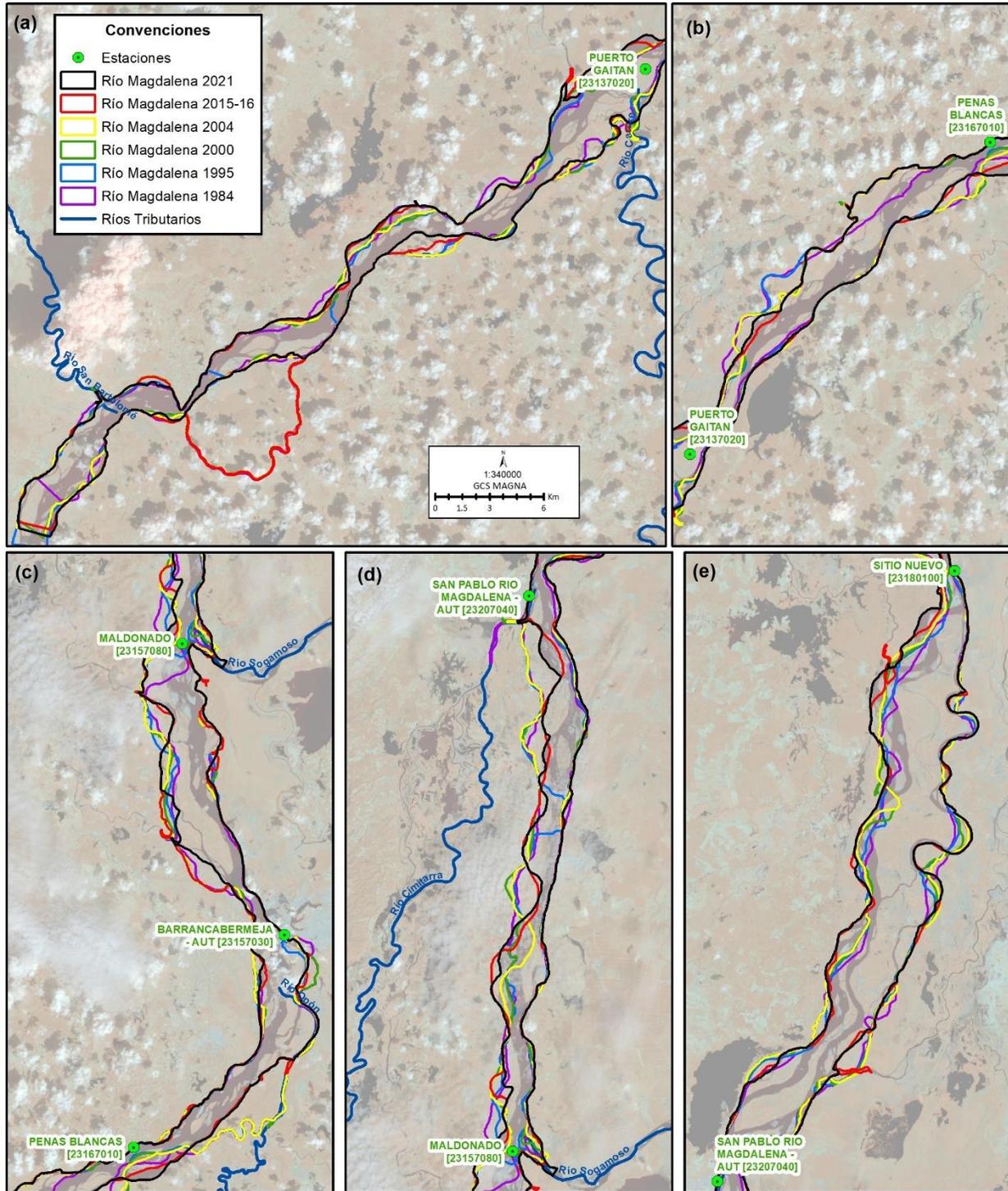


Figura 2.12 – Dinámica fluvial del río Magdalena: Puerto Berrío – Sitio Nuevo

Entre las estaciones de Puerto Gaitán y Peñas Blancas se puede ver el fenómeno opuesto a la zona anterior, una sedimentación en la margen izquierda del río, como se muestra en la Figura 2.12 (b); pese a esto, la margen derecha ha retrocedido poco y la sedimentación en este tramo ha aumentado fuertemente por lo que se podría pensar que la velocidad o profundidad del cauce ha aumentado.

Entre las estaciones de Peñas Blancas y Barrancabermeja el cauce se mantiene relativamente estable a lo largo de 35 años, salvo un caño que se conectaba al río Opón. Para el periodo 2015-2016 el caño se encontraba sedimentado y para el 2021 no fue posible trazar su curso.

Sobre la ciudad de Barrancabermeja se ha presentado un proceso de acreción que en su parte de mayor acumulación alcanza 610 metros, pese a esto en el sector de localización de la estación Barrancabermeja se ha producido un proceso erosivo que ha alcanzado los 215 metros, esto probablemente debido a la presencia de barras aluviales longitudinales sobre este tramo.

En la zona aledaña a la estación Maldonado, desembocadura del río Sogamoso, ha existido una amplia dinámica de las orillas, alcanzando los 2500 metros sobre la margen izquierda del río, como se muestra en la Figura 2.12 (c). Todo esto se debe a la múltiple presencia de barras aluviales en esta zona, debido entre otras causas a la dinámica de la desembocadura del río Sogamoso.

Entre las estaciones de Maldonado y San Pablo, la dinámica del río ha ocurrido sobre la margen izquierda del río Magdalena, de forma sinusoidal, mientras que, la margen derecha ha permanecido estable en los 35 años de análisis, como se muestra en la Figura 2.12 (d).

Entre las estaciones de San Pablo y Sitio Nuevo, la dinámica del río ha ocurrido sobre las dos márgenes del río Magdalena, como se muestra en la Figura 2.12 (e).

En general el río Magdalena tiene una dinámica muy amplia, divagando siempre sobre depósitos arcillosos o arenosos destacando fácilmente aquellas zonas relativamente duras sobre las demás.

2.2.3 Análisis multitemporal de barras

Las barras aluviales revelan detalles para tener en cuenta, por ejemplo, en la Figura 2.13 (a) se puede observar cómo, a pesar de la gran cantidad de barras aluviales y su evolución en el río Magdalena a la altura de la desembocadura del río San Bartolomé, hay un pequeño tramo de unos 2.25 km en los que a lo largo de los 35 años de análisis nunca ha tenido barras aluviales. Dado que el río Carare presenta una fuerte carga de sedimentos, en su desembocadura en el río Magdalena se observa la formación de barras aluviales para todos los años de análisis, como se ve en Figura 2.13

(a). En este sector la cantidad de sedimentos es tal, que siempre ha existido una gran cantidad de barras aluviales en el sector, pero en años recientes, las barras aluviales aguas arriba del río Carare han venido restringiendo una serie de brazos que el río Magdalena tenía en el sector, provocando que el cauce se recueste sobre la margen izquierda del río.

Sobre el sector de Barrancabermeja, hacia la altura del puente Yondó, se puede apreciar un estrechamiento del río Magdalena, con lo cual podría señalarse que este tramo presenta una relativa alta velocidad, motivo por el cual, la presencia de barras aluviales en el sector es poca, como se observa en la Figura 2.13 (c) aguas debajo de la estación Barrancabermeja.

Las barras aluviales siguen repitiendo su presencia a lo largo del río Magdalena, y con una mayor magnitud entre las estaciones de San Pablo y Sitio Nuevo, como se observa en la Figura 2.13 (e), la cual se ve influenciada por la formación de brazos sobre la margen derecha del río Magdalena. En el tramo final de estudio, y probablemente influenciado por un brazo que deriva hacia el río Cimitarra, las barras aluviales disminuyen su tamaño y su frecuencia, por lo que podría especularse que este brazo, se lleva una importante carga de sedimentos que de otra manera seguiría alterando el cauce principal del Magdalena.

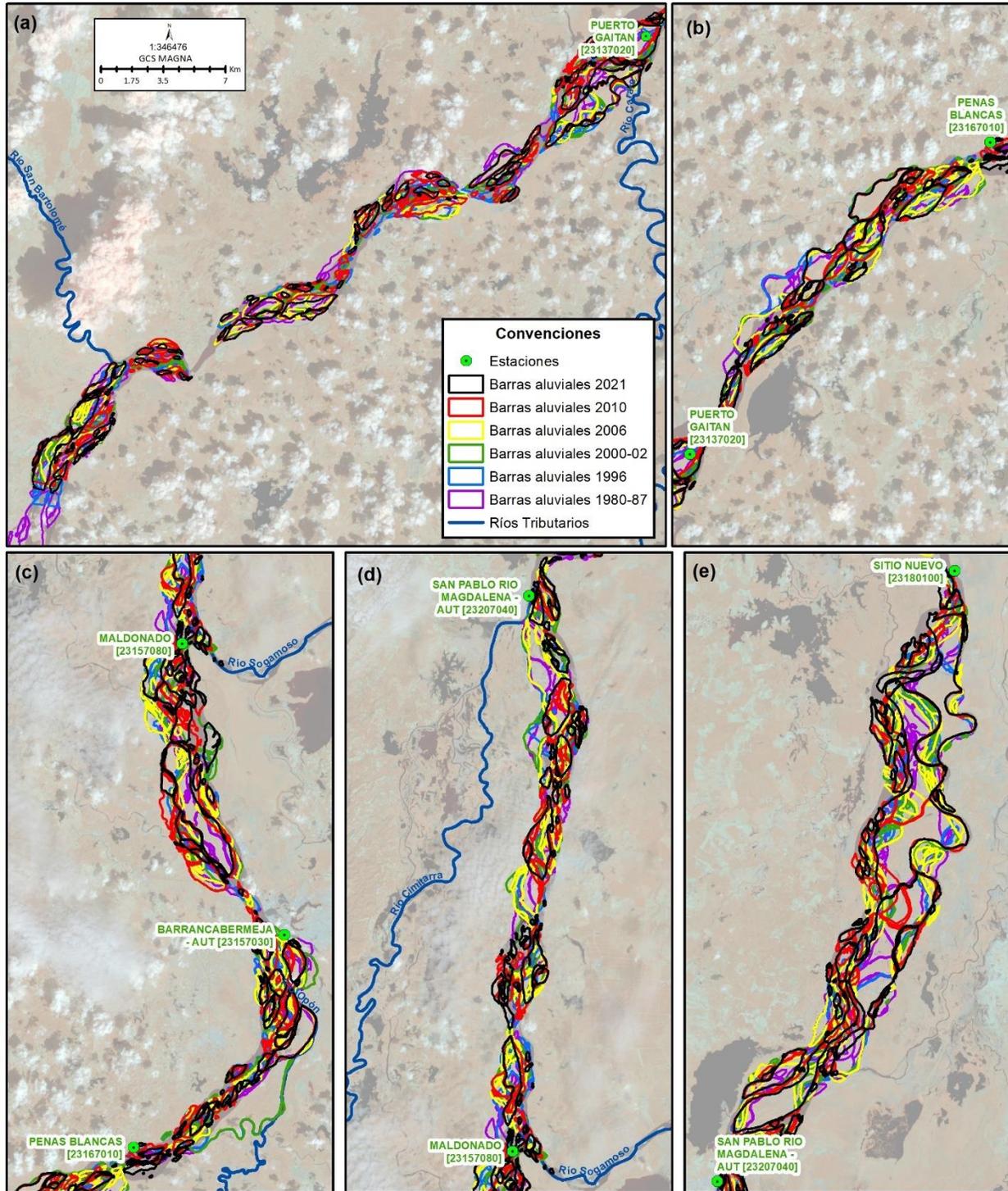


Figura 2.13 – Análisis de barras aluviales en el río Magdalena: Puerto Berrío – Sitio Nuevo

2.2.4 Resistencia relativa a la erosión fluvial

Se realizó el cálculo de la resistencia relativa a la erosión fluvial de acuerdo con la metodología de Vargas (2012), en la cual se le asigna un valor de resistencia a diferentes materiales expuestos a la dinámica de los ríos. Este valor está dado en función del tipo de material constitutivo de la roca o de la geoforma que está siendo afectada por el cuerpo de agua.

Las rocas con menor resistencia son en general aquellos depósitos no consolidados que ante la acción fluvial son arrastrados fácilmente, este es el caso de arenas o limos depositados por el mismo cauce del río o por eventos torrenciales en las zonas aledañas. En la medida que el material tiende a cementarse la resistencia a ser erodado por un río es mayor. A nivel geomorfológico, las formas como conos de deyección, cauces aluviales y valles de inundación son los que menor resistencia ofrecen a la erosión fluvial, esto debido a que se consideran geoformas recientes y son altamente dinámicas; ocurre lo contrario con geoformas como colinas, cerros y otras geoformas estructurales o denudacionales que por su posición topográfica o por la resistencia de sus materiales, conservan su forma durante muchos años y son catalogados como de resistencia muy alta a la erosión fluvial. Ambas formas de calificación son complementarias, por lo que si no se conoce la geología de una zona de interés puede utilizarse la geomorfología para determinarse esa resistencia relativa de un sector y viceversa.

Por último, cabe aclarar que se denomina resistencia relativa por la gran cantidad de variables que influyen en la velocidad en la que un material puede ser erodado por ejemplo, el caudal del río, el ángulo en que se atacan las rocas, el clima, la vegetación, etc. Por lo cual calcular una resistencia absoluta para cada tipo de material es una tarea realmente complicada. En la Tabla 2.4 se presenta la caracterización de la resistencia a la erosión fluvial en función del tipo de roca o geoforma, de acuerdo con Vargas (2012).

Tabla 2.4 – Caracterización de la resistencia a la erosión fluvial (Vargas, 2012)

Clase de material litológico	Tipo de material	Sensores	Resistencia a la erosión	
			Símbolo	Descripción
Rocas cristalinas	Rocas ígneas (granitos, riolitas, granodioritas, gabros, basaltos, etc.) y rocas metamórficas (neises, esquistos, filitas,	Colinas, cerros y cadenas montañosas denudacionales y estructurales	RMA	Resistencia muy alta

Clase de material litológico	Tipo de material	Sensores	Resistencia a la erosión	
			Símbolo	Descripción
	cuarcitas, etc.)			
Rocas sedimentarias	Rocas sedimentarias químicas y detríticas con cemento (cherts, cuarzoarenitas, calizas, etc.	Colinas, cerros residuales y/o en cadenas montañosas denudacionales y estructurales		
Rocas piroclásticas y rocas sedimentarias detríticas	Cenizas, tobas y aglomerados piroclásticos y rocas sedimentarias detríticas o clásticas (conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas no cementadas)	Escarpes, terrazas, colinas, cerros residuales y/o en cadenas montañosas denudacionales y estructurales	RA	Resistencia alta
Depósitos no consolidados de origen aluvial	Conglomerados, arenas, limos y/o arcillas	Terrazas aluviales, planicies aluviales, diques aluviales	RM	Resistencia media
Depósitos no consolidados de origen fluvio lacustre	Arcillas, limos y lodos orgánicos	Llanuras de inundación recientes y subrecientes, cubetas de ciénagas, manglares, marismas, etc.	RMB	Resistencia media baja
Depósitos aluviales subrecientes	Arenas y limos con niveles de conglomerados moderadamente compactos	Vegas de divagación subrecientes, islas fluviales subrecientes y terrazas bajas	RB	Resistencia baja
Depósitos aluviales de canal activo	Arenas, limos y gravas	Barras de arena, islas fluviales recientes, playas, lechos activos, vegas de divagación recientes	RMMB	Resistencia muy baja

Habiendo definido y actualizado las geformas fluviales del área de interés, se procedió a clasificar cada unidad en función de la Tabla 2.4 cuyos resultados se aprecian en la Figura 2.14. En la figura

se logra identificar que donde más tasa de erosión o acreción tiene el río, es donde menor resistencia a la erosión fluvial existe, por el contrario, aquellas zonas con geoformas y/o materiales duros, son las que menor movilidad en el río presentan. También puede señalarse que las unidades con mayor resistencia a los procesos fluviales se encuentran hacia el sur del área trabajo, en donde las geoformas montañosas revelan rocas más duras y, por ende, más difíciles de ser afectadas por la erosión fluvial. Hacia el sur, por el contrario, se observan geoformas planas que son producto de la dinámica propia del río, las cuales son muy poco consolidadas y ofrecen una baja resistencia a la erosión fluvial.

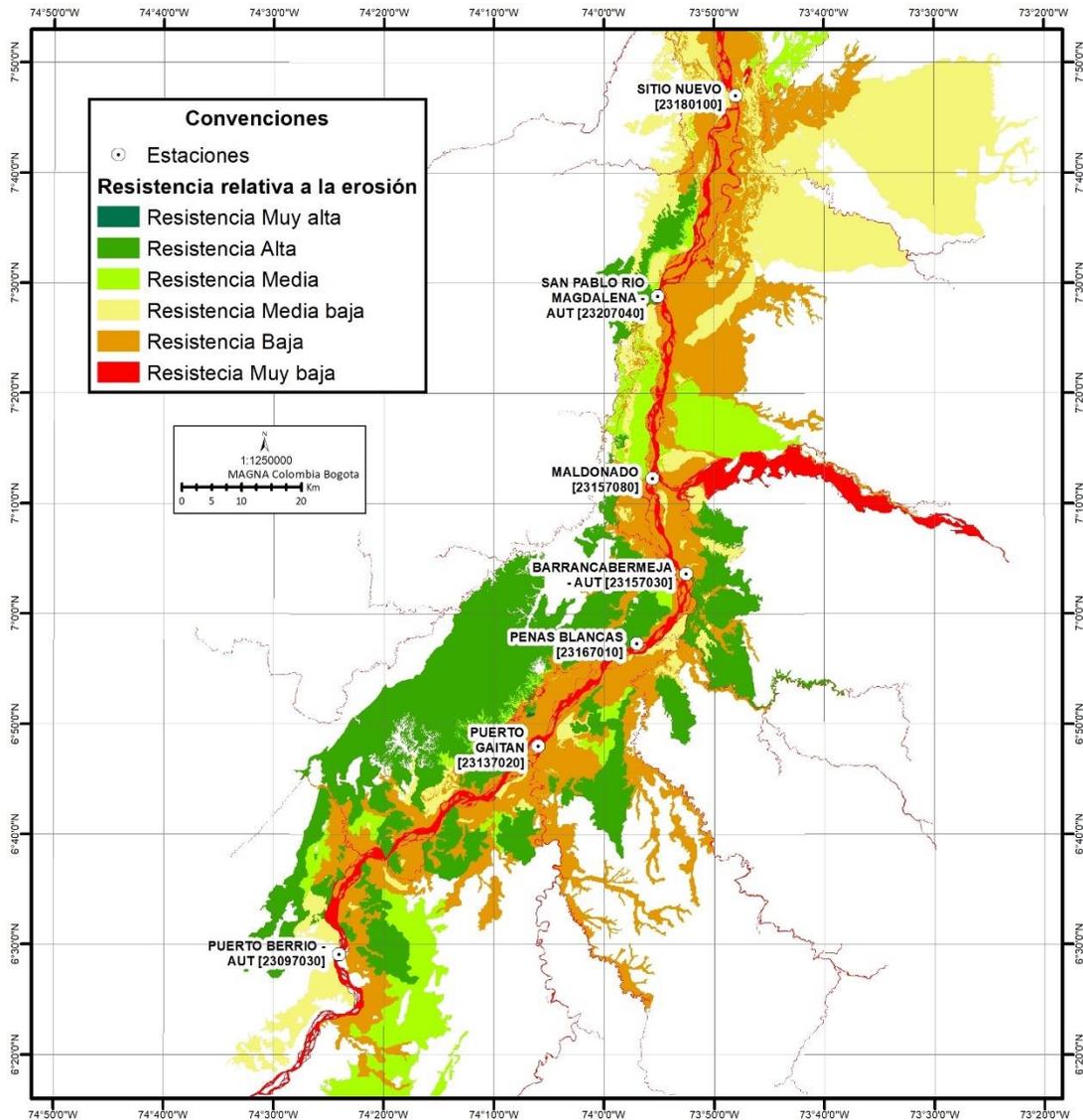


Figura 2.14 – Zonificación de la resistencia relativa a la erosión fluvial en el área de interés

Los shapes de la caracterización morfodinámica del río Magdalena, en el tramo de estudio, se encuentran en el Anexo 2 de este informe.

2.3 Conclusiones y recomendaciones

2.3.1 Conclusiones

- En el numeral 2.1 se realizó la caracterización hidrológica del tramo de estudio del río Magdalena y de los 5 ríos tributarios. Se identificaron 12 estaciones limnigráficas que históricamente han registrado información de caudales, de las cuales hay 9 activas, una de ellas sin registro de caudal, y 3 suspendidas. Los registros de caudal en las estaciones localizadas sobre el río Magdalena presentan patrones similares, con régimen bimodal. Del análisis de las series de caudal de los ríos tributarios, para los últimos 15 años, se estimó que en promedio el aporte de caudal de los 5 ríos tributarios en el río Magdalena es 985.5 m³/s, lo que equivaldría aproximadamente al 29% del caudal que transporta el río Magdalena en el tramo de estudio.
- En el numeral 2.2 se realizó la caracterización morfodinámica del tramo de estudio del río Magdalena, en donde se identificaron las zonas en que las orillas del cauce presentan una dinámica más pronunciada. Además, se identificaron las zonas de generación de barras aluviales, y que pueden dar origen a islas internas en el cauce del río Magdalena. Esa caracterización morfodinámica permitirá conocer las zonas en donde la sección transversal del río puede sufrir cambios teniendo influencia en el modelo hidráulico de pronóstico. Los estudios fluviales deben ser siempre complementados con análisis espectrales y de sensores remotos en general, los cuales permiten comprender diversos elementos de la dinámica fluvial que de otro modo podrían no ser denotados.

2.3.2 Recomendaciones

- Es necesario efectuar actividades de seguimiento sobre algunas orillas del río Magdalena, las cuales en los análisis actuales demostraron tener una muy alta movilidad y que,

dependiendo de su cercanía a poblaciones riverseñas, pueden generar eventos amenazantes a las comunidades.

3 Evaluación de los modelos hidrológicos e hidráulicos

3.1 Esquematación de los modelos hidrológicos e hidráulicos asociados al VMM

La modelación y pronóstico del río Magdalena se realiza a través de modelos hidrológicos e hidráulicos los cuales se encuentran delimitados por tres zonas: (1) parte Alta, entre las estaciones Puerto Salgar [23037010] y Barrancabermeja [23157030], (2) parte Media, entre las estaciones Puerto Berrío [23097030] y Sitio Nuevo [23187280], y (3) parte Baja, entre las estaciones Sitio Nuevo [23187280] y El Banco [25027020]. El caso de estudio, correspondiente al Valle Medio del río Magdalena se encuentra inserido en la parte Media, entre las estaciones de Puerto Berrío y Sitio Nuevo; sin embargo, la modelación hidráulica de esta parte Media es influenciada por los resultados de la parte Alta (modelos hidrológicos e hidráulicos). En la Figura 3.1 se esquematizan los modelos hidrológicos e hidráulicos involucrados en las partes Alta y Media del río Magdalena. A continuación, se realiza la descripción general de los modelos hidrológicos e hidráulicos que se encuentran en la parte Alta, entre las estaciones de Puerto Salgar y Barrancabermeja:

- La regulación de la represa de Betania se mide en la estación de Puente Santander [21097070].
- Entre las estaciones de Puente Santander [21097070] y Puerto Salgar [23037010] se tiene incorporado un modelo hidrológico, denominado Alto Magdalena, como se muestra en la Figura 3.1 (a). El modelo hidrológico se encuentra configurado en el programa HEC-HMS
- Los resultados de ese modelo hidrológico (caudales) son incorporados en el modelo hidráulico de la parte Alta (condición de frontera aguas arriba), que va desde la estación de Puerto Salgar [23037010] hasta la estación de Barrancabermeja [23157030], como se muestra en la Figura 3.1 (a). El modelo hidráulico se encuentra configurado en el programa MIKE11.
- En el modelo hidráulico los aportes de los ríos Negro, Carare y Opón son los obtenidos de los modelos hidrológicos de las tres respectivas subcuencas, como se muestra en la Figura 3.1 (a). Los tres modelos hidrológicos se encuentran configurados en el programa HEC-HMS.

- En la simulación de ese modelo hidráulico se obtienen caudales en la abscisa correspondiente a la estación de Puerto Berrío, los cuales son incorporados como condición de frontera aguas arriba en el segundo modelo hidráulico (entre las estaciones de Puerto Berrío y Sitio Nuevo).

Posteriormente, se realiza la descripción general de los modelos hidrológicos e hidráulicos que se encuentran en la parte Media, entre las estaciones de Puerto Berrío y Sitio Nuevo:

- En el modelo hidráulico entre las estaciones de Puerto Berrío [23097030] y Sitio Nuevo [23187280] tiene cinco afluentes, como se muestra en la Figura 3.1 (b).
- Dos de los cinco afluentes son representados por modelos hidrológicos, correspondiendo a las cuencas hidrográficas de los ríos Carare y Opón. Esos modelos se encuentran configurados en el programa HEC-HMS, como se muestra en la Figura 3.1 (b).

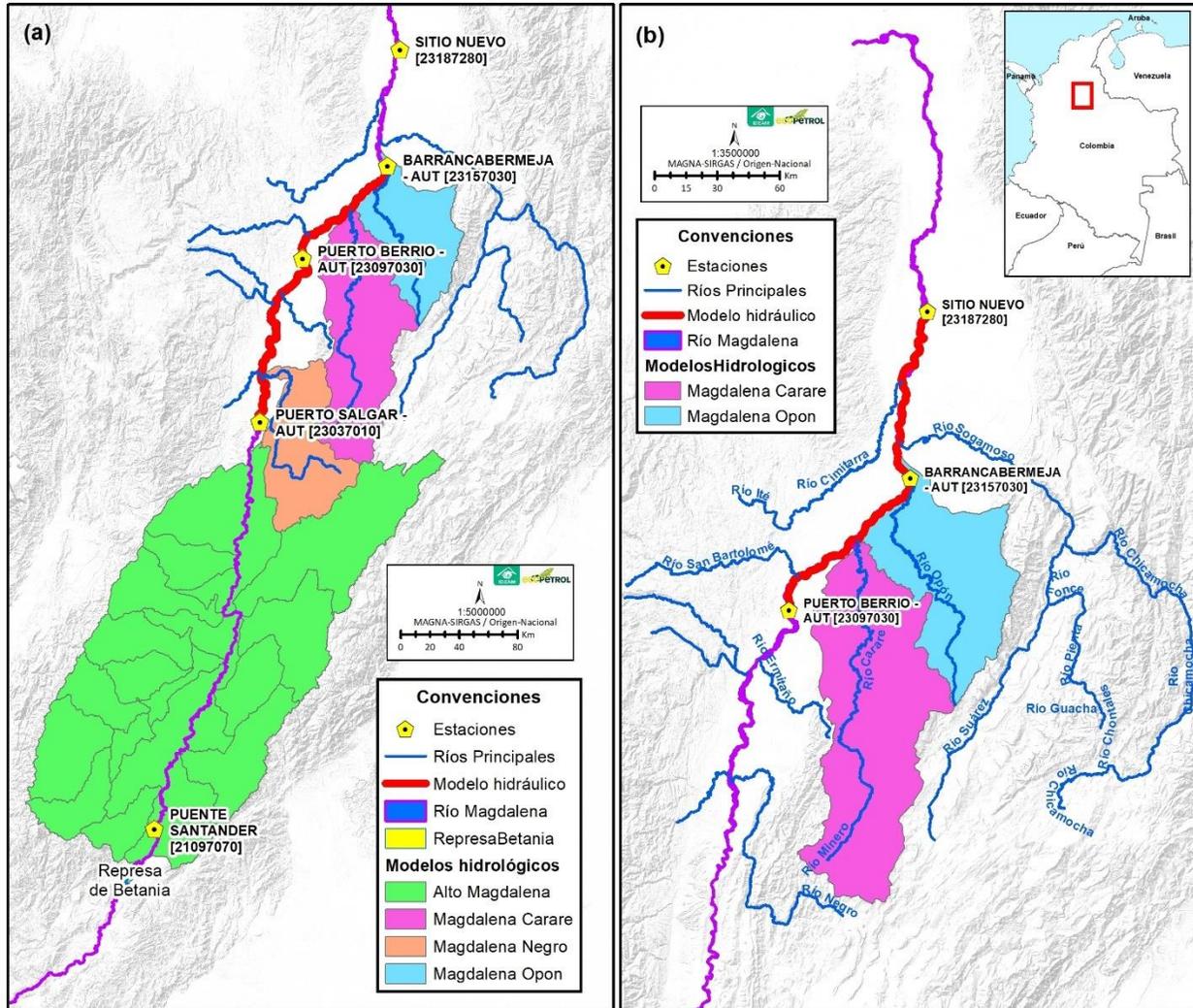


Figura 3.1 – Esquema conceptual de la modelación en el río Magdalena: (a) parte Alta y (b) parte Media

En el numeral 3.2 se hace la evaluación de los 4 modelos hidrológicos identificados: Alto Magdalena, Magdalena Negro, Magdalena Carare y Magdalena Opón. Mientras que en el numeral 3.4 se hace la evaluación del modelo hidráulico en el tramo de análisis, entre las estaciones de Puerto Berrío y Sitio Nuevo. Adicionalmente, en el numeral 3.3 se hace la evaluación de los insumos climáticos (precipitación y temperatura) que alimentan los modelos hidrológicos.

3.2 Evaluación de los modelos hidrológicos

3.2.1 Descripción de los modelos hidrológicos

En la Figura 3.2 se muestra la configuración del modelo hidrológico en el programa HEC-HMS, en donde se simula el tramo del río Magdalena entre Betania y Puerto Salgar. De la inspección de ese modelo hidrológico se observa que en el tramo correspondiente entre Betania y Puerto Salgar, sobre el río Magdalena, el tránsito hidráulico es simulado a través de un tránsito hidrológico en donde se utiliza el modelo de retraso (lag). En cada sector se utiliza un valor fijo del tiempo de retraso, por lo que el modelo hidrológico solamente se ajustará a una combinación de caudales sobre el río Magdalena.

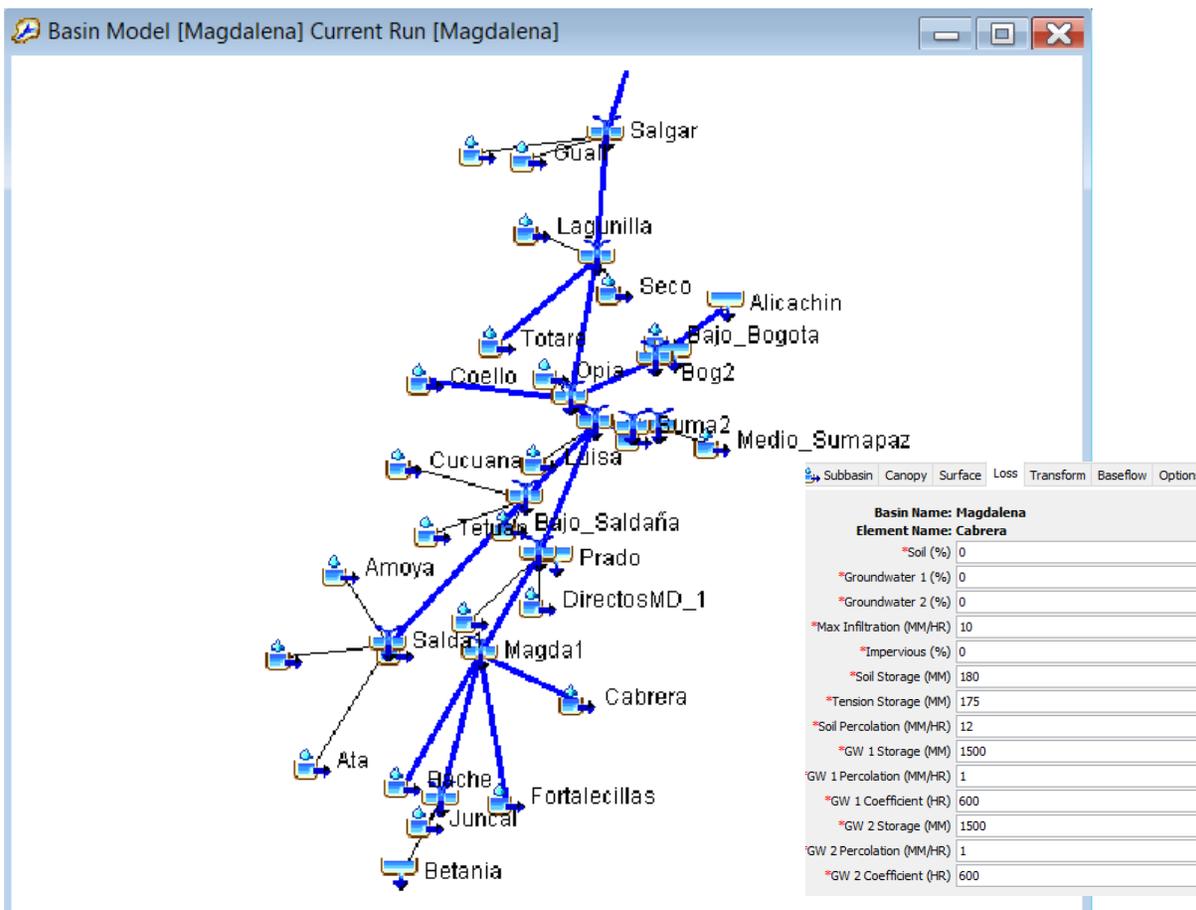


Figura 3.2 – Vista del modelo hidrológico Alto Magdalena – Programa HEC-HMS

En la Figura 3.3 se muestra la configuración del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica del río Negro, el cual se encuentra configurado en el programa HEC-HMS.

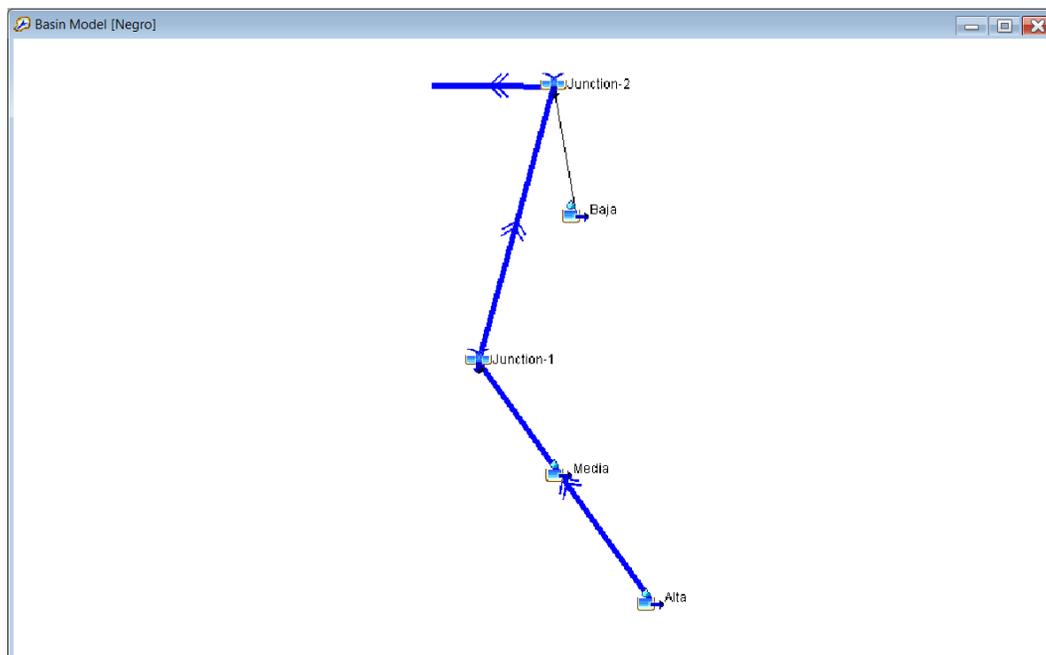


Figura 3.3 – Vista del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica del río Negro

En la Figura 3.4 se muestra la configuración del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica del río Carare, el cual se encuentra configurado en el programa HEC-HMS.

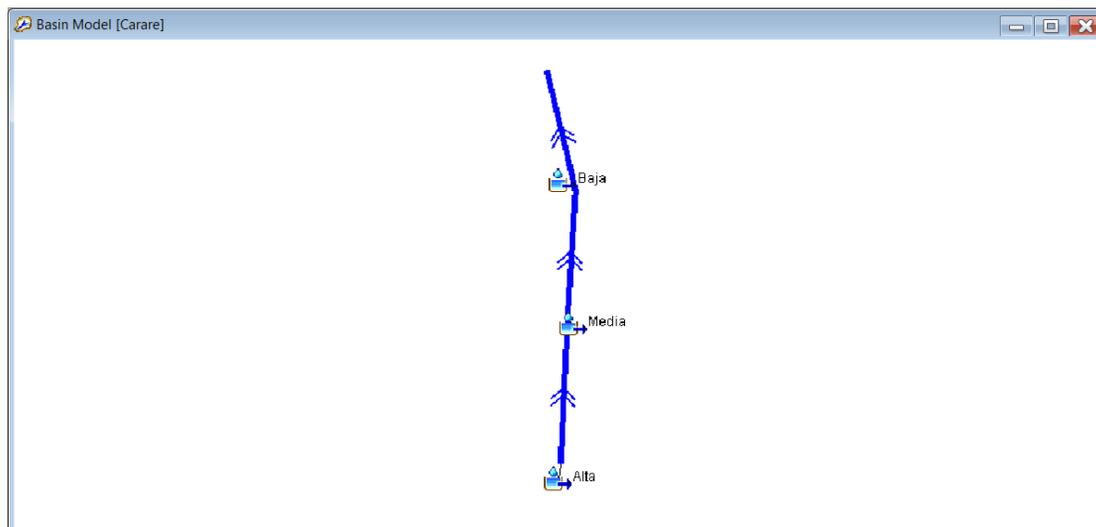


Figura 3.4 – Vista del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica del río Carare

En la Figura 3.5 se muestra la configuración del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica de los ríos Opón y Colorada, el cual se encuentra configurado en el programa HEC-HMS. En el

modelo hidrológico se calcula el aporte del río Opón y del río Colorada y luego son sumadas las contribuciones de los dos ríos.

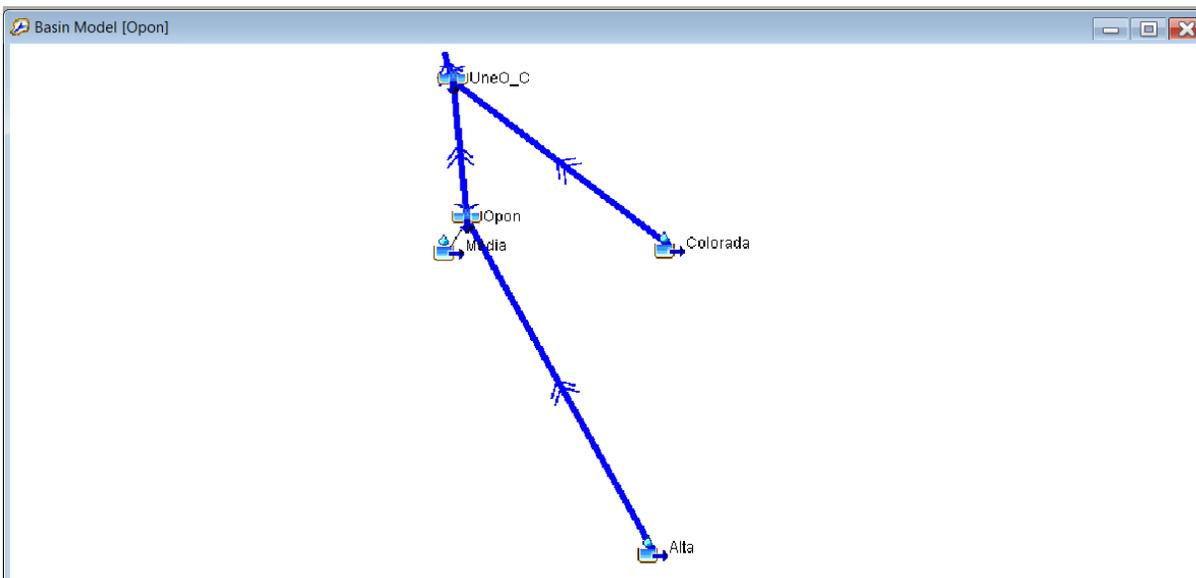


Figura 3.5 – Vista del modelo hidrológico de la subzona hidrográfica de los ríos Opón y Colorada

3.2.2 Evaluación de los modelos hidrológicos

Con base en el informe técnico elaborado por Urrego (2018), se evaluaron los cuatro modelos hidrológicos antes mencionados, por medio de la métrica determinística BIAS, para el periodo de enero a diciembre de 2018.

En la Figura 3.6 se presentan los caudales observados en la estación de Puerto Salgar [23037010] y los caudales simulados en el modelo hidrológico Alto Magdalena (en HEC – HMS), en donde se observa que el modelo hidrológico genera sobrestimación de los caudales. En la Figura 3.7 se muestra el desempeño del modelo hidrológico en términos del BIAS, el cual se encuentra entre 2100 m³/s y -150 m³/s, con una sobrestimación general de los caudales.

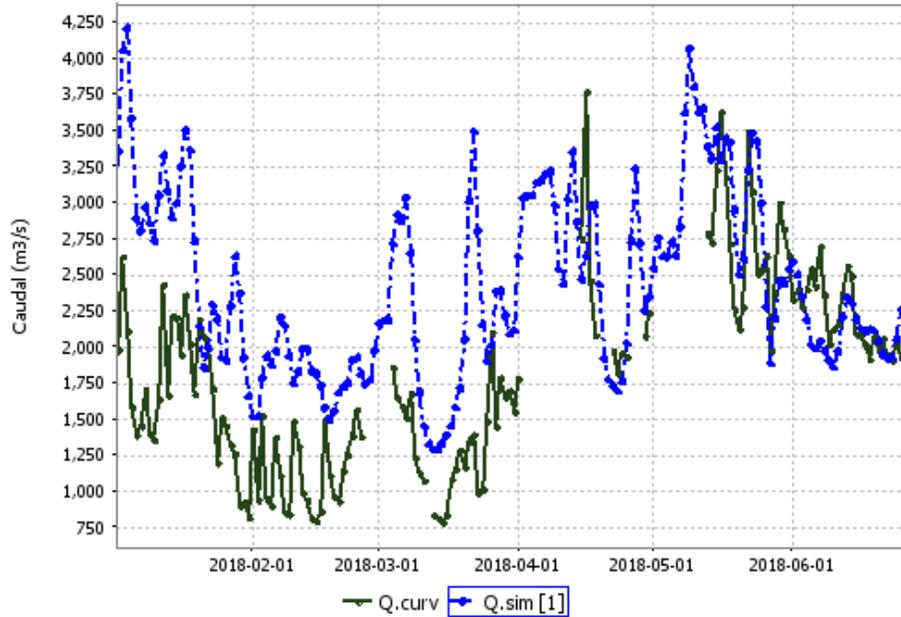


Figura 3.6 – Comparación de caudales observados y simulados en la estación de Puerto Salgar (Urrego, 2018)

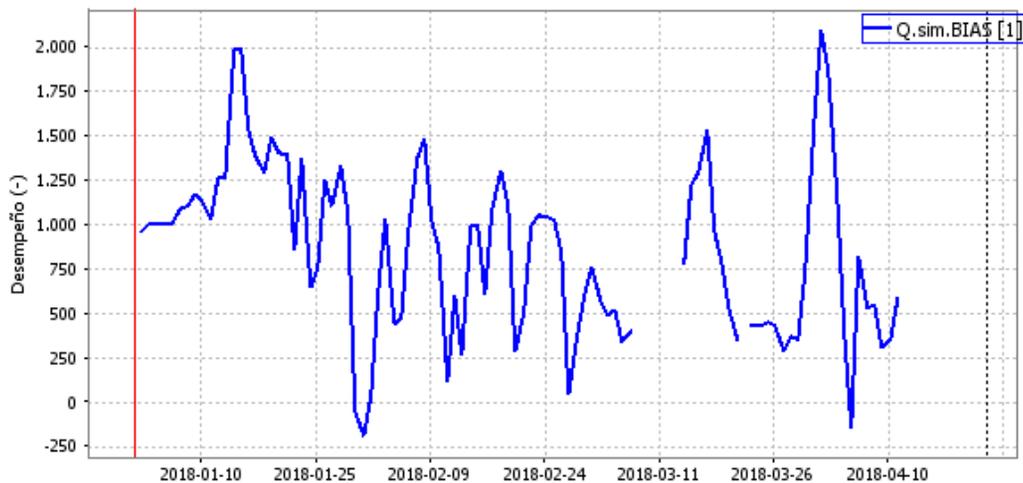


Figura 3.7 – Desempeño BIAS en la estación de Puerto Salgar (Urrego, 2018)

En la Figura 3.6 se presentan los caudales observados en el río Negro y los caudales simulados en el modelo hidrológico Magdalena Negro (en HEC – HMS), en donde se observa que el modelo hidrológico genera subestimación de los caudales. En la Figura 3.9 se muestra el desempeño del modelo hidrológico en términos del BIAS, el cual se encuentra entre $80 \text{ m}^3/\text{s}$ y $-550 \text{ m}^3/\text{s}$, presenta mejores resultados en periodos de lluvias bajas; mientras que en el periodo de lluvias altas hay una

subestimación general de los eventos pico. La información de precipitación utilizada en el modelo hidrológico correspondió a la información registrada en la estación Puerto Libre [23067040].

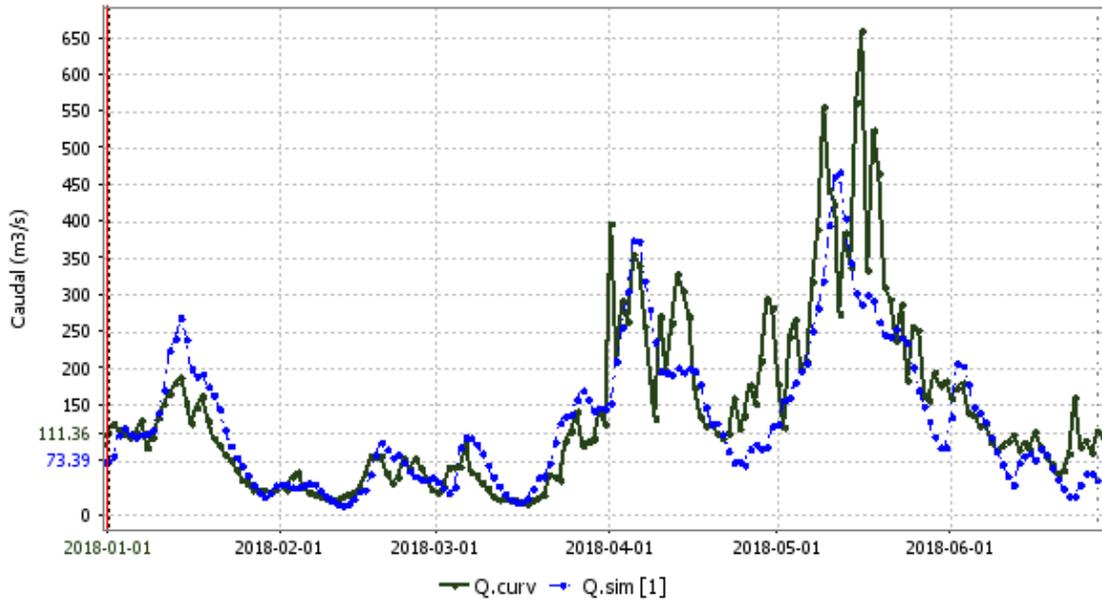


Figura 3.8 – Comparación de caudales observados y simulados en el río Negro (Urrego, 2018)

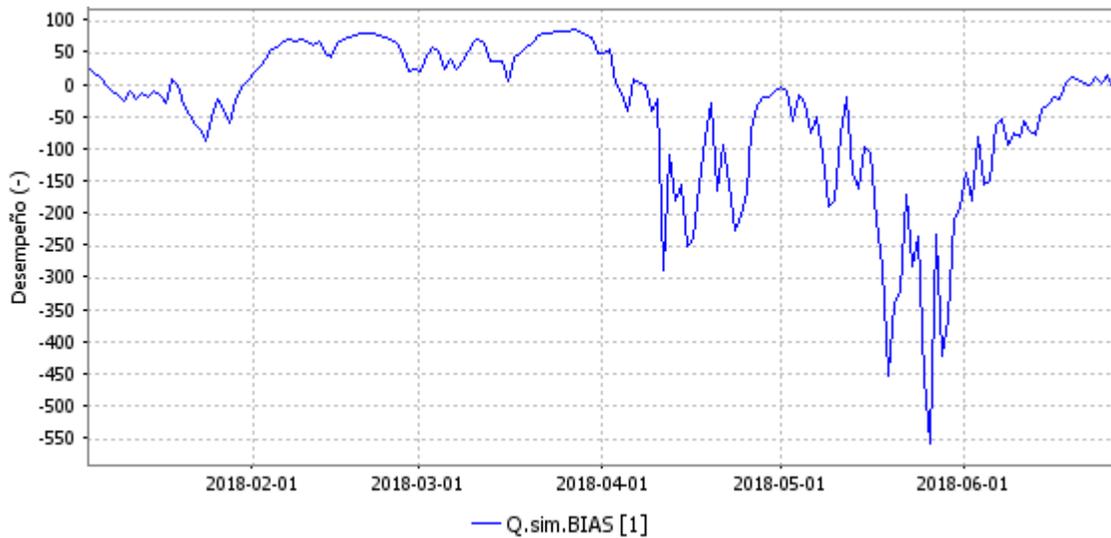


Figura 3.9 – Desempeño BIAS en el río Negro (Urrego, 2018)

En la Figura 3.10 se presentan los caudales observados en el río Carare y simulados en el modelo hidrológico Magdalena Carare (en HEC – HMS), en donde se observa que el modelo representa

adecuadamente los caudales observados (45 días del período registrado). Se observa también que para los primeros 5 meses del período seleccionado el registro de valores de caudal fue esporádico. La información de precipitación utilizada en el modelo hidrológico correspondió a la información registrada en la estación Puerto Araujo [23120070].

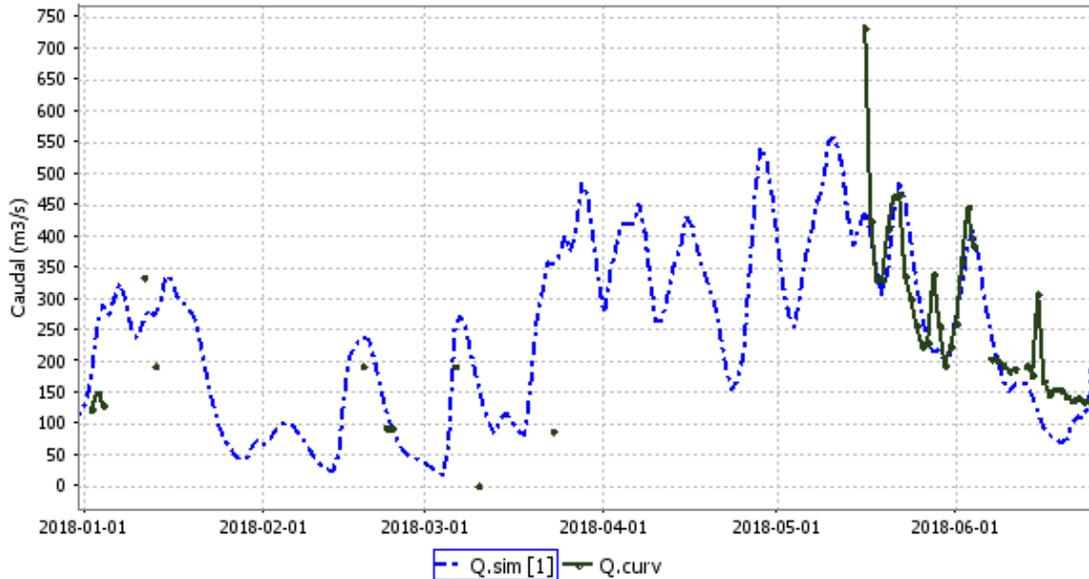


Figura 3.10 – Comparación de caudales observados y simulados en el río Carare (Urrego, 2018)

En la Figura 3.11 se presentan los caudales observados en el río Opón y simulados en el modelo hidrológico Magdalena Opón (en HEC – HMS), en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los caudales observados en periodos de lluvias bajas; mientras que en el periodo de lluvias altas hay una subestimación general de los eventos pico, hasta una diferencia de aproximadamente 350 m³/s, como se muestra en la Figura 3.12 en la evaluación de desempeño del modelo (BIAS). La información de precipitación utilizada en el modelo hidrológico correspondió a la información registrada en la estación Puente Ferrocarril [23140040].

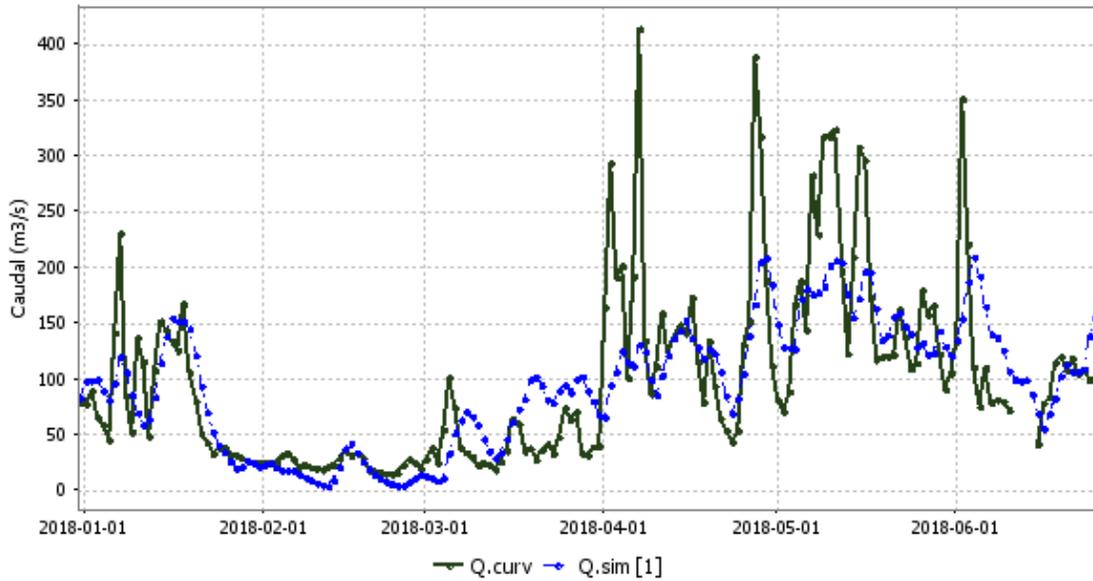


Figura 3.11 – Comparación de caudales observados y simulados en el río Opón (Urrego, 2018)

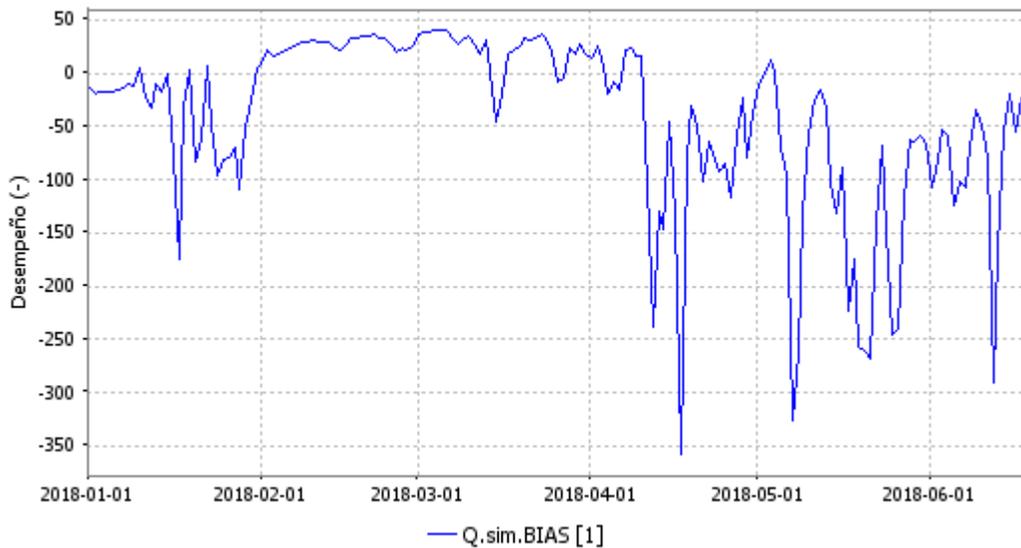


Figura 3.12 – Desempeño BIAS en el río Opón (Urrego, 2018)

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen comparativo entre el acierto de eventos para la fase de modelación (a partir de registros de precipitación y nivel) y la segunda fase correspondiente al pronóstico de los modelos hidrológicos.

Tabla 3.1 – Aciertos de los modelos hidrológicos configurados en el programa HEC-HMS

Modelo hidrológico	Modelación		Pronóstico	
	Eventos	Aciertos	Eventos	Aciertos
Alto Magdalena	14	5	13	4
Magdalena Negro	15	6	12	3
Magdalena Opón	16	7	10	5

El desempeño de los modelos de los ríos en la etapa de pronóstico y conforme a las métricas evaluadas tuvo un desempeño entre regular y bajo en las tres ventanas de tiempo, como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 – Resumen de la evaluación del desempeño en los modelos hidrológicos HEC-HMS en la etapa de pronóstico

Modelo hidrológico	Corriente	Desempeño en los tres días de pronóstico		
		1	2	3
Alto Magdalena	Río Magdalena	Bajo	Bajo	Bajo
Magdalena Negro	Río Negro	Regular	Regular	Bajo
Magdalena Opón	Río Opón	Regular	Regular	Regular

3.3 Evaluación de los insumos climáticos para la modelación hidrológica

3.3.1 Insumos climáticos

Adicional a la evaluación de los modelos hidrológicos, se realizó la validación de los insumos climáticos para modelación hidrológica, correspondientes a los productos de precipitación (a nivel diario y horario) y de temperatura (a nivel horario). Los productos evaluados fueron GSMAP (versión 6), MSWEP (versión 2.8), MSWX y WRF. Para precipitación diaria se incluyen los resultados obtenidos de la combinación de productos con el algoritmo RF-MEP y a paso horario el promedio de los productos. En la Tabla 3.3 se muestran las estaciones meteorológicas con información de precipitación diaria y horaria en las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso.

Tabla 3.3 – Estaciones meteorológicas con datos de precipitación

Precipitación	Estaciones meteorológicas en la subzona hidrográfica del río Opón	Estaciones meteorológicas en la subzona hidrográfica del río Sogamoso
Diaria	23125040, 23130010, 23140070, 23145020, 23155030, 23155040, 24055070	24050060, 24050070, 24050110, 24055030, 24055080, 24060040, 24060050, 24060060, 24060070, 24060080, 24065010, 24065030
Horaria	24055070	24055080

En lo que respecta a la temperatura derivada del producto MSWX (resolución temporal de tres horas), se realizó su validación con la temperatura máxima y mínima diaria de las estaciones en la zona de estudio, es decir que de los ocho datos de temperatura que tiene para un día el producto MSWX se estima el valor máximo y mínimo, y estos valores se comparan con sus homólogos en los registros de cada estación. Lo anterior, se debe a que dentro de la información disponible en el repositorio DHIME del IDEAM no hay datos de temperatura del aire a una resolución horaria o cada tres horas. De las estaciones disponibles en la zona de estudio con datos de temperatura máxima y mínima fueron seleccionadas 29, como se muestra en la Figura 3.13, en donde 3 estaciones se encuentran en la subzona hidrográfica del río Opón y 2 estaciones en la subzona hidrográfica del río Sogamoso.

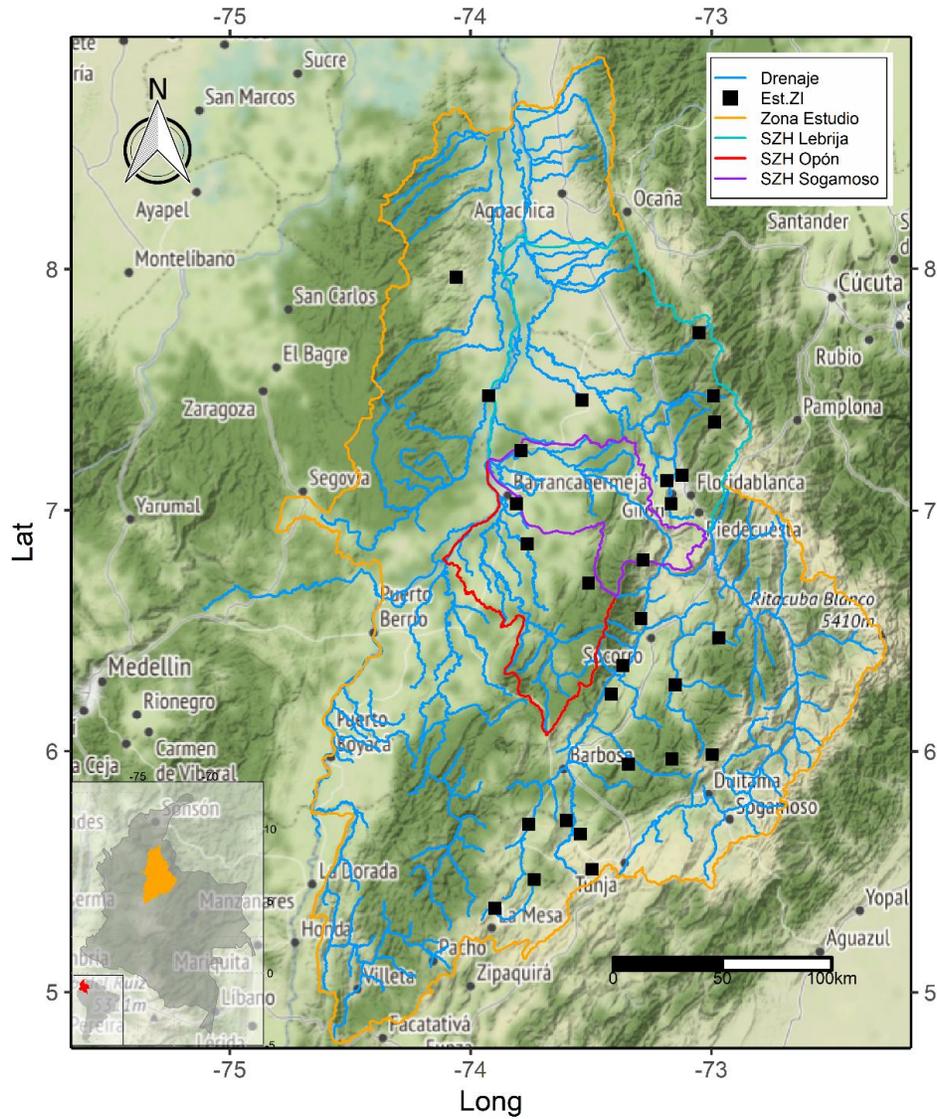


Figura 3.13 – Distribución espacial de las estaciones meteorológicas (cuadrados negros) con información de temperatura diaria máxima y mínima dentro de la zona de estudio (AC-4)

3.3.2 Validación de la precipitación en la subzona hidrográfica del río Opón

En la Figura 3.14 se muestra la distribución espacial de la precipitación mensual en la subzona hidrográfica del río Opón, información que fue generada de la combinación de los productos GSMAP, MSWEP y el DEM por medio del algoritmo RF-MEP. La malla de la precipitación diaria estimada por el algoritmo tiene un tamaño de 0.05° por 0.05°. Los meses con menos precipitación

son agosto y septiembre con valores diarios menores a 3 mm/día mientras que los meses más húmedos corresponden a mayo y diciembre con valores iguales o superiores 8 mm/día.

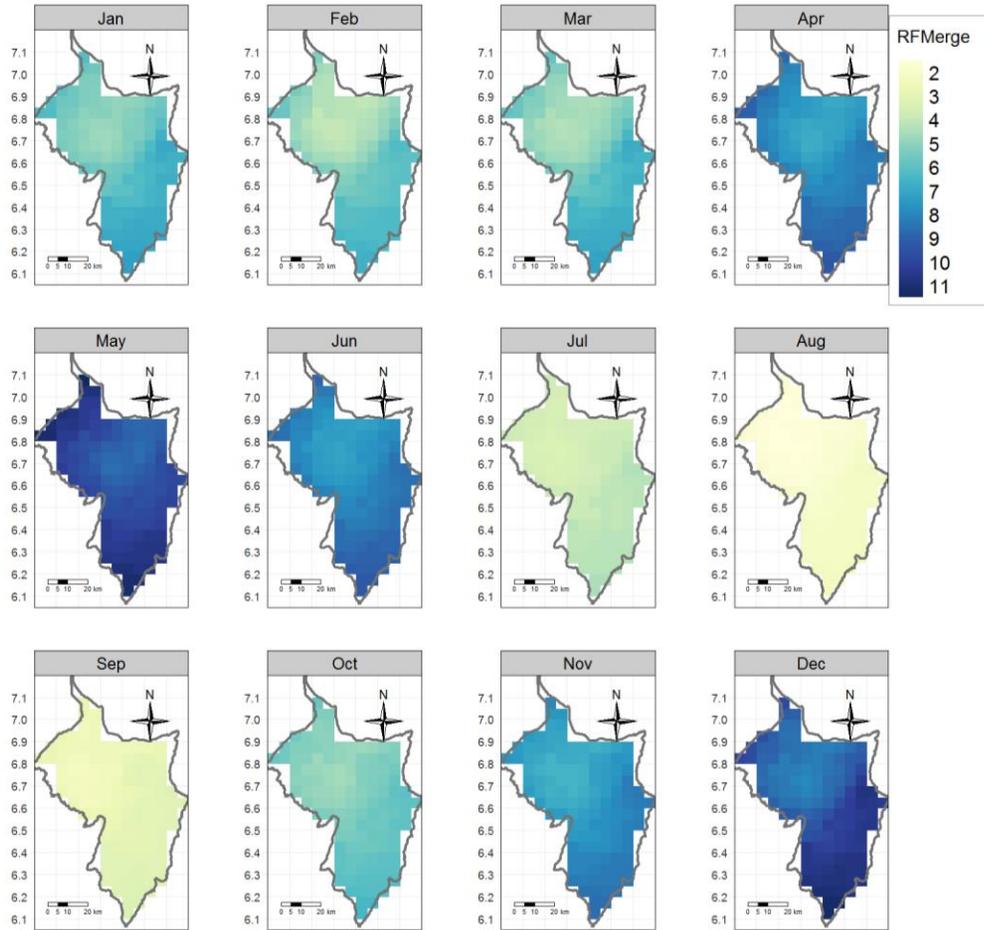


Figura 3.14 – Distribución espacial mensual de la precipitación media diaria obtenida por el algoritmo RF-MEP en la SZH del río Opón para el período 2000 al 2019

En la Figura 3.15 se muestra la variabilidad de la precipitación diaria observada (Obs), combinada (RF-MEP), GSMAP y MSWEP para tres estaciones meteorológicas en la subzona hidrográfica. Las tres estaciones son Chucuri [23130010], El Carmen [23145020] y El Centro [23155040]. En general, se observa que los datos estimados por RF tienen una variabilidad muy similar con los observados, ya que los bigotes y cuantiles de los boxplot son muy similares, pero en cuanto a las medianas se evidencia una sobreestimación por parte de RF. Este último aspecto es mucho más evidente en el producto MSWEP en las tres estaciones evaluadas.

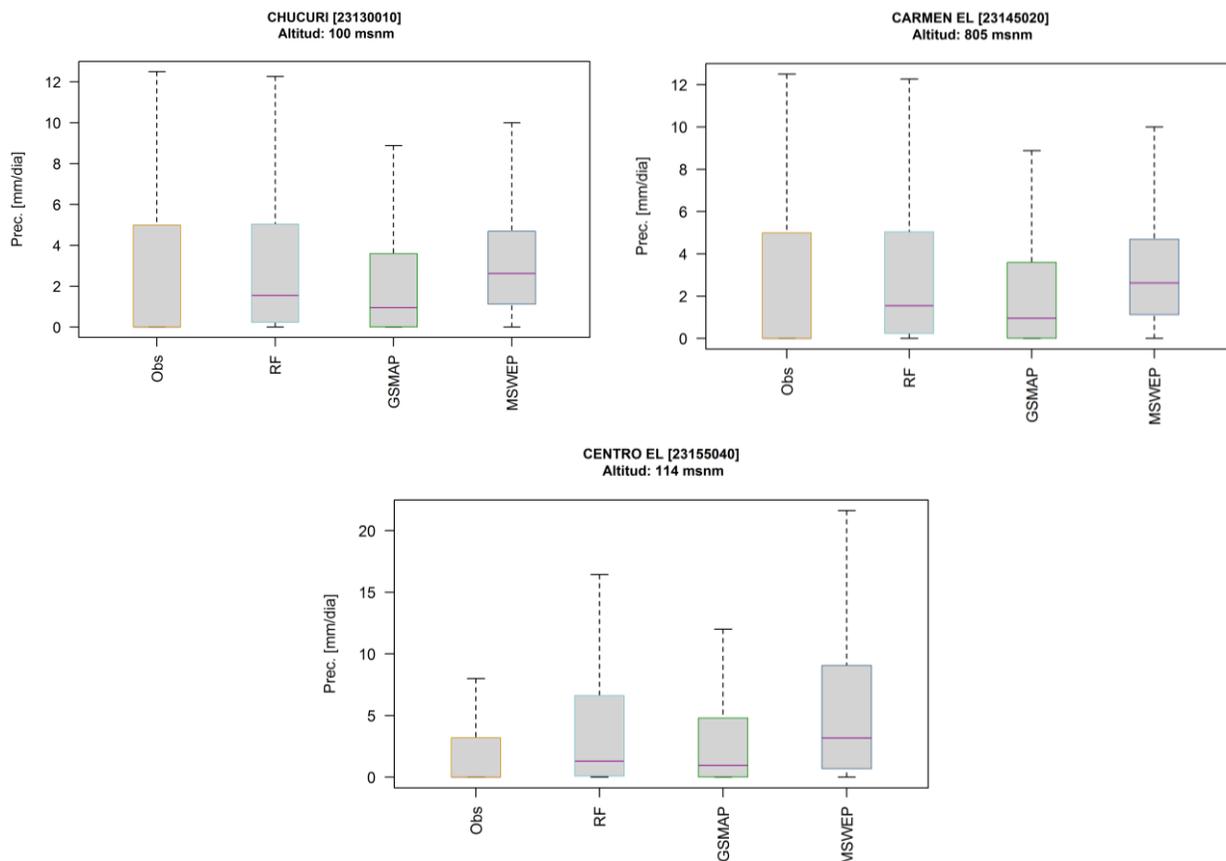


Figura 3.15 – Comparación variabilidad de la precipitación diaria entre los datos observados en las estaciones Chucuri, El Carmen y El Centro con respecto a las estimaciones de RF, GSMAP y MSWEP para el período 2000 al 2019

Si bien el producto GSMAP tiende a presentar una precipitación mediana mayor a la observada, por lo general tiene una tendencia a la subestimación, como se muestra en la Figura 3.15. De las tres estaciones presentadas, Chucuri y El Centro tienen altitudes similares, pero en El Centro se evidencia de forma más clara la sobrestimación en los productos de precipitación como en la combinación de estos.

Como parte de la evaluación cuantitativa de los productos y la combinación, se evaluaron las métricas RMSE, PBias y KGE en cada una de las estaciones antes mencionadas, como se muestra en la Figura 3.16. De la figura se observa que el algoritmo RF-MEP presenta el menor RMSE y también el menor sesgo de los datos. La métrica KGE mantiene la misma tendencia de mejora reportada por PBias y RMSE en la estimación de los campos de precipitación obtenida con algoritmo RF-MEP.

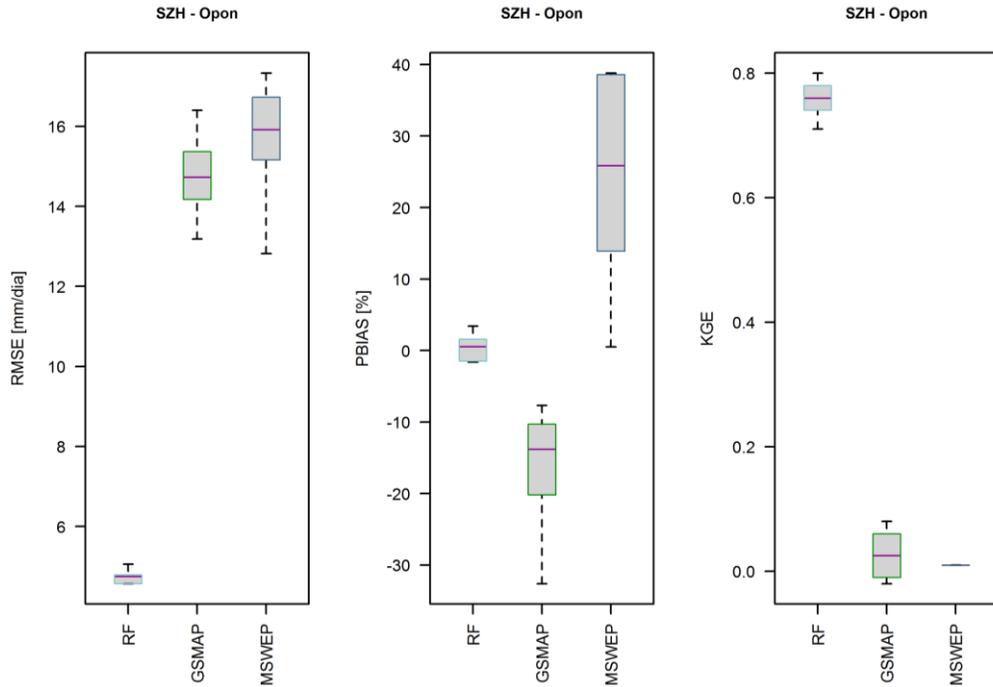


Figura 3.16 – Evaluación del ajuste de las estimaciones de precipitación diaria (RF, GSMAP y MSWEP) con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBias y KGE – SZH del río Opón

En el ejercicio de la evaluar la capacidad para representar espacial y temporalmente la dinámica y magnitud de la precipitación horaria, se realizaron mapas de la distribución mensual de los productos GSMAP (Figura 3.17, izquierda) y WRF (Figura 3.17, derecha).

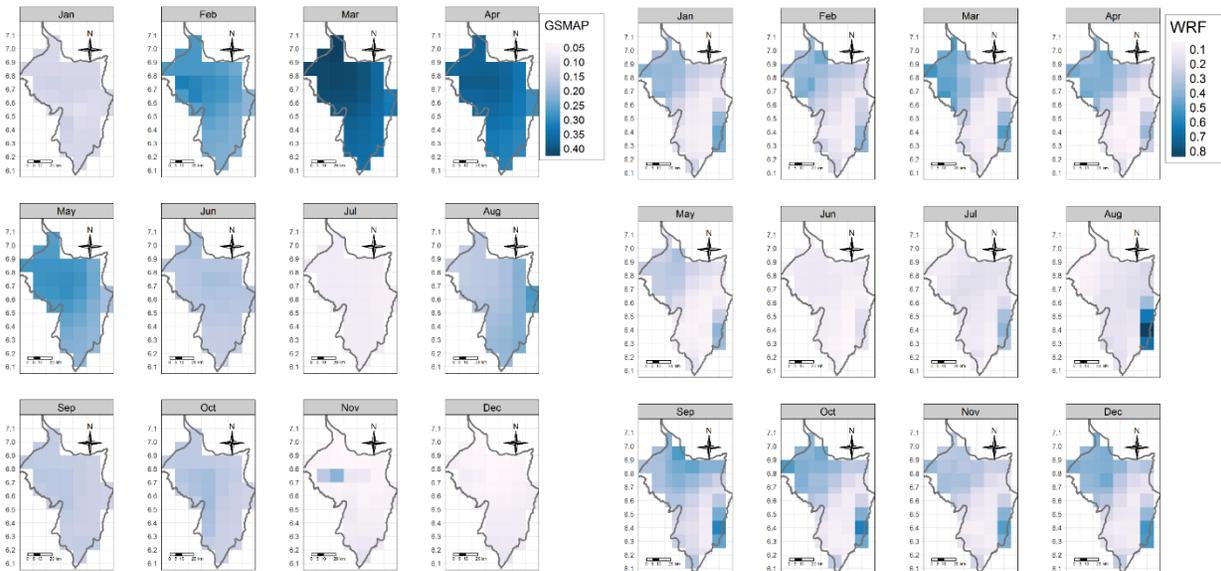


Figura 3.17 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida por el producto GSMAP (izquierda) y WRF (derecha) en la SZH del río Opón para el periodo 01/08/2019 al 31/08/2020

De la Figura 3.17 se puede concluir:

- El rango de la precipitación media horaria del producto GSMAP oscila entre 0.0 a 0.4 mm/h y del producto WRF 0.0 a 0.8 mm/h.
- El producto WRF es mucho más heterogéneo en la magnitud de sus pixeles que el producto GSMAP, pero el rango es muy similar entre cada mes para WRF que para GSMAP.
- El mes con más precipitación diaria es identificable (marzo) en el producto GSMAP, pero no claramente identificable en el producto WRF.
- El mes con menor precipitación media horaria es julio en el producto GSMAP y junio en el producto WRF.
- Existe un comportamiento de incremento de la precipitación en el producto GSMAP durante los primeros meses del año que no es identificable en el producto WRF.

En la Figura 3.18 se muestra la combinación de los dos productos a través de la media de GSMAP y WRF en cada paso de tiempo, en donde se obtienen campos de precipitación suavizados con precipitaciones entre 0.0 a 0.5 mm/h.

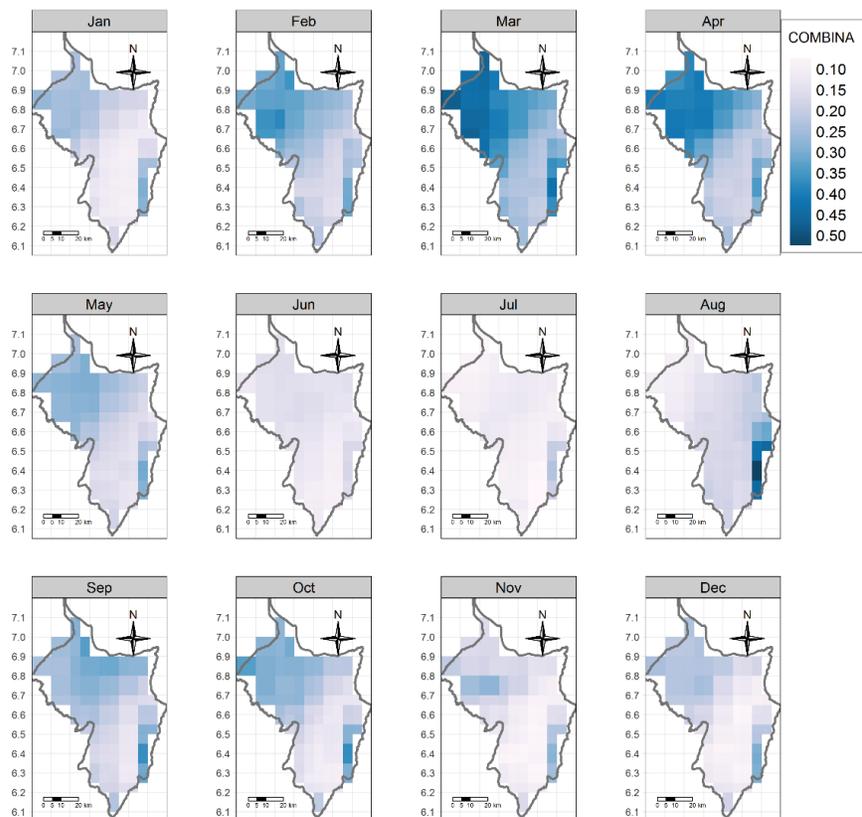


Figura 3.18 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida del promedio entre GSMAP y WRF en la SZH del río Opón para el periodo 01/08/2019 al 31/08/2020

Como parte de la verificación de los productos y su combinación con respecto a los registros in situ para precipitación horaria, se comparó su variabilidad a lo largo de la serie de tiempo en la estación San Vicente de Chucuri [24055070], como se muestra en la Figura 3.19. A la izquierda se presenta la comparación sin datos atípicos mientras que a la derecha se presenta la comparación con datos atípicos, en donde se presentan datos atípicos con magnitudes de hasta - 15000 mm/día que puede corresponder a un error en el dispositivo de medición. Las estimaciones de precipitación (productos y combinación), tiene en general, una clara tendencia a sobrestimar como se muestra en la Figura 3.19.

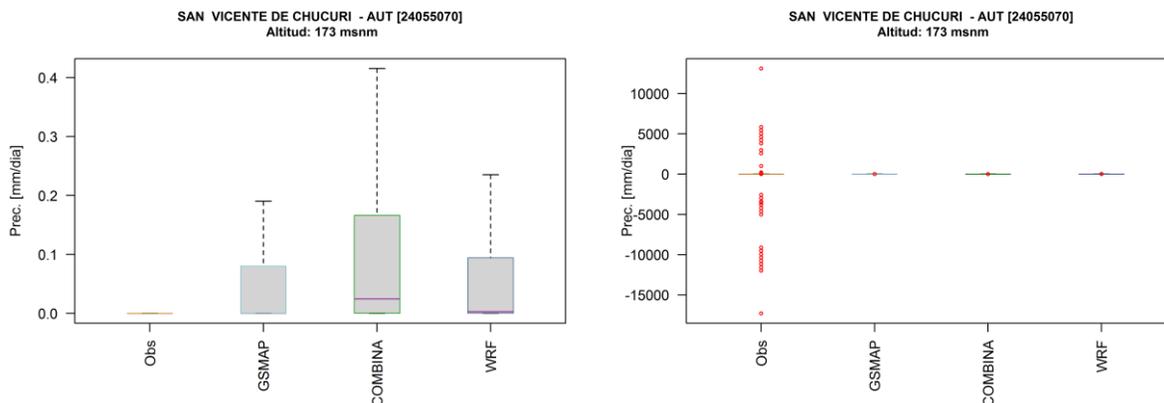


Figura 3.19 – Evaluación de las estimaciones en la precipitación

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de las métricas RMSE, KGE y PBias para los dos productos y su combinación, de donde se corrobora la pobre estimación de la magnitud de la precipitación horaria por parte de los tres conjuntos de datos, pero sobresale GSMAP como el producto que sobrestima en “menor” medida la variable analizada.

Tabla 3.4 – Evaluación del ajuste de las estimaciones de precipitación horaria frente a los datos observados en la SZH del río Opón

Conjunto de datos	KGE	RMSE	PBIAS %
GSMAP	-0.22	1.39	61.9
WRF	-1.36	1.63	215.3
Combinación	-0.74	1.39	138.6

3.3.3 Validación de la precipitación en la subzona hidrográfica del río Sogamoso

En la Figura 3.20 se muestra la distribución espacial de la precipitación mensual en la subzona hidrográfica del río Sogamoso, información que fue generada de la combinación de los productos GSMAP, MSWEP y el DEM por medio del algoritmo RF-MEP. El mes con precipitaciones más altas se da mayo seguido de diciembre. Los eventos más importantes de precipitación (>8 mm/día)

a nivel diario se dan al nororiente y noroccidente de la zona, mientras que el sector centro y sur de la zona la magnitud de los eventos diarios es inferior 8 mm/día. Con meses con menor cantidad de precipitación se da en el tercer trimestre del año.

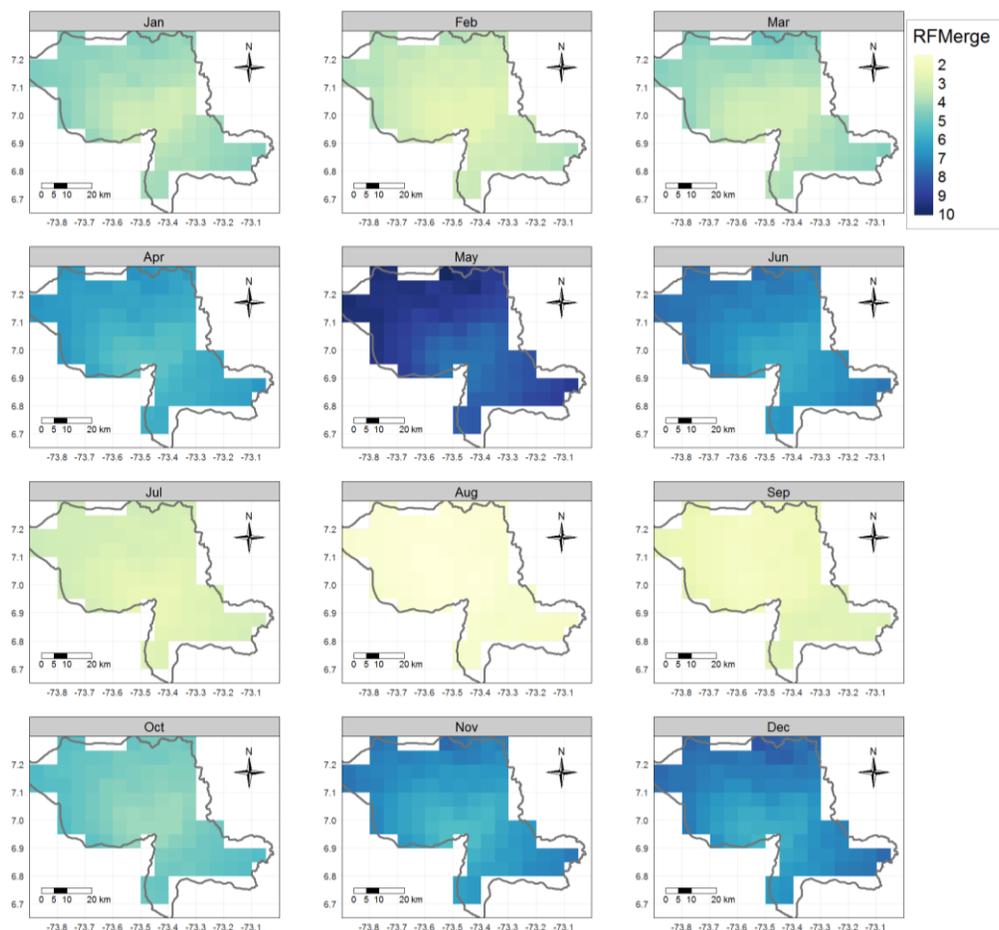


Figura 3.20 – Distribución espacial mensual de la precipitación media diaria obtenida por el algoritmo RF-MEP en la SZH del río Sogamoso para el periodo 2000 al 2019

En la Figura 3.21 se muestra la variabilidad de la precipitación diaria observada (Obs), combinada (RF-MEP), GSMAP y MSWEP para dos de las siete estaciones con registros de precipitación diaria dentro de la SZH del río Sogamoso. Las dos estaciones son San Vicente [24050060] y Puente La Paz [24060060]. En altitudes alrededor de los 700 msnm, se observa una menor sobrestimación con respecto a los valores observados (Obs) entorno a la mediana de los boxplot. Sin embargo, en altitudes menores y alrededor de 100 msnm la sobrestimación por parte de RF, GSMAP y MSWEP

es mayor. El producto MSWEP continua con mayor sobrestimación en ambas altitudes difiriendo del producto GSMAP que mantiene una tendencia de subestimación.

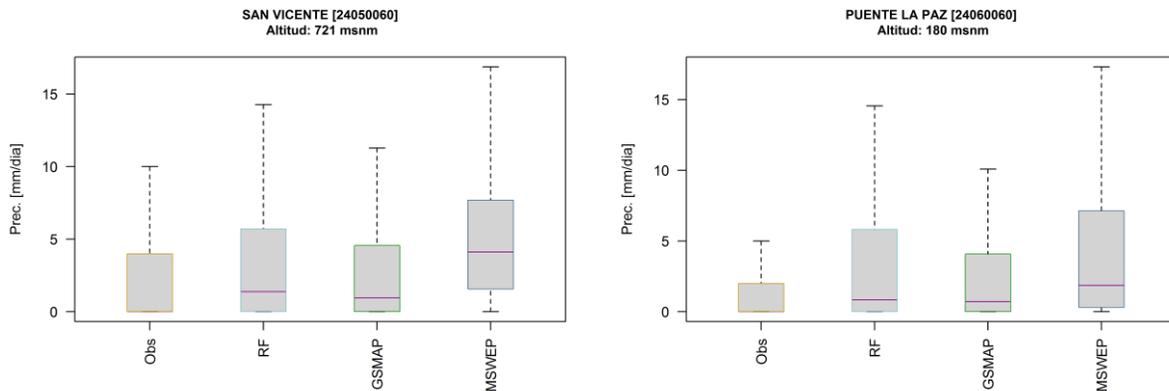


Figura 3.21 – Comparación variabilidad de la precipitación diaria entre los datos observados en las estaciones San Vicente y Puente La Paz con respecto a las estimaciones de RF, GSMAP y MSWEP para el período 2000 al 2019

Como parte de la evaluación cuantitativa de los productos y la combinación, se evaluaron las métricas RMSE, PBias y KGE en cada una de las estaciones antes mencionadas, como se muestra en la Figura 3.22. De la figura se observa un comportamiento similar a lo obtenido para la subzona hidrográfica de Opón, en donde el algoritmo RF-MEP es el que genera mejores resultados (menores RMSE y PBias).

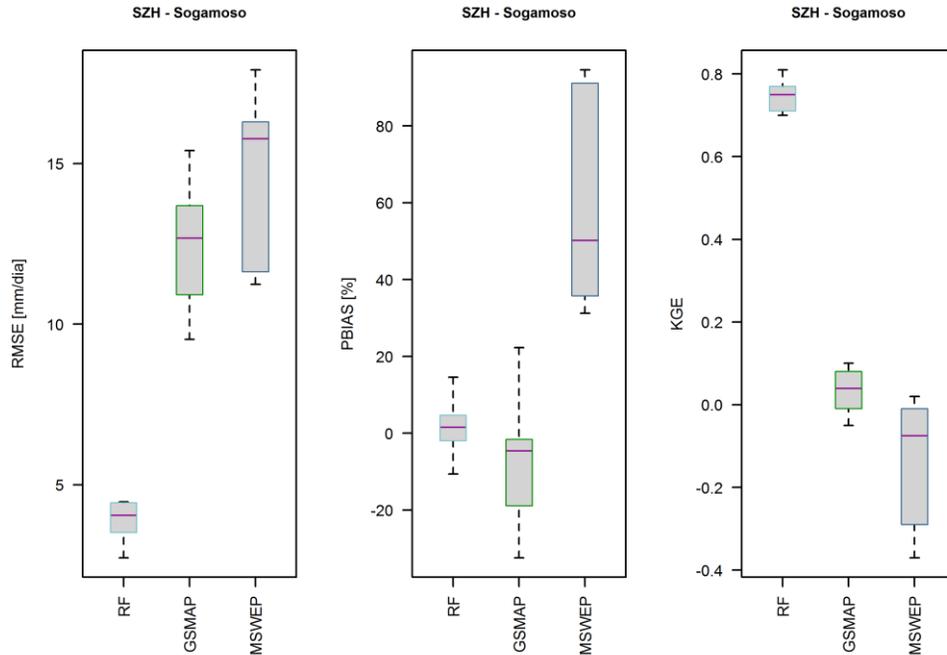


Figura 3.22 – Evaluación del ajuste de las estimaciones de precipitación diaria (RF, GSMAP y MSWEP) con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBIAS y KGE – SZH del río Sogamoso

En el ejercicio de la evaluar la capacidad para representar espacial y temporalmente la dinámica y magnitud de la precipitación horaria, se realizaron mapas de la distribución mensual de los productos GSMAP (Figura 3.23, superior) y WRF (Figura 3.23, inferior). De la figura se observa que la distribución espacial y temporal tiene las mismas características que se describieron para la subzona hidrográfica del río Opón. En la subzona hidrográfica del río Sogamoso se observa menos precipitación, ya que los rangos los anuales se observa una reducción de 0.1 mm/h los valores máimos.

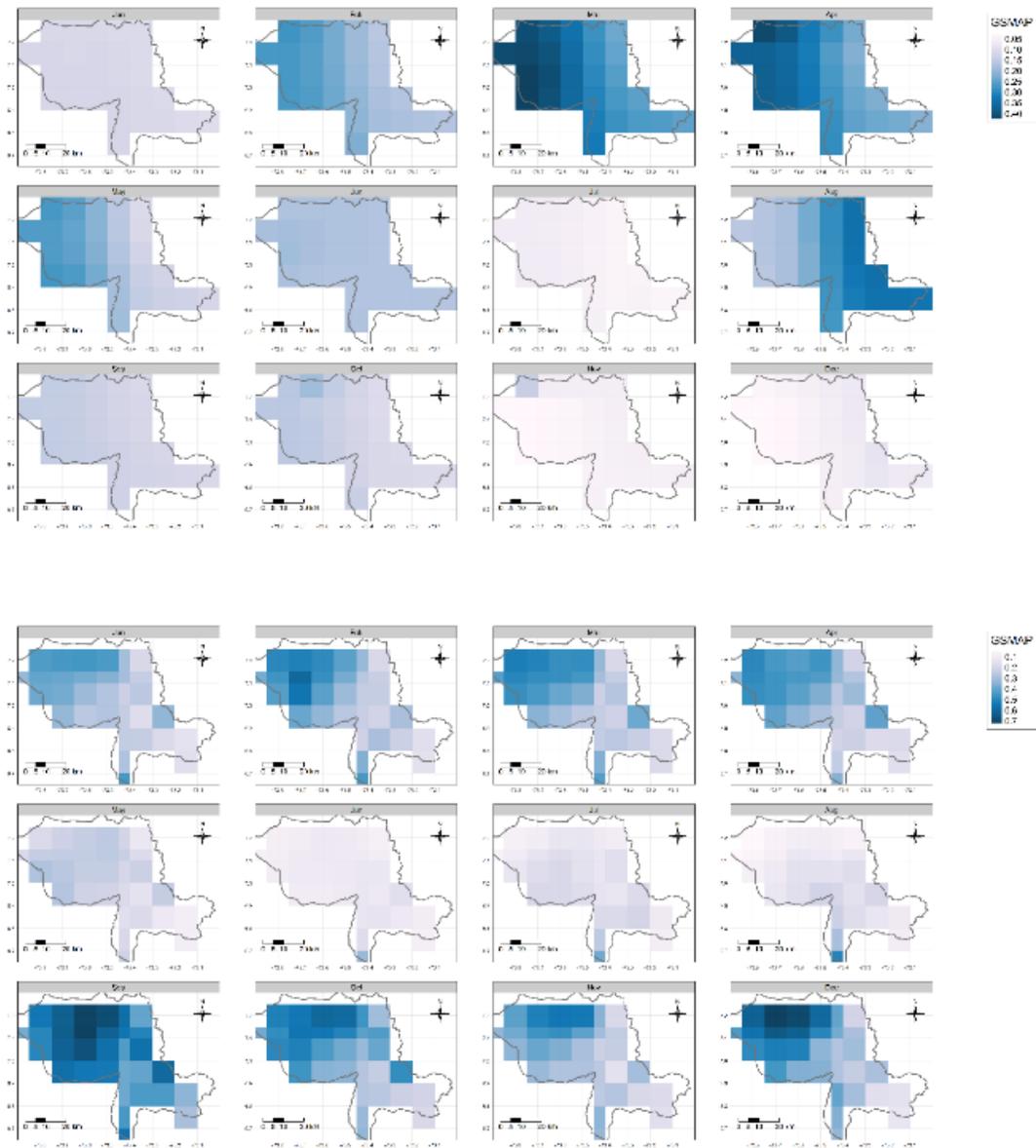


Figura 3.23 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida por el producto GSMAP (superior) y WRF (inferior) en la SZH del río Sogamoso para el período 01/08/2019 al 31/08/2020

En la Figura 3.24 se muestra la combinación de los dos productos a través de la media de GSMAP y WRF en cada paso de tiempo, en donde se obtienen campos de precipitación suavizados con precipitaciones entre 0.0 a 0.45 mm/h. En la combinación de los productos, se evidencia que en los cuatro primeros meses del año el producto GSMAP tiene mayor peso que WRF, ya que este último

por lo general indica menores magnitudes de precipitación. Caso contrario ocurre en los últimos cuatro meses del año de la combinación donde GSMAP reporta precipitaciones por debajo 0.2 mm/h y que reducen a medida que pasa el tiempo, mientras que WRF tiene un comportamiento más homogéneo en los cuatro meses tanto en magnitud con la distribución espacial de la variable.

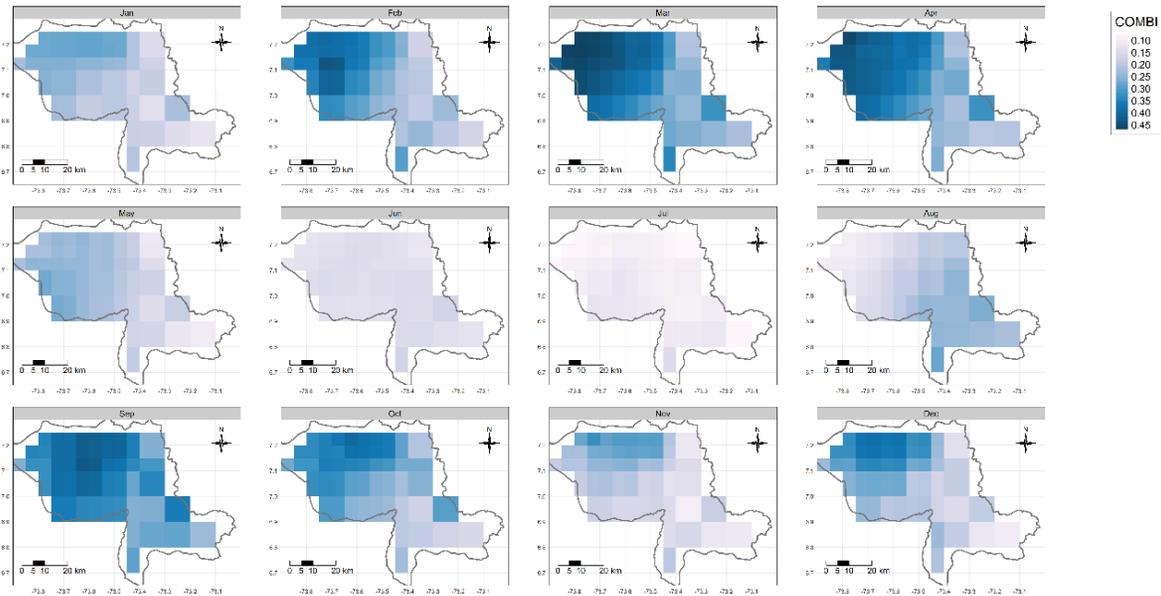


Figura 3.24 – Distribución espacial mensual de la precipitación media horaria (mm/h) obtenida del promedio entre GSMAP y WRF en la SZH del río Sogamoso para el periodo 01/08/2019 al 31/08/2020

Como parte de la verificación de los productos y su combinación con respecto a los registros in situ para precipitación horaria, se comparó su variabilidad a lo largo de la serie de tiempo en la estación La Lizama Vizcaina [24055080], como se muestra en la Figura 3.25. A la izquierda se presenta la comparación sin datos atípicos mientras que a la derecha se presenta la comparación con datos atípicos, en donde se presentan datos atípicos con magnitudes de hasta +55 mm/día. Las estimaciones de precipitación (productos y combinación), tiene en general, una clara tendencia a subestimar como se muestra en la Figura 3.25.

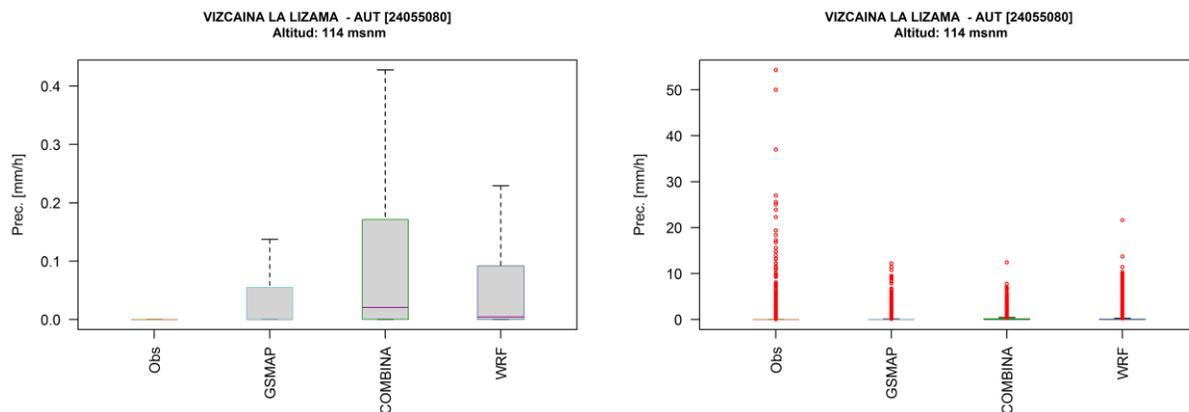


Figura 3.25 – Evaluación de las estimaciones en la precipitación

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de las métricas RMSE, KGE y PBias para los dos productos y su combinación, de donde el producto WRF y la combinación presenta un mejor ajuste con respecto al producto GSMAP. El porcentaje sesgo en términos absolutos del producto WRF y la combinación en la SZH del río Sogamoso es mucho menor a lo reportado en la SZH del río Opón. Igualmente, el producto GSMAP en la SZH del río Sogamoso en su evaluación del tiene un sesgo negativo, el cual en términos absolutos es menor al reportado para el SZH del río Opón.

Tabla 3.5 – Evaluación del ajuste de las estimaciones de precipitación horaria frente a los datos observados en la SZH del río Sogamoso

Conjunto de datos	KGE	RMSE	PBIAS %
GSMAP	-0.33	3.30	-31.5
WRF	-0.26	3.32	-14.8
Combinación	-0.31	3.29	-18.3

3.3.4 Validación del producto de temperatura

La verificación del producto MSWX para la variable temperatura horaria permite caracterizar el máximo y mínimo diario frente al valor observado en las estaciones con registros de la variable y localizadas en la zona de interés. En la Figura 3.26 se presenta la distribución espacial de la

temperatura media máxima mensual que se caracteriza por oscilar en un rango de 10 °C a 35 °C y que tiende a permanecer homogénea en espacio y tiempo.

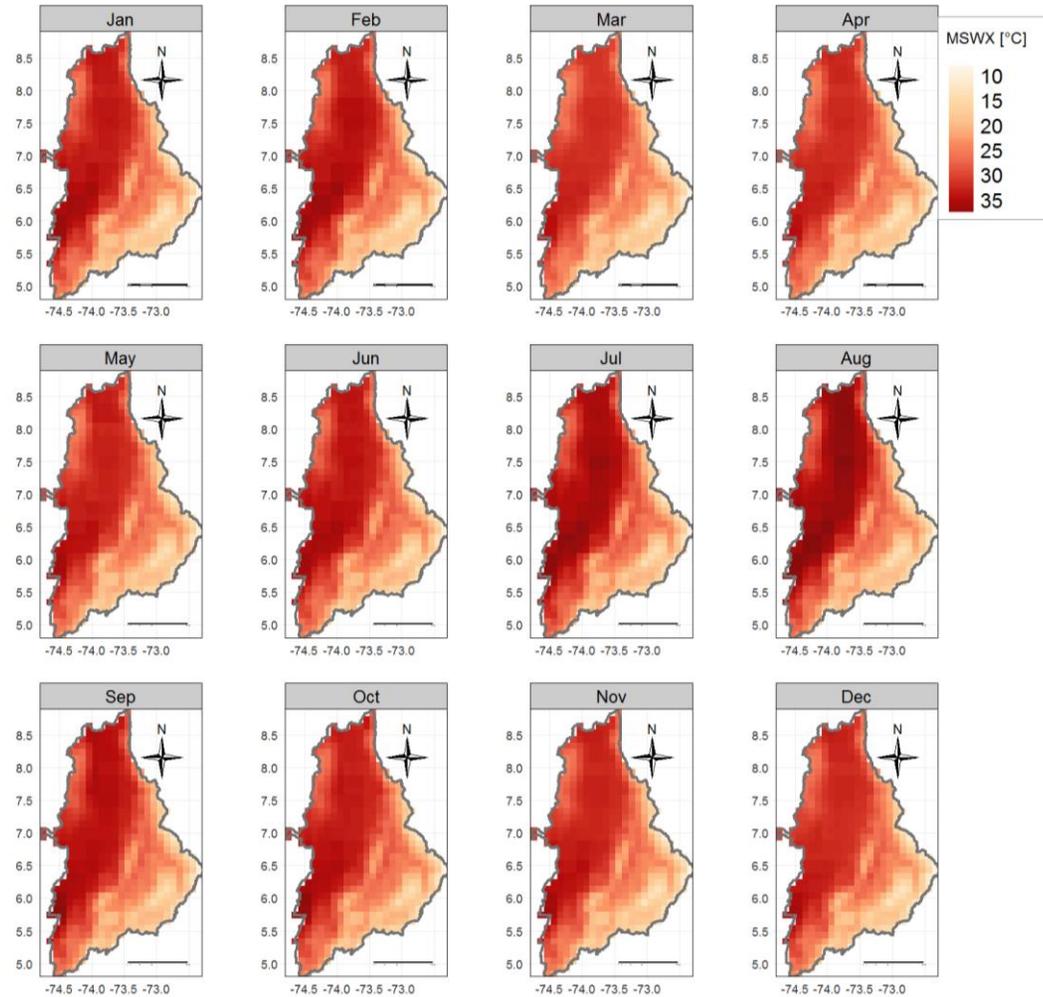


Figura 3.26 – Caracterización mensual de la temperatura máxima diaria estimada a partir de la temperatura horaria del producto MSWX para la zona de estudio

Con respecto a la temperatura media mínima mensual, se observa una distribución similar a la temperatura máxima, pero con un rango inferior que oscila de 5 °C a 25 °C, como se muestra en la Figura 3.27.

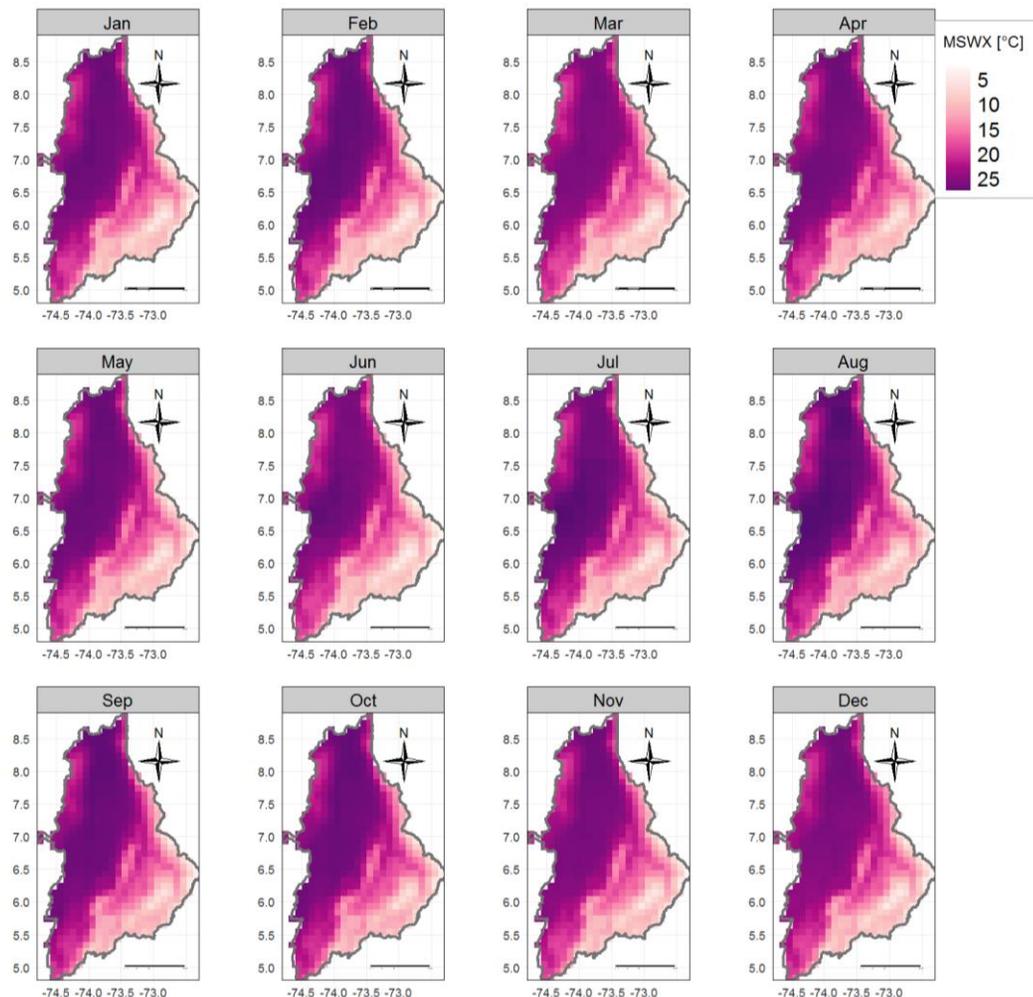


Figura 3.27 – Caracterización mensual de la temperatura mínima diaria estimada a partir de la temperatura horaria del producto MSWX para la zona de estudio

En el nivel de ajuste de la estimación del producto MSWX para la variable temperatura horaria con respecto al valor máximo y mínimo diario fue evaluado con la métricas RMSE, KGE y PBias. En la Figura 3.28 se muestra la evaluación para la temperatura máxima y en la Figura 3.29 se muestra la evaluación para la temperatura mínima.

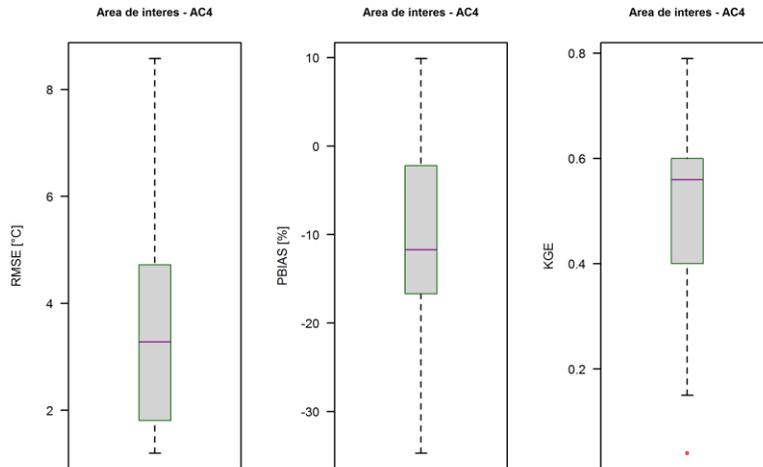


Figura 3.28 – Evaluación del ajuste de la temperatura máxima diaria obtenida de la temperatura horaria del producto MSWX con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBias y KGE en la zona de estudio (AC-4)

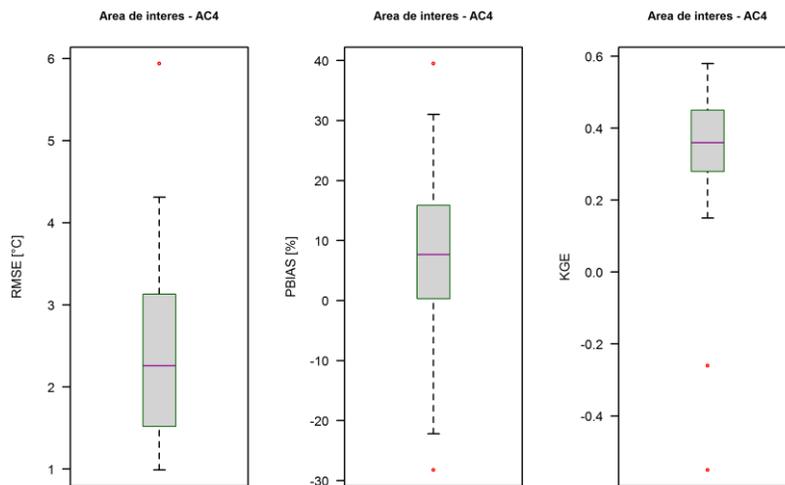


Figura 3.29 – Evaluación del ajuste de la temperatura mínima diaria obtenida de la temperatura horaria del producto MSWX con respecto a los datos observados a través de las métricas RMSE, PBias y KGE en la zona de estudio (AC-4)

En terminos de las medianas del RMSE se observa un mayor error en la temperatura máxima (3.3 °C) que en la temperatura mínima (2.2 °C). En la evaluación del sesgo, se evidenció que el producto tiende a subestimar la temperatura máxima en un -12 % y que de forma opuesta tiende a sobrestimar la temperatura mínima en un 8 %. Por último, el KGE calculado para cada una de las 29 estaciones tiende a presentar un rango amplio de valores que puede estar próximos a 0.8 a 0.2

para la temperatura máxima y 0.6 a -0.4 para temperatura mínima. Sin embargo, la mayoría de estaciones reportaron valores del KGE por encima de 0.55 en la temperatura máxima y 0.35 en la temperatura mínima, en terminos generales son resultados satisfactorios para representar la variable tanto en el espacio como en el tiempo.

3.4 Evaluación del modelo hidráulico

3.4.1 Descripción del modelo hidráulico en MIKE11

De acuerdo con la Figura 3.1 (b) el tramo de modelación hidráulica del río Magdalena está comprendido entre las estaciones de Puerto Berrio (aguas arriba) y de Sitio Nuevo (aguas abajo). El modelo hidráulico incluido en la plataforma FEWS – Colombia se encuentra configurado en el programa MIKE 11, el cual es unidimensional. En la Figura 3.30 se muestra la topología del modelo hidráulico en el programa MIKE11, la cual está constituida por dos tramos: el primer tramo correspondiente al alineamiento del río Magdalena con 84 secciones transversales localizadas en una longitud aproximada de 189.5 km y el segundo tramo correspondiente a los últimos 21 km del río Sogamoso antes de confluir en el río Magdalena. En el tramo del río Magdalena, la separación entre las secciones es de 0.5 km (mínimo) y 10.7 km (máximo), con un promedio de 2.3 km, donde las mayores separaciones entre las secciones se observan en la zona cercana a la estación de Sitio Nuevo.

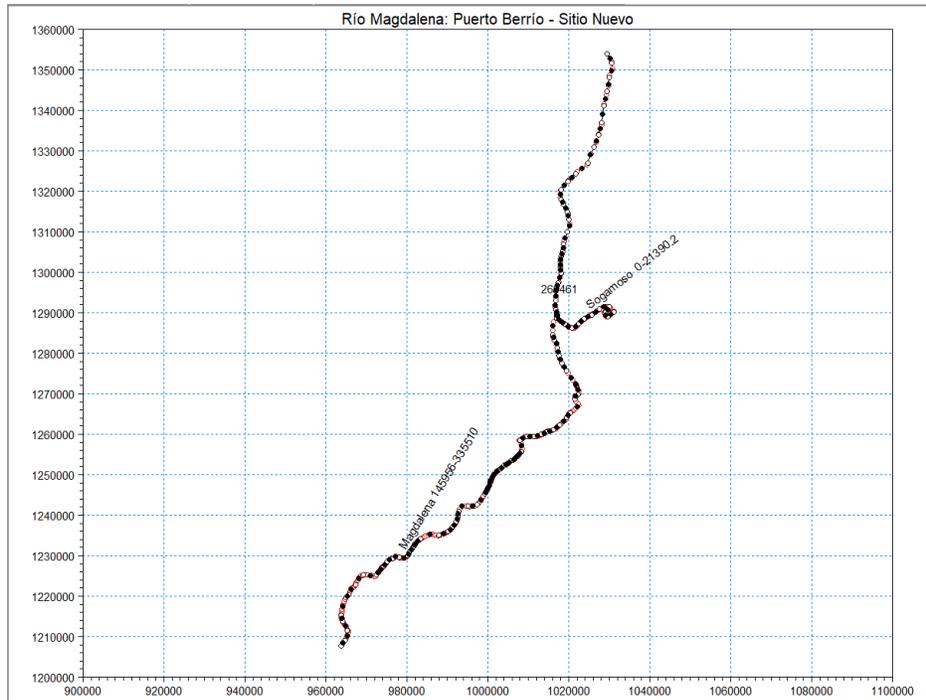


Figura 3.30 – Topología del modelo hidráulico del río Magdalena en el programa MIKE11

En la Figura 3.31 se muestra la visualización de las secciones transversales, en donde en cada sección se observa la configuración del cauce con la delimitación de la orilla. De la inspección del archivo de secciones transversales se logró determinar que las secciones incluidas del río Magdalena son de 2008 mientras que las del río Sogamoso son de 2016.

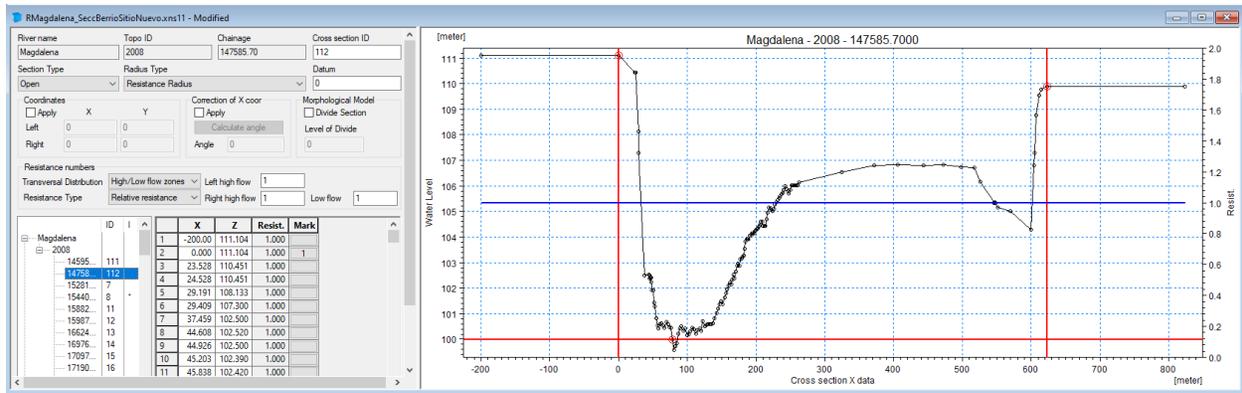


Figura 3.31 – Visualización de las secciones transversales del modelo hidráulico

En el modelo hidráulico se establecieron cinco condiciones de frontera de caudal y una condición de frontera de niveles, como se muestra en la Figura 3.32. Las condiciones de frontera de caudal representan (1) el caudal en el río Magdalena en la estación de Puerto Berrio (resultados de un modelo hidráulico que se incorporan en la abscisa K145+956); (2) el caudal de aporte del río San Bartolomé, denominado La Regla por la estación (caudal uniforme de 50 m³/s en la abscisa K166+000); (3) el caudal de aporte del río Carare (resultados del modelo hidrológico en la abscisa K203+400); (4) el caudal de aporte de los ríos Opón y Colorada (resultados del modelo hidrológico en la abscisa K244+000); y (5) el caudal de aporte del río Sogamoso (resultados de un modelo estadístico en el brazo Sogamoso, en el cual se considera la media móvil de los últimos 7 días).

	Boundary Description	Boundary Type	Branch Name	Chainage	Chainage	Gate ID	Boundary ID
1	Open	Inflow	Magdalena	145956	0		Berrio
2	Point Source	Inflow	Magdalena	166000	0		La Regla
3	Point Source	Inflow	Magdalena	203400	0		Carare
4	Point Source	Inflow	Magdalena	244000	0		OponColorada
5	Open	Inflow	Sogamoso	0	0		Sogamoso
6	Open	Q-h	Magdalena	335510	0		SitioNuevo

Figura 3.32 – Condiciones de frontera en el modelo hidráulico del río Magdalena

En cuanto a la condición de frontera de aguas abajo del tramo de modelación se tiene una curva de relación de caudales y niveles, correspondiente a la estación de Sitio Nuevo, como se muestra en la Figura 3.33.

	Boundary Description	Boundary Type	Branch Name	Chainage	Chainage	Gate ID	Boundary ID
1	Open	Inflow	Magdalena	145956	0		Berrio
2	Point Source	Inflow	Magdalena	166000	0		La Regla
3	Point Source	Inflow	Magdalena	203400	0		Carare
4	Point Source	Inflow	Magdalena	244000	0		OponColorada
5	Open	Inflow	Sogamoso	0	0		Sogamoso
6	Open	Q-h	Magdalena	335510	0		SitioNuevo

	h	Q
1	46	400
2	48.08	755.6
3	48.58	1192.8
4	49.08	1699.7
5	49.58	2270.1
6	50.08	2899.4
7	50.58	3583.8
8	51.08	4260

Figura 3.33 – Condición de frontera en la abscisa correspondiente a la estación de Sitio Nuevo

A lo largo del río Magdalena se establecieron 6 abscisas en donde en cada una de ellas se asignaron rugosidades en tres zonas (fondo, medio y arriba de la sección), como se muestra en la Figura 3.34 (izquierda). Para cada una de estas 6 abscisas se establecieron los niveles a los cuales se cambia de zona, como se muestra en la Figura 3.34 (derecha). Las rugosidades se interpolan de forma lineal entre las diferentes abscisas.

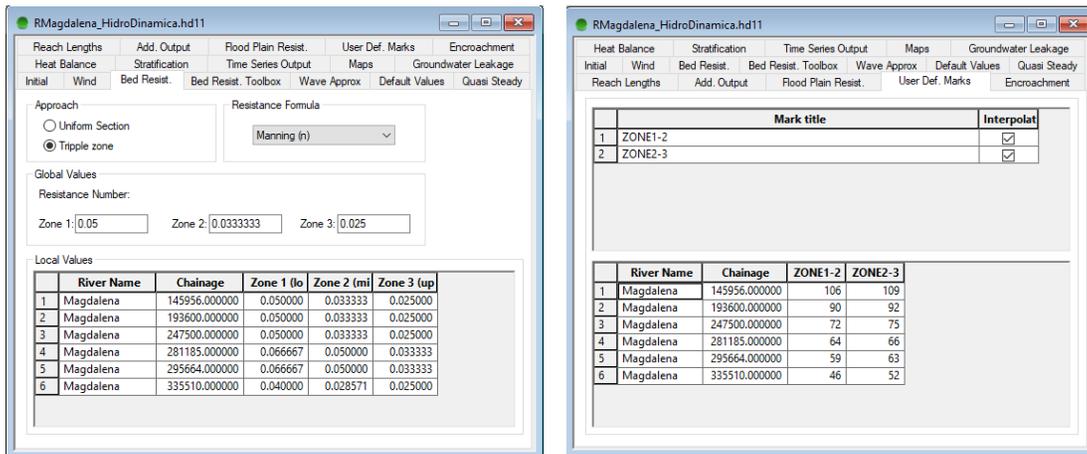


Figura 3.34 – Definición de las rugosidades en el modelo hidráulico del río Magdalena

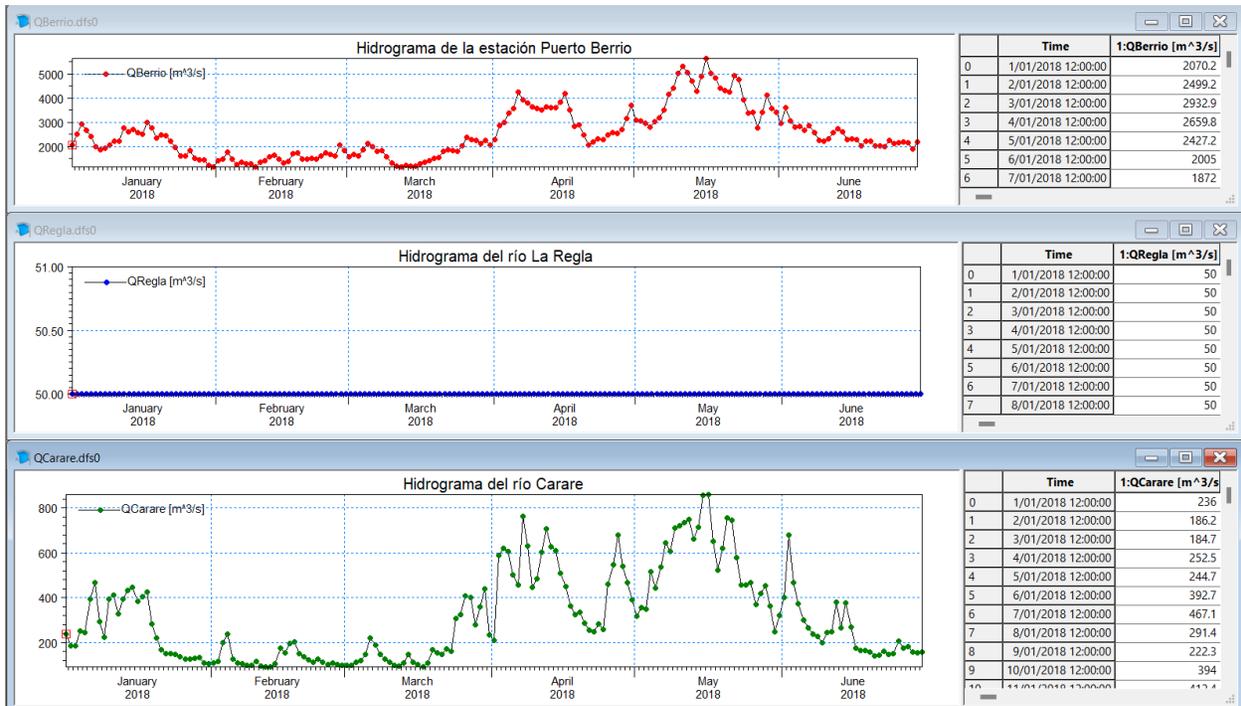
3.4.2 Período de evaluación

Para conocer el desempeño del modelo hidráulico se estableció un período de seis meses comprendido entre el 1 de enero de 2018 hasta el 30 de junio de 2018, en donde en las condiciones de frontera de caudal se utilizará información medida (registrada).

Para ese período de tiempo se establecieron las condiciones de frontera de la siguiente forma: (1) en la abscisa K145+956, aguas arriba del tramo de modelación, se utilizó la información registrada en la estación Puerto Berrío – AUT [23097030]; (2) en la abscisa K166+000, desembocadura del río San Bartolomé (denominado La Regla en el modelo hidráulico), se incluyó un valor constante de 50 m³/s (como se indica en los flujos de trabajo de la plataforma FEWS-Colombia); (3) en la abscisa K203+400, desembocadura del río Carare, se utilizó la información registrada en la estación Barretero Finca [23127050]; (4) en la abscisa K244+000, desembocadura del río Opón, se utilizó la información registrada en la estación Puente Ferrocarril [23147020]; (5) en la abscisa

K0+000 del tramo del río Sogamoso, 21 kilómetros aguas arriba de la desembocadura del río Sogamoso, se utilizó la información registrada en la estación Puente Sogamoso [24067020]. En la Figura 3.35 se muestran los hidrogramas incorporados en el modelo hidráulico.

Para la condición de frontera de aguas abajo, en la estación de Sitio Nuevo se ajustaron los valores de la relación de niveles y caudales incluida en el modelo hidráulico de MIKE11 (Figura 3.33) con los valores correspondientes de la curva de gasto de esta estación para el año de 2018, como se muestra en la Figura 3.36.



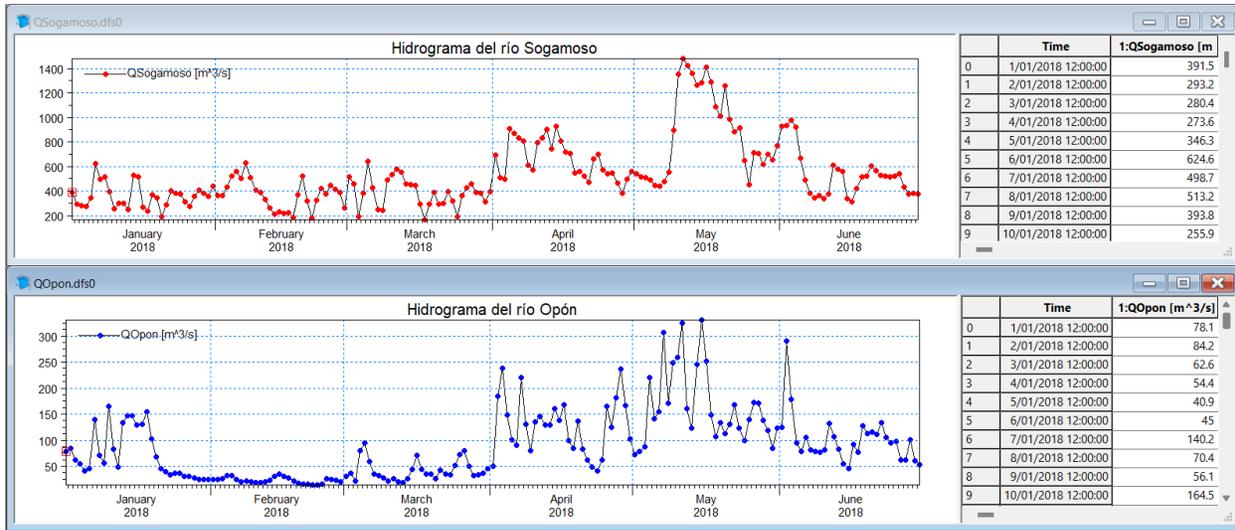


Figura 3.35 – Condiciones de frontera incorporadas en el modelo hidráulico para hacer la validación

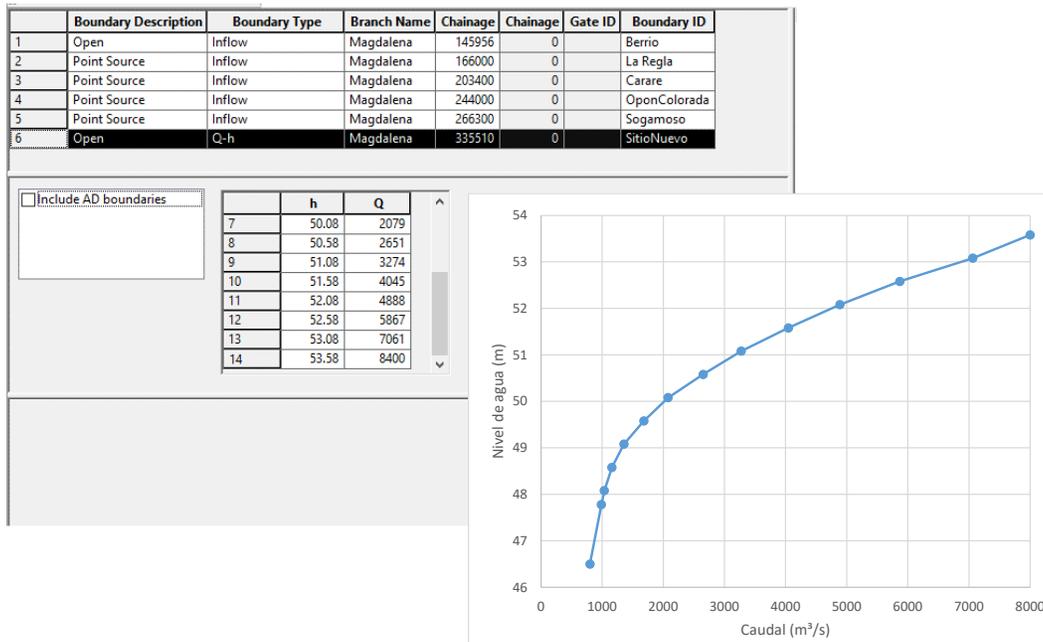
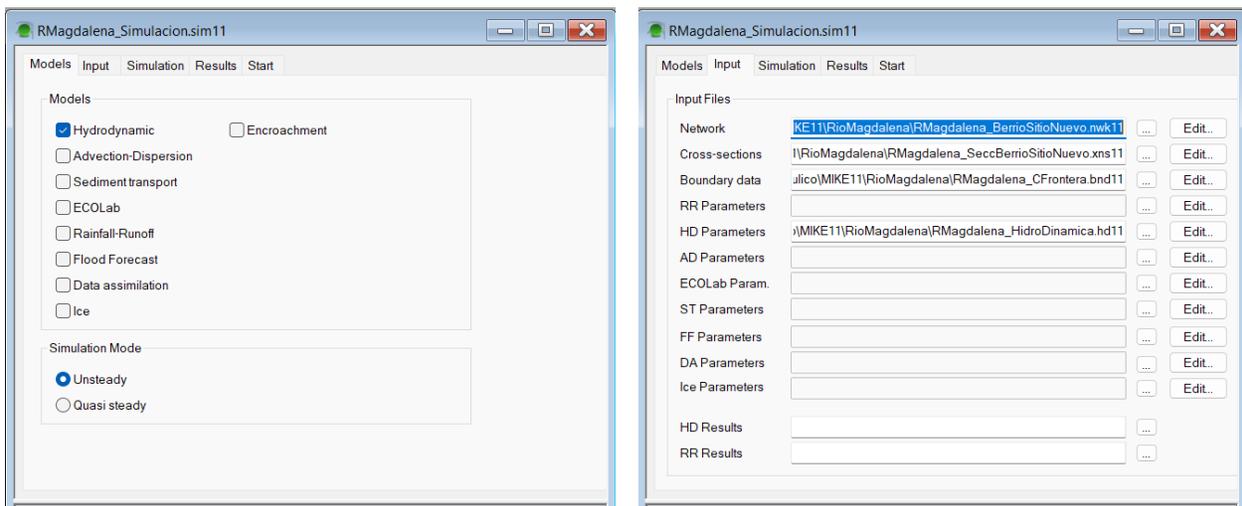


Figura 3.36 – Condición de frontera en la abscisa correspondiente a la estación de Sitio Nuevo – validación

3.4.3 Características de la simulación hidráulica para flujo no permanente

En el programa MIKE11 se establecen las siguientes características de simulación:

- En la opción de modelos, se selecciona el modelo hidrodinámico y el tipo de simulación no permanente, como se muestra en la Figura 3.37 (parte superior izquierda).
- En la opción de entradas, se indican las rutas de los archivos de (1) la topología del río, (2) las secciones transversales, (3) las condiciones de frontera y (4) los parámetros hidrodinámicos, como se muestra en la Figura 3.37 (parte superior derecha).
- En la opción de simulación, se definen los tiempos de simulación, incluyendo el tiempo de cálculo hidráulico, como se muestra en la Figura 3.37 (parte inferior izquierda).
- En la opción de resultados, se indica la ruta del archivo de salida con los resultados de la simulación, como se muestra en la Figura 3.37 (parte inferior derecha).
- En la opción de comienzo, se muestra la validación de los parámetros de la simulación, se selecciona el cálculo de MIKE11 y se visualizan los mensajes o errores de la simulación.



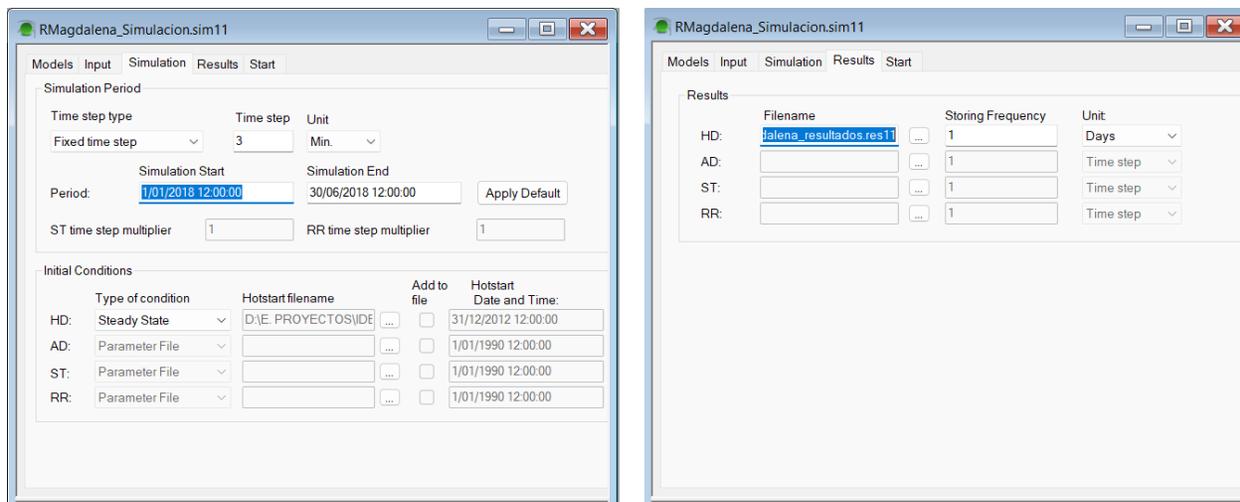


Figura 3.37 – Características de simulación incluidas en el modelo hidráulico

Una vez realizada la simulación sale una advertencia como se muestra en la Figura 3.38. La advertencia indica que hay diferencias de las cotas del lecho en el punto e intersección del tramo del río Magdalena y el tramo del río Sogamoso. Que la cota del lecho más baja en el río Magdalena en la abscisa K266+461 es 62.74 m y el nivel alto de 64.44 m en la parte final del tramo del río Sogamoso puede generar errores en la continuidad (masa) e inestabilidad en los cálculos, especialmente para los caudales bajos.

```
Warning No 65: In river SOGAMOSO : 21390.215 meter there is a difference
in the bed level of the rivers meeting at the intersection.
The lowest bed level (62.737 meter) is found in river MAGDALENA at
chainage 266460.692 meter. The highest level (64.440 meter) is found in river SOGAMOSO at
chainage 21390.215 meter.
A difference in bed level for the rivers meeting may cause
mass errors and instabilities especially if low flow is simulated.
```

Figura 3.38 – Advertencia de la simulación

3.4.4 Resultados de la simulación

En el visor MIKE View se pueden ver los resultados de la simulación. En la Figura 3.39 se muestra el perfil de flujo en el tramo del río Magdalena para el caudal mínimo (relleno de color azul) del período de análisis, así mismo se puede observar el perfil de flujo para el caudal máximo (línea roja punteada).

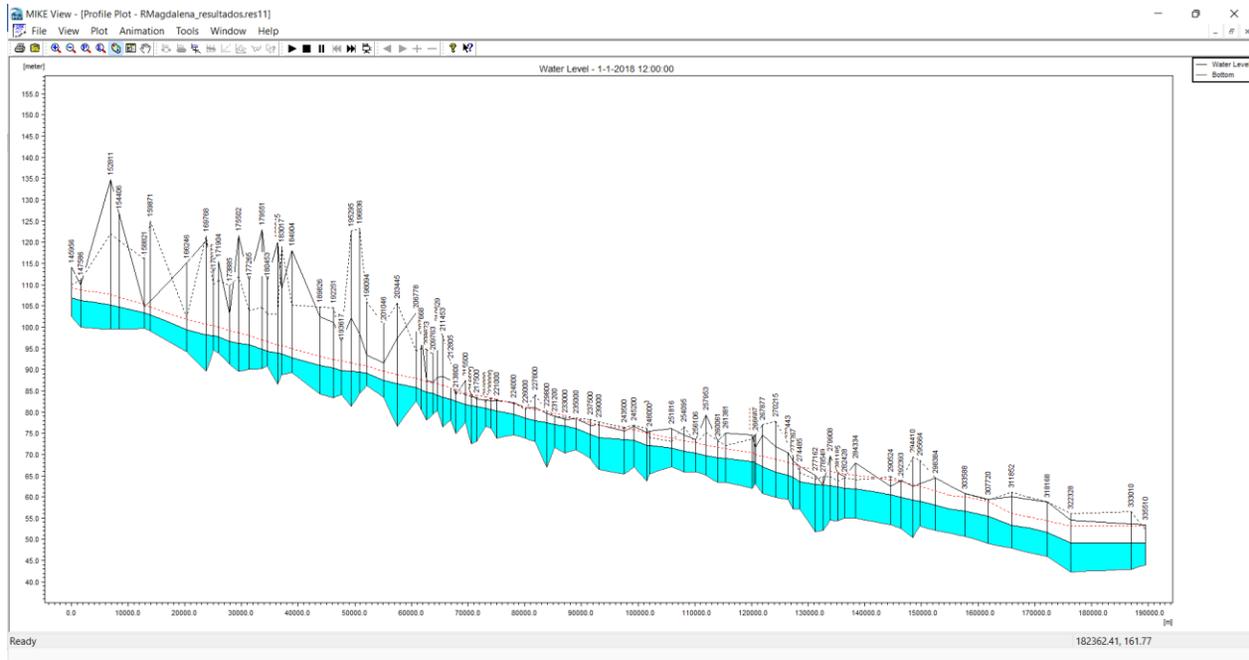


Figura 3.39 – Perfiles de flujo en el tramo del río Magdalena para los caudales máximo y mínimo del período de análisis

En los diferentes 84 puntos en donde se tiene información de las secciones transversales, se pueden ver los resultados de niveles y caudales para los 6 meses de simulación. A modo de ejemplo, en la Figura 3.40 se muestra la variación de niveles para la sección de la estación de Sitio Nuevo, aguas abajo del modelo hidráulico. Mientras que en la Figura 3.41 se muestra la variación de caudales para la sección de la estación de Sitio Nuevo.

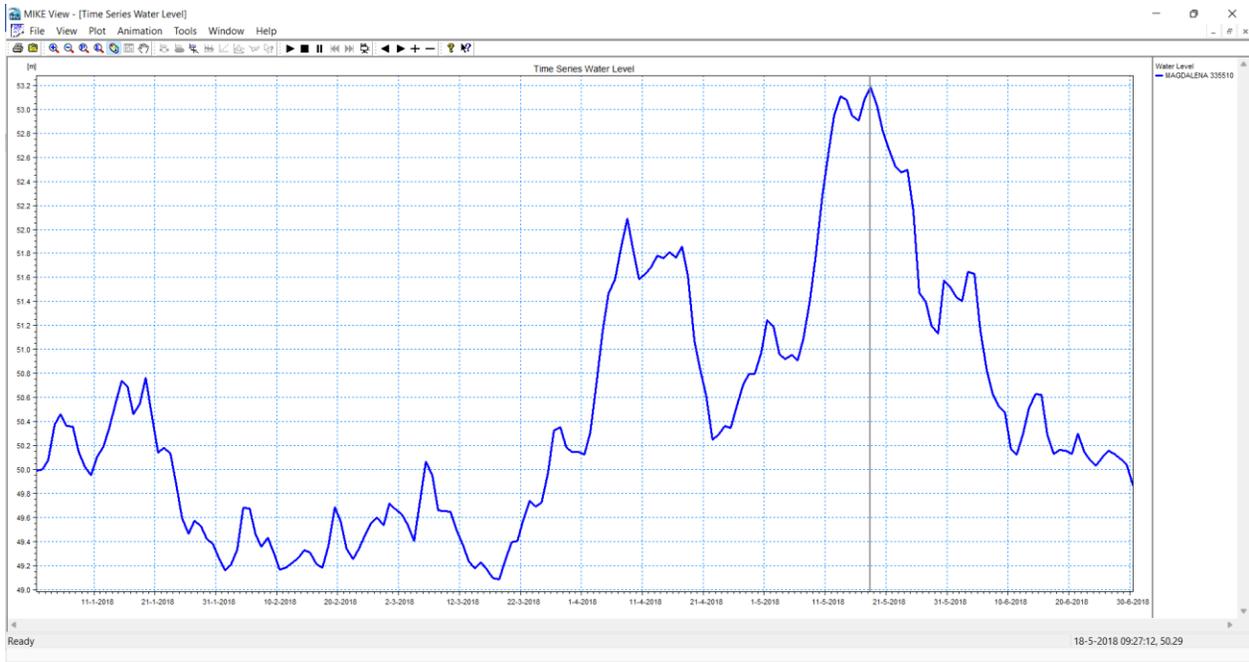


Figura 3.40 – Variación de niveles en la estación de Sitio Nuevo – resultados de la simulación

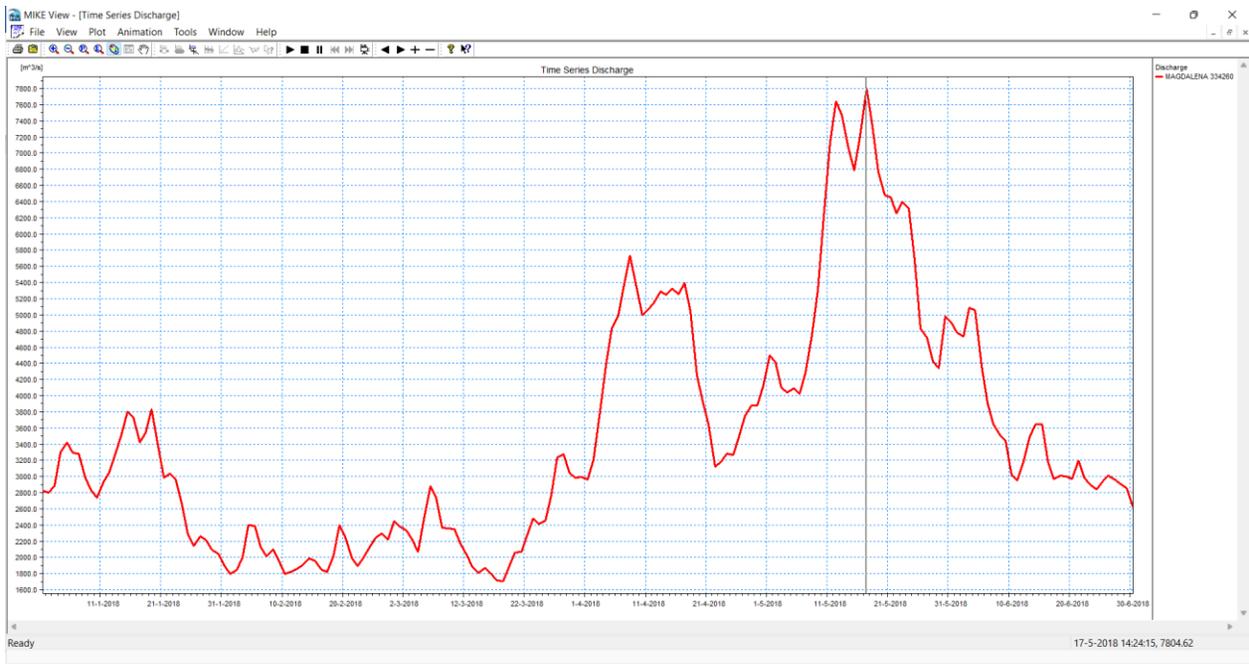


Figura 3.41 – Variación de caudales en la estación de Sitio Nuevo – resultados de la simulación

Adicionalmente, en el visor se puede ver la variación de los niveles de agua en las 84 secciones transversales, como se muestra en la Figura 3.42.

Por otra parte, en la visualización de los resultados de nivel en las secciones transversales se observó que algunas secciones transversales tienen irregularidades (picos) en el perfil de la sección (lecho del río), como se muestra en la Figura 3.43. Esas irregularidades pueden obedecer a errores en las mediciones topo batimétricas, las cuales se deben de ajustar.

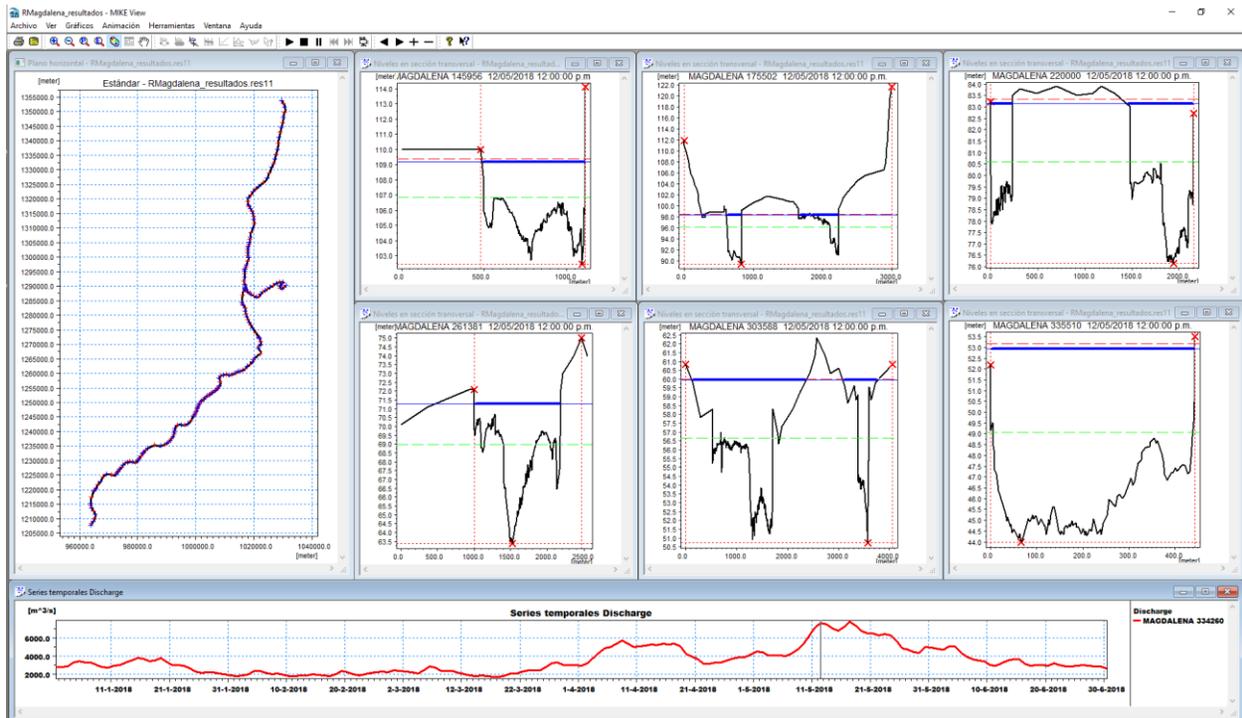


Figura 3.42 – Variación de niveles en diferentes secciones transversales para el caudal máximo del tiempo de análisis – resultados de la simulación



Figura 3.43 – Irregularidades en las secciones transversales del modelo hidráulico

Para el período de tiempo analizado se identificaron 24 secciones transversales en las cuales el nivel de agua excede el límite de alguna de las orillas del cauce. En la Figura 3.44 se muestra la localización de las 24 secciones y los perfiles de las 24 secciones transversales con el desbordamiento del cauce se encuentran en el Anexo 3 de este informe. De la Figura 3.44 es claro que los desbordamientos se concentran en dos zonas: (1) aguas abajo de la desembocadura del río Carare hasta el municipio de Barrancabermeja, y (2) aguas arriba y aguas abajo del municipio de Puerto Wilches.

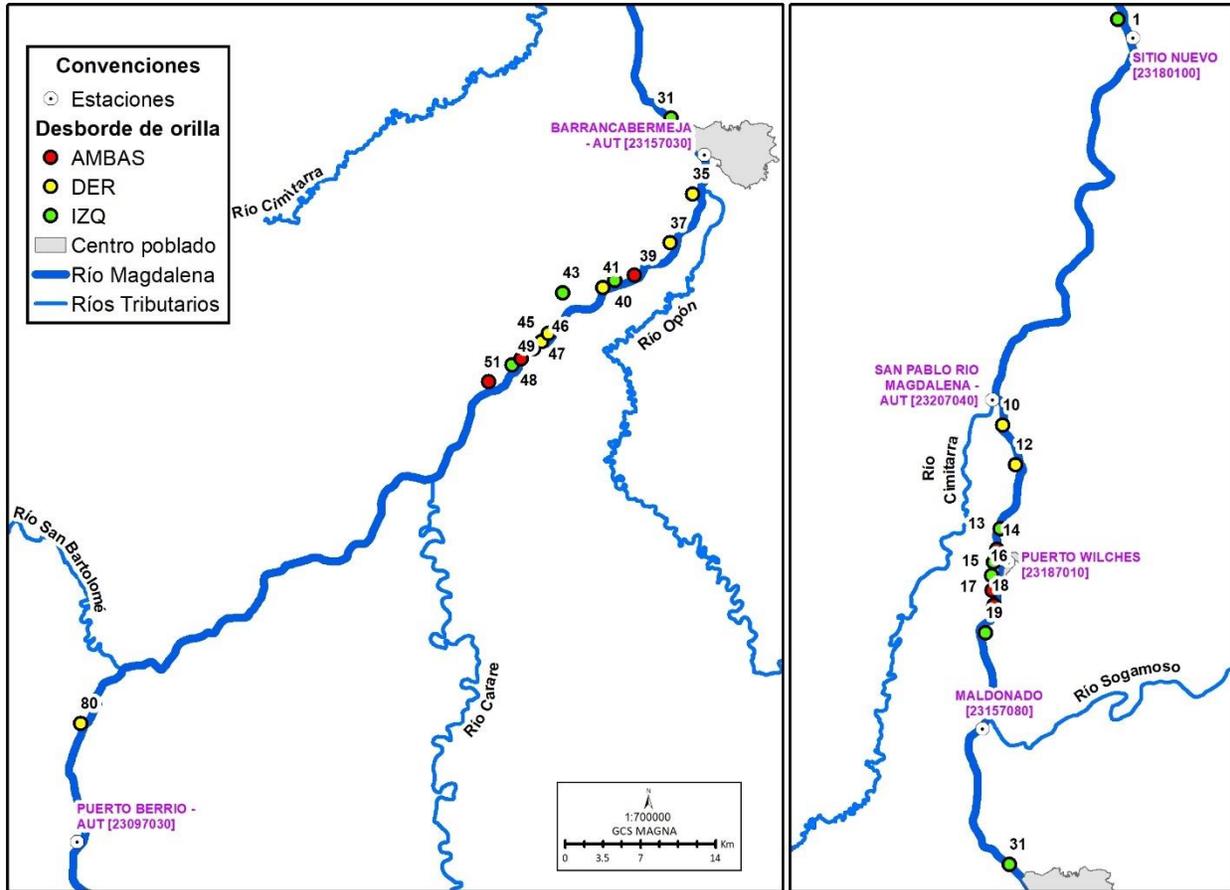


Figura 3.44 – Localización de las 24 secciones transversales con desbordamiento del cauce

3.4.5 Evaluación del desempeño del modelo hidráulico

Para la evaluación de desempeño del modelo hidráulico se comparó la serie de niveles obtenida de la simulación con los registros de nivel en la estación de Sitio Nuevo, como se muestra en la Figura 3.45. De la figura se observa que en general el modelo hidráulico da niveles menores a los observados en la estación, con excepción de los períodos en donde se tienen los caudales máximos (Figura 3.46) en donde el modelo hidráulico da niveles mayores a los registrados. En la Figura 3.46 se observa que el modelo hidráulico tiende de manera general a subestimar los caudales, y para los eventos pico tiende a sobrestimar los caudales (hasta por 2000 m³/s de diferencia), resultados que concuerdan con los resultados presentados por Urrego (2018).

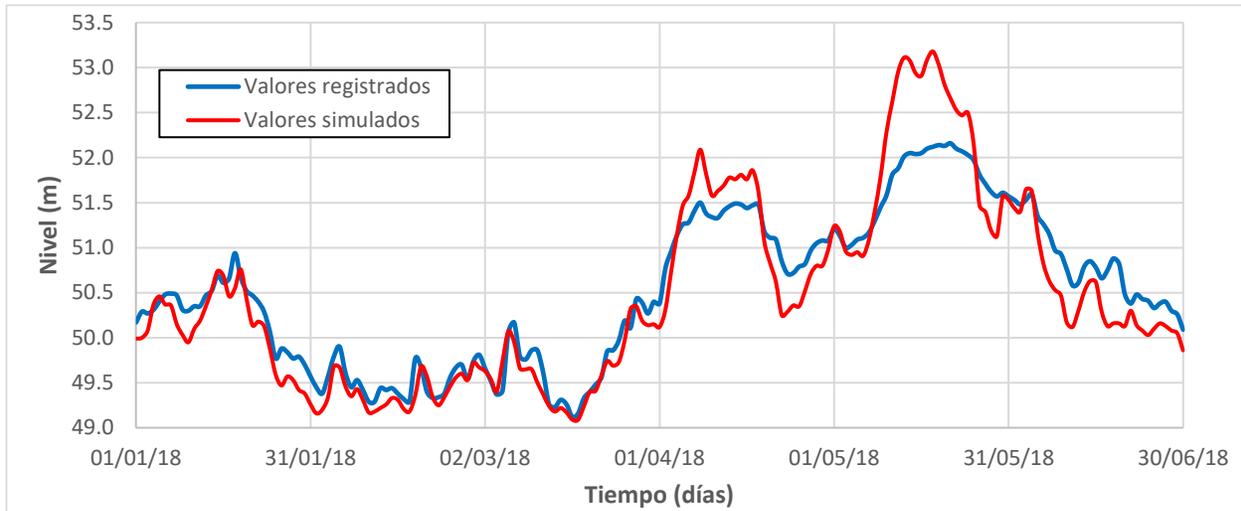


Figura 3.45 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo

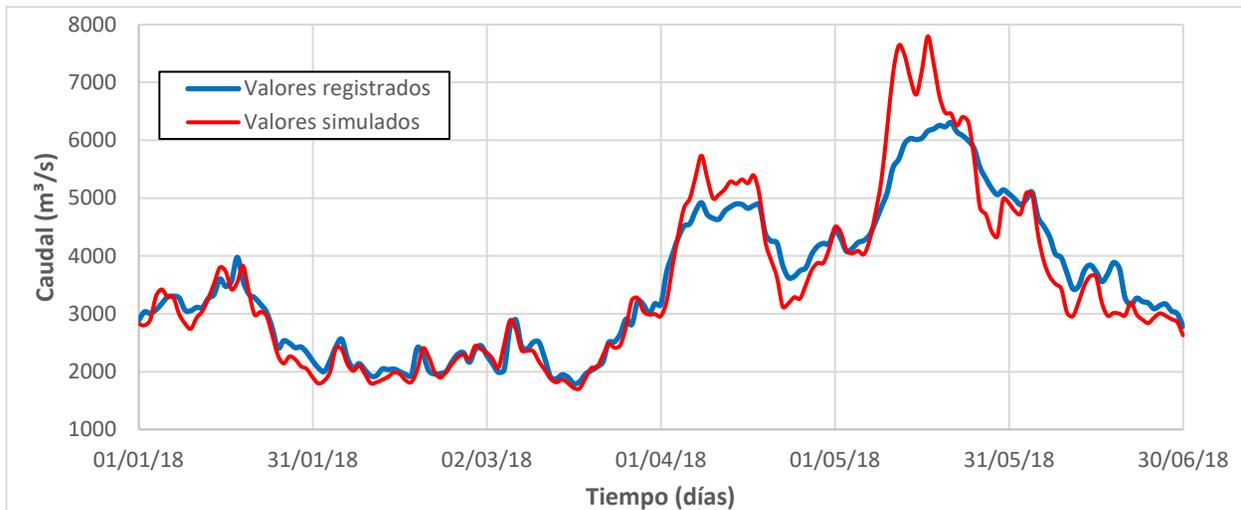


Figura 3.46 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo

De la Figura 3.46 se puede inferir que los niveles más bajos en la simulación pueden obedecer a la simplificación de caudales en el río San Bartolomé y a la exclusión de los aportes del río Cimitarra, mientras que, los niveles más altos en la simulación (para los caudales máximos) puede obedecer a que en el modelo hidráulico no se están considerando desbordes del cauce y almacenamientos temporales en la planicie de inundación.

En la Figura 3.47 se muestra la comparación de los niveles registrados y simulados en comparación con la línea de perfecto ajuste, en donde se observa que los valores simulados se encuentran en un

rango de más o menos un metro el valor registrado. Se considera que este valor es un poco alto y que se debe de minimizar con la calibración del modelo hidráulico.

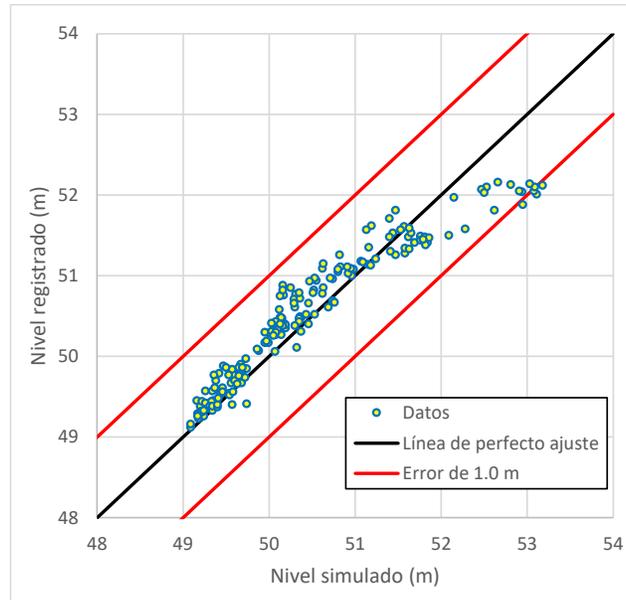


Figura 3.47 – Desempeño de comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo

3.4.6 Análisis de la topología del modelo hidráulico

De acuerdo con los resultados del numeral anterior, el modelo hidráulico es dependiente de las condiciones de frontera y de la topología del modelo. En este numeral se hará un análisis de la topología del modelo hidráulico, principalmente en relación con la variación física de las secciones transversales y la identificación de las zonas de inundación en el tramo de estudio (asociadas a eventuales desbordamientos del cauce).

Para el análisis de variación del cauce del río Magdalena, mediante la localización de las orillas, se utilizó la información digitalizada y presentada en el numeral 2.2. En la Figura 3.48 se muestra la localización de las secciones transversales del modelo hidráulico y la variación de las orillas para los años 2000, 2004, 2015 y 2021.

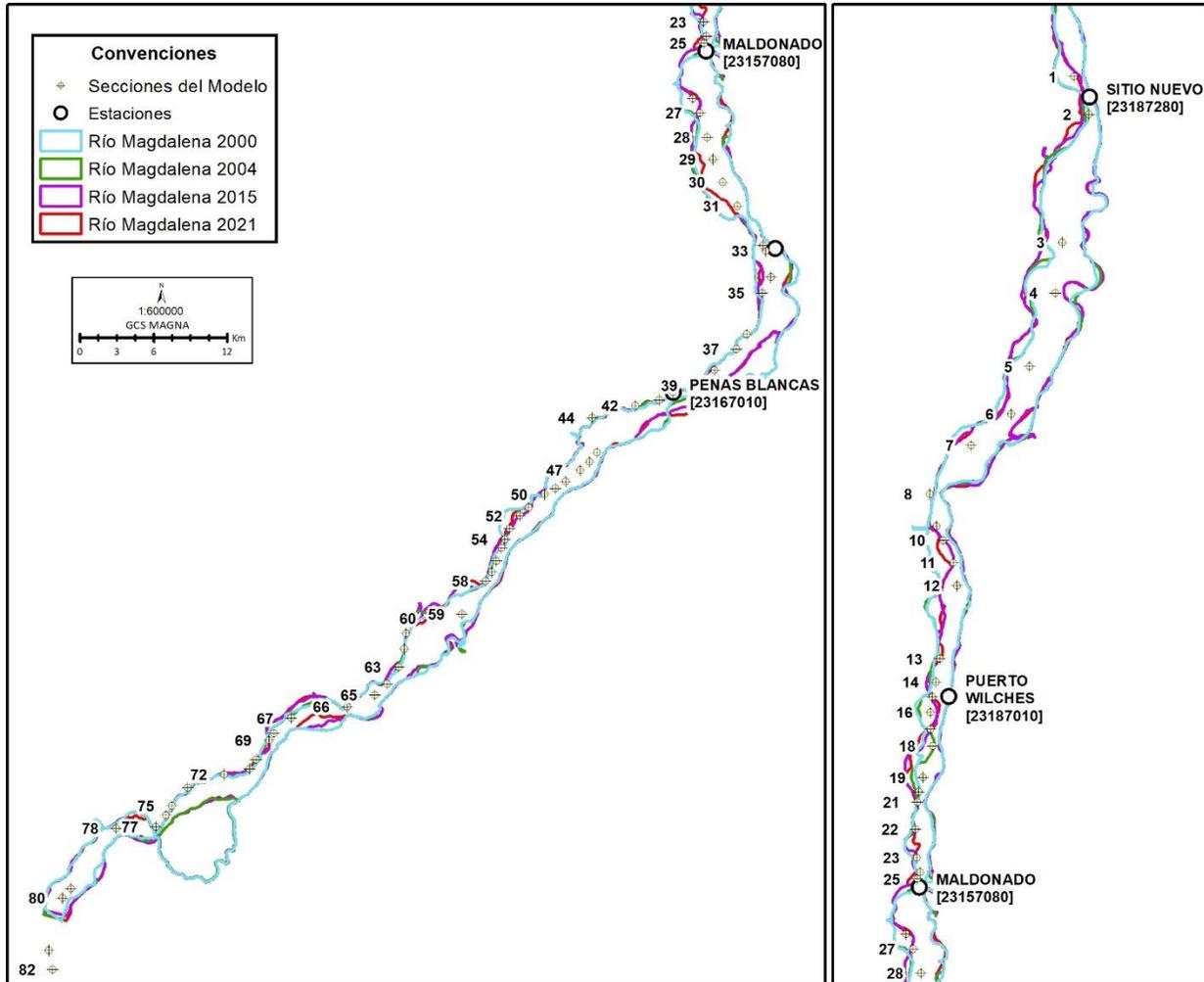


Figura 3.48 – Variación de las orillas del río Magdalena en el tramo de modelación hidráulica

Teniendo en cuenta el trazado del río Magdalena para diferentes años, en la Tabla 3.6 se relacionan las secciones en donde se han notado migraciones significativas de las orillas desde 2004 hasta 2021. De la tabla y la figura es claro que los mayores cambios ocurren en la margen izquierda del río Magdalena en el tramo analizado. Y que esos cambios se concentran principalmente entre las estaciones de Barrancabermeja y Sitio Nuevo.

Tabla 3.6 – Secciones en las cuales han migrado las orillas

Orilla que ha sufrido cambio	Secciones del modelo hidráulico en donde se identifican los cambios de las orillas
Orilla izquierda	69, 60, 55, 54, 53, 52, 31, 30, 29, 27, 26, 20, 19, 18, 16, 15, 14, 13, 11, 10, 7, 5, 2, 1
Orilla derecha	80, 67, 59, 42, 40, 39, 38, 37, 36, 24
Ambas orillas	34, 28, 25, 6, 4, 3

Como se mostró en el numeral 2.2, el río Magdalena presenta variación temporal y espacial de las orillas cauce, así como la generación de barras, que posteriormente pueden dar lugar a las islas internas del cauce. Estas variaciones del cauce tienen influencia sobre la hidráulica del tramo del río Magdalena, particularmente en los niveles de agua. Es importante disminuir la incertidumbre en los niveles de pronóstico ya que estos definen los umbrales de alerta que emite el IDEAM.

En la zona de análisis se identificaron cuatro estaciones del IDEAM sobre el río Magdalena que cuentan con información de las secciones transversales en el punto de medición de niveles (sitio de miras), como se muestra en la Figura 3.49. De esas cuatro estaciones se analizó la información de las tres estaciones que se encuentran dentro de los límites de modelación: Peñas Blancas [2316701], Barrancabermeja [23157030] y Sitio Nuevo [2318728].

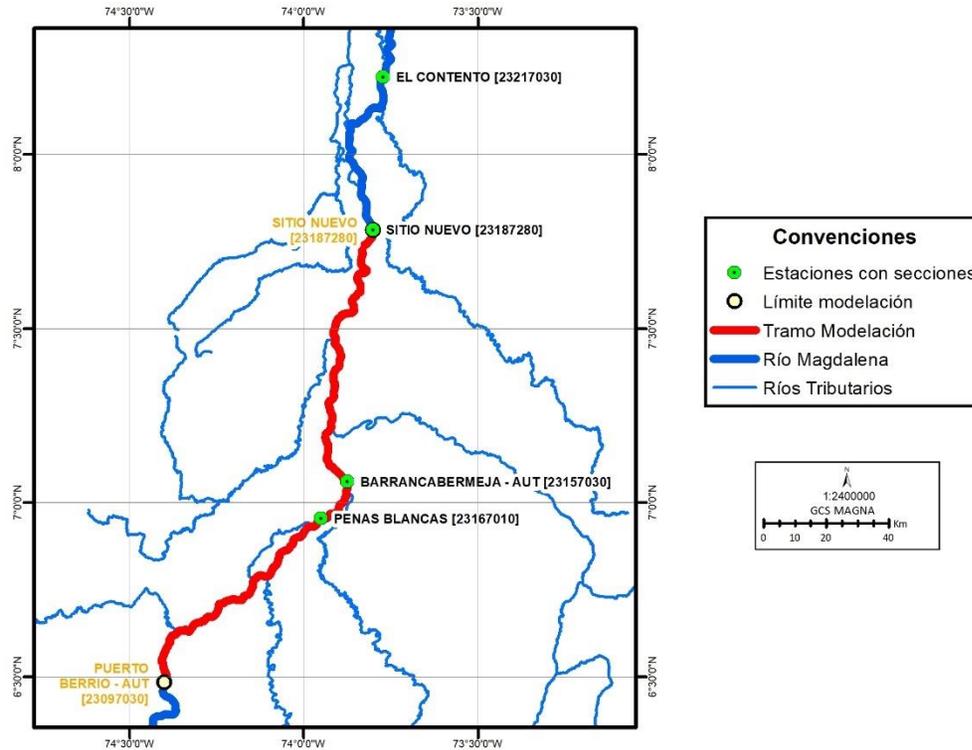


Figura 3.49 – Localización de las estaciones del IDEAM que cuentan con información de aforos (secciones transversales)

Para la estación de Peñas Blancas se tienen 10 registros de las secciones transversales, en las épocas de aforo líquido, entre los años de 2009 y 2017, como se observa en la Figura 3.50. Es claro que la sección ha sufrido cambios particularmente en la margen derecha. En el registro del 2009 se observa una sección mucho más profunda hacia la margen derecha.

Para la estación de Barrancabermeja se tienen 2 registros de las secciones transversales, en las épocas de aforo líquido, entre los años de 2019 y 2020, como se observa en la Figura 3.51. Para la sección de 2020 se ve una conformación monticular hacia el centro de la sección, formándose dos secciones hidráulicas hacia los extremos.

Para la estación de Sitio Nuevo se tienen 10 registros de las secciones transversales, en las épocas de aforo líquido, entre los años de 2008 y 2017, como se observa en la Figura 3.52. Es claro que la sección ha sufrido cambios particularmente en la margen izquierda, zona de mayor profundidad.

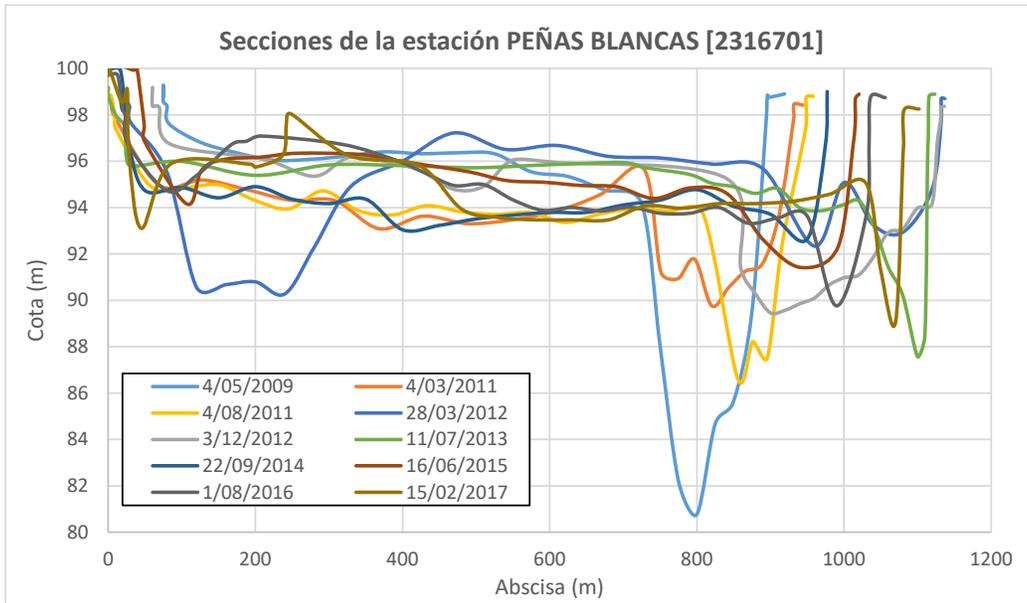


Figura 3.50 – Variación de la sección transversal en el punto de medición de niveles en la estación de Peñas Blancas

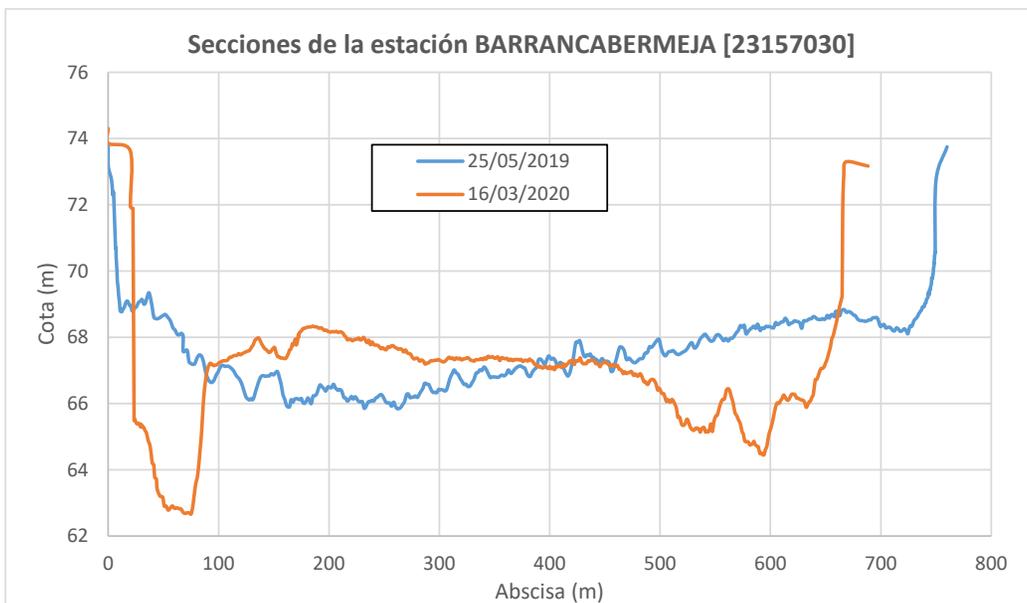


Figura 3.51 – Variación de la sección transversal en el punto de medición de niveles en la estación de Barrancabermeja

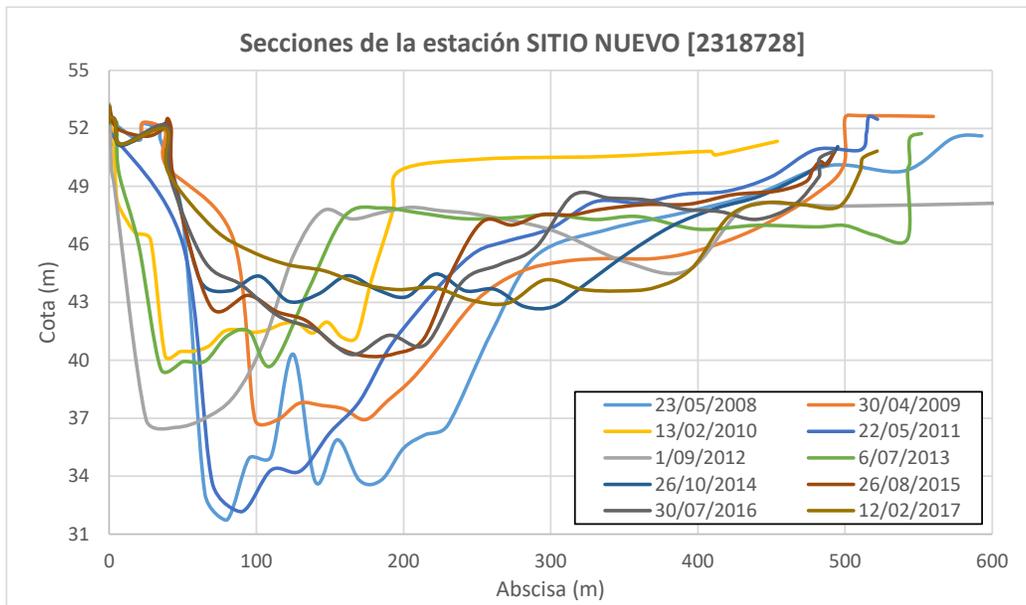


Figura 3.52 – Variación de la sección transversal en el punto de medición de niveles en la estación de Sitio Nuevo

De las figuras anteriores es claro que las secciones transversales del río Magdalena, en los puntos aguas arriba y aguas abajo de la zona de modelación (Puerto Berrío – Sitio Nuevo), presentan cambios notables a lo largo de los años. Esto implicaría hacer una actualización de las secciones transversales incluidas en los modelos hidráulicos.

Finalmente, se analizó la mancha de agua (extensión de la inundación) correspondiente al evento invernal de 2010-2011 en la región del Valle Medio del Magdalena, la cual fue obtenida a través de interpretación de información de sensores remotos, como se muestra en la Figura 3.53. En la misma figura se localizaron las 84 secciones transversales del modelo hidráulico, en donde es claro que las zonas de mayor desborde del cauce corresponden al tramo entre las secciones 31 (estación de Barrancabermeja) y 1 (estación de Sitio Nuevo). Esta información es consistente con los desbordes identificados en el modelo hidráulico (Figura 3.44).

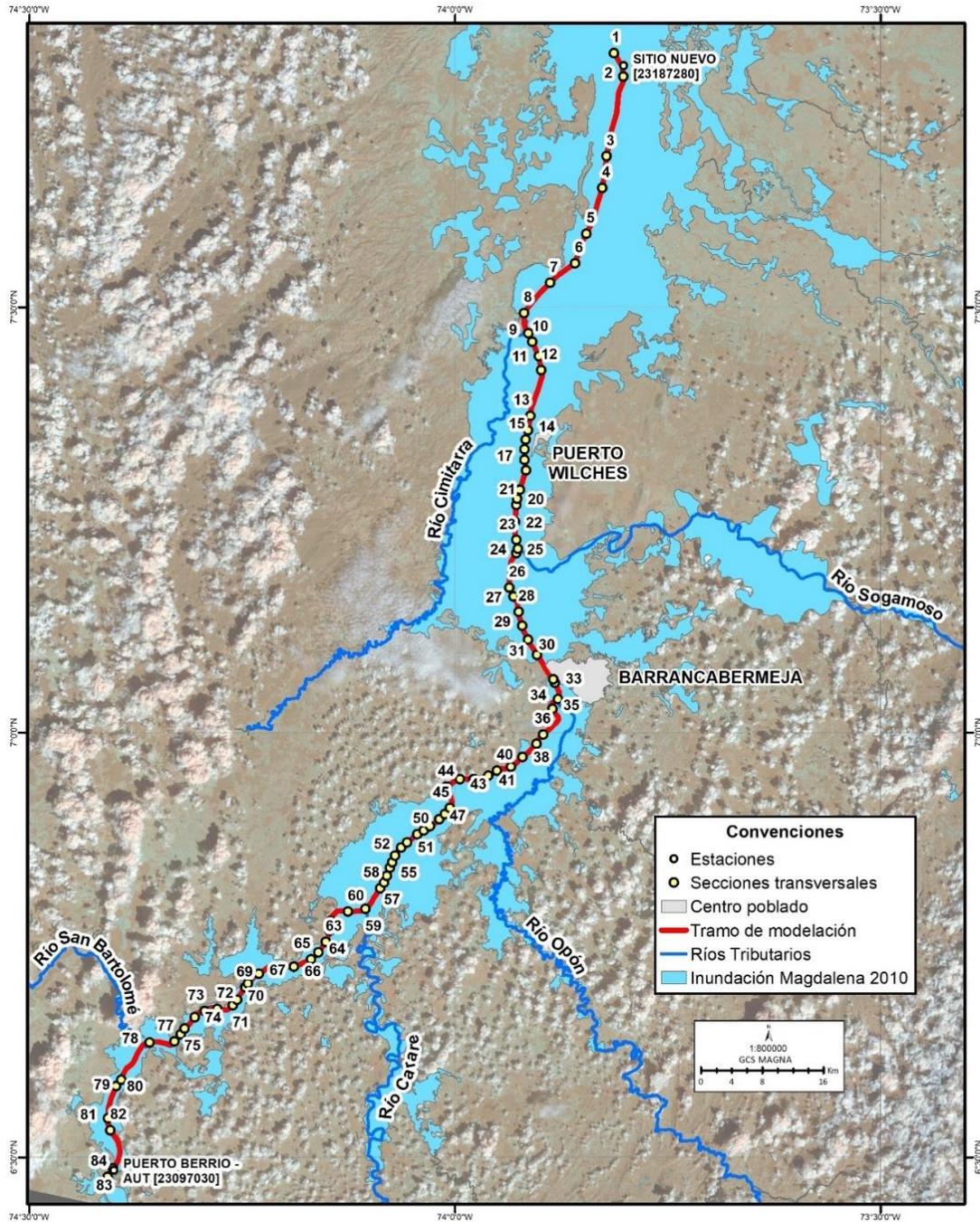


Figura 3.53 – Relación de las secciones transversales del modelo con las zonas de inundación de los eventos de 2010-2011

3.5 Propuesta de mejora de los modelos

3.5.1 Modelos hidrológicos

- De acuerdo con lo indicado en el numeral 3.2 se cuenta con el modelo hidrológico Alto Magdalena, en el programa HEC-HMS, para simular los caudales entre las estaciones de Puente Santander y Puerto Salgar. Dado que se tiene un modelo hidrológico para representar un tránsito hidráulico en un tramo del río Magdalena, en donde solamente se tiene un tiempo de retraso por tramo, es claro que se estaría incurriendo en errores de estimación (sobrestimación). Por lo que se recomienda dividir ese modelo hidrológico en un modelo hidráulico que sea alimentado por caudales provenientes de modelos hidrológicos o curvas de gasto que se tengan en los ríos tributarios al río Magdalena entre las estaciones de Puente Santander y Puerto Salgar. Adicionalmente, se recomienda revisar la información de entrada aguas arriba de la estación de Puente Santander y que sea consecuente con la operación del embalse de Betania.
- Se recomienda evaluar modelos hidrológicos diferentes a HEC-HMS que den una mejor representación de los caudales que se aportan a los modelos hidráulicos.

3.5.2 *Insumos climáticos*

- Para la precipitación diaria, se recomienda utilizar el algoritmo RF-MEP, en donde las entradas sea la combinación de los productos GSMAP y MSWEP, junto con el modelo digital de elevaciones.
- Para la precipitación horaria, la combinación de WRF y GSMAP a través de la media reportaron relativas mejoras en la especialización de la variable, pero alejadas de la magnitud observada reportada en las estaciones in situ.
- Para la variable temperatura a paso de tiempo horario, se evidenció que el producto MSWX representa de forma satisfactoria la temperatura máxima y mínima diaria tanto espacial como temporalmente. Estos resultados se podrían mejorar con el uso del algoritmo RF-MEP.
- Se recomienda realizar una evaluación de la precipitación diaria y horaria en periodo seco y húmedo tanto de los productos como de sus combinaciones que permitan evidenciar fortalezas y debilidades en la representación de la estacionalidad de la variable.

3.5.3 *Modelo hidráulico*

- Se recomienda incorporar un modelo hidrológico que permita simular la subzona hidrográfica del río San Bartolomé en vez de utilizar un aporte constante de 50 m³/s en el modelo hidráulico.
- Se recomienda incorporar un modelo hidrológico que permita simular la subzona hidrográfica del río Sogamoso en vez de utilizar el modelo estadístico que alimenta el modelo hidráulico.
- Se recomienda incorporar un modelo hidrológico que permita simular la subzona hidrográfica del río Cimitarra ya que en el modelo hidráulico no se considera este tributario.
- De acuerdo con el análisis realizado en el numeral 3.4.4 se evidencia que las secciones transversales incorporadas en el modelo hidráulico de MIKE11 están desactualizadas (2008) y en algunas de ellas no se cuenta con la información suficiente de las orillas. Por otra parte, se evidenció que en muchas partes del tramo de modelación hidráulica las orillas del río Magdalena han migrado (Figura 3.48), por ende, las secciones transversales se habrán modificado. Por estas razones se recomienda incorporar nueva información de secciones transversales en el modelo hidráulico, a través de un nuevo levantamiento topo batimétrico.

4 Actividades de campo y productos topo batimétricos

4.1 Contexto

De acuerdo con lo indicado en el numeral 3.5.3, se recomendó realizar levantamientos topo batimétricos para actualizar la topología del modelo hidráulico. En tal sentido el IDEAM realizó un levantamiento batimétrico en octubre de 2021 y se contrató la firma INCIGE (2022) para realizar un levantamiento topográfico con tecnología aerotransportada para cubrir las orillas e islas de la zona del levantamiento batimétrico. La zona de los levantamientos fue la comprendida entre las secciones 31 (aguas abajo del municipio de Barrancabermeja) y 5 (entre las estaciones de San Pablo y Sitio Nuevo) del modelo hidráulico inicial. A continuación, se hace la descripción de los dos levantamientos.

4.2 Levantamiento batimétrico

4.2.1 Actividades de campo

Entre el 20 y 30 de octubre de 2021 se realizó un levantamiento batimétrico de 36 secciones transversales, entre las secciones 31 (aguas abajo del municipio de Barrancabermeja) y 5 (entre las estaciones de San Pablo y Sitio Nuevo) del modelo hidráulico inicial, como se muestra en el esquema de la Figura 4.1.

De acuerdo con el IDEAM (2013), los levantamientos batimétricos deben estar “amarrados” geodésicamente a la red Magna Sirgas, por lo cual al tiempo de realizar el trabajo de hidrotopografía se realizó un trabajo de topografía tradicional para realizar el respectivo amarre. El procedimiento fue realizar una poligonal abierta por la parte firme de las orillas del cauce a partir de la cual se dieron las cotas de referencia de cada una de las secciones transversales levantadas.

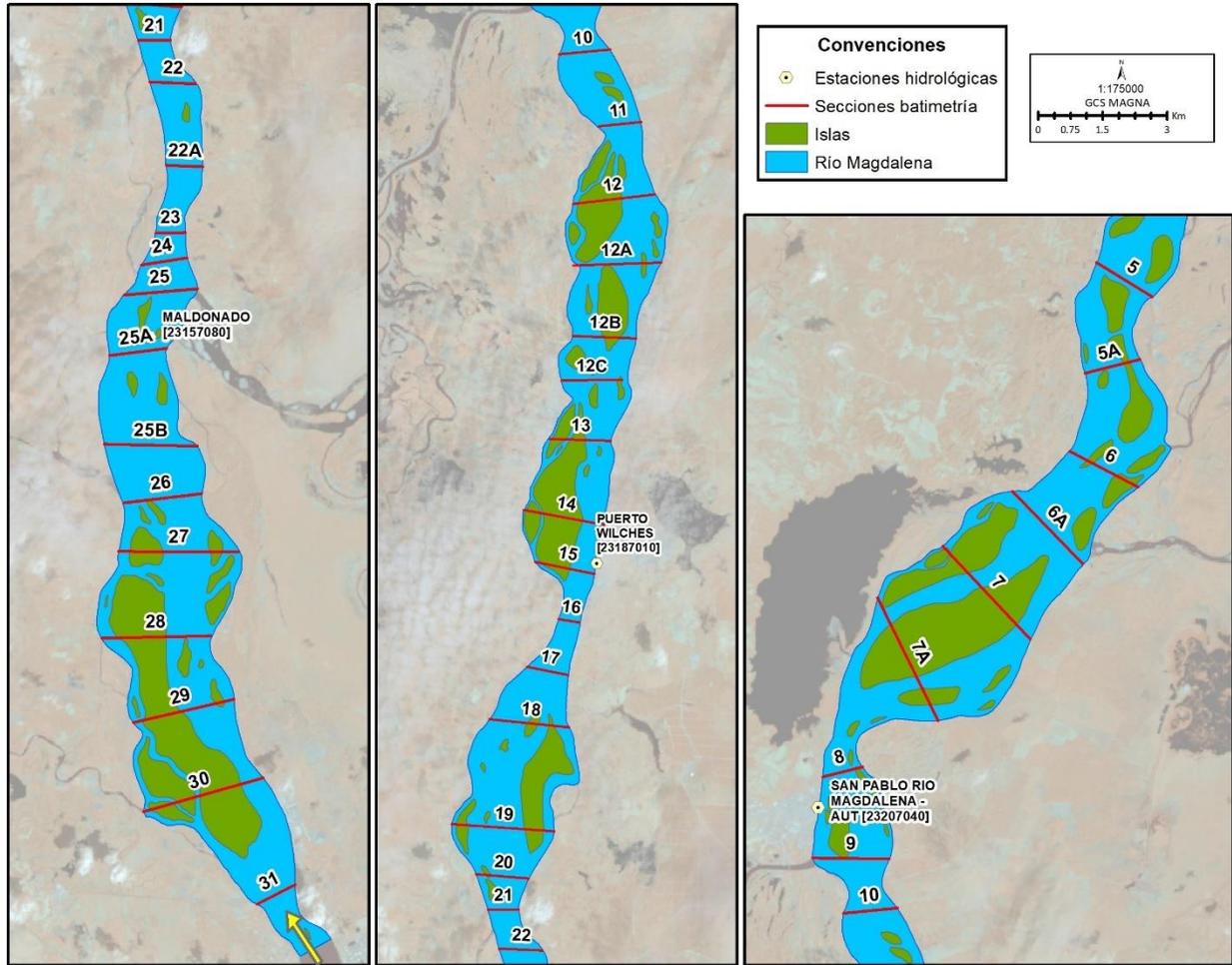


Figura 4.1 – Secciones transversales levantadas en el trabajo de hidrotopografía

A continuación, se describe el procedimiento realizado para levantar las secciones batimétricas, el cual está de acuerdo con la metodología para realizar trabajos de hidrotopografía (IDEAM, 2013):

- Para realizar la batimetría se contó con una embarcación con motor fuera de borda, un motorista, un auxiliar, el equipo de medición y el equipo de recepción de las mediciones, como se muestra en la Figura 4.2. Inicialmente se acopló el equipo de medición a la embarcación, y se realizaron las pruebas de ajustes mínimos.

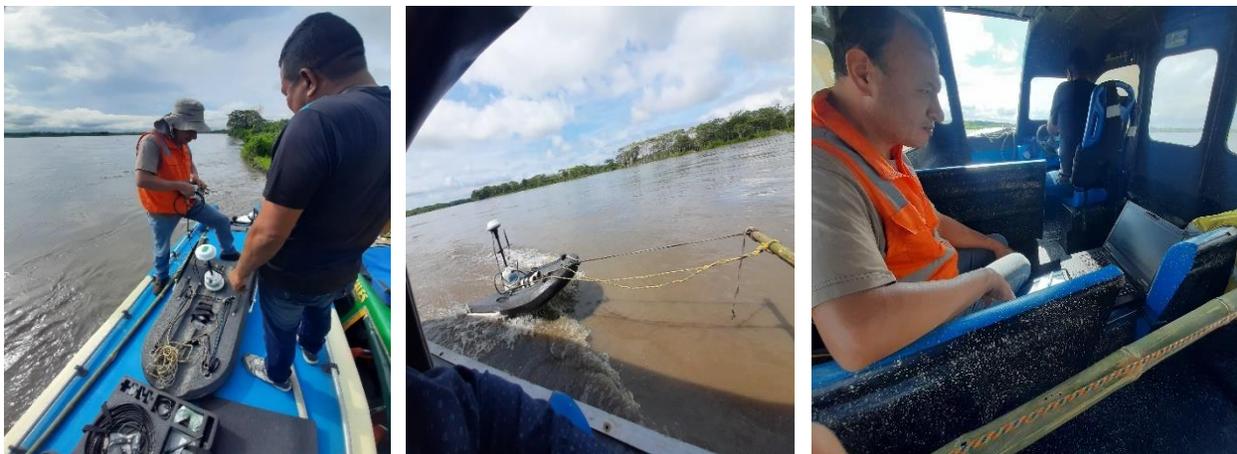


Figura 4.2 – Equipos para el levantamiento batimétrico

- En terreno (zonas duras, o en las orillas e islas) se fueron materializando puntos de topografía (puntos-estacas), a partir de los cuales se dan cotas de referencia a las diferentes secciones transversales, como se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.3 – Puntos de la poligonal de topografía para dar cotas a las secciones

- A partir de los puntos materializados en terreno y por nivelación topográfica se procedió a llevar la cota al punto de inicio de la batimetría, como se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.4 – Mediciones de cota de las secciones a partir de los puntos de topografía

- Posteriormente, a través del equipo RS-M9 Sontek se procede a realizar el levantamiento batimétrico de cada sección transversal, en donde se va registrando la información en un computador adaptado con el software Sontek como se muestra en la Figura 4.5. En la Figura 4.6 se muestra el esquema de las mediciones realizadas en cada sección transversal.

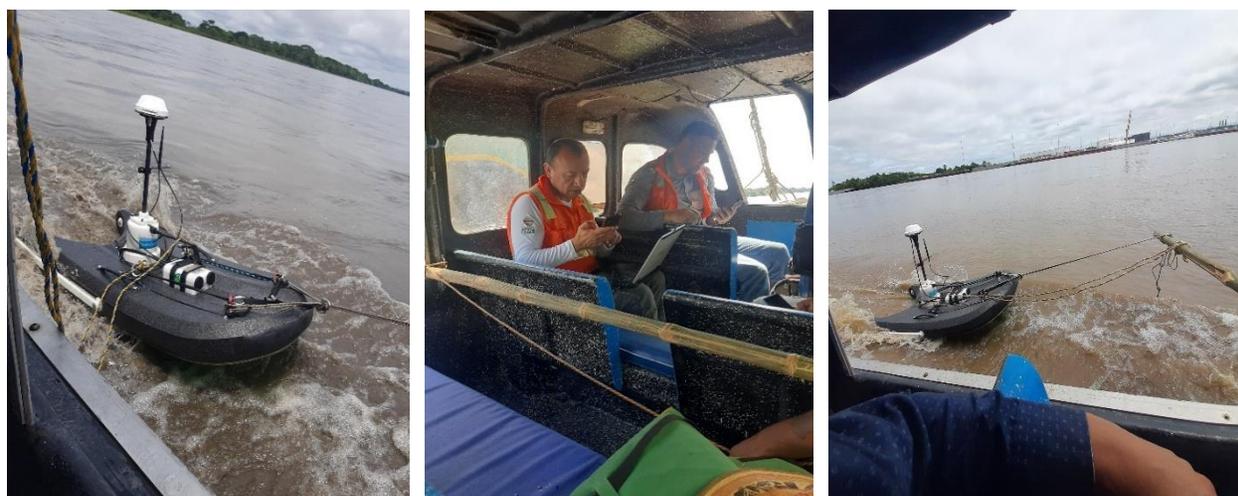


Figura 4.5 – Mediciones batimétricas a través del equipo ADCP RS-M9 (Sontek)



Figura 4.6 – Esquema de las mediciones realizadas en cada sección transversal

- En las secciones correspondientes a las estaciones limnigráficas del IDEAM, adicionalmente, se realizaron mediciones de las miras como se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7 – Mediciones de las miras en las estaciones limnigráficas

- Por último, se realiza el levantamiento topográfico de orillas (terreno seco), para empalmar en el postproceso con la batimetría, como se muestra en la Figura 4.8.



Figura 4.8 – Topografía en la zona de las orillas e islas

4.2.2 *Producto batimétrico*

Después de haber hecho el trabajo de batimetría, en oficina se procedió a procesar la información registrada con el ADCP. Para realizar el procesamiento de los datos se utilizó el programa RiverSurveyor Live, como se muestra en la Figura 4.9, en donde se hizo un filtrado de los datos anómalos.

Luego de revisar las mediciones, a través del programa RiverSurveyor Live se exportan las mediciones de cada sección transversal a formato Excel, el cual se anexa al informe. A partir de los datos en Excel se procede a incorporar las mediciones en un archivo shape a través del programa ArcGIS. En la Figura 4.10 se muestran las cotas batimétricas de la sección 11 y en la Figura 4.11 se muestra la distribución de los puntos de medición en cada sección transversal.

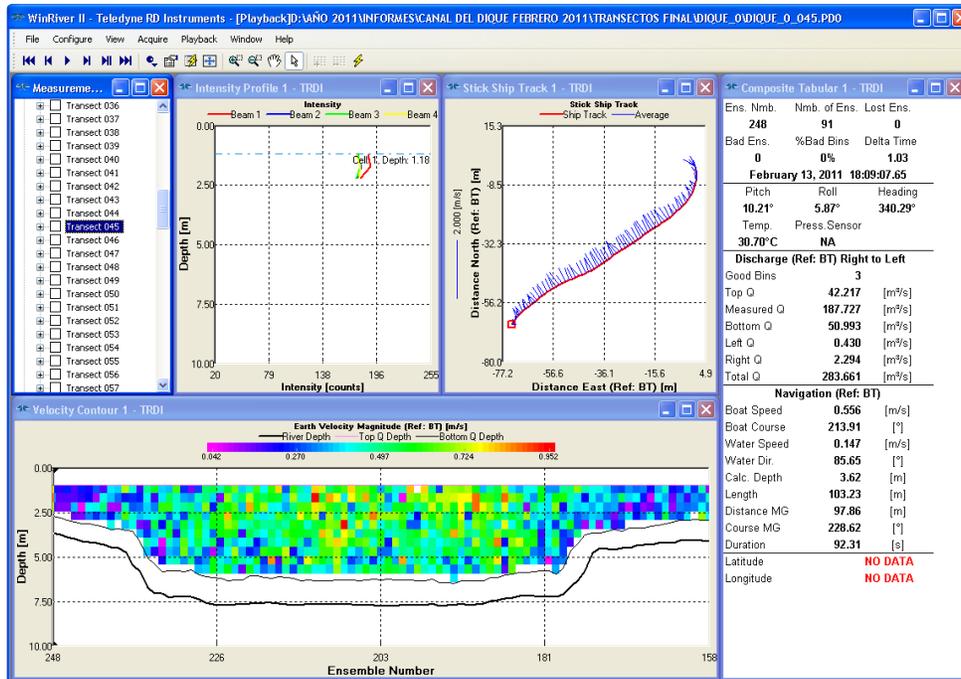


Figura 4.9 – Programa RiverSurveyor

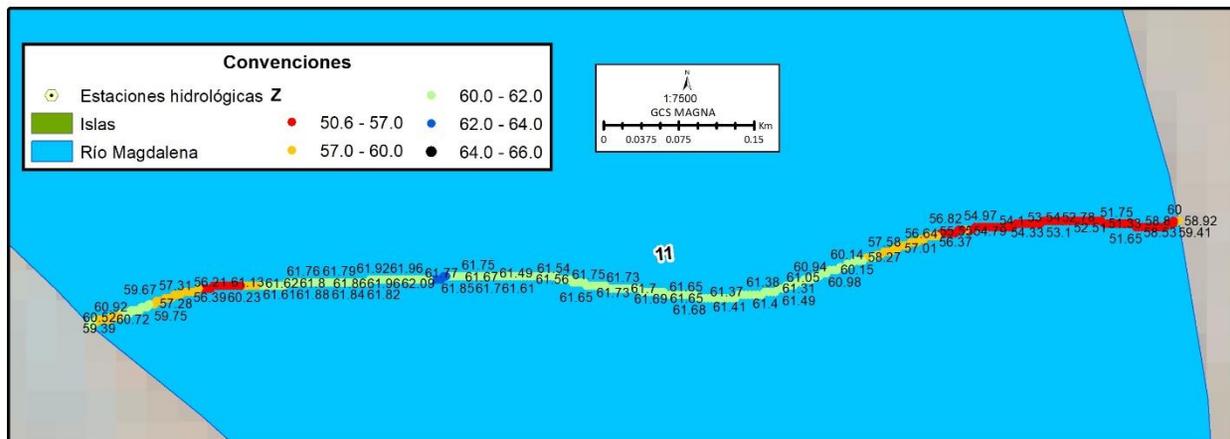


Figura 4.10 – Cotas de los puntos batimétricos de la sección 11

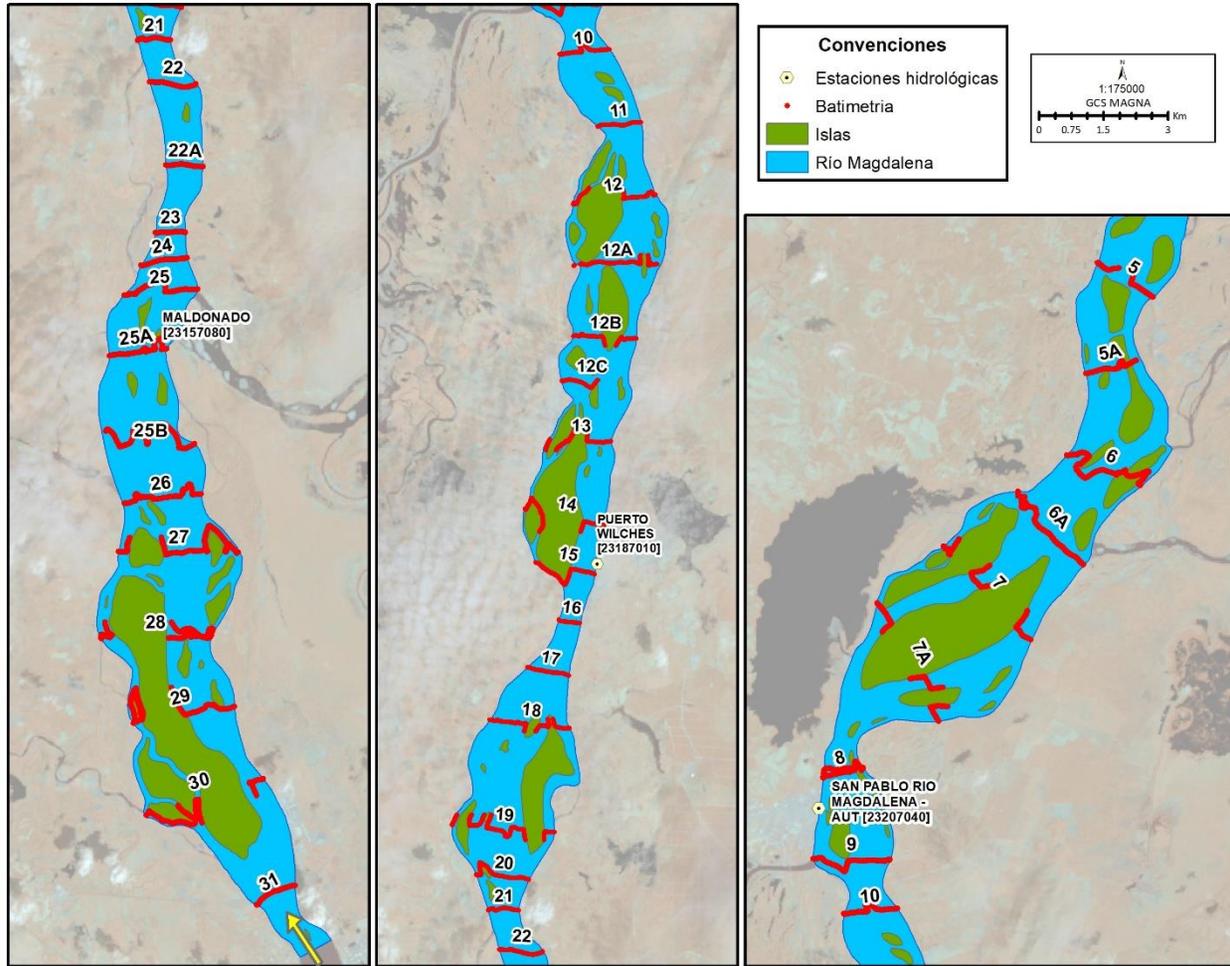


Figura 4.11 – Localización de los puntos batimétricos

4.3 Levantamiento topográfico con tecnología aerotransportada

El IDEAM suscribió un contrato con la empresa INCIGE SAS con el objeto de “realizar levantamiento topográfico de un modelo digital de terreno mediante el uso de tecnología aerotransportada en áreas de interés en el marco del convenio con Ecopetrol”. Las actividades de campo fueron realizadas entre el 6 de diciembre de 2021 y el 9 de enero de 2022 en el área que se muestra en la Figura 4.12 y los trabajos de procesamiento de la información fueron realizados en los meses de enero y febrero de 2022.

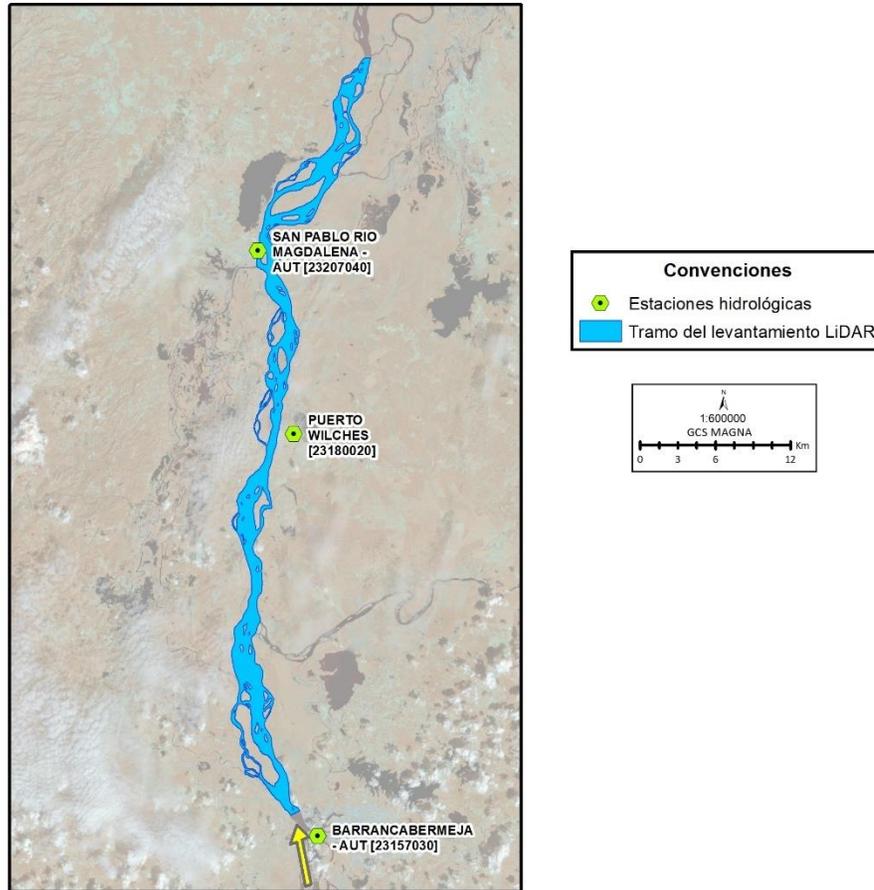


Figura 4.12 – Localización del área del levantamiento LiDAR

4.3.1 Cotas cero de las miras en el tramo del levantamiento

La primera de las actividades fue determinar las cotas cero de las tres estaciones del IDEAM que se encontraban en el área del levantamiento: Barrancabermeja, Puerto Wilches y San Pablo. En cada una de las estaciones se realizó ocupación con GPS en modo estático tanto en el BM (Figura 4.13) como en la mira (Figura 4.14).



Figura 4.13 – Fotografías de las mediciones en los BM de las estaciones de Barrancabermeja (izquierda), Puerto Wilches (centro) y San Pablo (derecha)



Figura 4.14 – Fotografías de las mediciones en las miras de las estaciones de Barrancabermeja (izquierda), Puerto Wilches (centro) y San Pablo (derecha)

En la Tabla 4.1 se relaciona la información obtenida de los trabajos de georreferenciación, de las cotas cero de mira y cotas de los BMs hallados en campo.

Tabla 4.1 – Relación de cotas en las estaciones del levantamiento topográfico

Estación	Punto	Latitud	Longitud	Cota
Barrancabermeja	BM	7° 03' 36.83224"	73° 52' 33.53372"	70.57 m
	Mira	7° 03' 36.72417"	73° 52' 33.55525"	75.53 m
Puerto Wilches	BM	7° 20' 39.18699"	73° 54' 18.60860"	59.60 m
	Mira	7° 20' 39.87968"	73° 54' 18.02539"	70.04 m
San Pablo	BM	7° 28' 49.23128"	73° 55' 06.80032"	54.81 m
	Mira	7° 28' 49.17972"	73° 55' 06.78878"	62.31 m

4.3.2 Metodología del levantamiento LiDAR

En la Figura 4.15 se muestra la metodología empleada por INCIGE para la generación de los productos.



Figura 4.15 – Actividades desarrolladas por INCIGE (fuente: informe del plan de trabajo de INCIGE)

En la metodología se establece que para ajustar el levantamiento LiDAR se debe realizar un levantamiento en terreno de algunos puntos de control, es así como en la Figura 4.16 se muestran 24 puntos de control, 6 pertenecientes a BMs del IGAC y 18 puntos levantados por INCIGE considerados de fotocontrol.

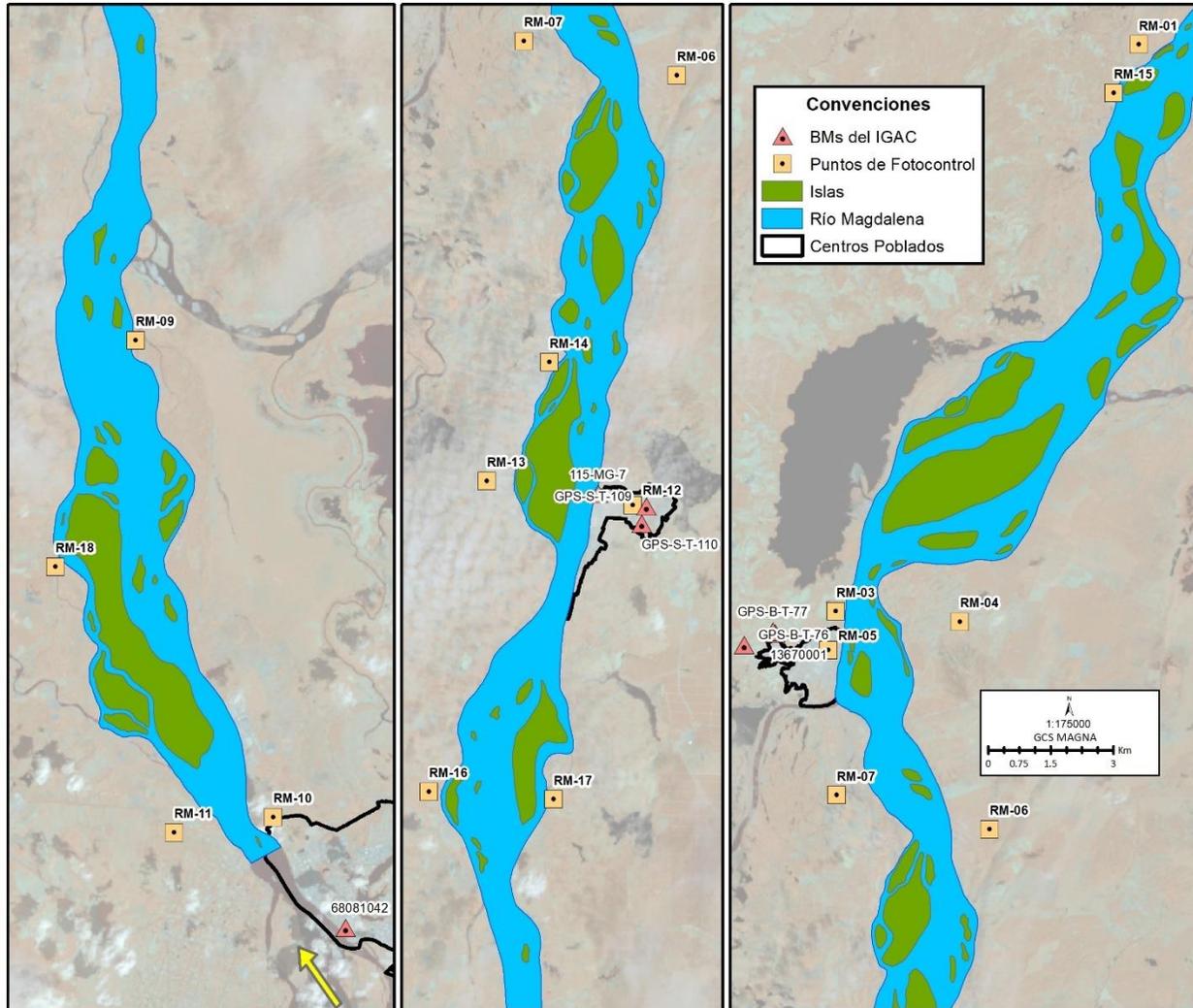


Figura 4.16 – Localización de los puntos de control terrestre

De los resultados del levantamiento topográfico se generaron 3 productos (INCIGE, 2022): (1) una ortofoto de la zona del levantamiento, (2) un modelo digital de terreno con la información LiDAR de orillas e islas, y (3) un modelo digital de terreno con la integración de las secciones batimétricas levantadas en octubre de 2021 (Figura 4.11). A continuación, se realiza una descripción de los procedimientos realizados para obtener los 3 productos.

4.3.3 Ortofoto de la zona de estudio

Para la generación de la ortofoto se requiere de las imágenes fotográficas del vuelo, la información de la aerotriangulación y la información de los puntos de control terrestre. El procedimiento de generación de la ortofoto tiene los siguientes pasos:

- La rectificación diferencial geométrica píxel/píxel con interpolación bicúbica.
- El mejoramiento del aspecto visual de la imagen se efectuará empleando el software Adobe Photoshop, con el propósito de obtener y presentar una impresión y archivo digital con un balance en tonos óptimos.
- La homogeneidad en el contraste entre imágenes para el mejoramiento de su legibilidad estará basada en el análisis de los histogramas de cada fotograma y aplicando los algoritmos correspondientes para corregir y balancear las zonas de alto contraste.

En la Figura 4.17 se muestra la ortofoto generada por INCIGE, en donde se incluyó la localización de los puntos de control, los BMs del IGAC y los puntos levantados por la consultoría.

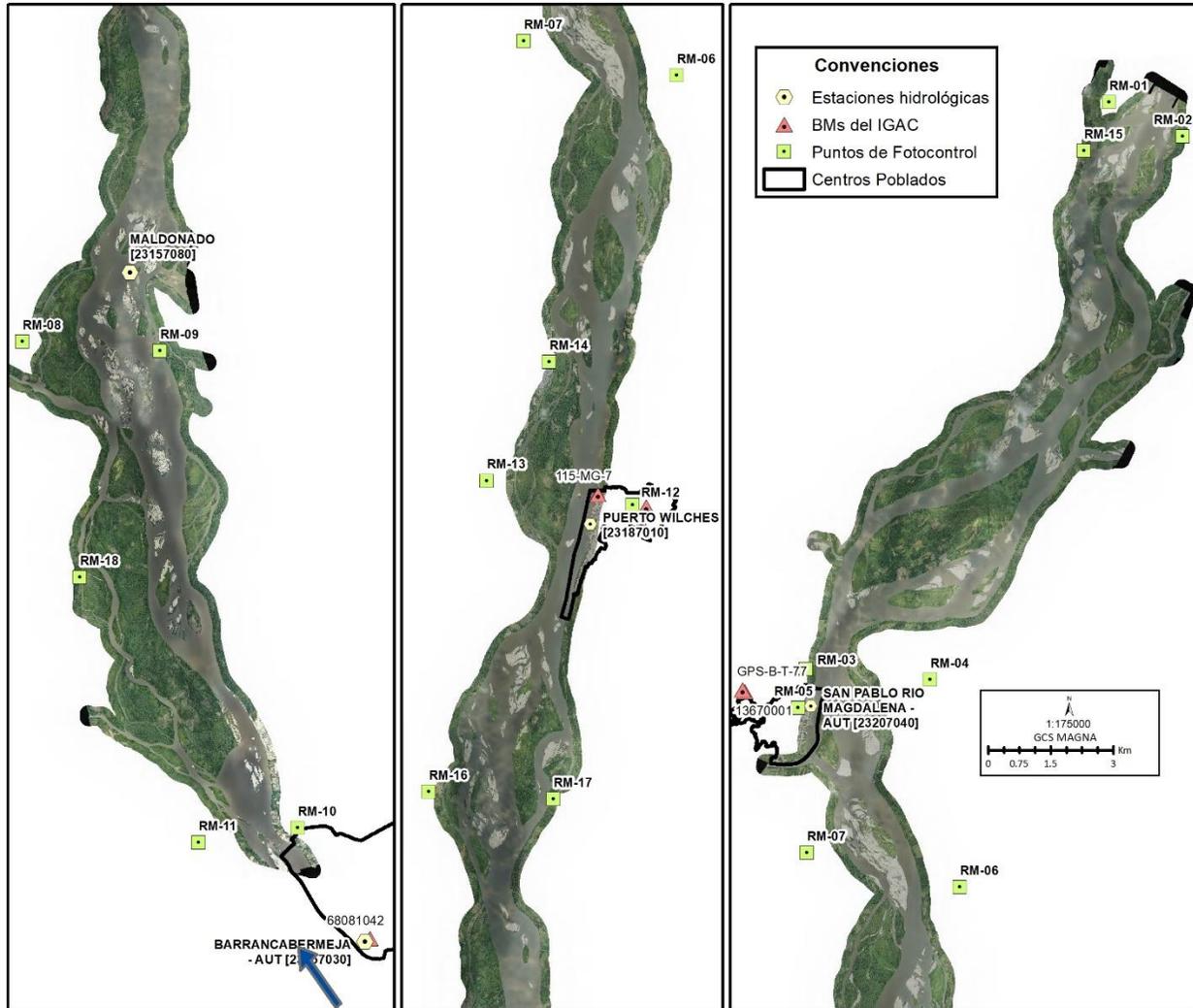


Figura 4.17 – Ortofoto de la zona del levantamiento LiDAR

4.3.4 Modelo Digital de Elevaciones de la información LiDAR

Para el procesamiento de los datos LiDAR, dirigido a la creación de los productos e insumos necesarios para la generación del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del Modelo Digital de Superficie (MDS), se ejecutaron varios procedimientos que incluyeron gestión de datos automatizados o semiautomatizados, que se describen a continuación:

- Inicialmente se realizó el proceso de emparejamiento, el cual permite mejorar la precisión y la calidad de la nube de puntos láser crudos. En el procedimiento se comparan los datos

láser de los vuelos superpuestos y se calculan los valores de corrección para los ángulos de desalineación, así como los errores de ubicación xyz.

- El cálculo del valor de comparación y corrección puede basarse en la coincidencia de superficies o en diferentes tipos de líneas de unión. La coincidencia de líneas de unión comprende puntos o líneas en superficies horizontales, verticales o inclinadas que se pueden usar para hacer coincidir las rutas de vuelo entre sí, pero también ubicaciones de puntos o líneas conocidas que permiten el ajuste de la nube de puntos láser para controlar las mediciones.
- Una vez resueltas las Trayectorias GPS y asegurada la correspondencia entre la numeración de vuelo de los puntos láser y los números de trayectoria, se calcula la etapa inicial del emparejamiento (diferencias de elevación promedio entre las líneas de vuelo).
- Los datos LiDAR emparejados se organizaron en formato LAS según la grilla especificada en la Figura 4.18 (parte izquierda). Los puntos del levantamiento en un conjunto de celdas de la grilla se muestran en la imagen de la derecha de la Figura 4.18.

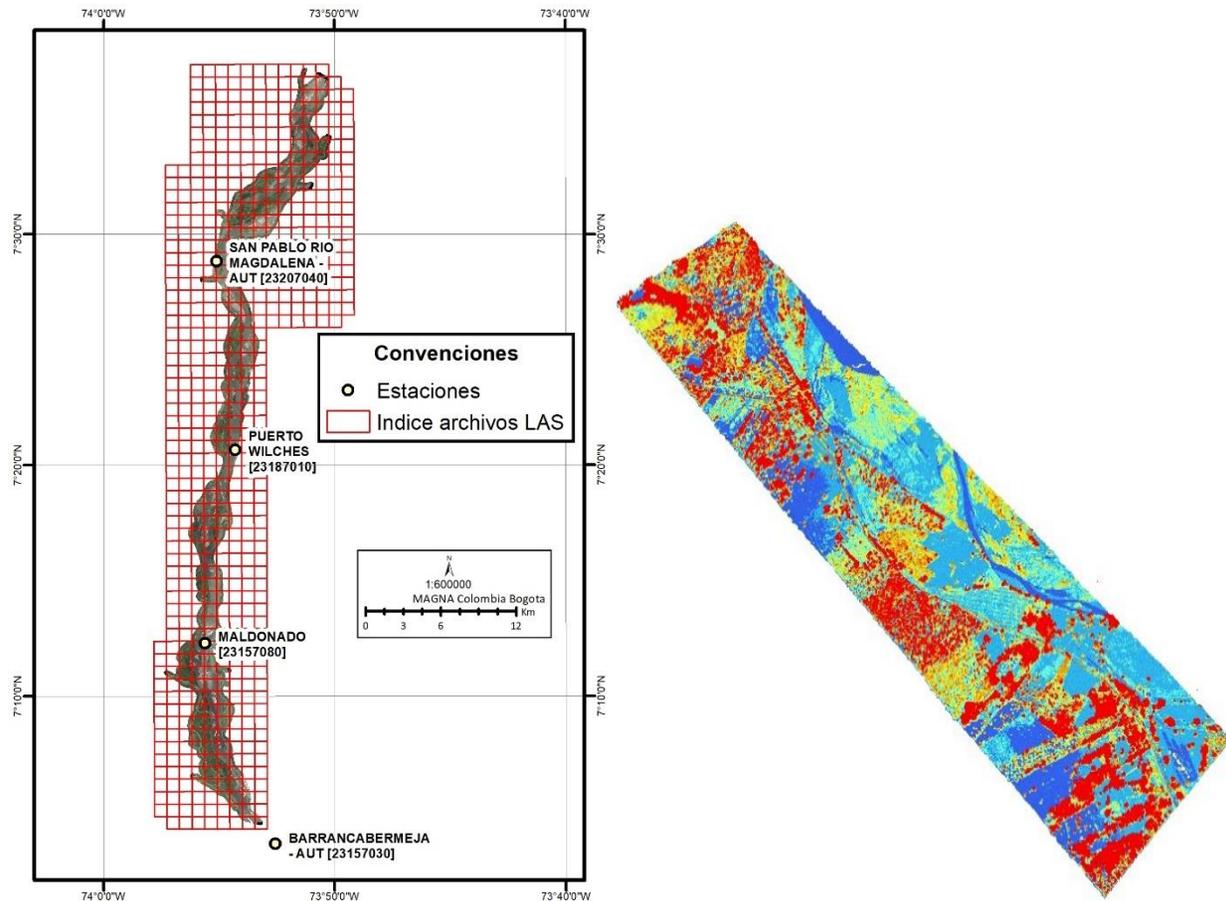


Figura 4.18 – Emparejamiento de los datos LiDAR

- Posteriormente, se realizaron los procedimientos de clasificación de los datos de separación de los datos del láser en diferentes clases. La clasificación de datos LiDAR es un proceso semiautomático, que comprende rutinas automáticas que separan los datos del láser en diferentes clases. La información fue clasificada: (1) no clasificado, (2) terreno, (7) ruido y (9) agua. Después del procesamiento automático, los datos son verificados manualmente para asegurar que las rutinas hayan clasificado los datos correctamente, como se muestra en la Figura 4.19. En la figura se muestra cómo la vegetación se ha clasificado erróneamente como terreno (parte superior) y se necesitan correcciones manuales (parte inferior).

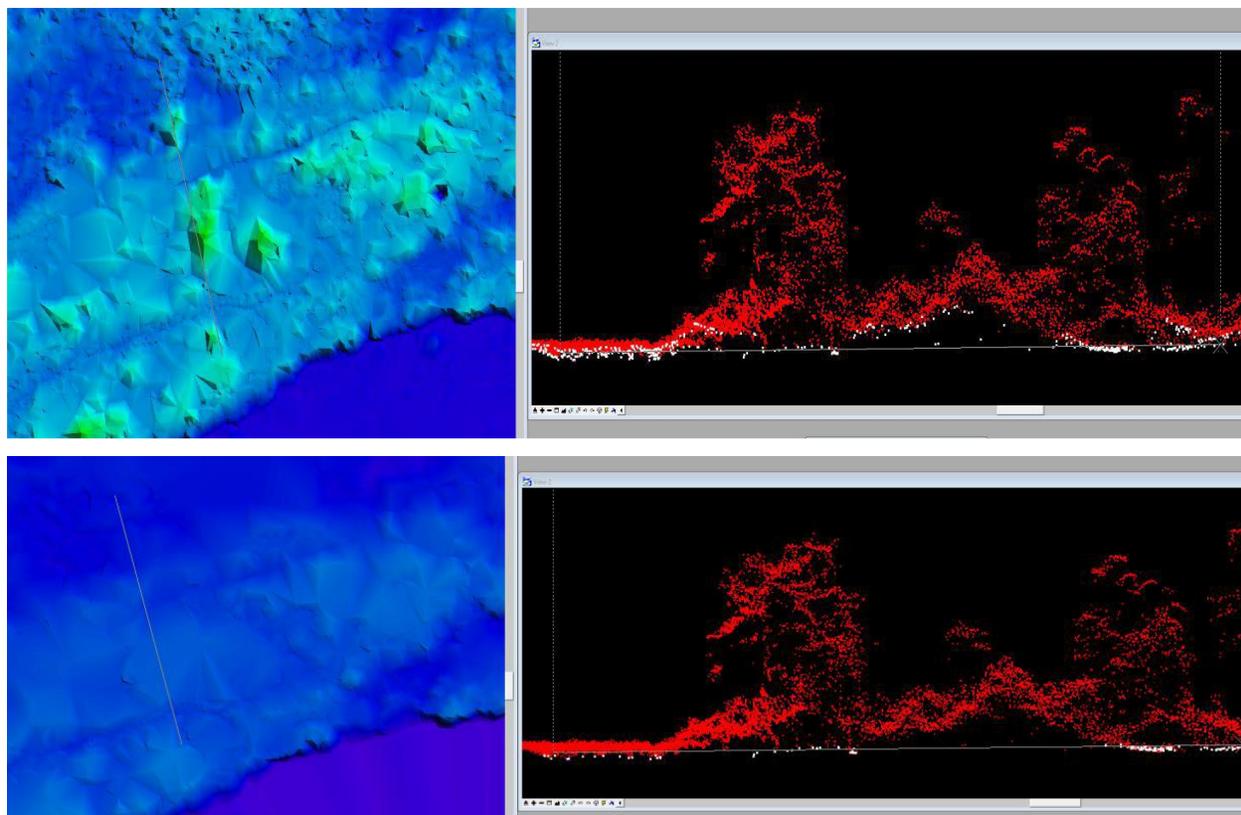


Figura 4.19 – Ejemplo de clasificación automática errónea de la vegetación (parte superior) y ajuste luego de la clasificación manual (parte inferior) (Fuente: INCIGE)

- El objetivo de la clasificación interactiva es realizar el control de calidad del proceso automático y corregir cualquier inexactitud o donde las macros no se ejecutaron correctamente. Las áreas donde surgen la mayoría de los problemas a nivel de clasificación de terreno son: pendientes y montículos, lechos de ríos, muros de contención, puentes, baja vegetación y zonas urbanas.
- La generación de los MDT y MDS se inicia con la nube de puntos LiDAR en formato LAS con las clasificaciones: sin clasificar, terreno, ruido y agua. La generación de los modelos fue realizada en el programa ArcGIS, en donde la resolución de los píxeles es de 0.50 m, como se muestra en la Figura 4.20.

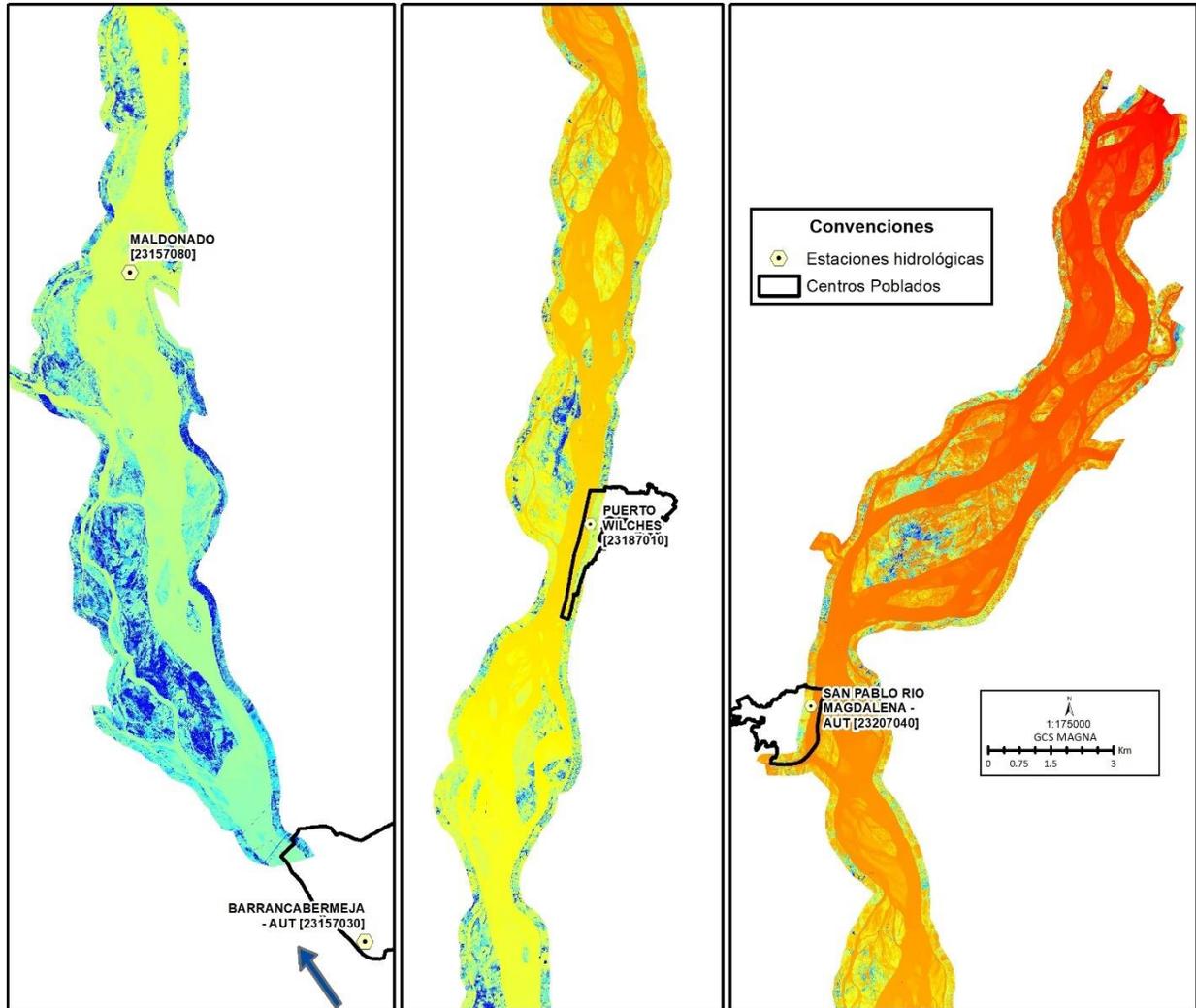
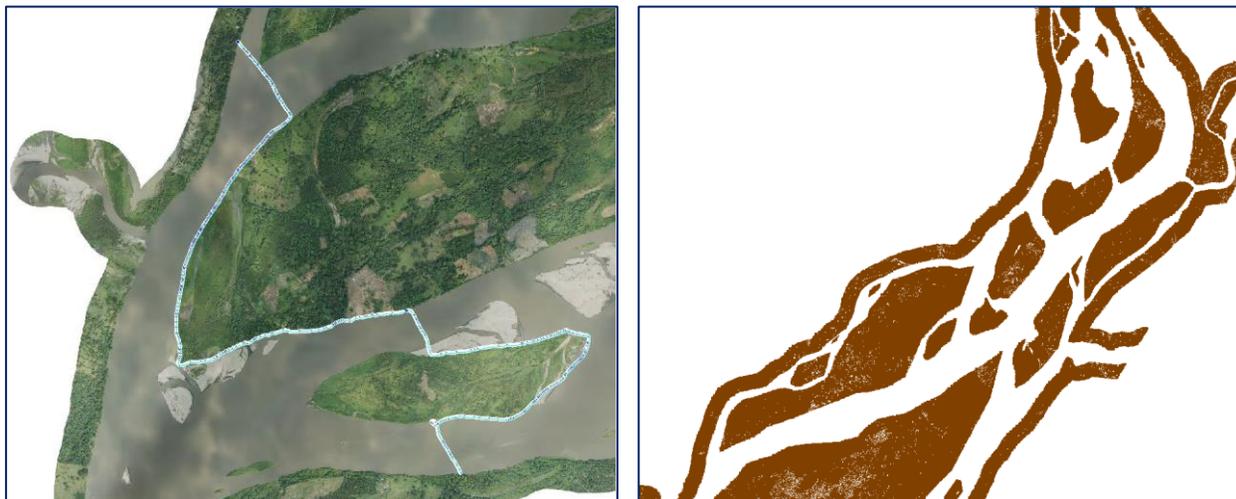


Figura 4.20 – Modelo Digital de Superficie

4.3.5 Modelo Digital de Elevaciones acoplado con las batimetrías

Teniendo los insumos anteriormente mencionados se procedió a una verificación estereoscópica en estación fotogramétrica digital de la batimetría y la nube de puntos LiDAR, como se muestra en la Figura 4.21 (a). Se procede entonces a digitalizar los bordes del río con el fin de delimitar los elementos agua y terreno, con estas líneas se harán los cortes de la nube de puntos LiDAR. En esta etapa se tienen en cuenta las islas y demás áreas de terreno existentes. Posteriormente se realiza un corte a la nube de puntos LiDAR por las líneas antes mencionadas, de tal manera que se tenga la

información clasificada como terreno en el área de interés del proyecto, como se muestra en la Figura 4.21 (b).



**Figura 4.21 – Verificación de la batimetría (parte izquierda) y corte de nube de puntos LiDAR clasificada (parte derecha).
(Fuente: INCIGE)**

Se procesa el MDT mediante el método de TIN (Red Irregular de Triángulos), tomando como insumos las secciones transversales generadas a partir de las batimetrías realizadas en la zona y la nube de puntos LiDAR recortada únicamente con la clasificación de terreno. Finalmente, se efectúa el control de calidad a la superficie generada (verificación de secciones, perfiles, etc.) y se exporta la triangulación generada a formato ráster. (GEOTIFF de 32 bits y punto flotante) con la resolución espacial (tamaño de píxel) solicitada (0.50 m x 0.50 m). En la Figura 4.22 se muestra el Modelo Digital de Terreno que tiene unificada la información del levantamiento LiDAR con la información del levantamiento batimétrico.

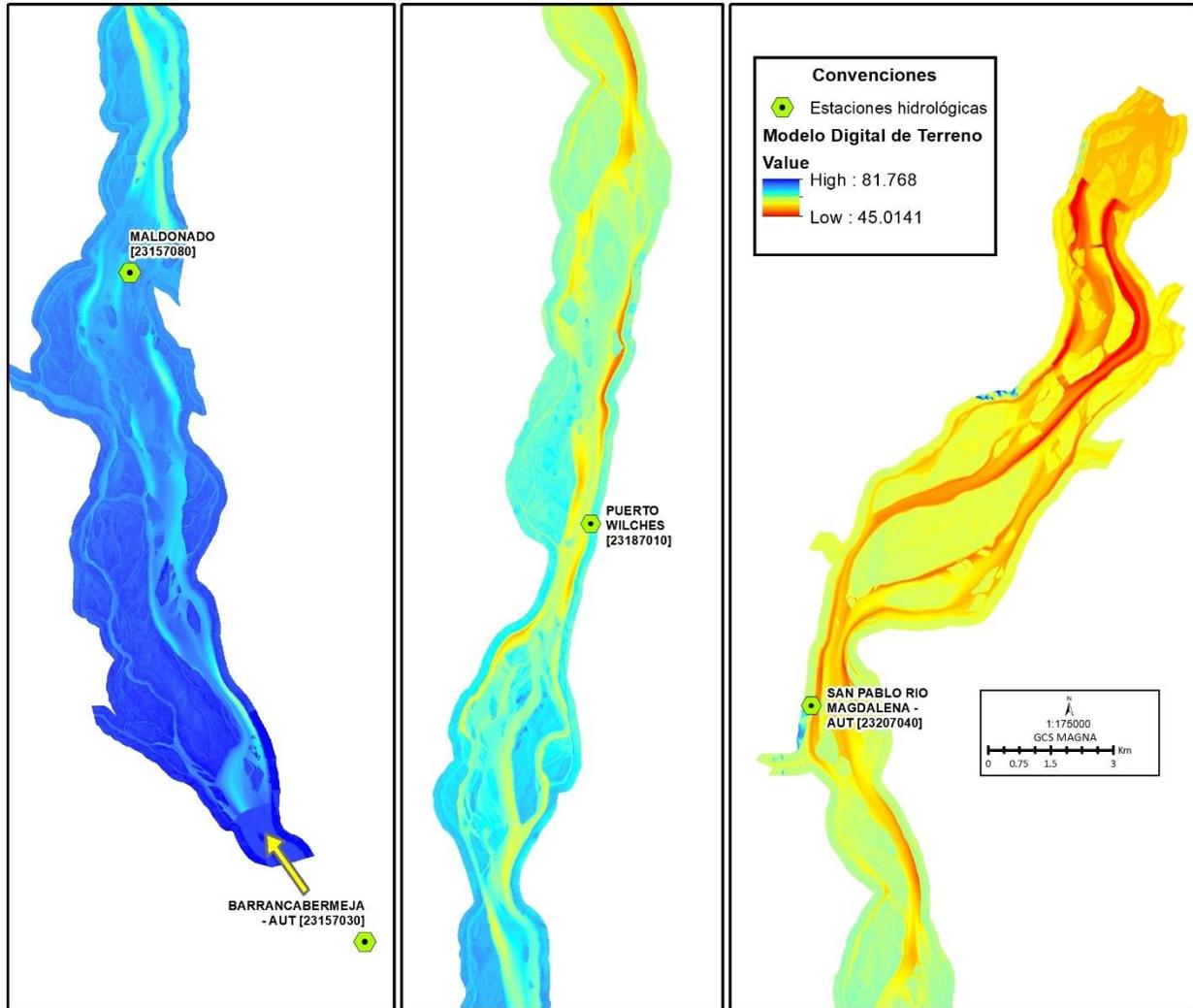


Figura 4.22 – Modelo Digital de Terreno con el acople de la batimetría y el levantamiento LiDAR

4.4 Definición de secciones transversales en el tramo del levantamiento topo batimétrico

A partir del Modelo Digital de Terreno unificado se establecieron 63 secciones transversales en el tramo en que se hizo el levantamiento topo batimétrico (LiDAR y batimetría), como se muestra en la Figura 4.23, con separaciones de aproximadamente 1 kilómetro. Se ubicaron las secciones de tal manera que en las zonas en donde se encuentran las estaciones de Puerto Wilches y San Pablo se localice una sección transversal, como es el caso de las secciones 15 y 08A, respectivamente (Figura 4.23).

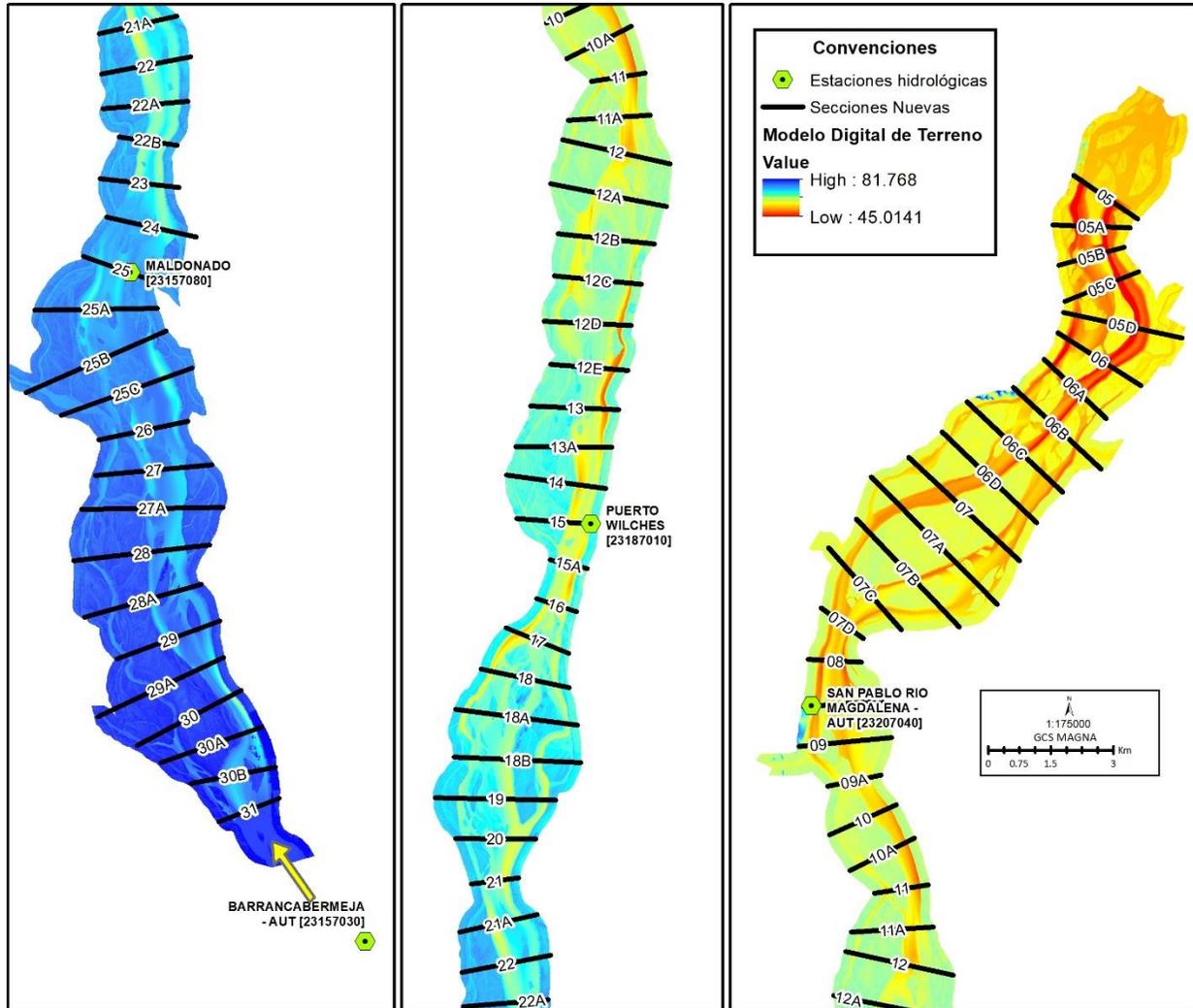


Figura 4.23 – Nuevas secciones transversales localizadas en el tramo del levantamiento topo batimétrico

Para cada una de las nuevas secciones transversales definidas en la Figura 4.23 se determinó el perfil de la sección (distancia – cota) a través del programa ArcGIS (herramienta 3D analyst), como se muestra en la Figura 4.24 a modo de ejemplo para la sección transversal 7.

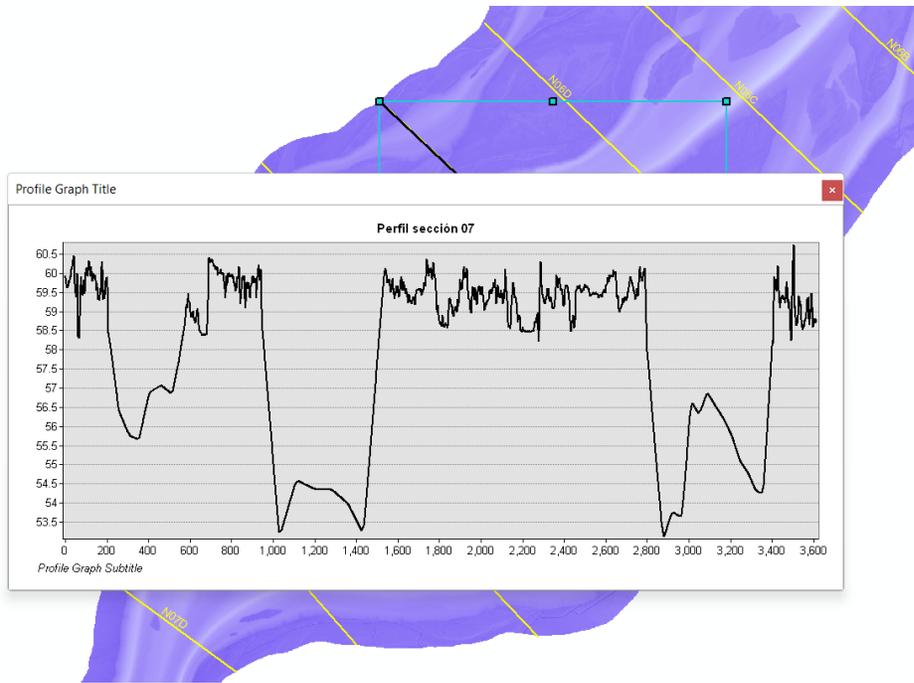


Figura 4.24 – Perfil de la nueva sección transversal 7

Los datos (distancia – cota) de las 63 nuevas secciones transversales fueron incorporados en el Anexo 4 de este informe. De la Figura 4.25 a la Figura 4.37 se muestran las 63 nuevas secciones transversales, luego de filtrar el número de datos por sección.

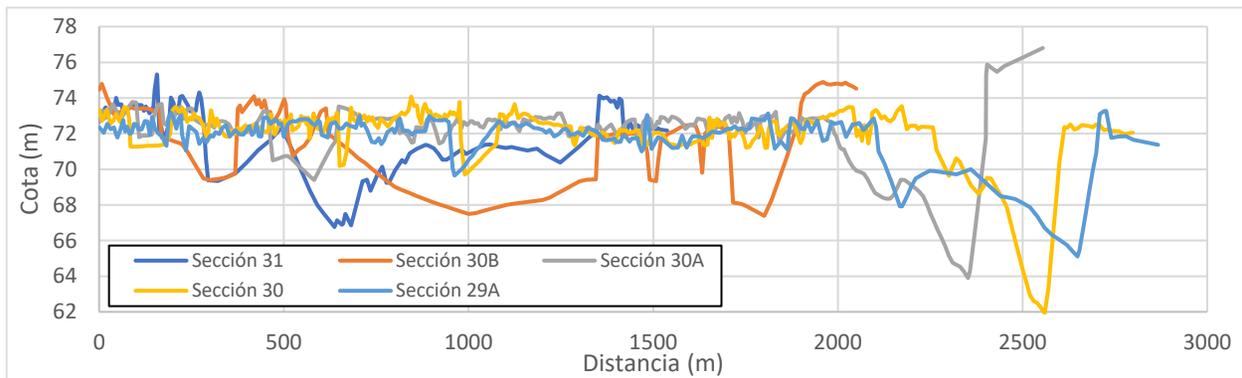


Figura 4.25 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 31 – 29A

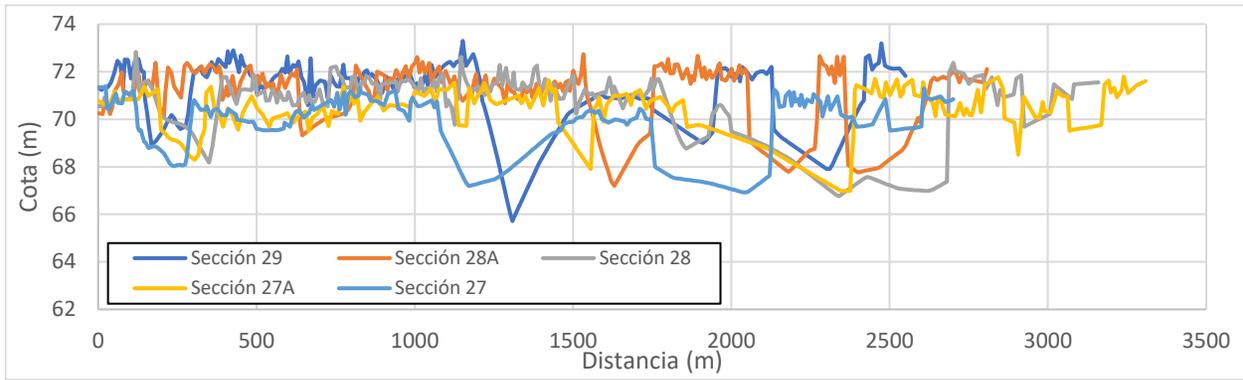


Figura 4.26 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 29 – 27

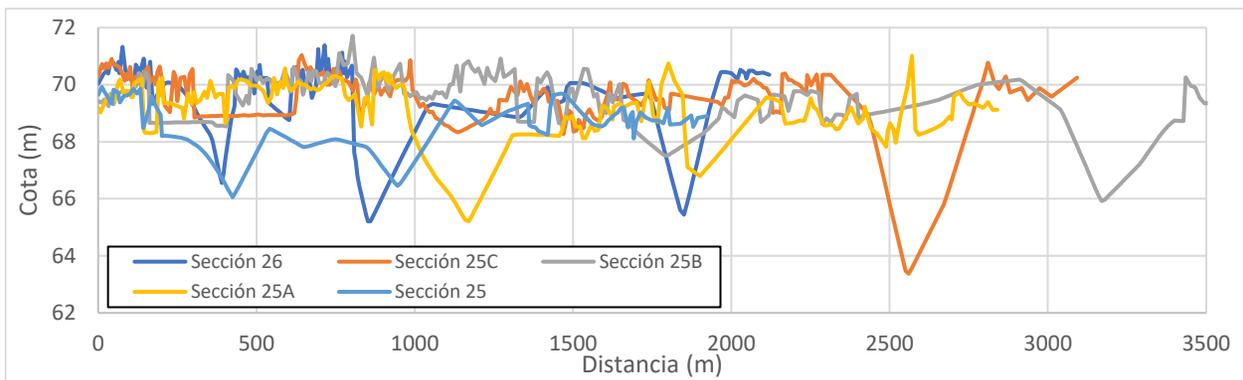


Figura 4.27 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 26 – 25

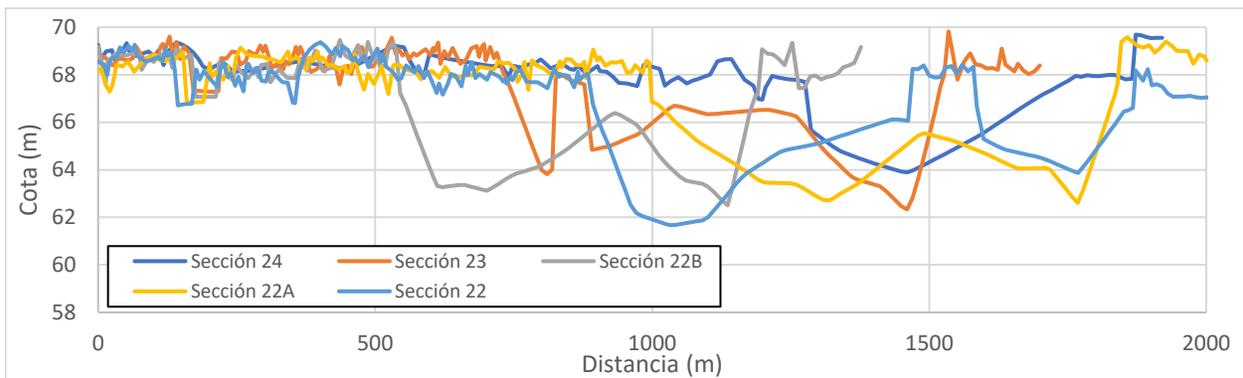


Figura 4.28 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 24 – 22

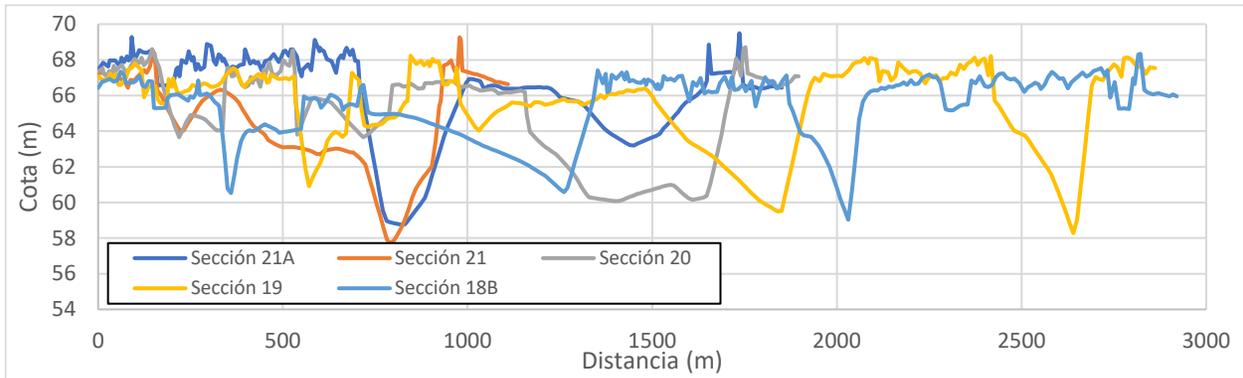


Figura 4.29 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 21A – 18B

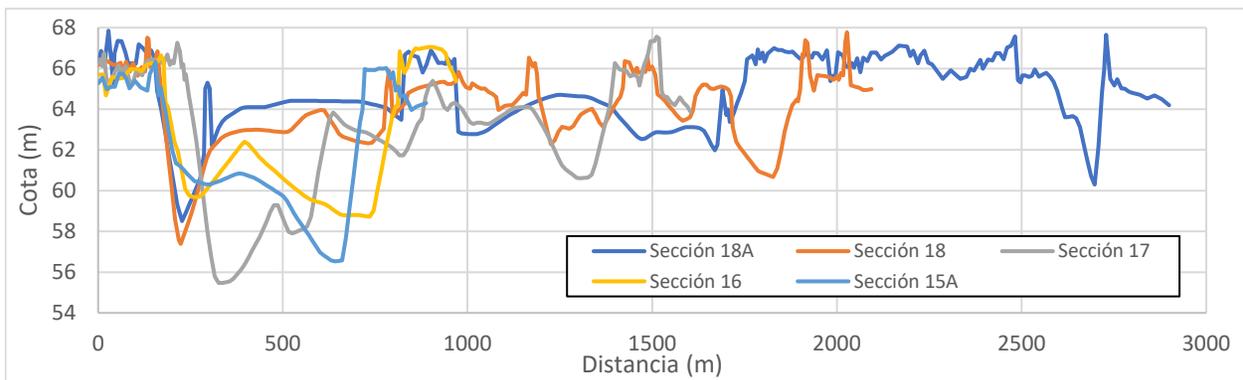


Figura 4.30 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 18A – 15A

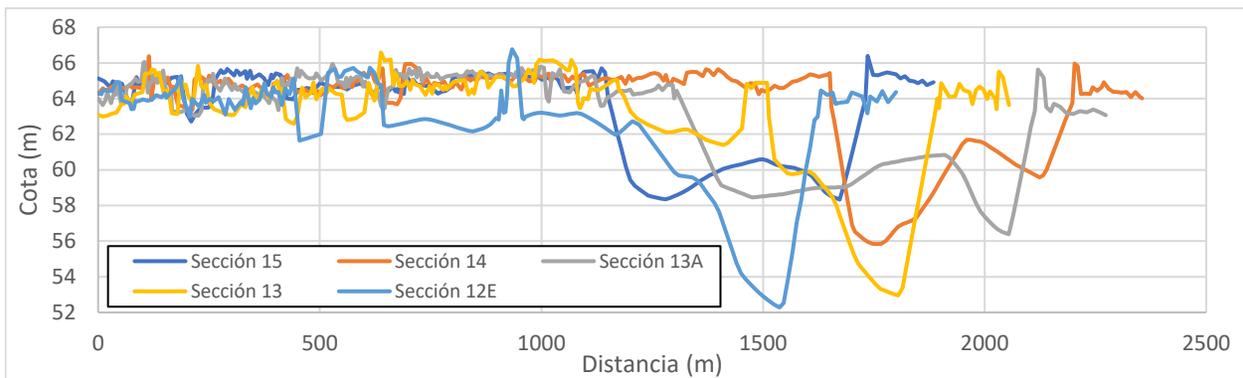


Figura 4.31 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 15 – 12E

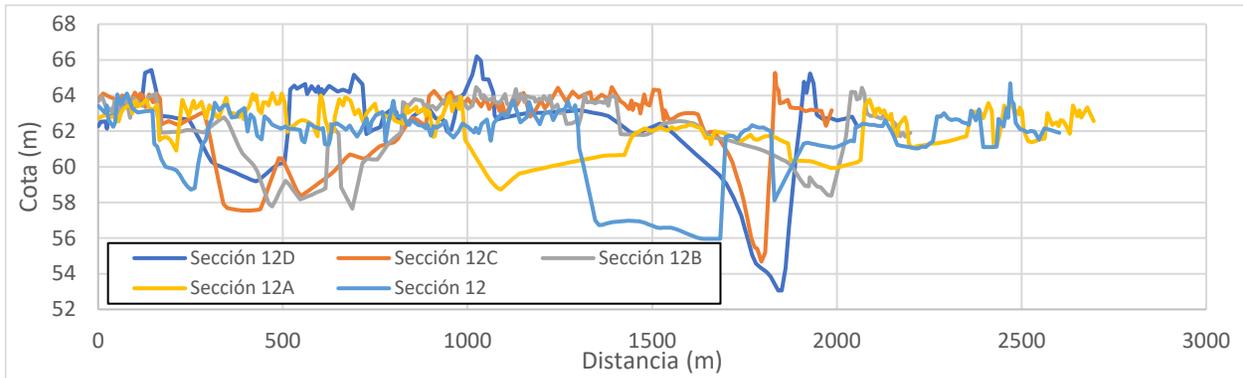


Figura 4.32 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 12D – 12

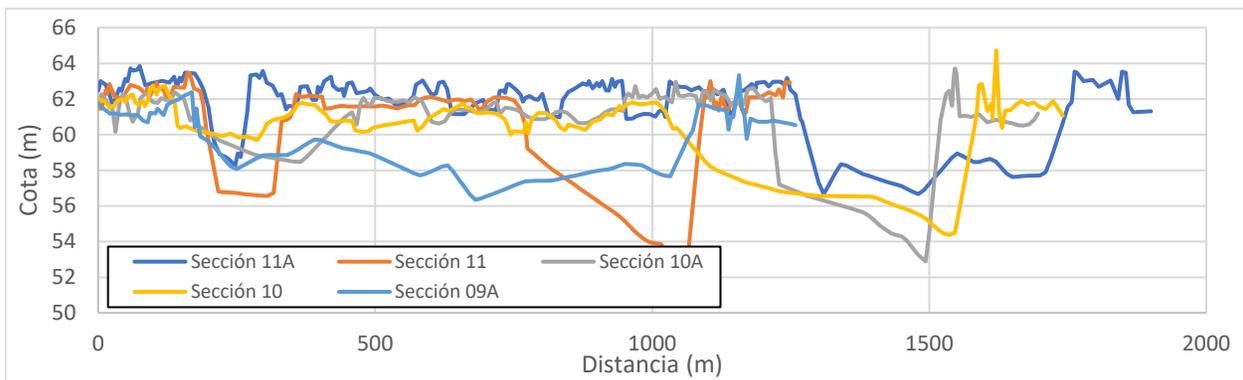


Figura 4.33 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 11A – 9A

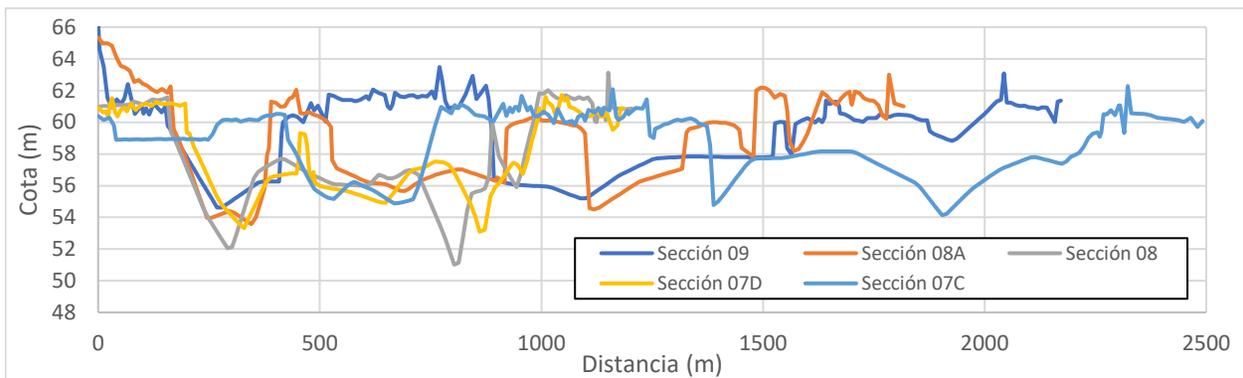


Figura 4.34 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 9 – 7C

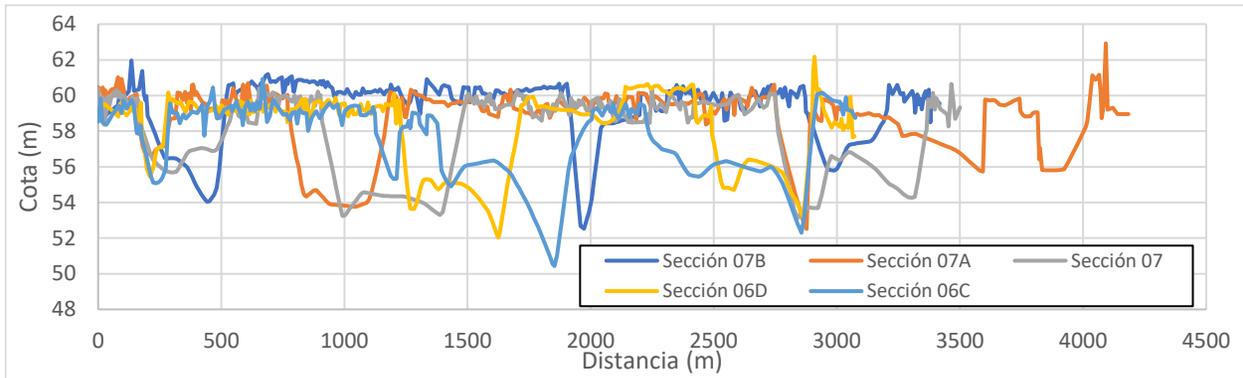


Figura 4.35 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 7B – 6C

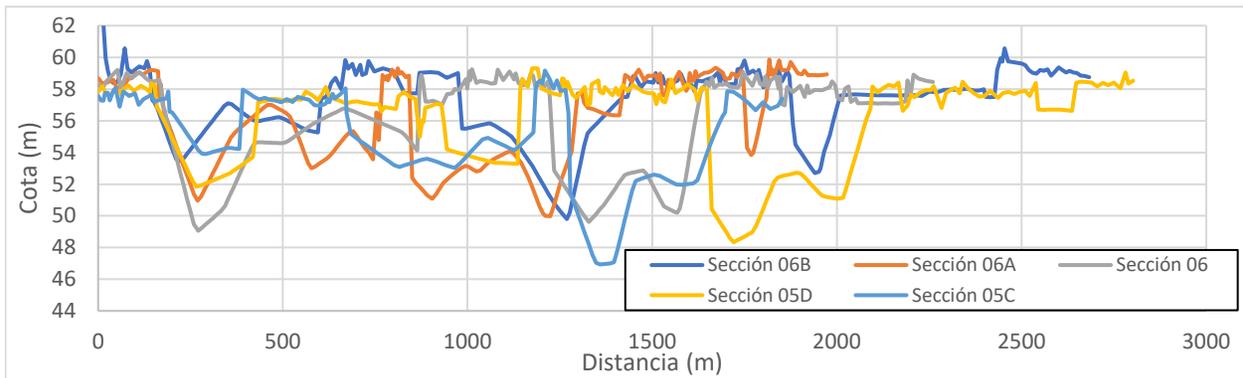


Figura 4.36 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 6B – 5C

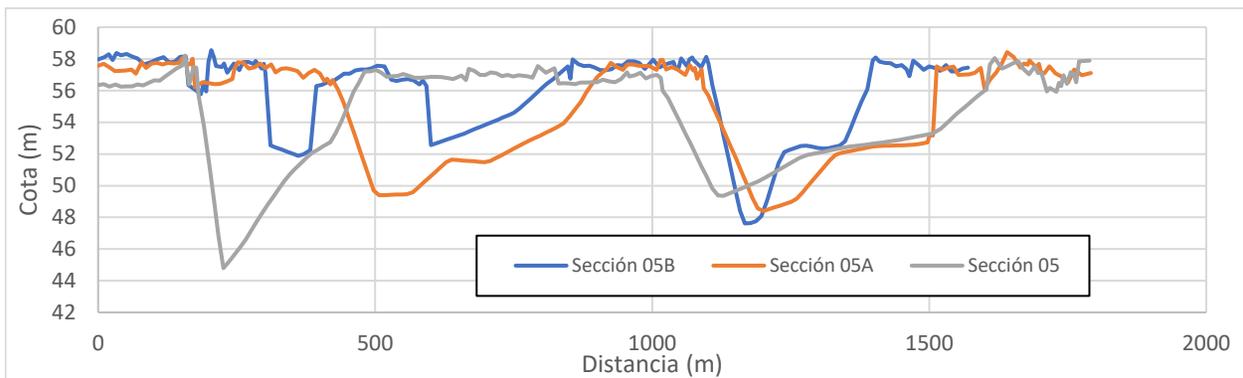


Figura 4.37 – Perfiles de las nuevas secciones transversales 5B – 5

5 Análisis de alternativas de modelos hidrológicos para el pronóstico

5.1 Conceptualización de los modelos hidrológicos

En el marco de la modelación hidrológica orientada a pronóstico existe una amplia gama de modelos, que en función de un conjunto de variables independientes intentan reproducir los flujos que conforman el ciclo hidrológico. Desde la perspectiva de los modelos basados en la física de los procesos, estos utilizan ecuaciones que a menudo son apropiadas solo en escalas espaciotemporales finas, generalmente más pequeñas que el intervalo de tiempo de los datos disponibles. Sin embargo, no existe una buena forma de escalar en el tiempo un modelo basado en la física, por lo que es necesaria la agregación de los resultados de los modelos.

Por otra parte, los modelos empíricos y conceptuales de lluvia-escorrentía a menudo se desarrollan siguiendo un enfoque de arriba hacia abajo buscando estructuras de modelos progresivamente más complejas en escalas de tiempo más finas. Los beneficios potenciales de refinar la resolución del modelo pueden verse comprometidos por las deficiencias estructurales que pueden surgir con la necesidad de aumentar la complejidad del modelo. Por lo tanto, puede existir una compensación entre la parsimonia (o robustez) del modelo y el aumento potencial en la precisión del modelo a partir de resoluciones refinadas.

De esta manera, en este capítulo se presentará el desempeño de cuatro modelos hidrológicos conceptuales a nivel diario y horario en cuanto a la estimación de caudales. Los cuatro modelos son: GR4J, TUWmodel, GR4H y GR5H, los cuales fueron evaluados para los ríos La Colorada y Sogamoso, localizados en las subzonas hidrográficas de Opón y Sogamoso, respectivamente. Cada modelo fue evaluado desde una perspectiva multinivel, es decir y para este caso el forzamiento de la variable precipitación tuvo tres productos GSMAP, MSWEP y RFmerge (i.e., mezcla de productos y datos in situ) a nivel diario, mientras que los productos WRF, GSMAP y una combinación estadística simple se usaron para la modelación horaria (únicamente en el río La Colorada). En cuanto a la temperatura únicamente se evaluó el producto MSWX (Beck et al., 2021) a una resolución de cada tres horas y su validación se realizó con los valores máximos y mínimos diarios de las estaciones en la zona estudio y disponibles en la plataforma DHIME.

Esta aproximación multinivel permitió construir ensambles hidrológicos y evaluar la capacidad que tiene esta estrategia para mejorar la estimación de caudales como consecuencia de la habilidad de los modelos y productos de compensar las debilidades de unos en función de las fortalezas de los demás. En la Figura 5.1 se muestran los elementos que conforman la modelación hidrológica nivel diario y horario que se realizó en las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso.

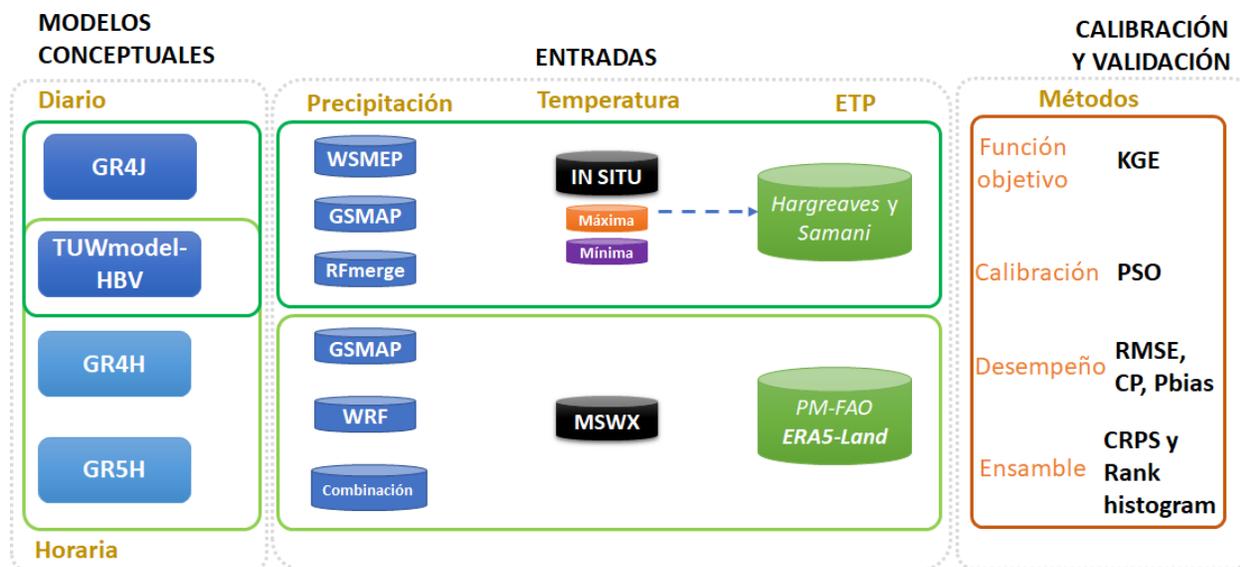


Figura 5.1 – Resumen de los modelos, forzamientos y métodos de evaluación de simulaciones hidrológicas a nivel diario y horario en las SZH de los ríos Opón y Sogamoso

A nivel diario se usaron los modelos hidrológicos GR4J y TUWmodel (basado en HVB) y a nivel horario GR4H, GR5H y TUWmodel que requieren como variables de entrada precipitación, temperatura y la evapotranspiración potencial (ETP). De estas variables únicamente cambia la precipitación que podría ser un producto o una combinación, es decir que las modelaciones serán mezclas entre productos de precipitación y modelos. Cada mezcla consideró como función objetivo el KGE calibrado mediante el algoritmo PSO.

5.2 Estaciones de validación y períodos de modelación

5.2.1 Estaciones de validación

Dentro de cada una de las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso existe una sola estación automática con telemetría que reporta niveles de agua (y caudales a través de las curvas de gasto) de los ríos La Colorada y Sogamoso, respectivamente. En la Tabla 5.1 se presentan detalles de la estación existente en las dos subzonas hidrográficas.

Tabla 5.1 – Detalles de las estaciones hidrológicas automáticas y con telemétrica que fueron usadas en la modelación hidrológica a nivel horario y diario

Código	Nombre	Subzona hidrográfica	Tecnología	Fecha de instalación	Altitud (m)	Latitud (°)	Longitud (°)
24067020	PUENTE SOGAMOSO - AUT [24067020]	Sogamoso	Automática con Telemetría	1992-08-14	90	7.244	-73.7875
23147040	AYACUCHO - AUT [23147040]	Opón	Automática con Telemetría	1992-10-14	101	6.855	-73.7693

Para las dos estaciones de la Tabla 5.1 se recopiló la información de caudales para el período 01/06/2020 – 31/12/2019, como se muestra en la Figura 5.2. De la figura se puede observar que las dos estaciones tienen series de tiempo que cubren la mayor parte del tiempo dentro del período seleccionado. En el caso de la estación Ayacucho falta un 25 % de los datos (rectángulos rojos en la Figura 5.2) y en la estación Puente Sogamoso falta un 3 %. Es importante, mencionar que en caso de los registros faltantes (años 2012-2016) de la estación Ayacucho no se realizó ningún tipo de rellenado de datos. Esta última actividad si se llevó a cabo para el resto de la serie de tiempo y de la misma forma para los datos de caudal faltantes en la estación Puente Sogamoso por medio de una interpolación lineal.

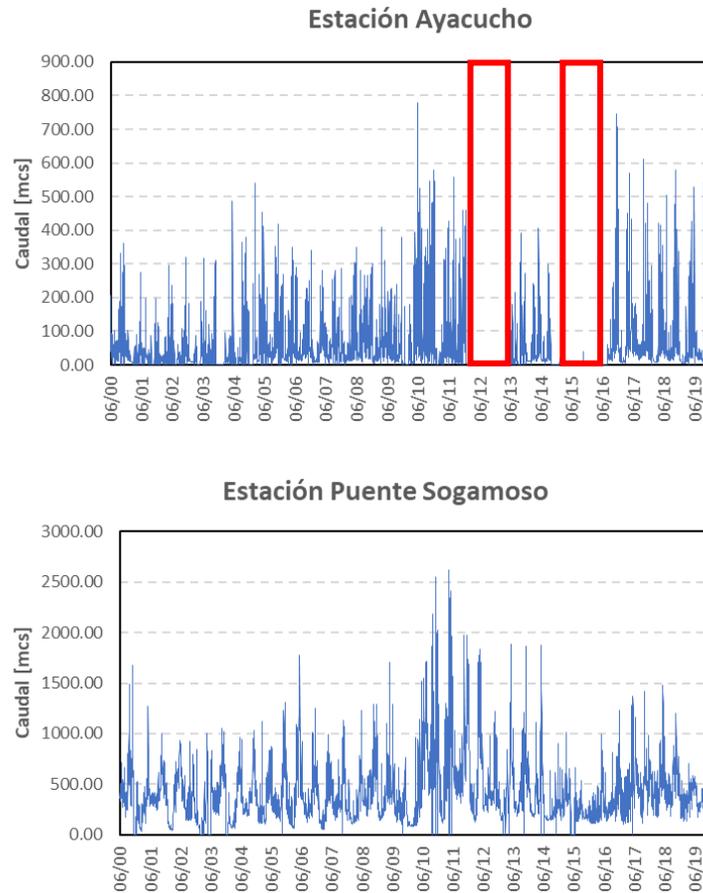


Figura 5.2 – Series de tiempo de caudal diario en las estaciones Ayacucho y Puente Sogamoso para el periodo 2000-2019

En la serie de tiempo caudal horario de la estación Ayacucho para el periodo 08/2019 a 08/2020 no cuenta con registros cada hora sino cada 12 horas. Como consecuencia de esta condición se tomaron los datos de los niveles horarios de la misma estación y se construyó una curva de gasto para estimar los caudales horarios en las horas y días sin esta información. De la serie de tiempo de nivel cada 12 horas hacían falta el 14% de los datos, los cuales fueron rellenados por medio de una interpolación lineal. En la Figura 5.3 se presenta la serie de tiempo original de caudales cada 12 horas disponible en el DHIME.

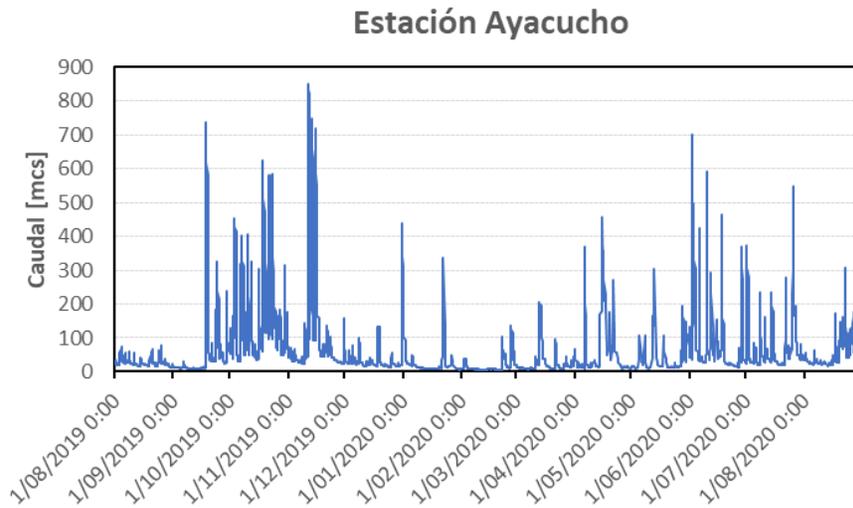


Figura 5.3 – Serie de tiempo de caudales cada 12 horas en la estación Ayacucho para periodo 2019-08 al 2020-08

5.2.2 Períodos de modelación

Para la evaluación de los modelos hidrológicos y sus forzamientos fueron seleccionados tres períodos para desarrollar el calentamiento, la calibración y la validación. A nivel diario la ventana de tiempo que cubre el ejercicio de modelación empieza el 1 de junio de 2000 y finaliza el 31 de diciembre de 2019, como se muestra en la Figura 5.4. Es importante señalar que en la etapa de validación, en el período entre los puntos de color negro y gris se presentó un porcentaje importante de datos faltantes en la serie de tiempo de caudal de la estación Ayacucho (SZH del río Opón), como se detalla más adelante.



Figura 5.4 – Definición de los periodos de calentamiento, calibración y validación para los ejercicios de modelación hidrológica nivel diario (SZH Opón y Sogamoso)

Con respecto a la modelación a nivel horario, en la Figura 5.5 se presentan los períodos de calentamiento, calibración y validación que cubre la ventana de tiempo del 1 de agosto de 2019

(00:00 am) hasta el 31 de agosto de 2020 (23:00 pm). Es importante resaltar que la modelación hidrológica a esta resolución temporal únicamente se realizó para la SZH del río Opón.



Figura 5.5 – Definición de los periodos de calentamiento, calibración y validación para los ejercicios de modelación hidrológica nivel horario (SZH Opón)

En los siguientes numerales se presentan los resultados de las modelaciones hidrológicas, a través de un conjunto de gráficos y tablas que abordan las etapas de calibración y validación, conformación del ensamble y su desempeño. Los gráficos de series de tiempo de caudal son presentados únicamente para la etapa de calibración, pero en las tablas se puede observar los resultados para ambas etapas.

5.3 Modelación a nivel diario en el río La Colorada, SZH Río Opón

5.3.1 Series de tiempo de la modelación multinivel

En la estación Ayacucho sobre el río La Colorada, se observa que la propuesta de modelación multinivel tuvo un amplio espectro de comportamientos por parte de cada una de las combinaciones modelo-forzamiento, como se observa en la Figura 5.6. Esta condición se refleja en aspectos tales como hidrogramas simulados con caudal base del resto de combinaciones como el caso de RFMerge-TUWmodel o caudales máximos por encima de los valores registrados. En el gráfico a la derecha de la Figura 5.6 se observa un análisis sobre el año 2006, en donde la combinación que tiende a representar mejor la hidrógrafa observada en la etapa de calibración es la combinación RFMerge - GR4J.

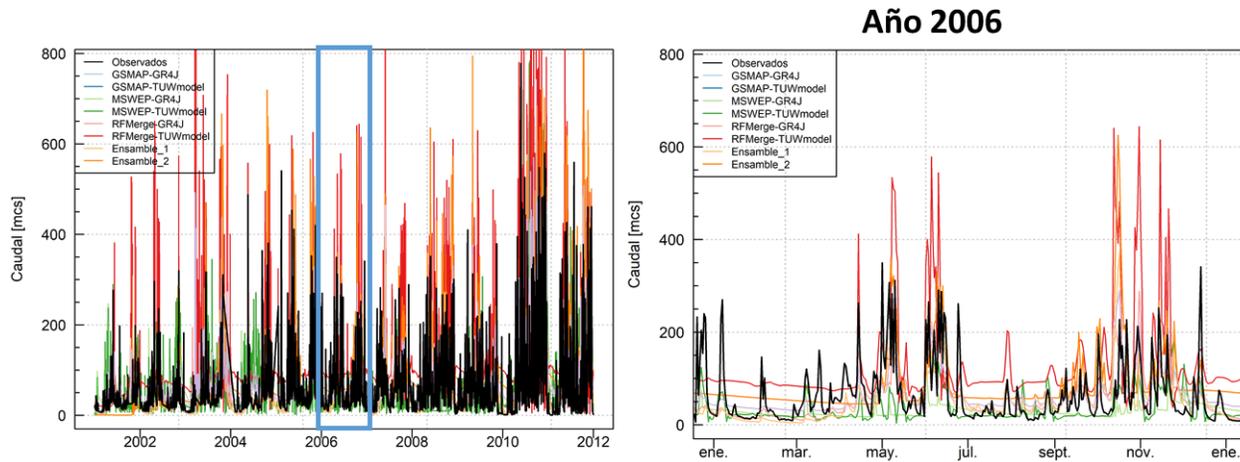


Figura 5.6 – Series de tiempo obtenidas en la etapa de calibración a nivel diario de las combinaciones de modelos y forzamientos (Izq.) y un zoom sobre el año 2006 (Der.) en la estación Ayacucho de la SZH del río Opón

A pesar de la enorme variabilidad en las respuestas de modelo-forzamiento en la estación Ayacucho a nivel diario, los ensambles hidrológicos, con la media (línea de color morado claro) y la mediana (línea de color anaranjado), permitieron evidenciar mejoras sustanciales en la representación de caudales, compensando las debilidades de modelos y forzamientos con ellos mismo, como se observa en la Figura 5.7 para el año 2006. En la figura se evidencia que los dos ensambles tienden a estar más próximos a los picos, pero una sobreestimación de los caudales base. Esto se puede asociar a que varios de los miembros, principalmente los asociados al modelo TUWmodel tienen muy bajo desempeño, como ocurre con la combinación MSWEP-TUWmodel.

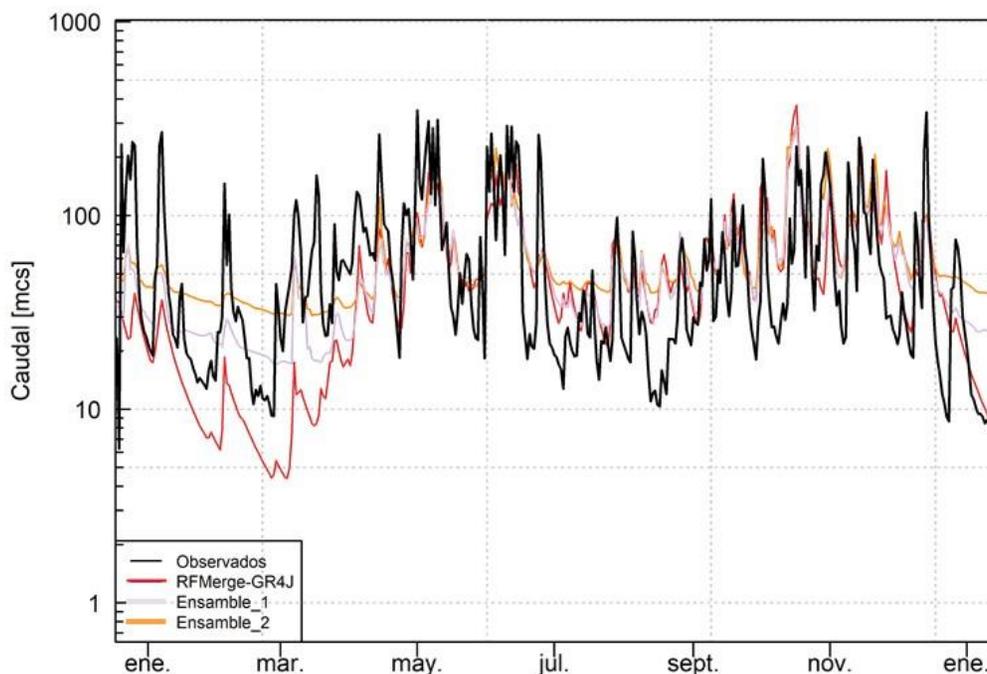


Figura 5.7 – Serie de tiempo de caudales diarios de la mejor combinación (modelo-forzamiento), ensambles (media - color púrpura claro y mediana - color anaranjado) y valor observado para el año 2006 en la estación Ayacucho

En la Tabla 5.2 se presentan los resultados del conjunto de parámetros que generaron un mejor desempeño en el modelo GR4J y en la Tabla 5.3 se presentan los resultados asociados al modelo TUWmodel. La magnitud de los parámetros obtenidos con el forzamiento GSMAP, en general, son bastante diferentes con respecto a los reportados para MSWEP y RFmerge, en ambos modelos. De resaltar que para la estación Ayacucho el modelo GR4J reportó los mejores resultados para cada uno de los forzamientos evaluados con excepción de GSMAP.

Tabla 5.2 – Parámetros calibrados del modelo GR4J para la estación Ayacucho

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – GR4J	MSWEP - GRAJ	RFMerge – GR4J
KGE	0.32	0.41	0.59
X1	6.26	700.10	449.05
X2	-30.86	-11.71	-6.22

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – GR4J	MSWEP - GRAJ	RFMerge – GR4J
X3	1291.17	96.74	63.20
X4	0.54	1.14	1.64

Tabla 5.3 – Parámetros calibrados del modelo TUVmodel para la estación Ayacucho

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – TUVmodel	MSWEP - TUVmodel	RFMerge – TUVmodel
KGE	0.35	-0.18	0.26
SCF	1.45	1.35	0.93
DDF	2.48	3.70	2.15
Tr	1.77	2.39	1.21
Ts	-0.96	-0.92	-1.23
Tm	-0.46	0.58	1.65
LPrat	0.43	0.11	0.07
FC	515.62	598.16	599.48
Beta	0.92	3.99	19.92
k0	1.04	1.21	0.35
k1	3.01	13.95	6.36
k2	114.98	249.68	249.82
lsuz	73.49	5.55	4.07
cperc	0.62	2.73	2.60
bmax	14.05	22.86	12.06
croute	16.70	4.41	47.60

5.3.2 Análisis de sensibilidad

En la Figura 5.8 se muestra el análisis de sensibilidad de los cuatro parámetros del modelo GR4J para la modelación realizada con el forzamiento RFMerge, en donde el rendimiento de los parámetros se muestra para $KGE \geq 0.3$. La línea roja vertical indica el valor de parámetro óptimo encontrado durante la calibración, mientras que la línea roja horizontal muestra el mejor

rendimiento del modelo correspondiente. Se observa que los parámetros X2 (coeficiente de intercambio) y X3 (capacidad de almacenamiento de enrutamiento) son los parámetros más sensibles, mientras que el parámetro X1 (capacidad de producción de almacenamiento de humedad del suelo) es el menos sensible, es decir que un rango más amplio de este parámetro se pueden obtener valores de KGE similares.

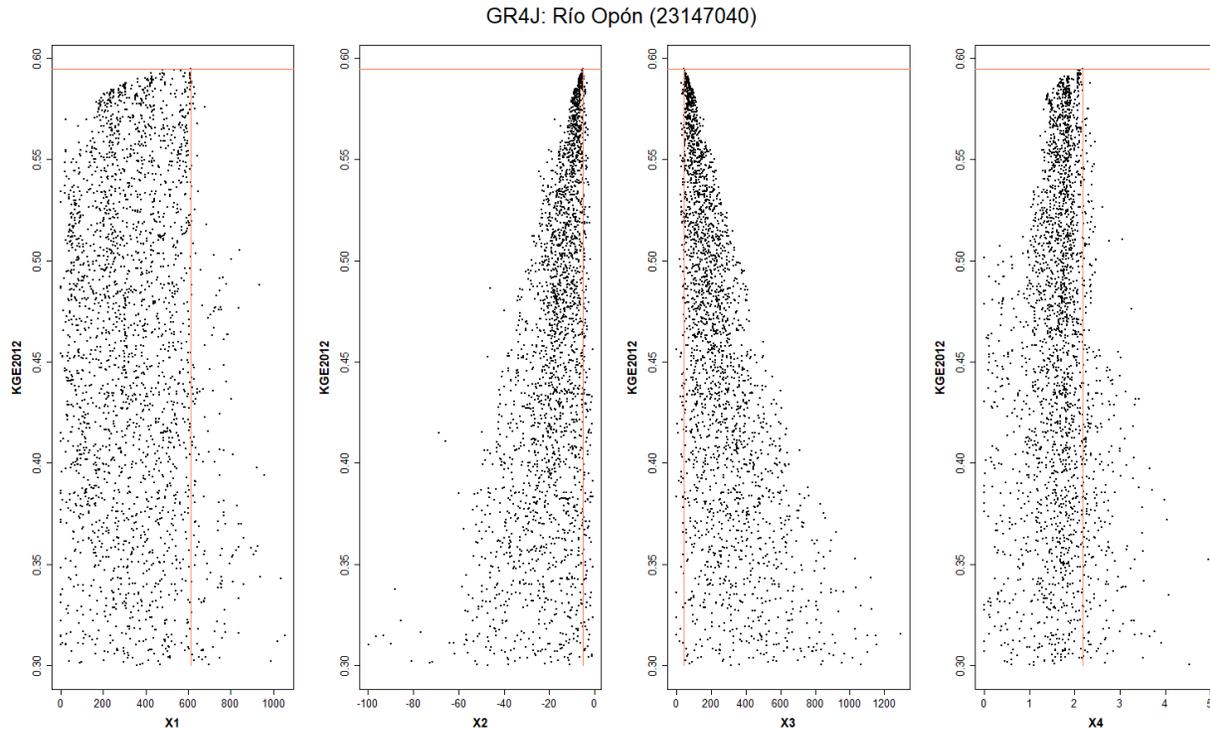


Figura 5.8 – Gráficos de dispersión entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y la función objetivo obtenidos en la etapa de calibración (diaria) por medio del algoritmo PSO – Estación Ayacucho

En la Figura 5.9 se muestra la relación paramétrica de la estructura del modelo GR4J en el proceso de calibración. Los paneles superiores evidencian la magnitud de la correlación lineal de Pearson entre los parámetros y la función objetivo, donde sobresale la relación de X2 y X3 (relación directamente proporcional), y de estos dos parámetros con el KGE con correlaciones positivas superiores a 0.5. En la diagonal de la figura se presenta el histograma de la distribución de los parámetros y del KGE, evidenciando que X4 tiene un rango que fue utilizado en la mayoría de las simulaciones y que tiende a ser más central a diferencia de los parámetros X2 y X3 que tiene un sesgo marcado a la izquierda y derecha, respectivamente.

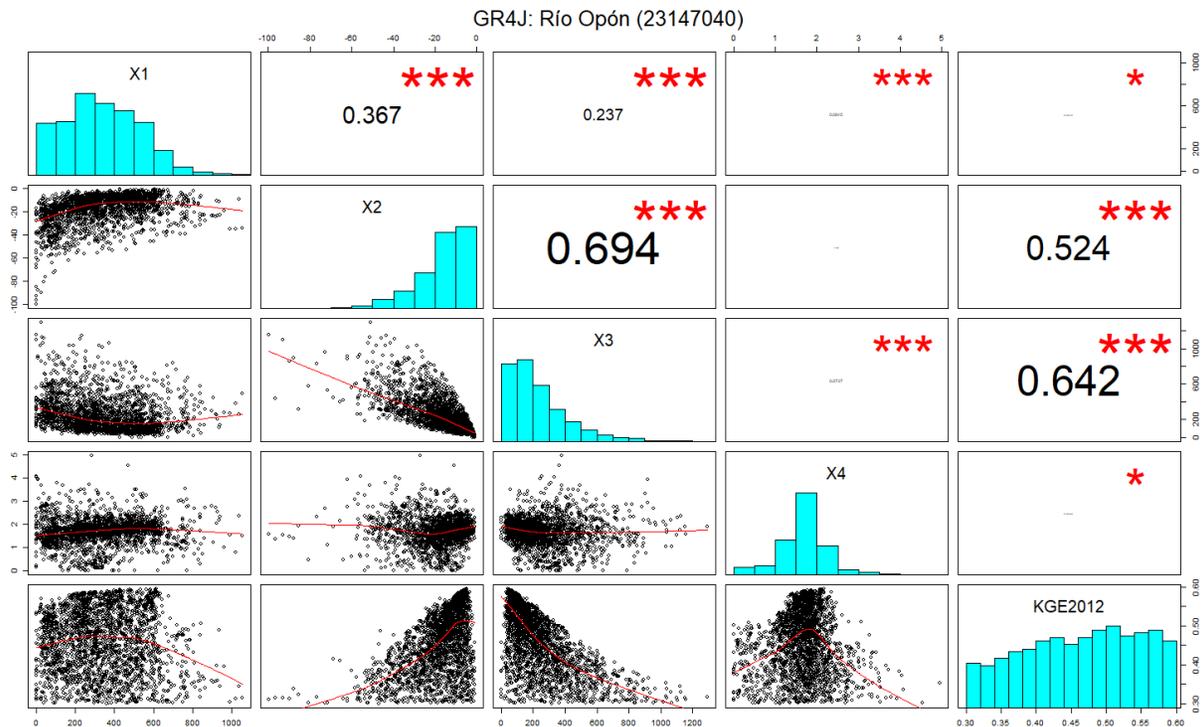


Figura 5.9 – Gráficos de correlación, histogramas y coeficiente de correlación de Pearson entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y la función objetivo (KGE) de la calibración diaria en la estación Ayacucho

5.3.3 Desempeño determinístico – Estación Ayacucho

El desempeño de los modelos y sus forzamientos fueron evaluados con cuatro métricas, como se muestra en la Tabla 5.4 (calibración) y la Tabla 5.5 (validación). A continuación, se realiza una descripción de los desempeños de acuerdo con las 4 métricas:

- Los mayores errores RMSE se reportan para el modelo TUWmodel, pero se reducen sustancialmente al combinar sus resultados con las salidas GR4J tanto en calibración como en validación. Los valores altos del RMSE en el modelo TUWmodel se deben a la tendencia marcada que tiene este modelo a sobreestimar los caudales indistintamente del forzamiento de precipitación utilizado y que se valida con los porcentajes positivos del PBias.
- Los porcentajes de Pbias del modelo GR4J fueron superiores al -3%, es decir bajas subestimaciones. Por otra parte, como consecuencia de una señal más predominante del modelo TUWmodel, los resultados de los ensambles en términos del PBias tienden a ser mucho mayores con respecto al mejor modelo, principalmente en el caso del ensamble 1

(media). De esta forma, se observa que la selección de los miembros (modelos) y del estadístico que conforma el ensamble influyen el desempeño.

- Los negativos del índice de persistencia (IP) evidencian que ninguno de los modelos tuvo un ajuste positivo que indique un ajuste aproximado entre los caudales pronosticados y observados. Un valor negativo implica que el modelo es menos eficiente que el modelo de persistencia. El valor del criterio refleja principalmente el desempeño durante las inundaciones, ya que es un criterio cuadrático. De esta manera, los mejores resultados se obtuvieron en los ensambles y la combinación RFMerge-GR4J y que fueron positivos en la etapa de validación.

Tabla 5.4 – Resultados de las métricas desempeño evaluadas en la estación Ayacucho para las modelaciones hidrológicas a nivel diario – Fase de calibración

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m ³ /s)	PBIAS (%)	IP	KGE
GSMAP – GR4J	86.59	-2.3	-0.91	0.31
GSMAP – TUWmodel	101.88	14.2	-1.65	0.30
MSWEP - GR4J	80.96	-1.4	-0.67	0.40
MSWEP - TUWmodel	138.89	98	-3.92	-0.34
RFMerge – GR4J	70.28	-0.3	-0.26	0.59
RFMerge – TUWmodel	103.25	48	-1.72	0.19
Ensamble 1	75.32	26	-0.45	0.47
Ensamble 2	71.74	11.7	-0.31	0.52

Tabla 5.5 – Resultados de las métricas desempeño evaluadas en la estación Ayacucho para las modelaciones hidrológicas a nivel diario – Fase de validación

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m ³ /s)	PBIAS (%)	IP	KGE
GSMAP – GR4J	101.37	44.9	-0.34	0.13
GSMAP – TUWmodel	114.16	63.7	-0.71	0.14
MSWEP - GR4J	95.04	-11.7	-0.18	0.26
MSWEP - TUWmodel	146.20	72.5	-1.80	-0.11

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m³/s)	PBIAS (%)	IP	KGE
RFMerge – GR4J	75.23	-8.2	0.26	0.53
RFMerge – TUWmodel	105.74	49.8	-0.46	0.26
Ensamble 1	85.60	35.2	0.04	0.36
Ensamble 2	79.72	21.1	0.17	0.38

5.3.4 Desempeño probabilístico - Estación Ayacucho

Revisión probabilística del desempeño del ensamble se realizó únicamente con una evaluación gráfica del histograma de rangos para determinar la confiabilidad de los pronósticos por ensambles y para diagnosticar errores en su media y dispersión. Los resultados que se presentan en la Figura 5.10 señalan que el ensamble tiene una tendencia clara a sobrestimar los caudales (es decir un sesgo a la izquierda), ya que en la mayoría de los ránkines realizados el valor observado queda en la posición uno a tres, mientras que los simulados los sobrepasan tanto en la calibración como en la validación.

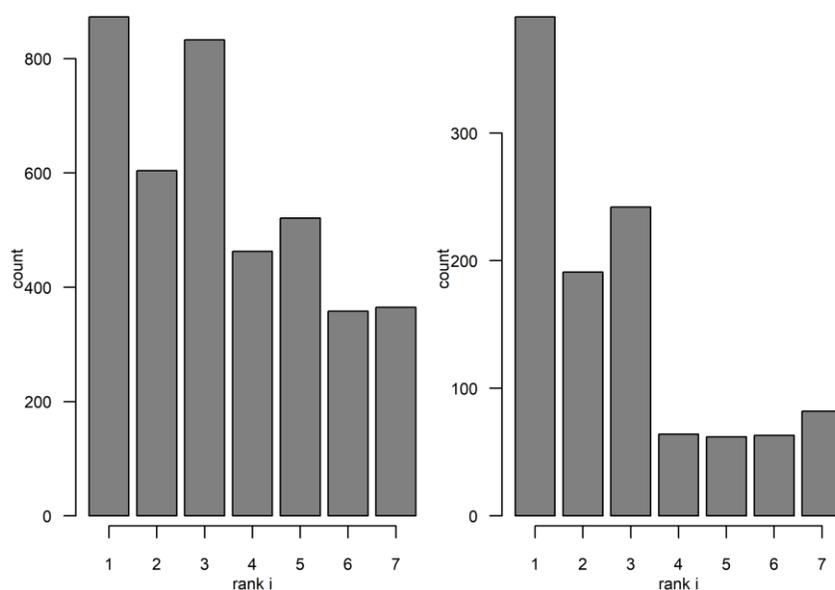


Figura 5.10 – Histograma de rango en las etapas de calibración (Der.) y validación (Izq.) para el ensamble de modelos hidrológicos (diario) en la estación Ayacucho

5.3.5 Incertidumbre

En este literal se presenta la evaluación de la incertidumbre enfocada en la estimación de los intervalos de confianza (IC) del 95 % para los caudales simulados que conforman los ensambles desde junio de 2000 a diciembre de 2019. La estimación de los IC se realizó por medio de un método de remuestreo o bootstrapping con sesgo corregido y acelerado (Solanas y Sierra, 1992; Peng, 2008). Figura 5.11 se presenta toda la serie de tiempo diaria para el periodo de calibración donde se muestra en color azul claro el IC, la línea de color rojo el ensamble (media) y la línea de color negro es el valor observado. El IC tiene un amplio rango de valores, el límite superior llega hasta 1300 m³/s en el mes de abril de 2003 que sobrepasa por alto margen al valor observado. Con respecto al límite inferior se puede observar valores bajos, pero superiores a cero.

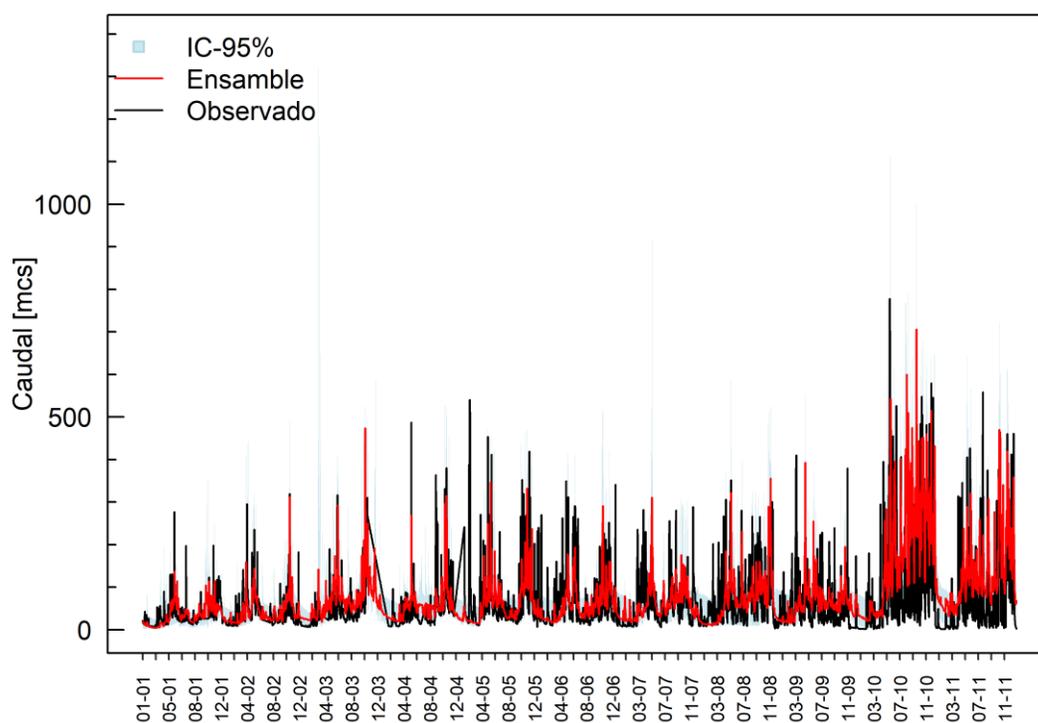


Figura 5.11 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) en el periodo de calibración diaria de la estación Ayacucho

En la Figura 5.12 se muestran los resultados y el IC para el año 2006, en donde se observa la clara influencia de los miembros que en su mayoría tienden a sobrestimar los caudales observados y que generan una homogenización de los IC especialmente en los caudales inferiores a 100 m³/s. De otra parte, el ensamble estimado con la media se aproxima de forma razonable a los valores observados,

sin embargo, para algunos eventos de gran magnitud subestima o sobrestima, es decir no presenta un comportamiento más homogéneo para la representación esta condición del flujo.

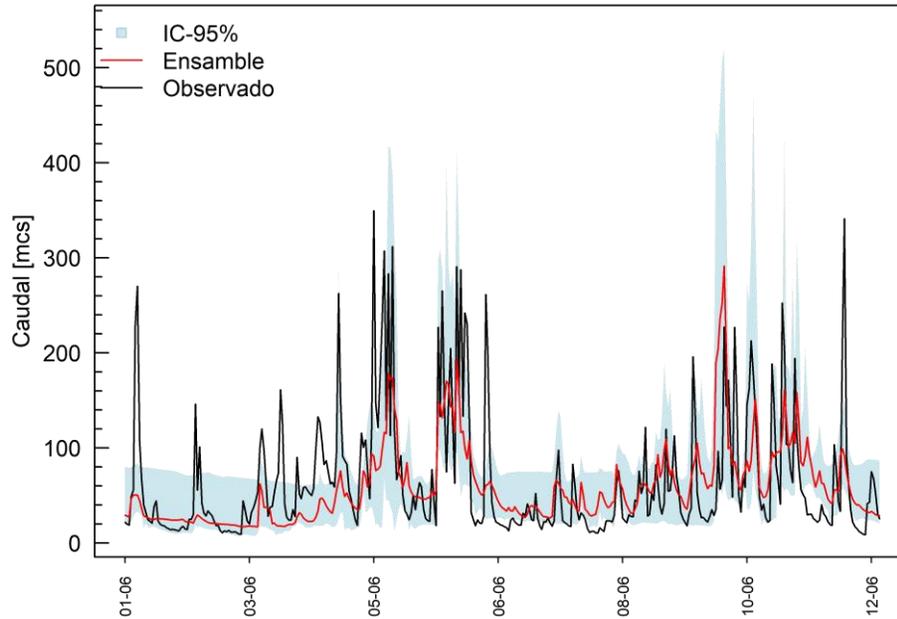


Figura 5.12 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) a nivel diario durante el año 2006 en la estación Ayacucho

5.4 Modelación a nivel diario en el río Sogamoso, SZH Río Sogamoso

5.4.1 Series de tiempo de la modelación multinivel

En el caso del río Sogamoso, en su estación Puente Sogamoso se observó que la mayoría de las combinaciones representan el comportamiento de los periodos húmedos y secos, pero se tienen una clara tendencia a la subestimación en los caudales superiores a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, como se observa en la Figura 5.13. Al igual que en la estación Ayacucho del río La Colorada, la mejor combinación se presentó entre RFMerge-GR4J ($KGE = 0.51$, etapa de calibración) y en menor medida el mismo forzamiento con el modelo TUWmodel ($KGE = 0.31$, etapa de calibración). Con respecto a los productos GSMAP y MSWEP se obtuvieron mejores resultados con el modelo GR4J en aproximadamente 0.1 con respecto a los resultados de TUWmodel.

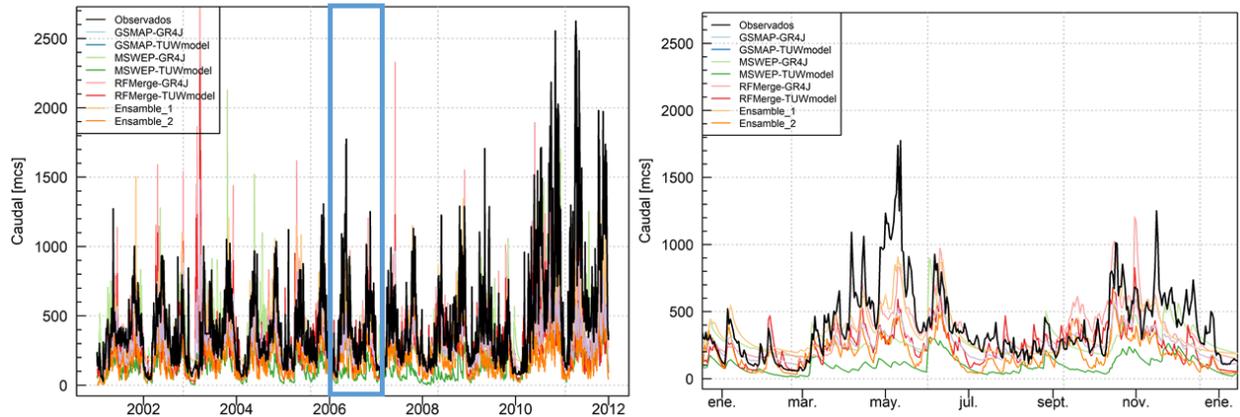


Figura 5.13 – Series de tiempo obtenidas en la etapa de calibración a nivel diario de las combinaciones de modelos y forzamientos (Izq.) y un zoom sobre el año 2006 (Der.) en la estación Puente Sogamoso de la SZH del río Sogamoso

Con respecto a los ensambles, se evidenciaron magnitudes similares en algunos picos de las hidrógrafas, pero predomina la subestimación tanto en la etapa de calibración como de validación. En este caso no existe mayor diferencia entre ensamble estimado con la media o la mediana, pero si existe una diferencia notable con la mejor combinación la cual cuantifica más caudal que los dos ensambles evaluados, como se observa en la Figura 5.14 para el año 2006.

En la Tabla 5.6 se presentan los resultados del conjunto de parámetros que generaron un mejor desempeño en el modelo GR4J y en la Tabla 5.7 se presentan los resultados asociados al modelo TUWmodel. Los parámetros calibrados para el modelo GR4J con los tres forzamientos de precipitación reportaron diferencias importantes; la más evidente se dio en el parámetro X1 que vario de 0.00 mm (GSMAP) a 77.39 mm (MSWEP), seguido de X4 (tiempo base del hidrograma unitario) que paso de 0.94 días (GSMAP) a 1.92 días (RFMerge). En el caso de TUWmodel, al tener una mayor dimensión paramétrica la equifinalidad se hace mucho evidente y en muy pocos parámetros los valores calibrados con cada forzamiento fueron similares.

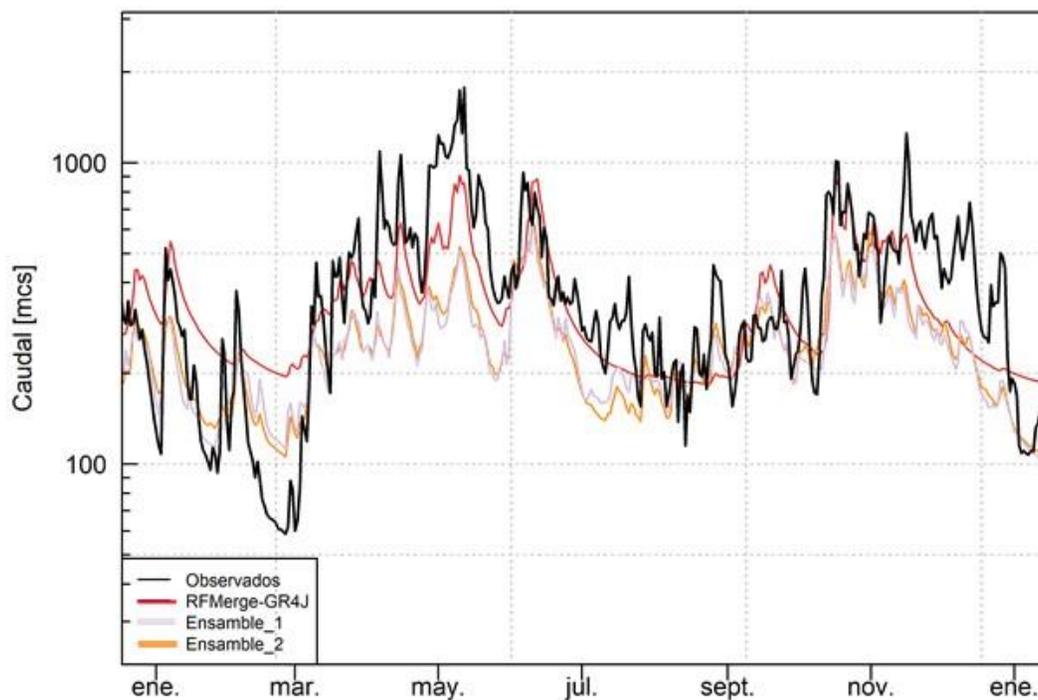


Figura 5.14 – Serie de tiempo de caudales diarios de la mejor combinación (modelo-forzamiento), ensambles (media - color púrpura claro y mediana - color anaranjado) y valor observado para el año 2006 en la estación Puesto Sogamoso

Tabla 5.6 – Parámetros calibrados del modelo GR4J para la estación Puesto Sogamoso

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – GR4J	MSWEP - GRAJ	RFMerge – GR4J
KGE	0.40	0.44	0.51
X1	0.00	77.39	28.89
X2	22.70	16.48	16.77
X3	268.39	191.02	152.47
X4	0.94	1.08	1.92

Tabla 5.7 – Parámetros calibrados del modelo TUWmodel para la estación Puesto Sogamoso

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – TUWmodel	MSWEP - TUWmodel	RFMerge – TUWmodel
KGE	0.21	0.30	0.31
SCF	1.34	1.31	1.17
DDF	1.06	2.28	4.76
Tr	1.70	1.90	2.28
Ts	0.53	-0.69	-2.16
Tm	-0.24	-0.18	-0.63
LPrat	0.45	0.59	0.65
FC	220.63	102.09	210.22
Beta	0.00	0.00	0.00
k0	0.01	0.41	0.34
k1	10.79	26.57	27.04
k2	221.44	202.58	230.91
lsuz	70.65	46.68	19.75
cperc	0.00	0.13	0.51
bmax	5.06	27.52	14.52
croute	16.00	45.26	37.71

5.4.2 Análisis de sensibilidad

Una diferencia entre los resultados de la sensibilidad paramétrica presentados para la estación Ayacucho frente a los obtenidos en la estación Puente Sogamoso, se dio en el parámetro X1 que fue mucho más sensible y que en el proceso de calibración reportó un rango más cerrado para mejores valores de la función objetivo. Con respecto al parámetro X4, se evidencia que no existe un único tiempo base del hidrograma unitario que en un rango de 0.2 días a un día reporta valores de la función objetivo alrededor de 0.44, como se muestra en la Figura 5.15.

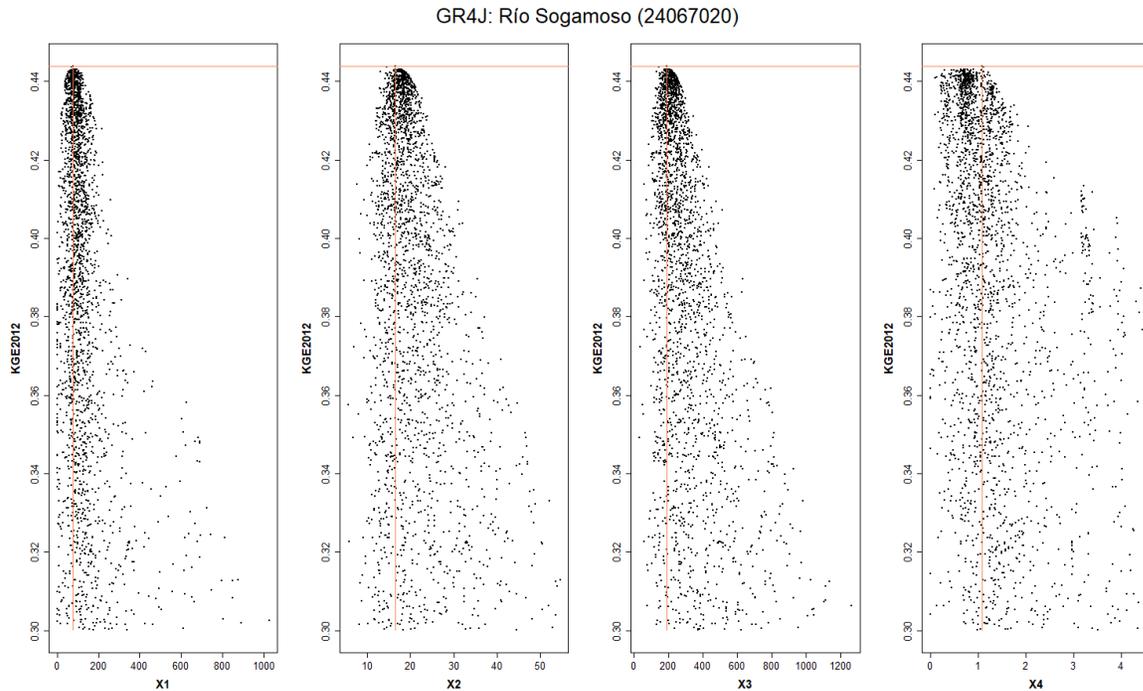


Figura 5.15 – Gráfico de dispersión entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y la función objetivo obtenidos en la etapa de calibración (diaria) por medio del algoritmo PSO – Estación Puente Sogamoso

La relación lineal entre los parámetros X2 y X3 es mucho más fuerte (correlación 0.851) en el caso de la estación Puente Sogamoso, ya que reporta menos dispersión y una mayor homocedasticidad a medida que incrementan los valores de los parámetros, como se puede observar en la Figura 5.16. De otro parte, la relación más relevante con la función objetivo se presentó con el parámetro X3, ya que presentó una correlación de 0.514, es decir que tiene un aporte importante en la representación de los flujos. Finalmente, en los rangos de los histogramas muestran que los cuatro parámetros tienen un sesgo a la izquierda indicando que la mayoría de las simulaciones en proceso de calibración los buenos resultados en la función objetivo se presentan para rangos magnitudes menores.

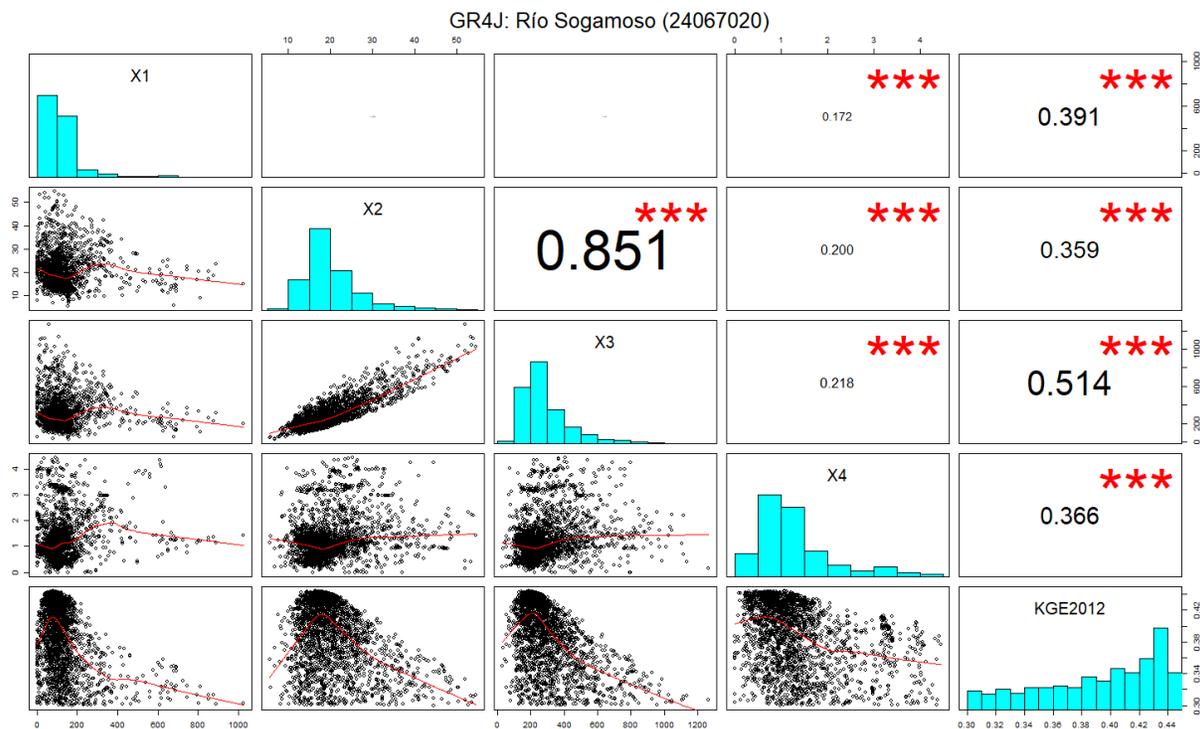


Figura 5.16 – Gráficos de correlación, histogramas y coeficiente de correlación de Pearson entre los parámetros del modelo GR4J-RFMerge y a la función objetivo (KGE) de la calibración diaria en la estación Puente Sogamoso

5.4.3 Desempeño determinístico – Estación Puente Sogamoso

El desempeño de los modelos y sus forzamientos fueron evaluados con cuatro métricas, como se muestra en la Tabla 5.8 (calibración) y la Tabla 5.9 (validación). A continuación, se realiza una descripción de los desempeños de acuerdo con las 4 métricas:

- En términos generales, las métricas RMSE y Pbias fueron menores en el período de validación que en el de calibración. Lo anterior, como consecuencia en subestimación de los caudales por parte de la mayoría de las combinaciones y del rezago en los picos entre los valores simulados y observados. Esta última condición se puede evidenciar en los valores negativos del IP que tienden mayores en el periodo de validación.
- Con respecto a los ensambles no se observan mejoras importantes con respecto al desempeño de la mayoría de sus miembros en la etapa de calibración, pero es menor su variación frente a los resultados obtenidos en la validación e incluso mejora en 0.02 unidades del KGE. La mejor combinación RFMerge-GR4J pierde 0.2 en términos del KGE

en la validación frente a la calibración. De esta manera, se evidencia pobres desempeños de los modelos y ensambles en la representación de los caudales en la estación Puente Sogamoso.

- Es importante resaltar que la evaluación de los modelos hidrológicos en el periodo de validación en la estación Puente Sogamoso no contempla la influencia del embalse Topocoro que empezó a funcionar en el año 2014.

Tabla 5.8 – Resultados de las métricas desempeño evaluadas en la estación Puente Sogamoso para las modelaciones hidrológicas a nivel diario – Fase de calibración

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m ³ /s)	PBIAS (%)	IP	KGE
GSMAP – GR4J	306.84	-16.0	-4.87	0.33
GSMAP – TUWmodel	414.95	-66.2	-9.73	0.30
MSWEP - GR4J	314.62	-11.2	-5.17	0.41
MSWEP - TUWmodel	350.04	-38.5	-6.64	0.17
RFMerge – GR4J	272.6	-18.1	-3.63	0.51
RFMerge – TUWmodel	371.87	-55	-7.62	0.31
Ensamble 1	310.38	-34.2	-5	0.24
Ensamble 2	316.52	-36.3	-5.24	0.22

Tabla 5.9 – Resultados de las métricas desempeño evaluadas en la estación Puente Sogamoso para las modelaciones hidrológicas a nivel diario – Fase de validación

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m ³ /s)	PBIAS (%)	IP	KGE
GSMAP – GR4J	266.69	-3.5	-5.06	0.27
GSMAP – TUWmodel	333.94	-57.6	-8.5	-0.03
MSWEP - GR4J	272.12	-18.6	-5.31	0.35
MSWEP - TUWmodel	315.61	-43.9	-7.49	0.16

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m³/s)	PBIAS (%)	IP	KGE
RFMerge – GR4J	244.35	-19.3	-4.09	0.38
RFMerge – TUWmodel	329.6	-56.8	-8.26	0.07
Ensamble 1	259.56	-33.3	-4.74	0.26
Ensamble 2	262.97	-36.2	-4.89	0.26

5.4.4 Desempeño probabilístico - Estación Puente Sogamoso

La evaluación de los ensambles por medio del histograma de rangos soporta de forma conjunta que sus miembros tienden a subestimar, toda vez que los valores observados son ranqueados principalmente en la séptima posición y que a medida que los caudales son más grandes es menor la probabilidad de encontrarlos en una posición central frente a los valores simulados, como se muestra en la Figura 5.17. Esta condición se traduce en una baja confiabilidad en los resultados del pronóstico e incrementa a medida que los caudales sean mayores.

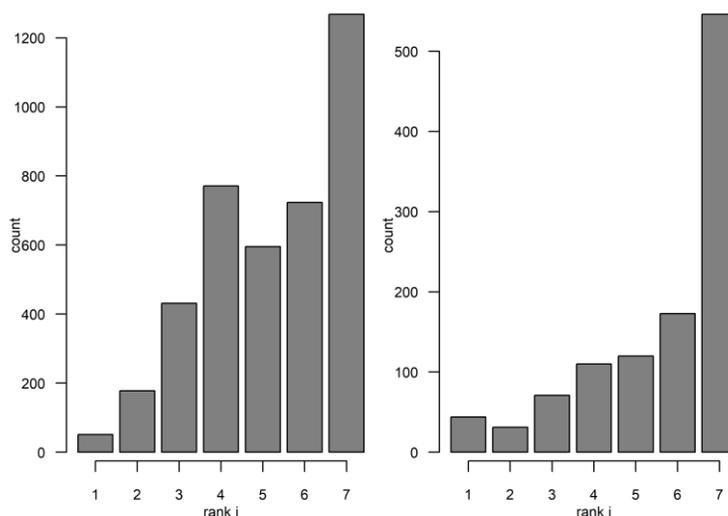


Figura 5.17 – Histograma de rango en las etapas de calibración (Der.) y validación (Izq.) para el ensamble de modelos hidrológicos (diario) en la estación Puente Sogamoso

5.4.5 Incertidumbre

El IC de los resultados del ensamble evidencian que existe una probabilidad de cubrir eventos de magnitudes de caudales bajos a lo largo del período evaluado, pero que en el límite superior del IC

es baja la probabilidad de representar caudales observados, ya que estos últimos sobrepasan ese umbral, tal como se observa en la Figura 5.18.

En la Figura 5.19 se muestran los resultados y el IC para el año 2006, en donde se observa la clara influencia de los miembros que en su mayoría tienden a subestimar los caudales observados y que los picos o la llega de los eventos tiene un retraso que no permite la coincidencia entre el ensamble y los valores observados que puede estar asociado a una de falta correspondencia con los pulsos de precipitación (magnitud y temporalidad).

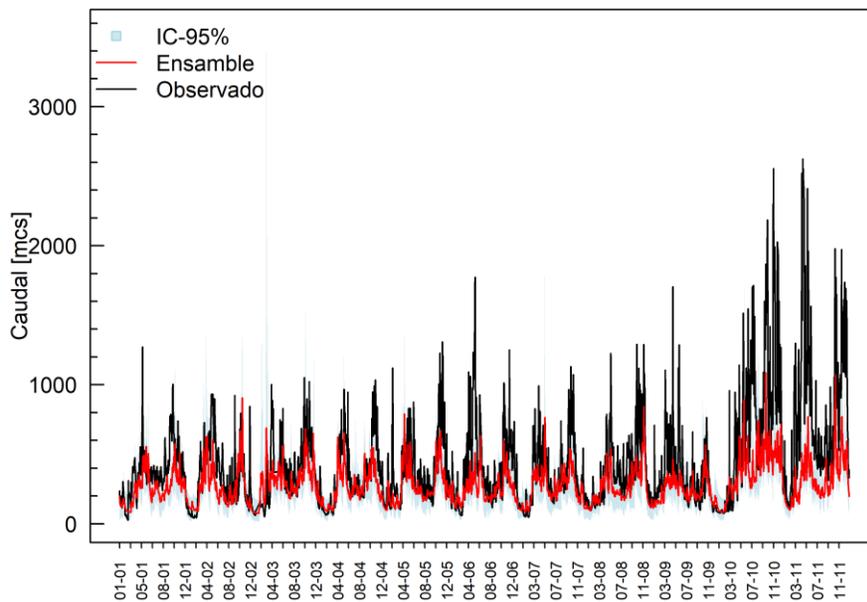


Figura 5.18 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) en el periodo de calibración diaria de la estación Puente Sogamoso

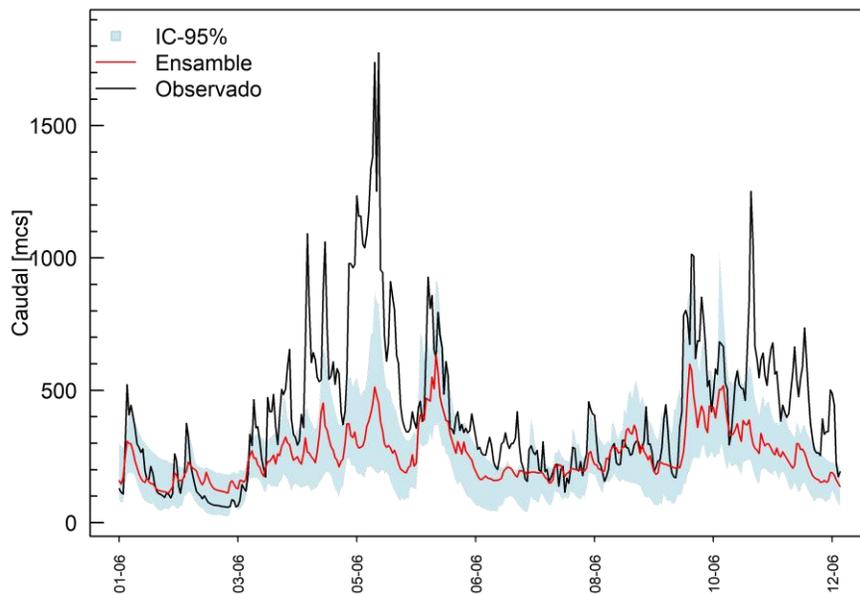


Figura 5.19 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) a nivel diario durante el año 2006 en la estación Puente Sogamoso

5.5 Modelación a nivel horario en el río La Colorada, SZH Río Opón

5.5.1 Series de tiempo de la modelación multinivel

La modelación hidrológica a nivel horario se realizó únicamente en la estación Ayacucho y para el período entre agosto de 2019 y agosto de 2020, en donde se utilizaron tres modelos: GR4H, GR5H, TUWmodel y tres forzamientos: GSMAP, WRF, y COMBI (combinación con la media de WRF y GSMAP). A la izquierda de la Figura 5.20 se presenta el comportamiento de cada una de las respuestas obtenidas de los tres modelos y los tres forzamientos. A simple vista se observa una amplia variabilidad de las respuestas de cada combinación (forzamiento-modelo) y que como aparece en la gráfica a la derecha de la Figura 5.20 (noviembre de 2019) se tiende a sobrestimar los caudales bajos, mientras que en los altos existe una mayor heterogeneidad en la respuesta de los modelos.

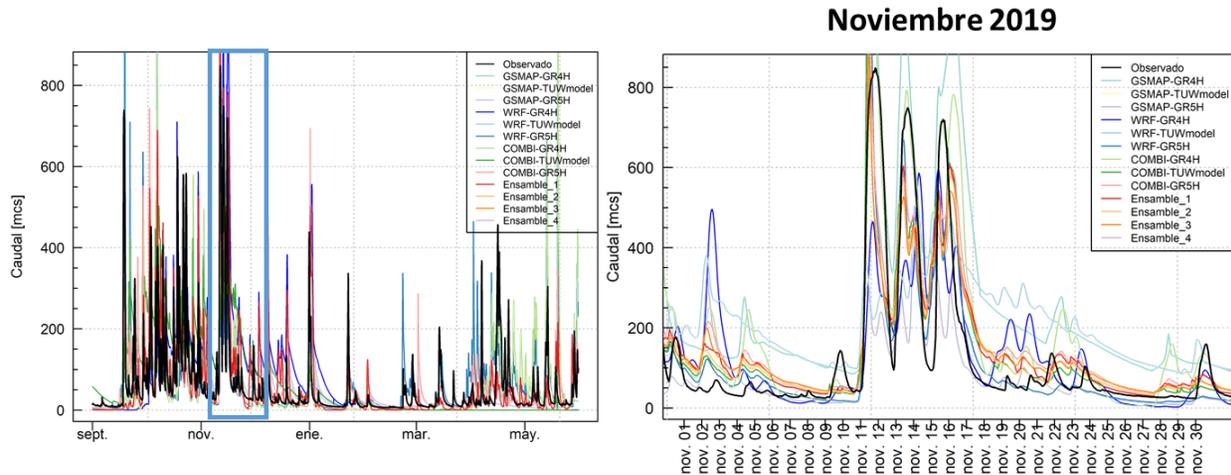


Figura 5.20 – Series de tiempo obtenidas en la etapa de calibración a nivel horario de las combinaciones de modelos y forzamientos (Izq.) y un zoom sobre el mes de noviembre año 2019 (Der.) en la estación Ayacucho de la SZH del río Opón

Con respecto a los ensambles se utilizaron dos alternativas más en su construcción, además de la media y mediana que fueron abordadas en las modelaciones a nivel diario. El ensamble 3 corresponde a la media de las modelaciones realizadas con GR4H y GR5H, y el ensamble 4 está conformado por los mismos miembros del ensamble 3, pero se estima con la mediana. Como resultado, por ejemplo en el mes de noviembre de 2019 (Figura 5.21), se evidenció que en los picos correspondientes a los caudales superiores a 500 m³/s entre los ensambles no se presentan mayores diferencias y representan de forma satisfactoria los valores observados, pero en los picos inferiores a 200 m³/s el ensamble 3 tiene un mejor comportamiento y una sobreestimación menor frente a los demás ensambles. Si bien la mejor combinación (COMBI-TUWmodel) representa mejor los picos superiores a 500 m³/s existe una amplia variación en la estimación de los caudales menores a 50 m³/s que difieren de los observados.

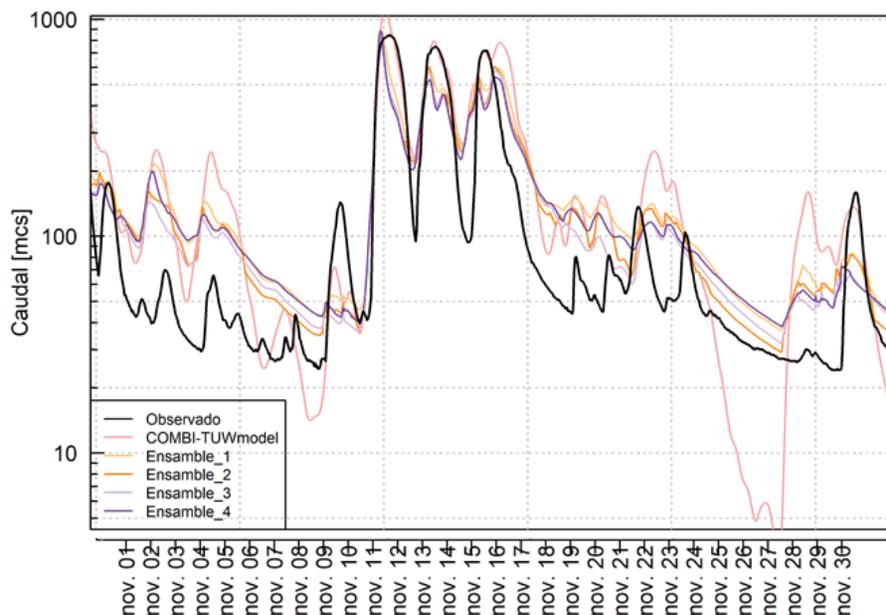


Figura 5.21 – Serie de tiempo de caudales horarios de la mejor combinación (modelo-forzamiento), ensambles y valor observado durante noviembre de 2019 en la estación Ayacucho

De los resultados reportados en las calibraciones que se muestran en la Tabla 5.10, Tabla 5.11 y Tabla 5.12, sobresale un comportamiento satisfactorio en general para todas las combinaciones entre modelos y forzamientos donde la función objetivo fue superior a 0.4. Los mejores resultados se presentaron para el modelo TUWmodel seguido por GR4H, pero ambos casos el forzamiento fue la combinación de GSMAP y WRF (COMBI). Los parámetros calibrados en los tres modelos difieren de manera importante en función del forzamiento de precipitación evaluado y no existe un rango cerrado en los que se encuentren resultados satisfactorios de la función objetivo. Esta condición es más evidente en los modelos GR4H y GR5H, y menos en TUWmodel donde una mayor dimensión paramétrica restringe más la búsqueda óptimos.

Tabla 5.10 – Parámetros calibrados del modelo GR4H para la estación Ayacucho

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – GR4H	WRF – GR4H	COMBI – GR4H
KGE	0.65	0.47	0.65

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – GR4H	WRF – GR4H	COMBI – GR4H
X1	151.28	15.36	17.87
X2	-2.44	-1.80	-2.08
X3	100.77	44.01	55.97
X4	4.21	4.23	2.76

Tabla 5.11 – Parámetros calibrados del modelo GR5H para la estación Ayacucho

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – GR5H	WRF – GR5H	COMBI – GR5H
KGE	0.60	0.42	0.65
X1	163.43	5.18	138.62
X2	-0.10	0.76	-2.62
X3	75.85	393.54	105.08
X4	1.61	4.45	4.00
X5	0.10	0.25	0.18

Tabla 5.12 – Parámetros calibrados del modelo TUWmodel para la estación Ayacucho

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – TUWmodel	WRF - TUWmodel	COMBI – TUWmodel
KGE	0.57	0.53	0.70
SCF	1.00	1.35	0.99
DDF	3.78	2.76	1.18
Tr	2.15	1.82	2.39
Ts	-0.65	-0.13	-1.06
Tm	0.43	0.32	0.91
LPrat	0.13	0.67	0.83
FC	182.74	142.47	214.36
Beta	6.61	10.01	7.04

Función objetivo /Parámetros	Forzamiento / Modelo		
	GSMAP – TUWmodel	WRF - TUWmodel	COMBI – TUWmodel
k0	1.24	0.89	1.36
k1	24.18	3.92	4.01
k2	172.64	7.19	10.47
lsuz	50.39	98.60	66.18
cperc	0.30	2.19	4.96
bmax	7.76	24.75	12.48
croute	0.00	9.39	1.56

5.5.2 *Análisis de sensibilidad*

La estructura de los modelos GR4J y GR4H es la misma. De esta manera, el comportamiento de la sensibilidad paramétrica que se observó a nivel diario en la estación Ayacucho se repite de forma similar a nivel horario. La diferencia radica en que los parámetros X1 y X4 tiene una sensibilidad reducida y por ende representar los caudales observados esta más relacionado con los parámetros X2 y X3. Es decir que los pequeños intercambios de agua con el componente subterráneo (X2) y una menor capacidad almacenamiento del tránsito influyen caudal total simulado. La interacción entre estos dos últimos parámetros y su dependencia se puede observar en la Figura 5.22, donde es evidente su relación directamente proporcional (correlación de 0.60).

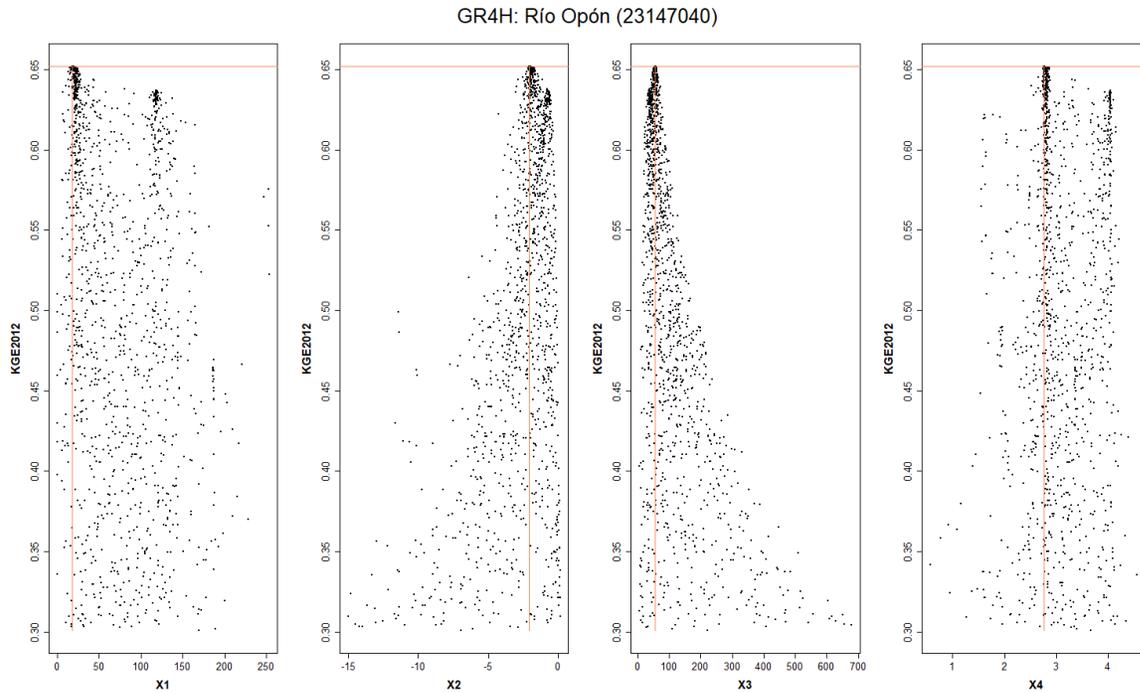


Figura 5.22 – Gráficos de dispersión entre los parámetros del modelo GR4J-COMBI y la función objetivo obtenidos en la etapa de calibración (horaria) por medio del algoritmo PSO – Estación Ayacucho

La distribución de los valores obtenidos en el proceso de calibración y representados por los histogramas en la diagonal de la Figura 5.23 muestran que las mejores simulaciones fueron reportadas para valores próximos a cero para los parámetros X2 y X3, mientras que un rango muy estrecho en X4 (2.8-3) reportó valores de la función objetivo iguales a 0.3 o 0.6 y de una forma similar ocurrió con el parámetro X1.

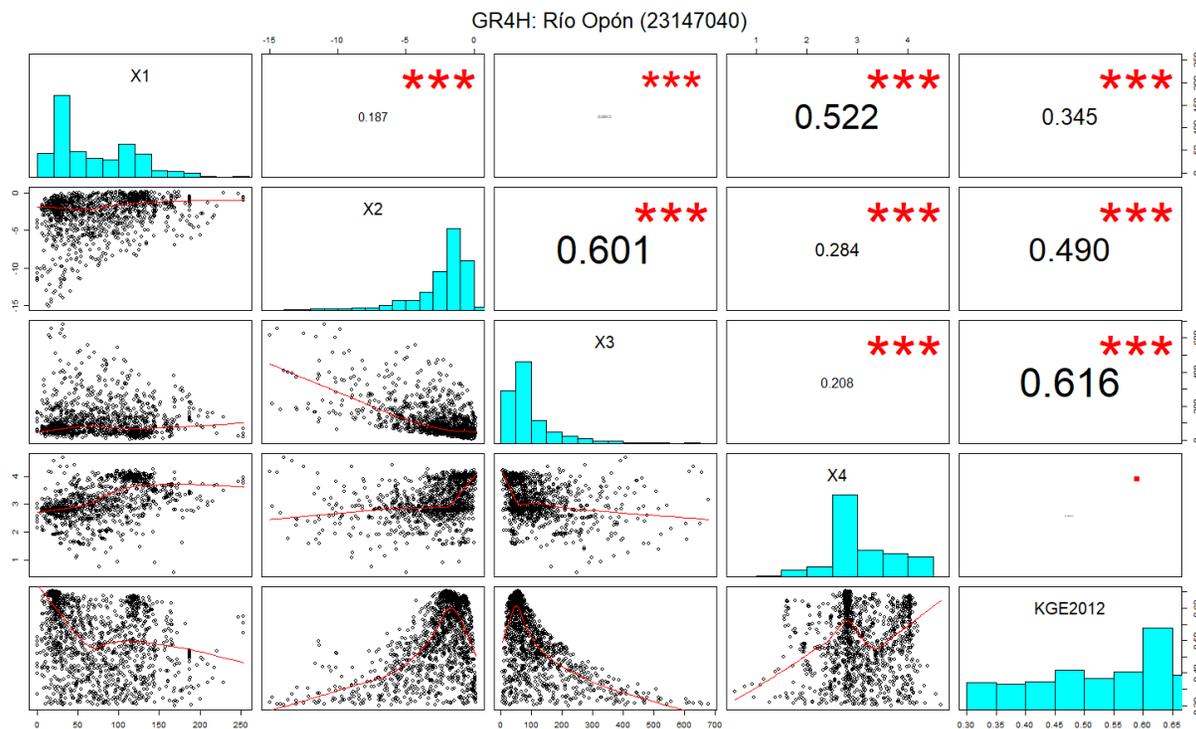


Figura 5.23 – Gráficos de correlación, histogramas y coeficiente de correlación de Pearson entre los parámetros del modelo GR4J-COMBI y la función objetivo (KGE) de la calibración horaria en la estación Ayacucho

5.5.3 Desempeño determinístico – Estación Ayacucho

El desempeño de los modelos y sus forzamientos fueron evaluados con cuatro métricas, como se muestra en la Tabla 5.13 (calibración) y la Tabla 5.14 (validación). A continuación, se realiza una descripción de los desempeños de acuerdo con las 4 métricas:

- La evaluación determinista de las combinaciones y los ensambles en términos de la métrica RMSE reportó valores entre 76 m³/s a 114 m³/s en la etapa de calibración. Aunque en la etapa de validación se presentó un incremento del RMSE en la mayoría de las combinaciones, las más importantes se dieron en las modelaciones donde se usó el producto WRF, ya que incrementaron su valor en más de un 100%.
- Con respecto al PBias, se observó que la mayoría combinaciones reportaron sobrestimaciones que oscilaron entre 0.3% a 20.3%, mientras que las subestimaciones oscilaron entre -9.2% a -1.6% ambos en la etapa de calibración. Sin embargo, estos resultados que se pueden clasificar como buenos y satisfactorios, pasaron a ser pobres en la

etapa de validación como consecuencia de incrementaron en termino absolutos de los porcentajes de sesgo, que por ejemplo, en el caso del mejor modelo paso sobrestimar en la etapa de calibración en un 4.7% a subestimar en un -41.6%. Aunque todos los PBias cambiaron en menor medida lo hicieron los ensambles 1 y 4.

- En cuanto al IP, se reportaron valores muy inferiores a cero tanto en la etapa de calibración como de validación que dejar ver que existe un problema en la representación de los tiempos de arribo el bajo desempeño del pronóstico de las combinaciones a nivel determinístico.

Tabla 5.13 – Resultados de las métricas desempeño evaluadas en la estación Puente Sogamoso para las modelaciones hidrológicas a nivel horario – Fase de calibración

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m ³ /s)	PBIAS (%)	IP	KGE
GSMAP – GR4H	91.49	0.3	-64.77	0.65
GSMAP – TUWmodel	113.34	17.6	-99.95	0.49
GSMAP – GR5H	82.58	-9.1	-52.59	0.56
WRF - GR4H	104.66	-1.6	-85.08	0.46
WRF - TUWmodel	105.58	-2.2	-86.61	0.53
WRF – GR5H	111.54	20.3	-96.77	0.45
COMBI – GR4H	87.54	-2	-59.22	0.65
COMBI – TUWmodel	88.13	4.7	-60.04	0.69
WRF – GR5H	83.73	15.4	-54.1	0.55
Ensamble 1	76.49	4.8	-44.98	0.66
Ensamble 2	81.79	-9.2	-51.57	0.58
Ensamble 3	80.37	-3.4	-49.76	0.6
Ensamble 4	78.92	3.9	-47.94	0.61

Tabla 5.14 – Resultados de las métricas desempeño evaluadas en la estación Puente Sogamoso para las modelaciones hidrológicas a nivel horario – Fase de validación

Forzamiento / Modelo	Métricas			
	RMSE (m ³ /s)	PBIAS (%)	IP	KGE
GSMAP – GR4H	103.05	-92.6	-24.78	-0.53
GSMAP – TUWmodel	107.07	-100	-26.83	-0.59
GSMAP – GR5H	88.16	-50.6	-17.87	-0.15
WRF - GR4H	219.95	61.4	-116.48	-0.9
WRF - TUWmodel	293.57	123.9	-208.28	-1.88
WRF – GR5H	174.19	44.6	-72.67	-0.39
COMBI – GR4H	117.28	-39.1	-32.4	0.03
COMBI – TUWmodel	90.65	-41.6	-18.95	0.11
WRF – GR5H	93.71	-22.8	-20.32	0.06
Ensamble 1	107.49	-13	-27.06	0.14
Ensamble 2	95.73	-41.4	-38.9	-16.5
Ensamble 3	99.06	-21.25	-22.83	-25.57
Ensamble 4	104.61	0.04	0.04	0.1

La pérdida de nivel de ajuste en las simulaciones y los valores observados en la etapa de calibración puede estar asociada a dos factores: (i) la longitud del periodo de evaluación (un año y un mes) es muy corta y (ii) el algoritmo de calibración PSO tiende a óptimos locales y no aproximarse a óptimos globales donde los parámetros identificados representen la generalidad de los flujos.

5.5.4 Desempeño probabilístico - Estación Ayacucho

La evaluación del histograma de rangos que permite establecer confiabilidad, la consistencia y el sesgo del ensamble, evidencio que ensamble (en términos de sus miembros) a nivel horario de la estación Ayacucho tiene forma de cúpula, indica que la dispersión es demasiado grande y poco consistente al diferir sus formas de una etapa a la otra, como se muestra en la Figura 5.24.

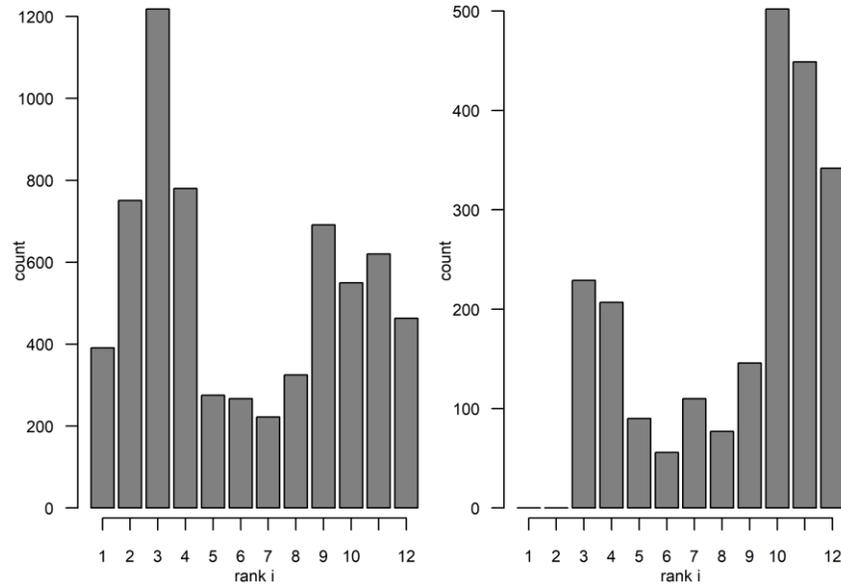


Figura 5.24 – Histograma de rango en las etapas de calibración (Der.) y validación (Izq.) para el ensamble de modelos hidrológicos (horario) en la estación Ayacucho

5.5.5 Incertidumbre

Los intervalos de confianza estimados para el conjunto de miembros del ensamble presentados en la Figura 5.25 y la ventana temporal sobre el mes de noviembre de 2019 (Figura 5.26) permiten identificar que gran parte de los valores observados salen del límite superior e inferior de los IC. Si bien el IC representa de forma aproximada el comportamiento de los valores observados los desfases en los picos también afectan que los valores observados no residan dentro de los umbrales de los IC.

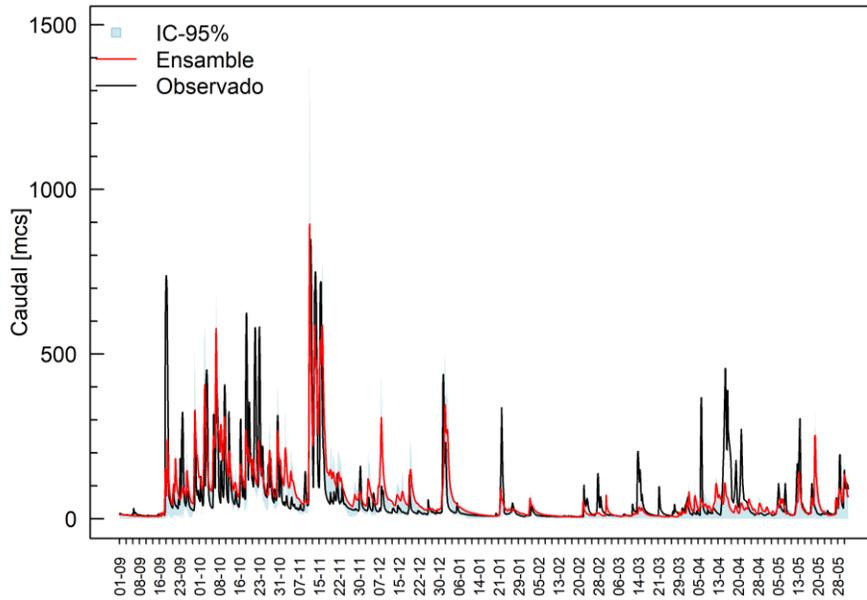


Figura 5.25 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) en el periodo de calibración horaria de la estación Ayacucho

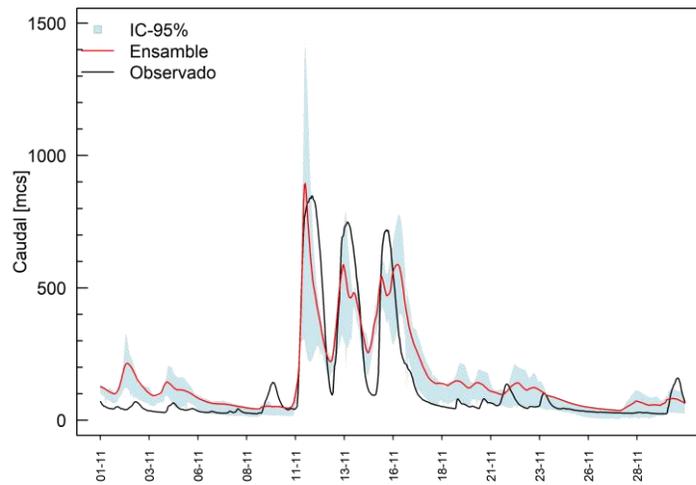


Figura 5.26 – Intervalos de confianza del 95 % para los miembros del ensamble, caudales observados y ensamble (media) a nivel horario durante el mes de noviembre de 2019 en la estación Ayacucho

6 Análisis de la configuración del modelo hidráulico para pronóstico

6.1 Modelo conceptual

Los modelos hidrológicos / hidráulicos incorporados (o por incorporar) en la plataforma FEWS – Colombia orientados a pronóstico deben tener un carácter operacional, deben ser simplificados en lo posible por tiempo computacional, y por la necesidad de contar con las estaciones que tienen datos en tiempo real o cuasireal (reportados por un observador al menos dos datos al día a la oficina de pronósticos). Es por esta razón que el modelo hidráulico del tramo de análisis, tramo del río Magdalena entre las estaciones de Puerto Berrio (aguas arriba) y de Sitio Nuevo (aguas abajo), es un modelo unidimensional.

El modelo hidráulico de pronóstico, configurado en el programa MIKE11, debe ser capaz de pronosticar niveles de desborde del cauce para generar alertas por inundaciones (épocas invernales) y niveles mínimos en el río Magdalena para análisis de navegación y dragado.

6.1.1 Archivos del modelo hidráulico

El modelo hidráulico del río Magdalena entre las estaciones de Puerto Berrio y Sitio Nuevo, implementado en el programa MIKE11 se encuentra configurado por los siguientes archivos, los cuales se muestran en la Figura 6.1:

- Los archivos QBerrio.dfs0, QCarare.dfs0, QCimitarra.dfs0, QOpon.dfs0, QRegla.dfs0 y QSogamso.dfs0 corresponden a las condiciones de frontera de caudal. QBerrio contiene el hidrograma aguas arriba del tramo de modelación sobre el río Magdalena y los otros archivos contienen los hidrogramas del aporte de los ríos tributarios al río Magdalena en el tramo de estudio.
- El archivo RMagdalena_BerrioSitioNuevo.nwk11 contiene la topología del modelo hidráulico: alineamiento, abscisas y estructuras hidráulicas.
- El archivo RMagdalena_CFrontera.bnd11 contiene la relación de las condiciones de frontera con los abscisados de la topología.

- En el archivo RMagdalena_HidroDinamica.hd11 se encuentran las características hidráulicas del modelo (rugosidades, condiciones iniciales, etc.)
- En el archivo RMagdalena_resultados.res11 se encuentran los resultados de la simulación hidráulica.
- El archivo RMagdalena_SeccBerrioSitioNuevo.xns11 contiene la información de las secciones transversales del modelo hidráulico.
- En el archivo RMagdalena_Simulación.sim11 se encuentran las condiciones de simulación del modelo hidráulico.

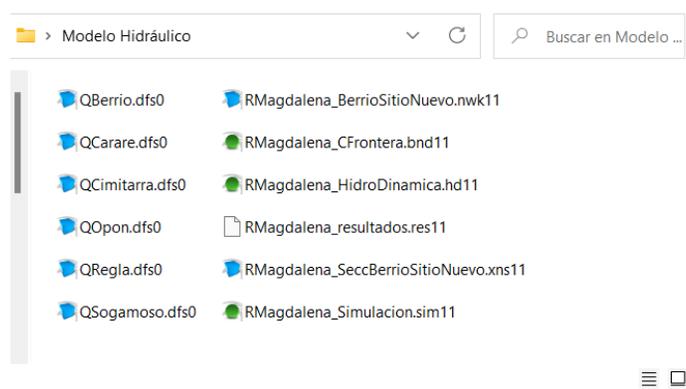


Figura 6.1 – Archivos que componen el modelo hidráulico

6.1.2 Escalas de análisis

El modelo hidráulico tiene una escala diaria, dado que los caudales de entrada de los ríos tributarios y del río Magdalena en la estación de Puerto Berrío (condiciones de frontera) son diarios. Sin embargo, el tiempo de cálculo interno es de 3 minutos por lo que en el modelo hidráulico se puede tener una escala subdiaria sin problema, dependiendo de la información de entrada y de la escala de los niveles y caudales que se pretendan mostrar en el modelo hidráulico. En los ríos tributarios del río Magdalena se puede tener una escala de tiempo subdiaria, dado que en esos cauces se pueden presentar crecientes repentinas (súbitas), las cuales son de duraciones cortas (minutos o horas) después del inicio del evento de lluvia. Esa escala subdiaria se puede obtener de los modelos hidrológicos.

Dado que el modelo hidráulico es unidimensional, la escala espacial está referenciada a la separación de las secciones transversales, entre 0.6 km y 13.8 km, y al cumplimiento de las condiciones de Courant, razón por la cual el tiempo de cálculo se establece en 3 minutos.

6.2 Primer ajuste del modelo hidráulico

6.2.1 Planteamiento del primer ajuste del modelo hidráulico

De acuerdo con los resultados del numeral 3.4 es evidente que el modelo hidráulico representa adecuadamente los niveles y caudales registrados en períodos en donde el régimen de flujo es de caudales bajos y medios en el río Magdalena. Sin embargo, para las épocas invernales, en donde se tienen los caudales máximos en el río, el modelo hidráulico no representa adecuadamente los niveles y caudales registrados dado que no se contemplan las zonas de desborde del cauce del río Magdalena con la respectiva pérdida de agua en la planicie de inundación y ciénagas aledañas a la zona de estudio (conservación de la masa).

Por lo tanto, se realizó un primer ajuste del modelo hidráulico inicial, trabajo realizado en 2021 y presentado como avance en el Producto 4, en donde se consideró el ajuste de la topología, de las condiciones de frontera y la incorporación de estructuras hidráulicas para simular los desbordamientos del cauce. En los siguientes numerales se hace la descripción de las incorporaciones.

6.2.2 Ajuste de la topología – primer ajuste

En relación con la topología del modelo hidráulico se realizaron los siguientes ajustes:

- Se eliminó el tramo del río Sogamoso y se ajustó la condición de frontera al punto de confluencia en el río Magdalena, abscisa K265+500, como se muestra en la Figura 6.2.

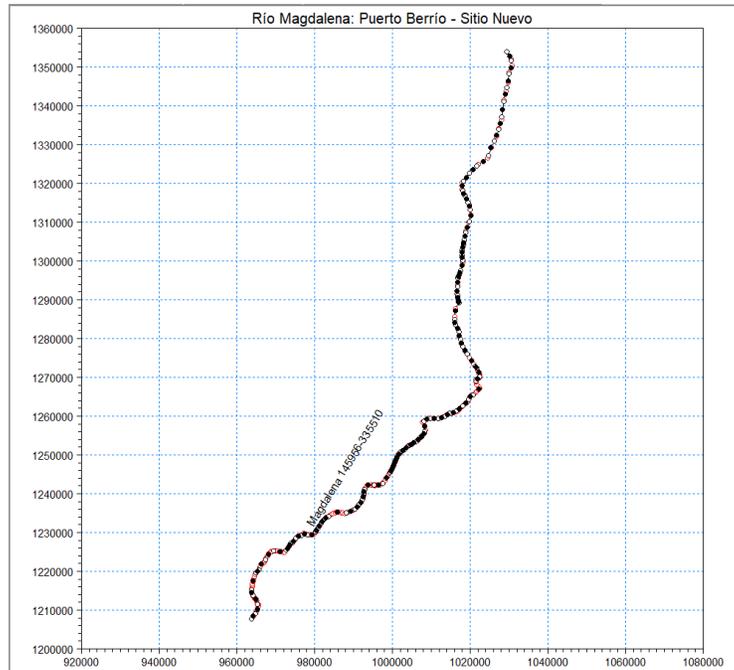


Figura 6.2 – Topología del modelo hidráulico – Primer ajuste del modelo hidráulico

- En las secciones transversales incorporadas en el modelo hidráulico se eliminaron los cambios bruscos del lecho del río Magdalena, como se había identificado en la Figura 3.43.

6.2.3 Ajuste de las condiciones de frontera – primer ajuste

En relación con las condiciones de frontera, aporte de los ríos tributarios, se realizaron los siguientes ajustes:

- En la abscisa K166+000, desembocadura del río San Bartolomé (denominado La Regla en el modelo hidráulico), se utilizó la información registrada en la estación La Bodega [23107020], como se muestra en la Figura 6.3, en vez del caudal constante de 50 m³/s.

	Boundary Description	Boundary Type	Branch Name	Chainage	Chainage	Gate ID	Boundary ID
1	Open	Inflow	Magdalena	145956	0		Berrio
2	Point Source	Inflow	Magdalena	166000	0		La Regla
3	Point Source	Inflow	Magdalena	203400	0		Carare
4	Point Source	Inflow	Magdalena	244000	0		OponColorada
5	Point Source	Inflow	Magdalena	266300	0		Sogamoso
6	Point Source	Inflow	Magdalena	295900	0		Cimitarra
7	Open	Q-h	Magdalena	335510	0		SitioNuevo

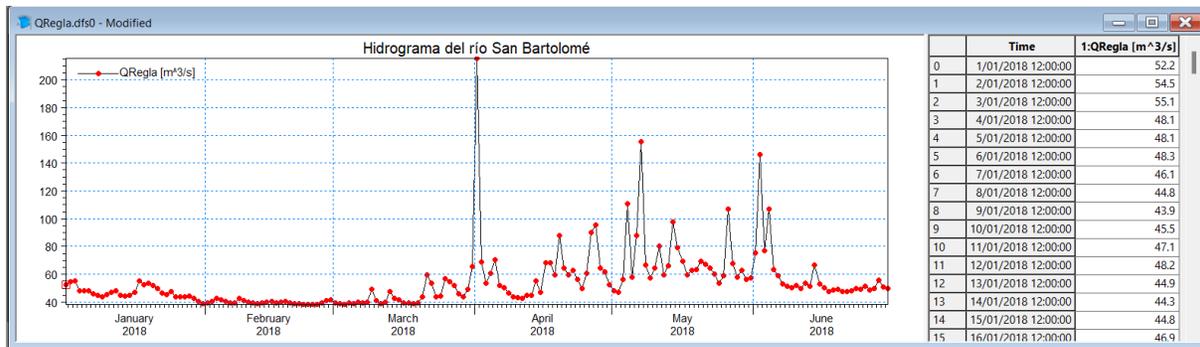


Figura 6.3 – Condición de frontera del río San Bartolomé – Primer ajuste del modelo hidráulico

- la abscisa K295+900, desembocadura del río Cimitarra, se incluyó la misma serie de la estación La Bodega [23107020], como se muestra en la Figura 6.4. Esta aproximación se puede hacer dado que no se cuenta con registros de caudal en el río Cimitarra y que el comportamiento hidrológico es similar al del San Bartolomé como se identificó en la caracterización de caudales presentada en el numeral 2.1.

	Boundary Description	Boundary Type	Branch Name	Chainage	Chainage	Gate ID	Boundary ID
1	Open	Inflow	Magdalena	145956	0		Berrio
2	Point Source	Inflow	Magdalena	166000	0		La Regla
3	Point Source	Inflow	Magdalena	203400	0		Carare
4	Point Source	Inflow	Magdalena	244000	0		OponColorada
5	Point Source	Inflow	Magdalena	266300	0		Sogamoso
6	Point Source	Inflow	Magdalena	295900	0		Cimitarra
7	Open	Q-h	Magdalena	335510	0		SitioNuevo

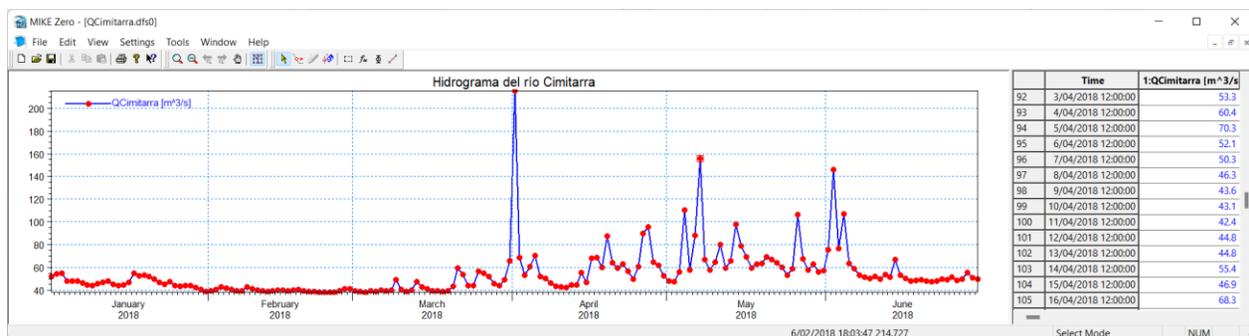


Figura 6.4 – Condición de frontera del río Cimitarra – Primer ajuste del modelo hidráulico

6.2.4 Incorporación de estructuras hidráulicas para simular los desbordamientos del cauce – primer ajuste

En las características hidráulicas del modelo unidimensional se pueden incorporar diferentes tipos de estructuras dentro de las cuales se encuentran estructuras de regulación. De las opciones de estructuras de regulación se optó por la estructura lateral (side structure), la cual funciona similar a un vertedero lateral que deja salir el caudal del cauce sin retorno (pérdida de volumen). En la Figura 6.5 se muestra el esquema del vertedero lateral idealizado en cada sección que presenta desbordamiento.

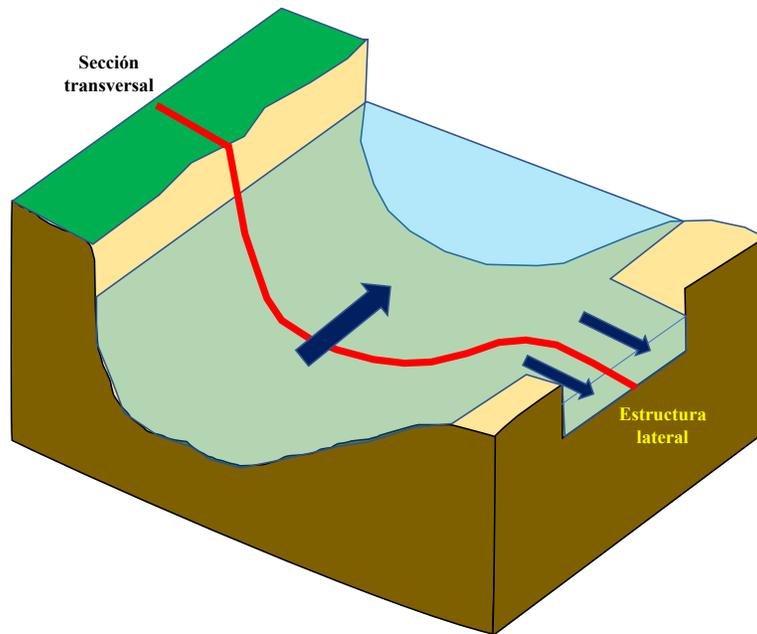


Figura 6.5 – Esquema del vertedero lateral idealizado en cada sección que presenta desbordamiento

Para cada una de las secciones en las cuales ocurría desborde para el modelo inicial (Figura 3.44) fueron analizados los niveles de agua e incorporadas las estructuras laterales en el programa MIKE11 como se muestra en la Figura 6.6. En donde se determinó que la regulación sea en función del nivel de agua (H points). El ancho de la brecha lateral fue establecido en 100.0 m en todas las secciones y se calcularon los factores de regulación que relacionan el caudal descargado (hacia la planicie de inundación) con el nivel de agua, como se muestra en el cuadro de “regulation function” de la Figura 6.6.

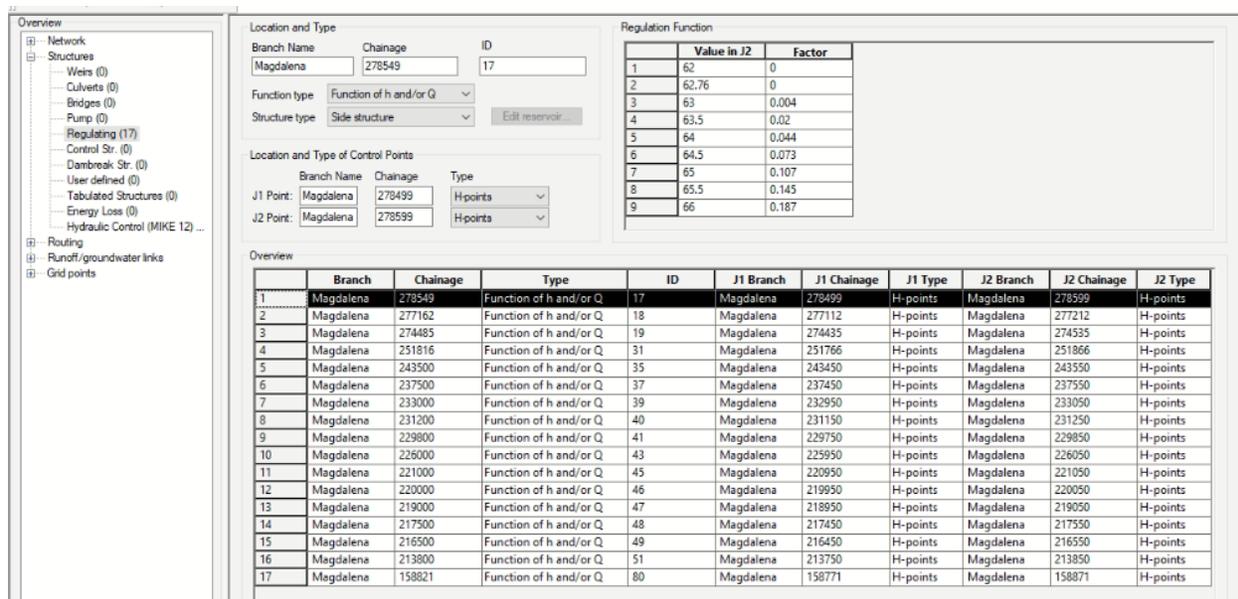


Figura 6.6 – Incorporación de las estructuras laterales en el modelo unidimensional

6.3 Evaluación del modelo hidráulico ajustado

6.3.1 Estaciones para la evaluación de niveles y caudales

Para la evaluación del modelo hidráulico ajustado, se seguirá utilizando el período de seis meses comprendido entre el 1 de enero de 2018 hasta el 30 de junio de 2018, en donde las condiciones de frontera de caudal corresponderán a los caudales medidos en las estaciones de los diferentes afluentes en el tramo de estudio. En la Figura 6.7 se muestran las estaciones identificadas en el tramo de estudio (Puerto Berrío – Sitio Nuevo) y que cuentan con información registrada de caudales (izquierda) y niveles (derecha).

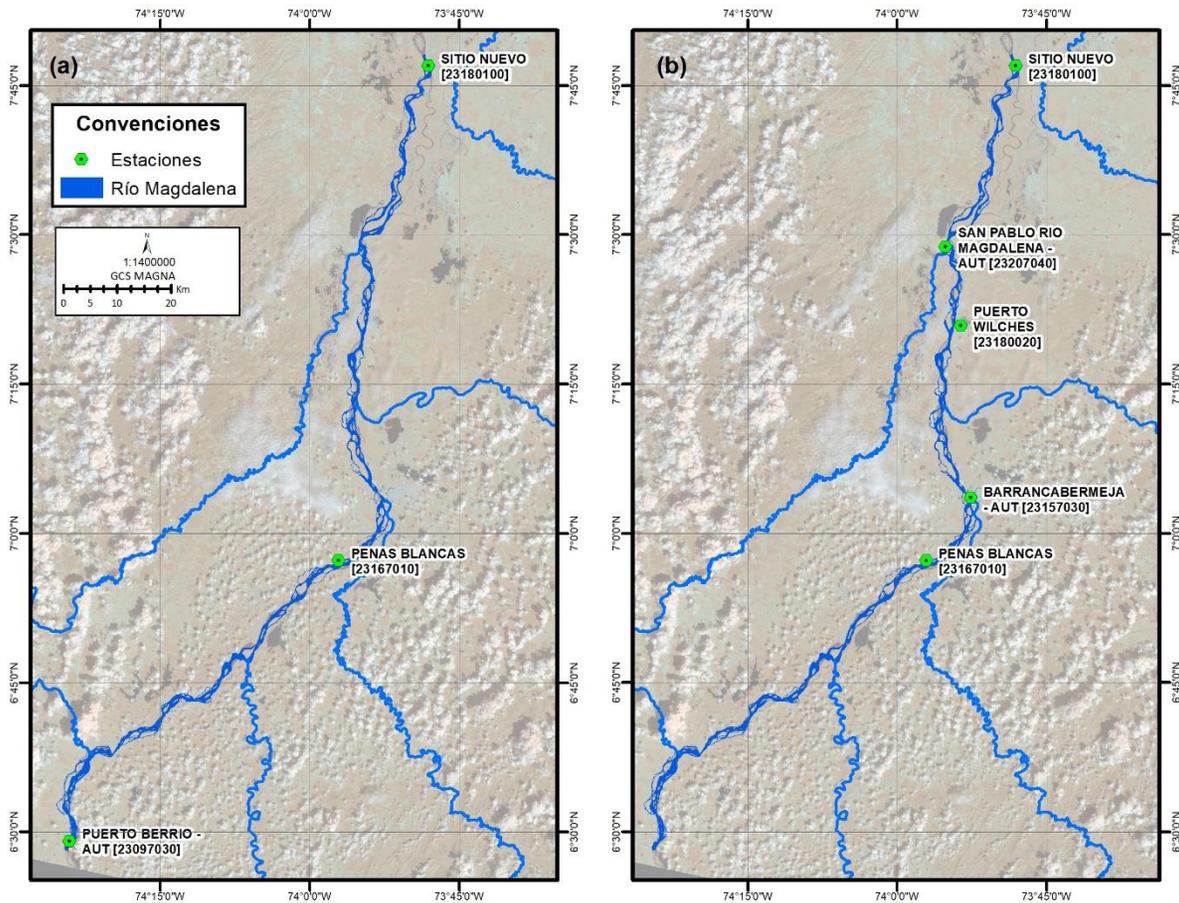


Figura 6.7 – Localización de estaciones en el tramo de estudio que cuentan con información de (a) caudales y (b) niveles

6.3.2 Cotas cero de las estaciones

Dado que el modelo hidráulico da niveles de agua en cada una de sus secciones transversales y que en las estaciones (Figura 6.7-b) solamente se registra la lectura de agua en la mira, se deben convertir esas lecturas de agua en niveles de agua mediante las cotas cero de las miras instaladas en cada estación de análisis. En la Tabla 6.1 se muestran los valores de cota cero de las cinco estaciones de referencia (Figura 6.7-b) de acuerdo con las diferentes fuentes de información del IDEAM.

Tabla 6.1 – Cotas cero de las estaciones del tramo del río Magdalena en donde se miden niveles

Estación	Actualización cotas	Área operativa 8	Inundación río Magdalena	FEWS	Levantamiento INCIGE
Peñas Blancas	93.57 m	93.57 m	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Barrancabermeja	70.49 m	68.81 m	70.49 m	70.49 m	70.57 m
Puerto Wilches	66.01 m	58.95 m	59.14 m	59.14 m	59.60 m
San Pablo	54.84 m	92.49 m	54.84 m	54.84 m	54.81 m
Sitio Nuevo	45.98 m	45.98 m	50.98 m	46.58 m	Sin registro

Para las 5 estaciones se adoptarán los siguientes valores:

- Para la estación de Peñas Blancas se adoptó el valor de 74.30 m de acuerdo con las simulaciones del modelo hidráulico. El valor disponible del área operativa 8 (93.57 m) no es consistente con los resultados de la modelación hidráulica.
- Para la estación de Barrancabermeja se adoptó el valor de 70.57 m, dado que INCIGE realizó esta medición en diciembre de 2021,
- Para la estación de Puerto Wilches se adoptó el valor de 59.60 m, dado que INCIGE realizó esta medición en diciembre de 2021,
- Para la estación de San Pablo se adoptó el valor de 54.81 m, dado que INCIGE realizó esta medición en diciembre de 2021,
- Para la estación de Sitio Nuevo se adoptó el valor de 46.58 m, dado que el valor incorporado en la plataforma FEWS-Colombia parece ser más consistente que la de la inundación del río Magdalena; mientras que con el valor de 50.98 m (inundación del río Magdalena) no se puede ejecutar el modelo hidráulico ya que sale un mensaje de advertencia que los niveles de agua en la sección de Sitio Nuevo se salen del cauce.

6.3.3 Análisis de caudales

En la Figura 6.8 se muestra la comparación de los caudales en las estaciones Puerto Berrío, Peñas Blancas y Sitio Nuevo resultantes de la simulación del modelo hidráulico ajustado. Se observa el

aporte de los tributarios e incremento de los caudales en las dos estaciones de aguas abajo. De la figura se puede decir que el tiempo medio de viaje de la onda de creciente en el río Magdalena es de 2 días entre las estaciones de Puerto Berrío y Peñas Blancas y de 2 días entre las estaciones de Peñas Blancas y Sitio Nuevo.

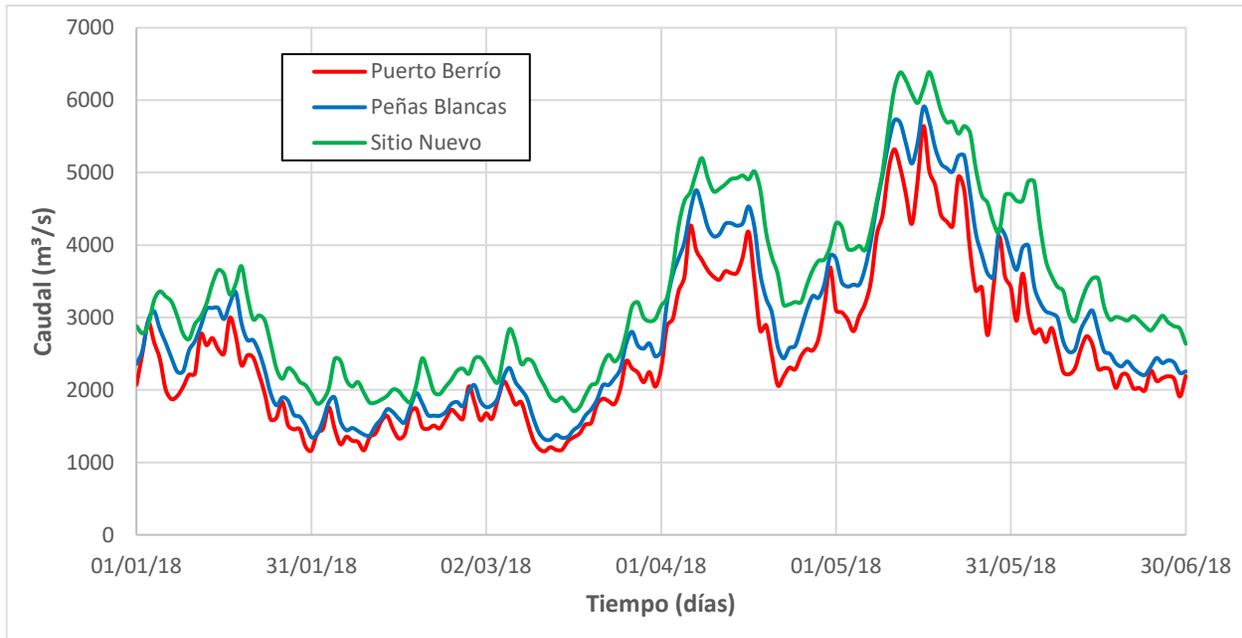


Figura 6.8 – Comparación de los caudales simulados en las estaciones de Puerto Berrío, Peñas Blancas y Sitio Nuevo – Primer ajuste

En la Figura 6.9 se muestra la comparación de los caudales registrados en la estación de Peñas Blancas con los caudales simulados en el modelo hidráulico, en donde para los dos primeros meses del período de simulación se observa una subestimación en el modelo hidráulico, mientras que, para los siguientes cuatro meses se observa una adecuada representación del modelo hidráulico con los valores registrados en la estación.

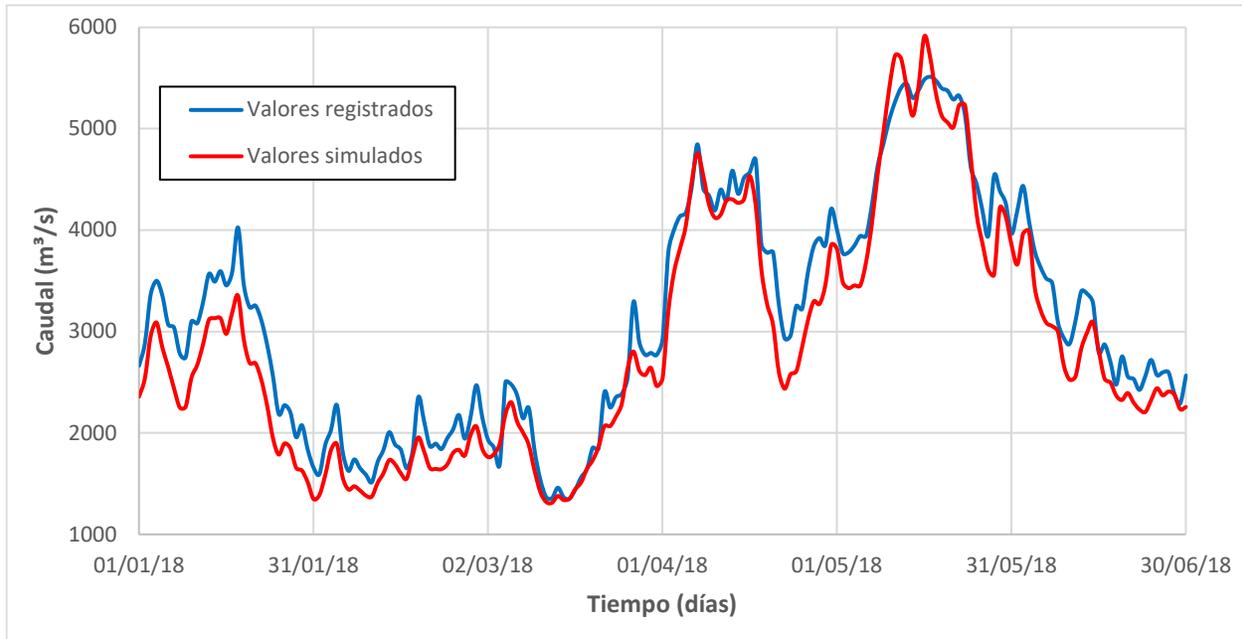


Figura 6.9 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Primer ajuste

En la Figura 6.10 se muestra la comparación de los caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo con los caudales simulados en el modelo hidráulico, en donde se observa una adecuada representación del modelo hidráulico con los valores registrados en la estación, con excepción del período correspondiente al limbo descendente de las crecientes máximas.

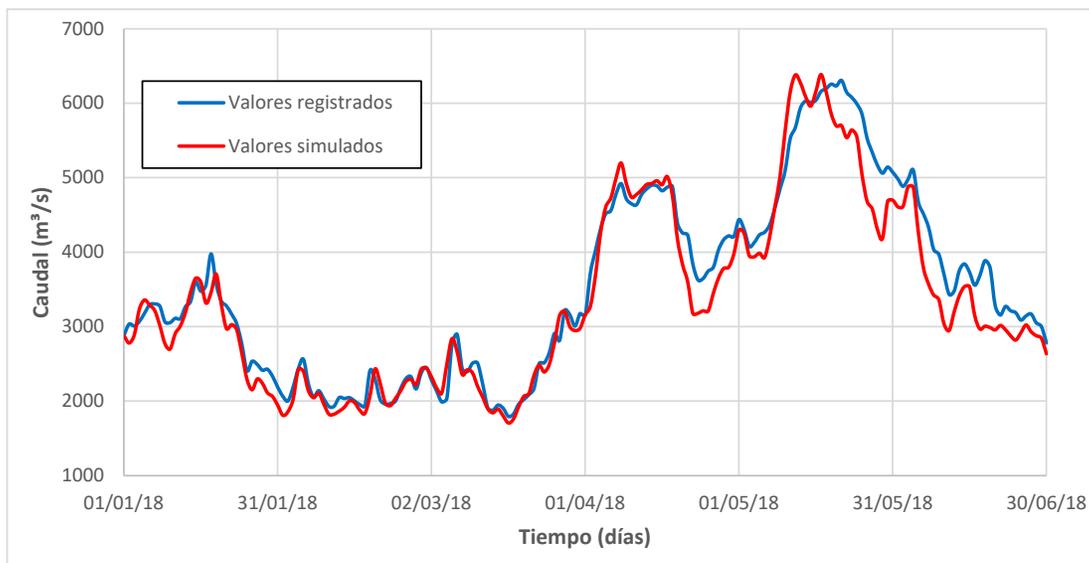


Figura 6.10 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Primer ajuste

En la Figura 6.11 se muestra la comparación de los caudales registrados y simulados en relación con la línea de perfecto ajuste, en donde se observa que los valores de caudal simulados se encuentran en un rango de $\pm 28\%$ el valor registrado para la estación de Peñas Blancas (Figura 6.11-a) y $\pm 30\%$ para la estación de Sitio Nuevo (Figura 6.11-b).

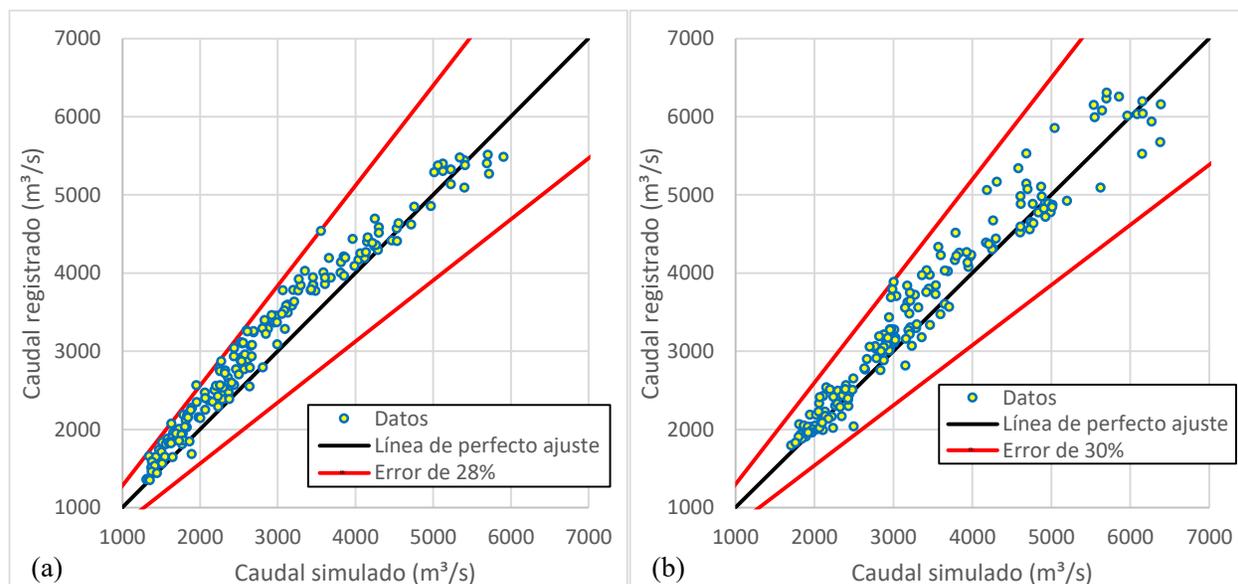


Figura 6.11 – Comparación de los caudales en las estaciones de (a) Peñas Blancas y (b) Sitio Nuevo – Primer ajuste

En la Figura 6.12 se muestra el efecto de incorporar las estructuras hidráulicas, reducción de los caudales pico, en la comparación de caudales en la estación de Sitio Nuevo. De la Figura 6.12 es claro que con la incorporación de las estructuras hidráulicas (que permiten desborde del cauce) se atenúan los caudales pico identificados en la simulación del modelo base (Figura 3.41), observándose una reducción en el caudal máximo de hasta $1900 m^3/s$, aproximadamente. Al permitir el desbordamiento del cauce, el modelo hidráulico tiene a dar resultados similares a los registrados en la estación de Sitio Nuevo.

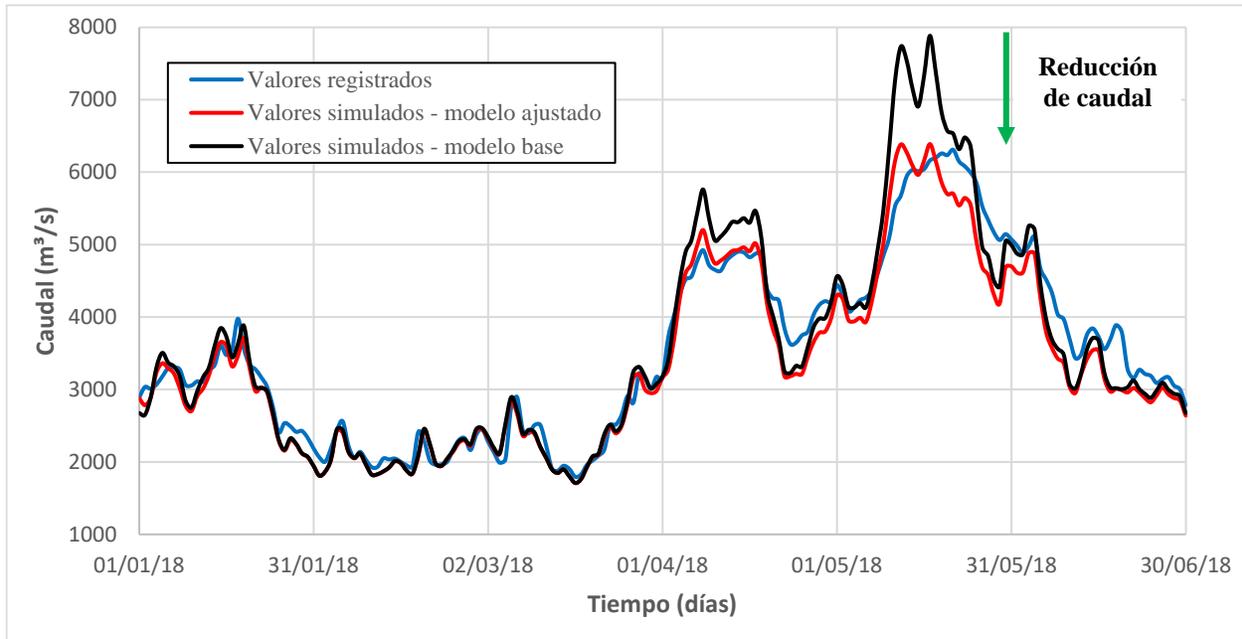


Figura 6.12 – Efecto de la incorporación de estructuras hidráulica (desbordamiento del cauce) en los caudales simulados en la estación de Sitio Nuevo – Primer ajuste

En la Figura 6.13 se muestran las series de caudal correspondientes a los desbordamientos en las secciones en donde se sobrepasa la banca llena, y que son el resultado de incorporar las estructuras hidráulicas laterales.

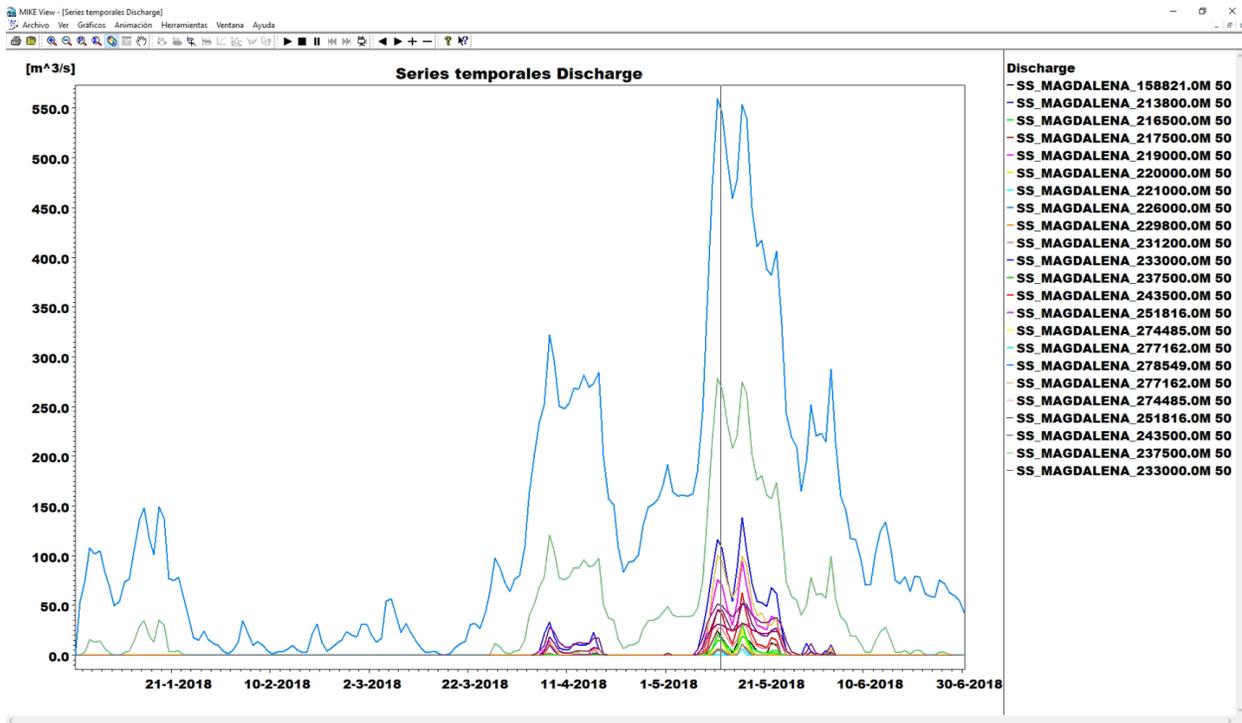


Figura 6.13 – Caudales de desborde en las secciones en donde se incorporaron las estructuras hidráulicas laterales – Primer ajuste

6.3.4 Análisis de niveles

En la Figura 6.14 se muestra la comparación de los niveles en las estaciones Peñas Blancas, Barrancabermeja, Puerto Wilches, San Pablo y Sitio Nuevo resultantes de la simulación del modelo hidráulico ajustado. Se observa que la serie de niveles tiene una tendencia similar en las 5 estaciones.

Mientras que, en la Figura 6.15 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Peñas Blancas con los niveles simulados en el modelo hidráulico, en donde se observa que el nivel registrado es aproximadamente 0.5 m más alto que el simulado.

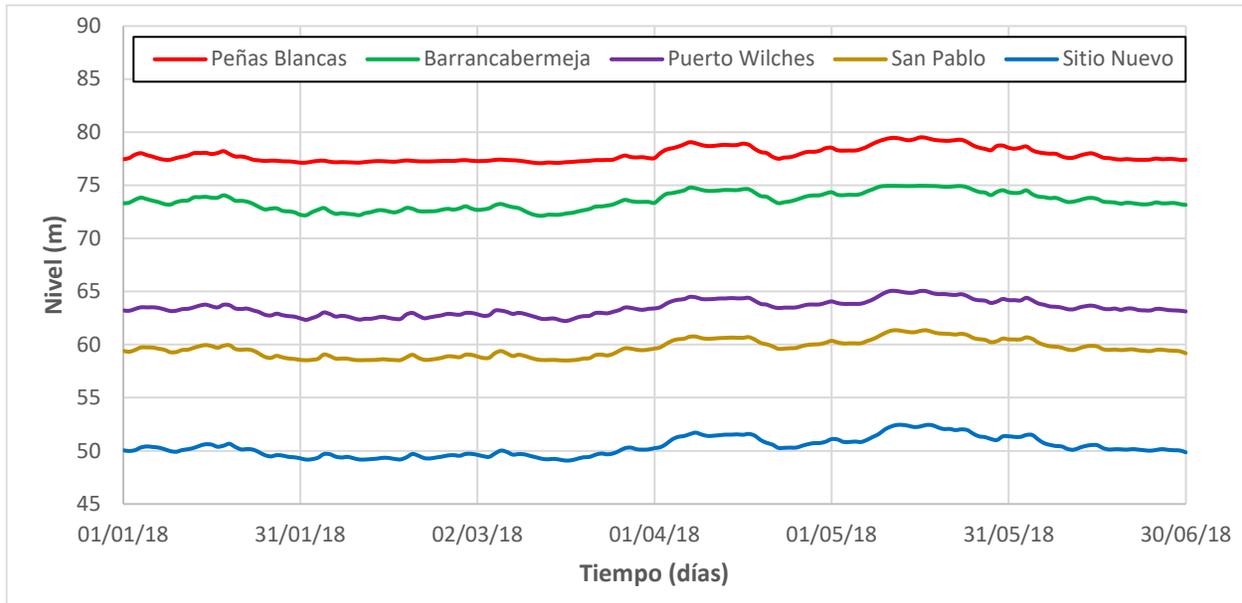


Figura 6.14 – Comparación de los niveles simulados en las estaciones de Peñas Blancas, Barrancabermeja, Puerto Wilches, San Pablo y Sitio Nuevo – Primer ajuste

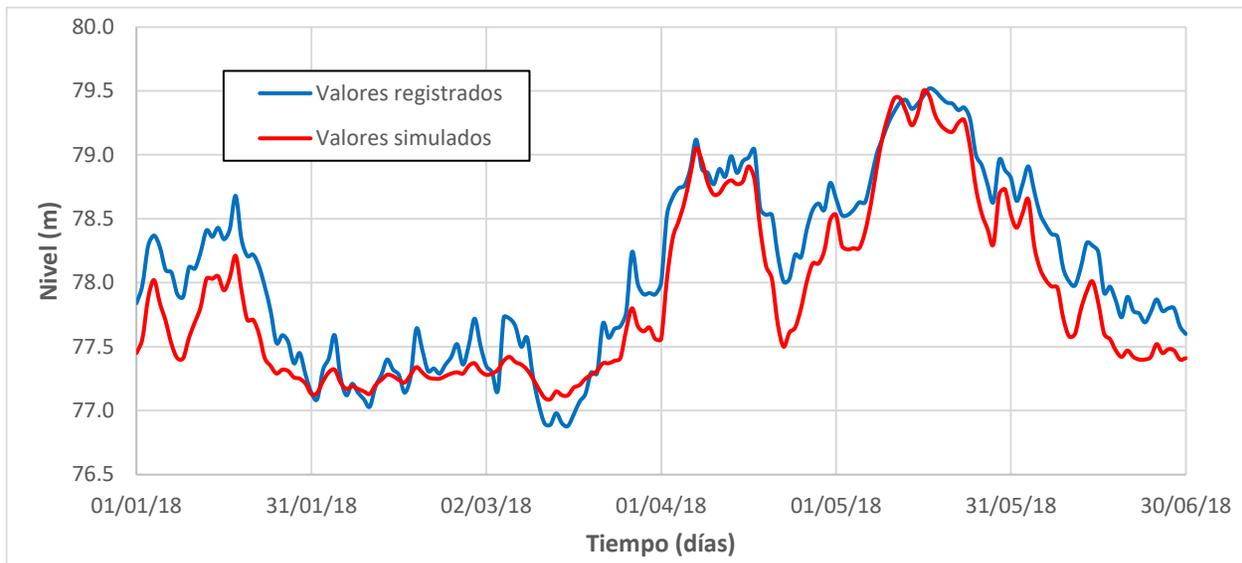


Figura 6.15 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Primer ajuste

En la Figura 6.16 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Barrancabermeja con los niveles simulados en el modelo hidráulico, en donde se observa que el modelo hidráulico representa adecuadamente los niveles registrados.

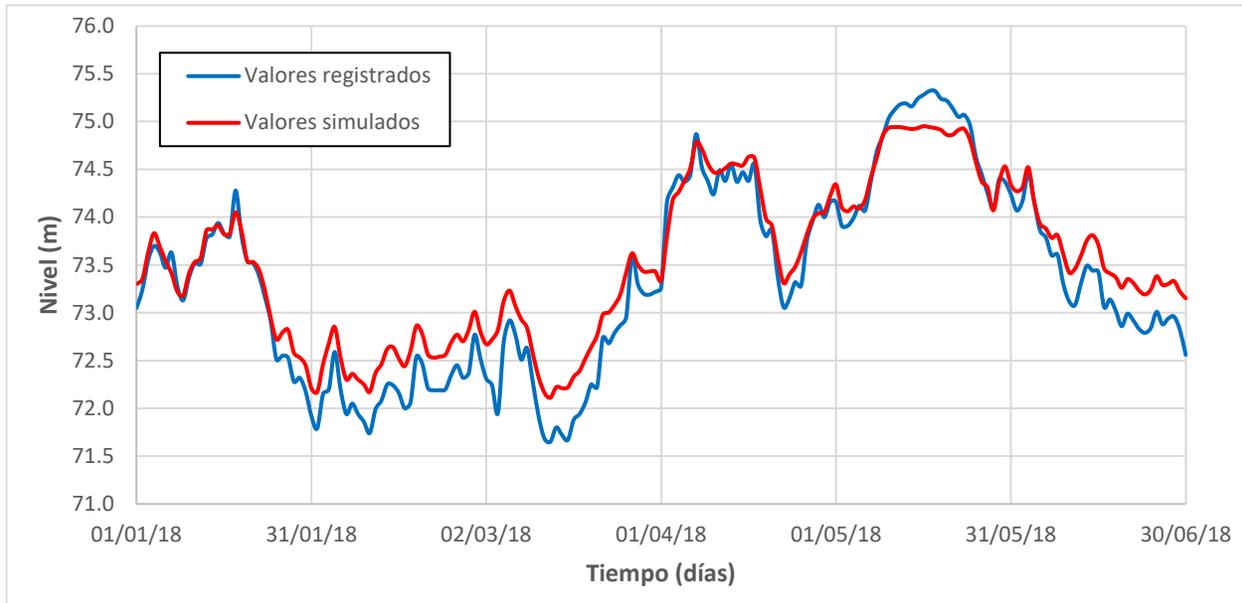


Figura 6.16 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – Primer ajuste

En la Figura 6.17 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Puerto Wilches con los niveles simulados en el modelo hidráulico, en donde se observa que el nivel registrado es aproximadamente 0.85 m más alto que el simulado.

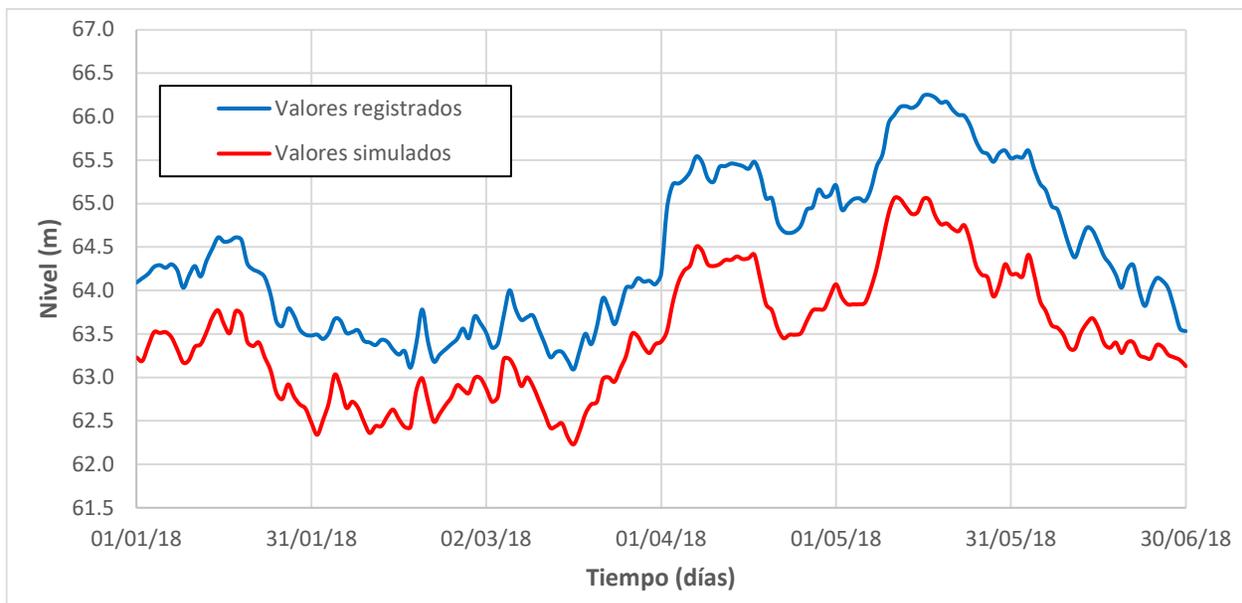


Figura 6.17 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – Primer ajuste

En la Figura 6.18 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de San Pablo con los niveles simulados en el modelo hidráulico, en donde se observa que el nivel registrado es aproximadamente 0.90 m más alto que el simulado.

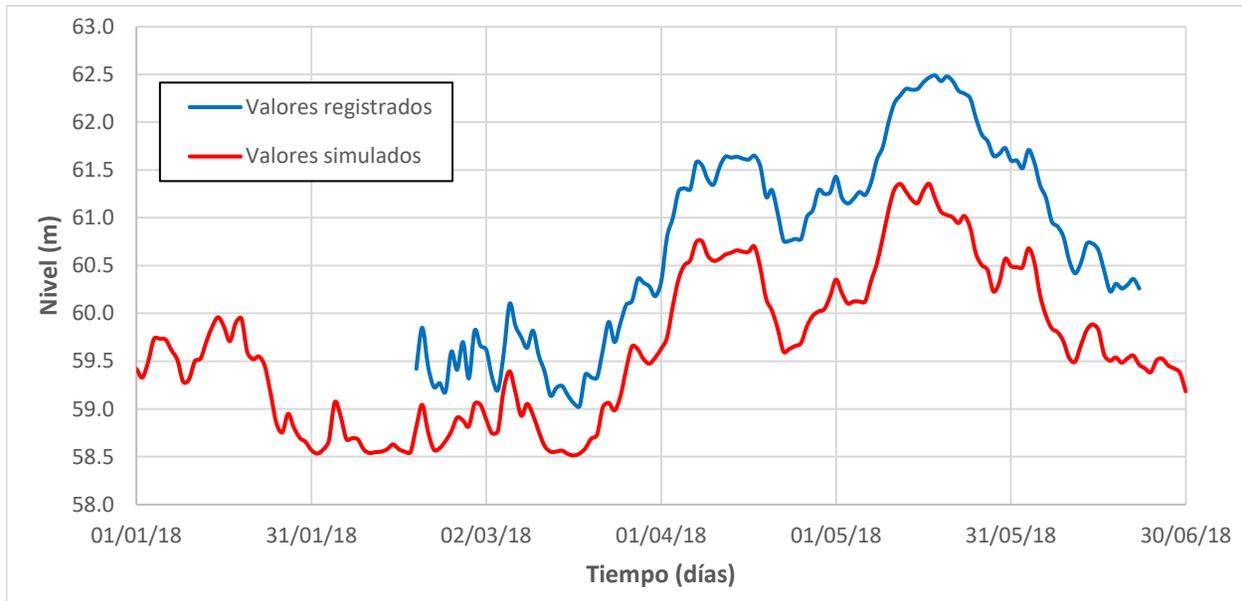


Figura 6.18 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – Primer ajuste

En la Figura 6.19 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo con los niveles simulados en el modelo hidráulico, en donde se observa que el modelo hidráulico representa adecuadamente los niveles registrados.

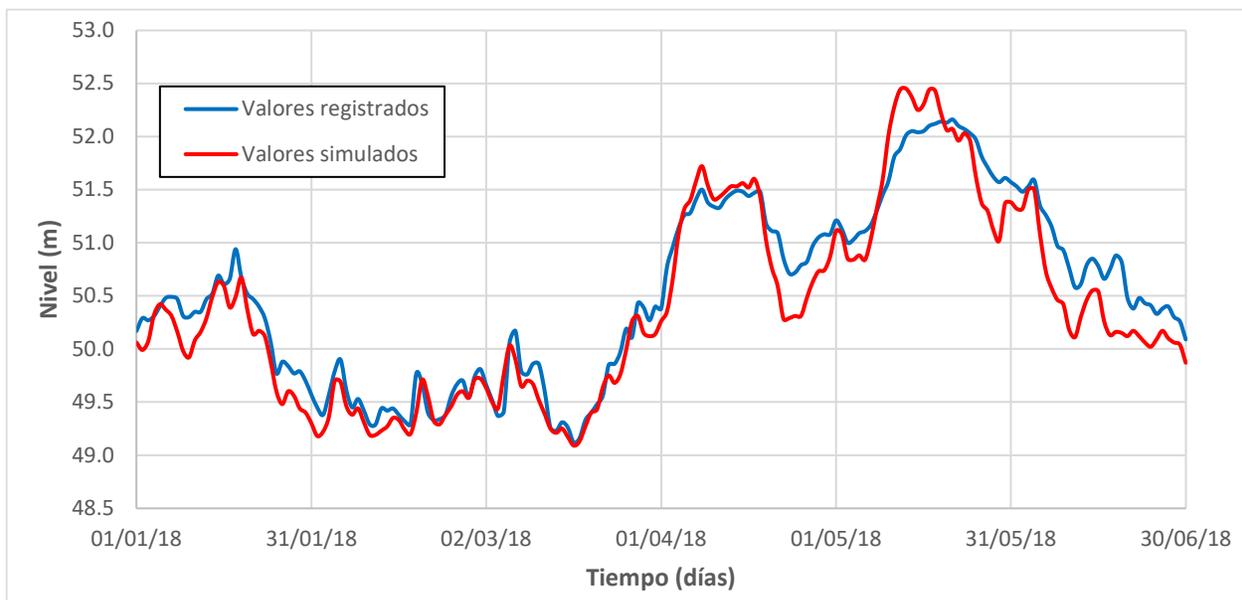


Figura 6.19 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Primer ajuste

A manera de ejemplo, en la Figura 6.20 se muestra la comparación de los niveles registrados y simulados de acuerdo con la línea de perfecto ajuste para la estación de Barrancabermeja (Figura 6.20-a) y Sitio Nuevo (Figura 6.20-b). Para el caso de la estación de Barrancabermeja los valores de niveles simulados se encuentran en un rango de ± 0.85 m del valor registrado, mientras que, en la estación de Sitio Nuevo los valores de niveles simulados se encuentran en un rango de ± 0.70 m del valor registrado.

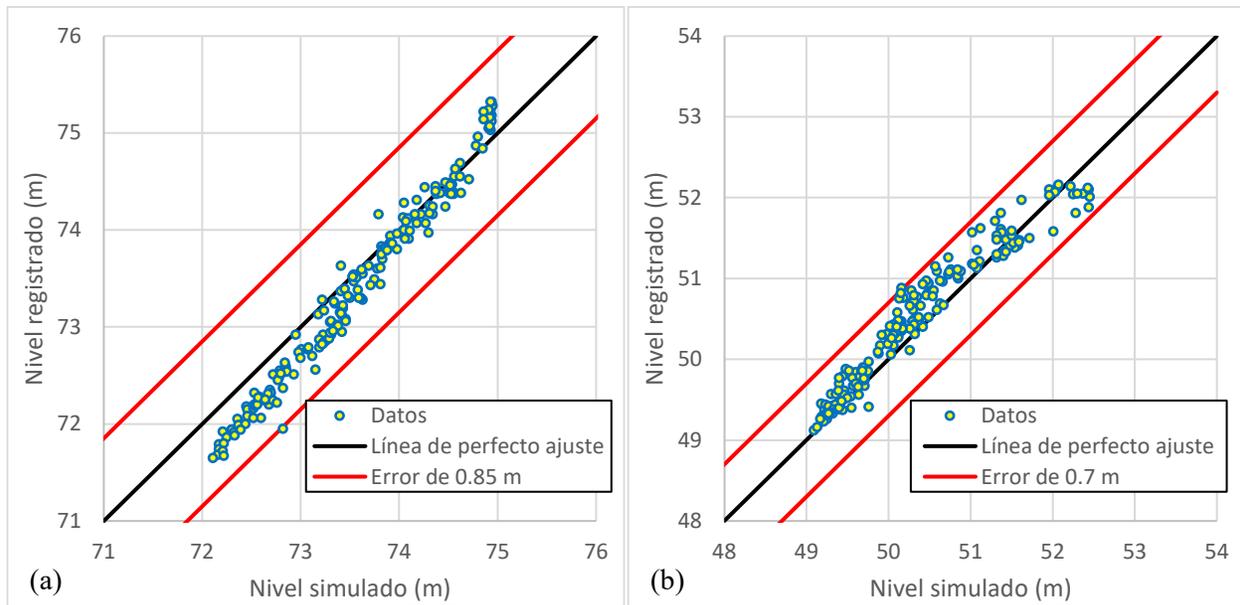


Figura 6.20 – Comparación de niveles simulados y registrados en las estaciones: (a) Barrancabermeja y (b) Sitio Nuevo – Primer ajuste

6.4 Segundo ajuste del modelo hidráulico

6.4.1 Ajuste del alineamiento del cauce

El alineamiento del cauce del río Magdalena del modelo hidráulico de MIKE11, en el tramo de análisis (entre las estaciones de Puerto Berrío y Sitio Nuevo), se validó con una imagen satelital LANDSAT de enero de 2021 (ver numeral 2.2), encontrándose que el alineamiento del cauce ha sufrido cambios importantes, como se muestra en la Figura 6.21.

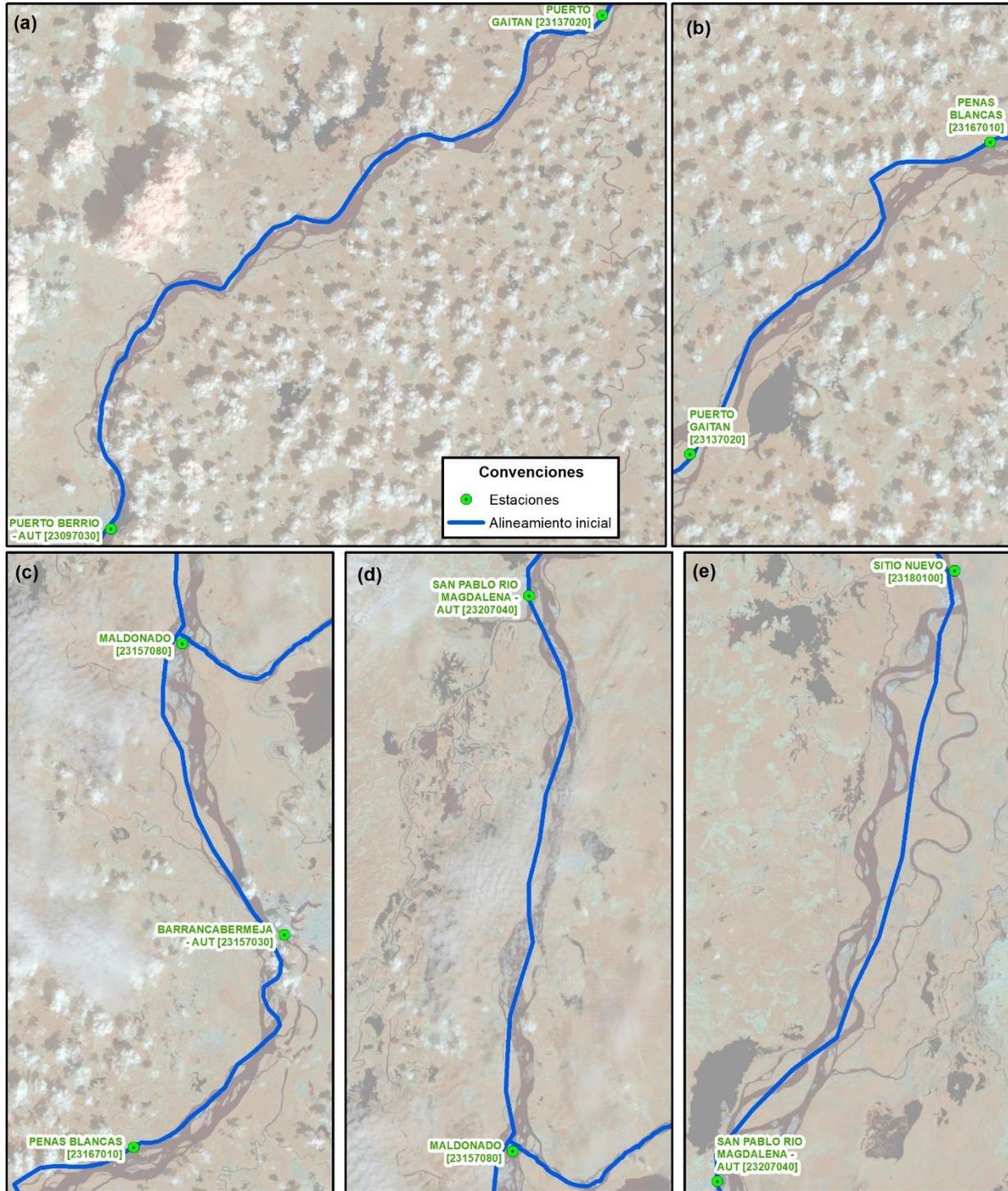


Figura 6.21 – Alineamiento del río Magdalena incorporado en el modelo hidráulico de MIKE11

Por esta razón se procedió a ajustar el alineamiento del cauce del río Magdalena en el tramo de análisis. El procedimiento fue el siguiente:

- En ArcGIS se realizó el nuevo trazado del alineamiento, teniendo en cuenta la imagen satelital de enero de 2021 (numeral 2.2) para los tramos entre las secciones 84 – 31 y 5 – 1, y teniendo en cuenta la ortofoto del levantamiento LiDAR (numeral 4.3) para el tramo entre las secciones 31 – 5, como se muestra en la Figura 6.22.

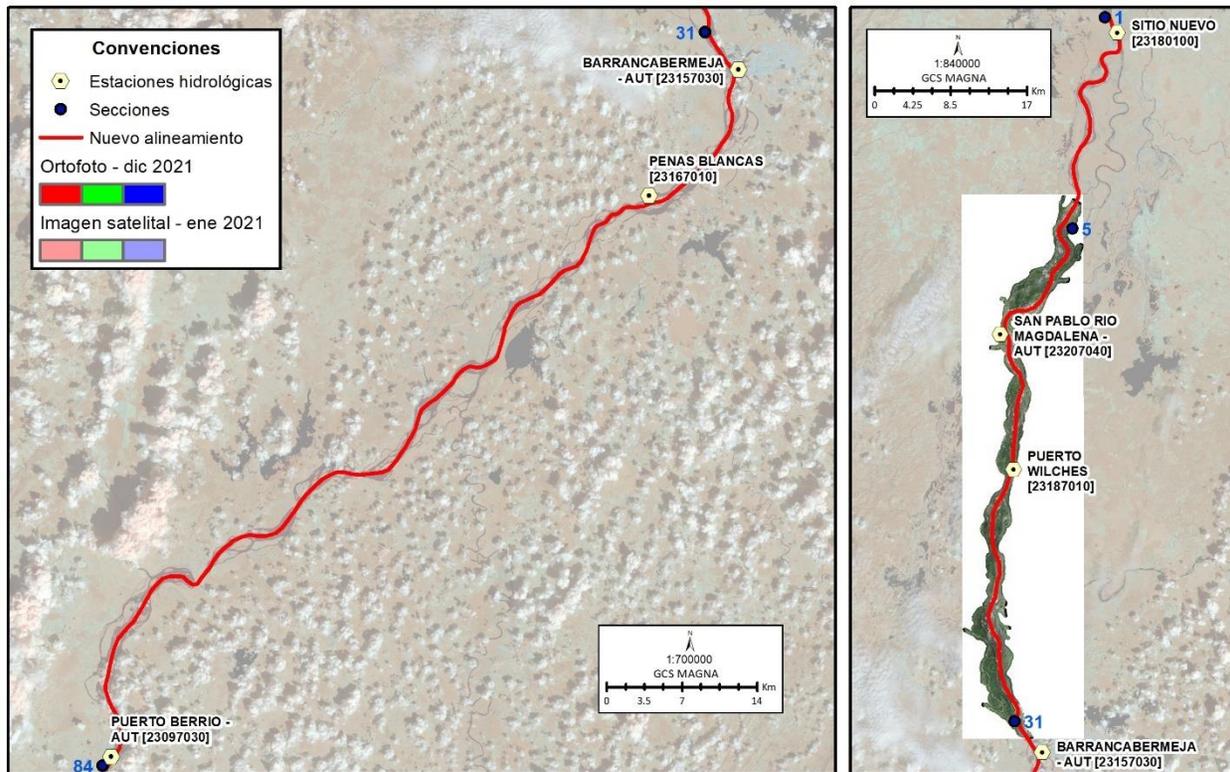


Figura 6.22 – Nuevo alineamiento del cauce por incorporar en el modelo hidráulico

- Se exportaron las coordenadas de los vértices del alineamiento a Excel y posteriormente se incorporaron en un nuevo archivo de topología del modelo hidráulico (en el programa MIKE11), como se muestra en la Figura 6.23.

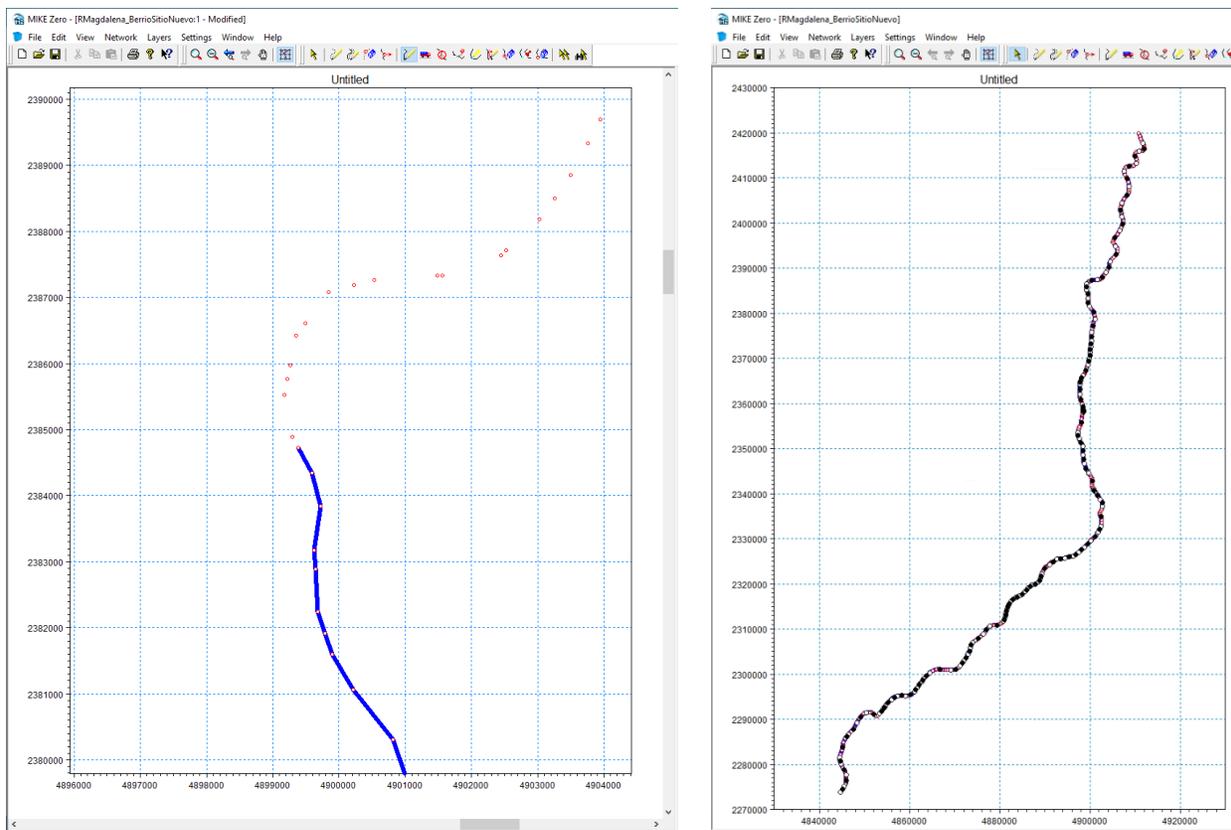


Figura 6.23 – Incorporación de la nueva topología del modelo hidráulico (alineamiento) en el programa MIKE11

Posteriormente, se ajustó la nomenclatura (nombre de identificación) de las secciones, existentes y nuevas, de acuerdo con el nuevo alineamiento (Figura 6.24). En la Tabla 6.2 se muestra la relación de esta nomenclatura con el abscisado de la nueva topología del modelo hidráulico.

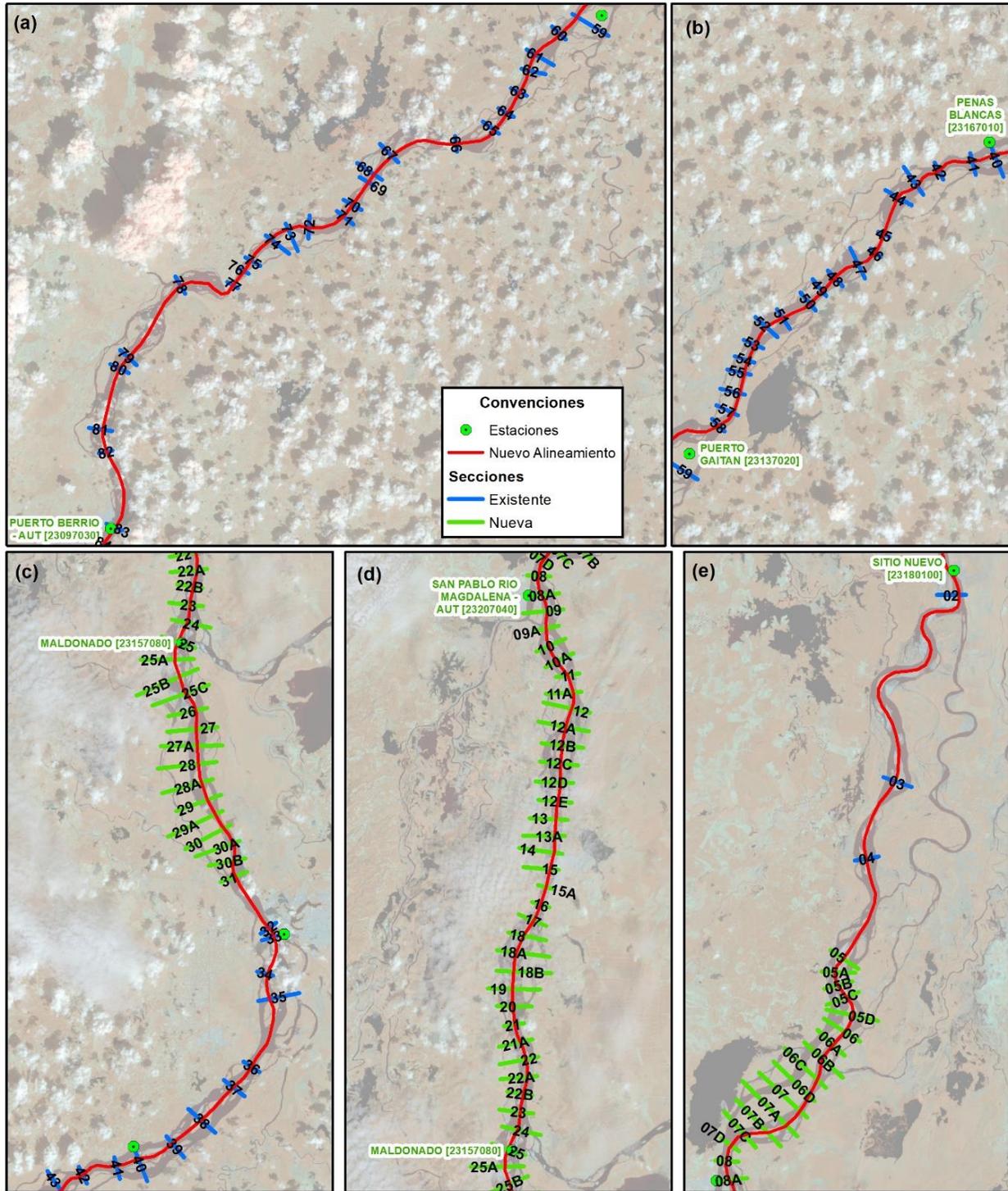


Figura 6.24 – Nomenclatura de las secciones incorporadas en la nueva topología del modelo hidráulico

Tabla 6.2 – Relación de la nomenclatura de las secciones con el abscisado de la nueva topología del modelo hidráulico

Sección	Abscisa	Sección	Abscisa	Sección	Abscisa	Sección	Abscisa
84	145956.0	54	209868.4	28	255137.0	12B	285088.6
83	147300.6	53	210802.5	27A	256135.7	12A	286126.3
82	152836.7	52	211960.8	27	257069.1	12	287179.2
81	154368.9	51	212991.5	26	258092.5	11A	288107.1
80	158692.0	50	214688.4	25C	259195.2	11	289088.0
79	159631.2	49	215650.0	25B	260172.1	10A	290055.6
78	165698.1	48	216663.3	25A	261177.7	10	291010.8
77	169861.1	47	218170.7	25	262148.3	9A	292000.6
76	171063.0	46	219338.7	24	263322.8	9	292960.2
75	171934.9	45	220434.6	23	264326.2	8A	293920.0
74	173906.8	44	222619.3	22B	265337.0	8	294990.2
73	175296.4	43	223855.0	22A	266298.5	7D	295894.0
72	176722.5	42	225386.3	22	267276.6	7C	296881.9
71	179302.6	41	227439.4	21A	268283.9	7B	298145.7
70	180295.9	40	228713.0	21	269281.9	7A	299265.1
69	182182.4	39	230805.3	20	270303.6	7	300351.5
68	182824.4	38	232846.4	19	271250.6	6D	301323.3
67	184571.6	37	235362.8	18B	272207.4	6C	302316.6
66	189235.4	36	236889.6	18A	273272.0	6B	303518.0
65	192110.4	35	240957.5	18	274267.4	6A	304494.4
64	193545.4	34	242349.8	17	275263.0	6	305435.6
63	195208.5	33	244493.4	16	276226.3	5D	306472.8
62	196847.7	32	245059.6	15A	277241.2	5C	307612.9
61	198003.2	31	248446.2	15	278246.1	5B	308399.6
60	200189.9	30B	249339.7	14	279164.0	5A	309160.0
59	201833.9	30A	250326.2	13A	280094.0	5	310039.5
58	205794.7	30	251280.7	13	281018.9	4	316077.8
57	206869.0	29A	252195.7	12E	281998.9	3	320769.0
56	207994.5	29	253090.2	12D	283055.5	2	334654.2
55	209141.4	28A	254116.7	12C	284086.3	1	338040.2

En la Figura 6.25 (izquierda) se muestra el pantallazo del ajuste de la nomenclatura y abscisa de la sección existente 84 (aguas arriba en la estación de Puerto Berrío) y en la Figura 6.25 (derecha) se muestra el pantallazo del ajuste de la nomenclatura y abscisa de la sección nueva 29, en donde a la nomenclatura se le incluyó el año de la información topo batimétrica (2022). Todas las secciones (existentes y nuevas) se incorporaron en el río con nombre “MAGDALENA” y se colocó un identificador de topografía como “2008-22”, el 2008 haciendo referencia al año de la topografía de las secciones existentes y 22 haciendo referencia al 2022 año del producto de topografía de las secciones nuevas.

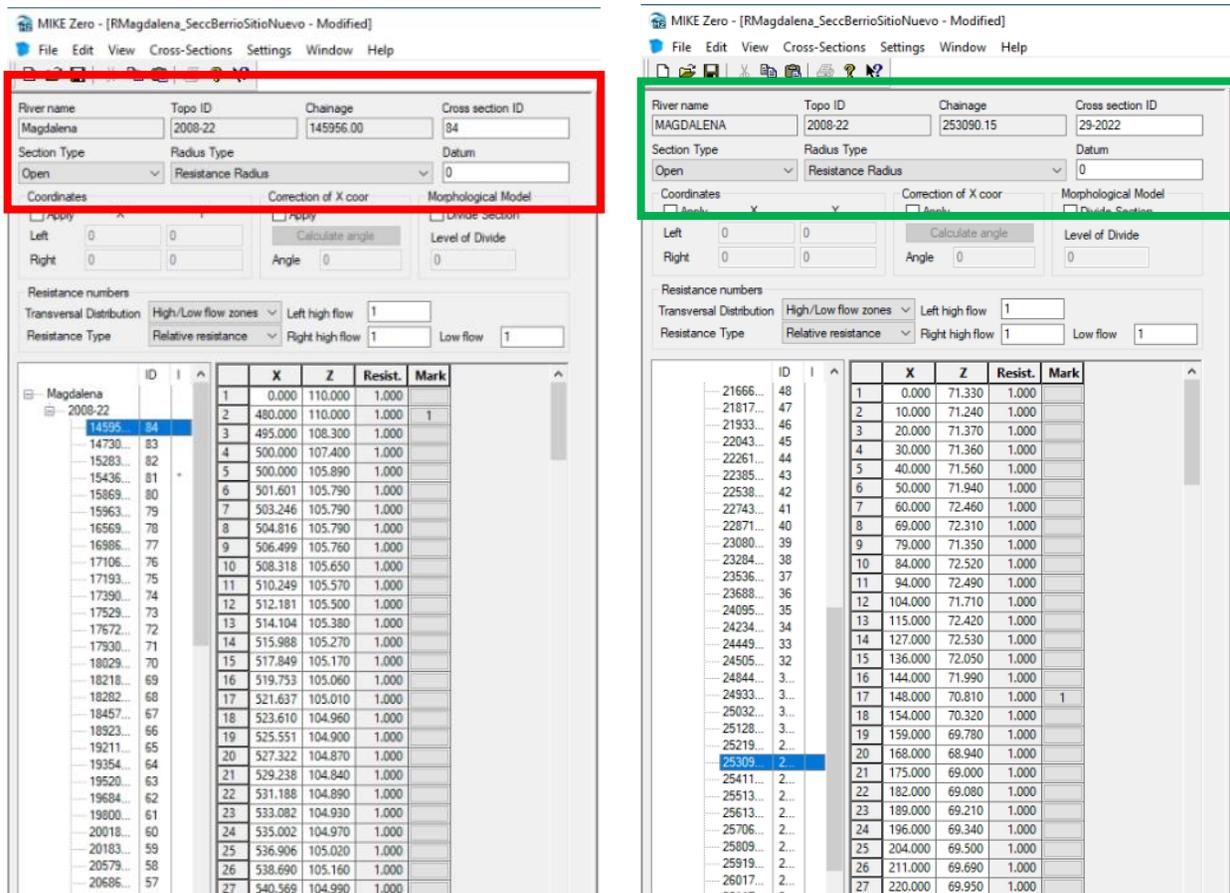


Figura 6.25 – Incorporación de la nomenclatura y abscisas de las secciones en el programa MIKE11: sección existente (izquierda) y sección nueva (derecha)

6.4.2 Incorporación de las nuevas secciones transversales

Posteriormente, los valores de los perfiles de las nuevas secciones (de la Figura 4.25 a la Figura 4.37) fueron incorporados en cada sección definida en el programa MIKE11, como se muestra a manera de ejemplo en la Figura 6.26 para la sección 29.

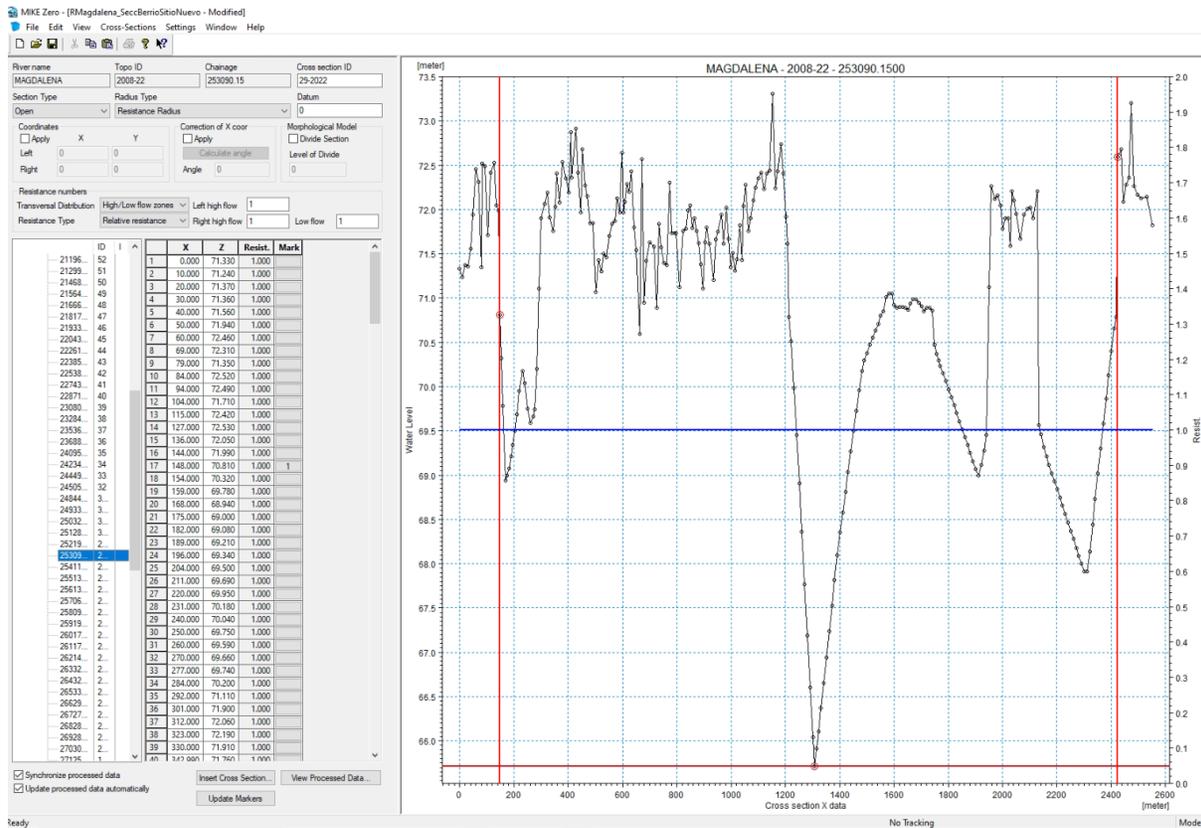


Figura 6.26 – Incorporación de datos X Z de la sección 29 (nueva) en el programa MIKE11

Una vez incorporados los datos X (abscisa horizontal) Z (cota) de cada sección se procedió a establecer los límites de la sección transversal, como lo son el borde de la banca izquierda, el punto más bajo y el borde de la banca derecha. A manera de ejemplo, en la Figura 6.27 (izquierda) se muestran los límites del cauce (bordes de las bancas, puntos rojos) para la sección 23 y en la Figura 6.27 (derecha) se muestra la incorporación de estos límites y la incorporación del punto más bajo de la sección.

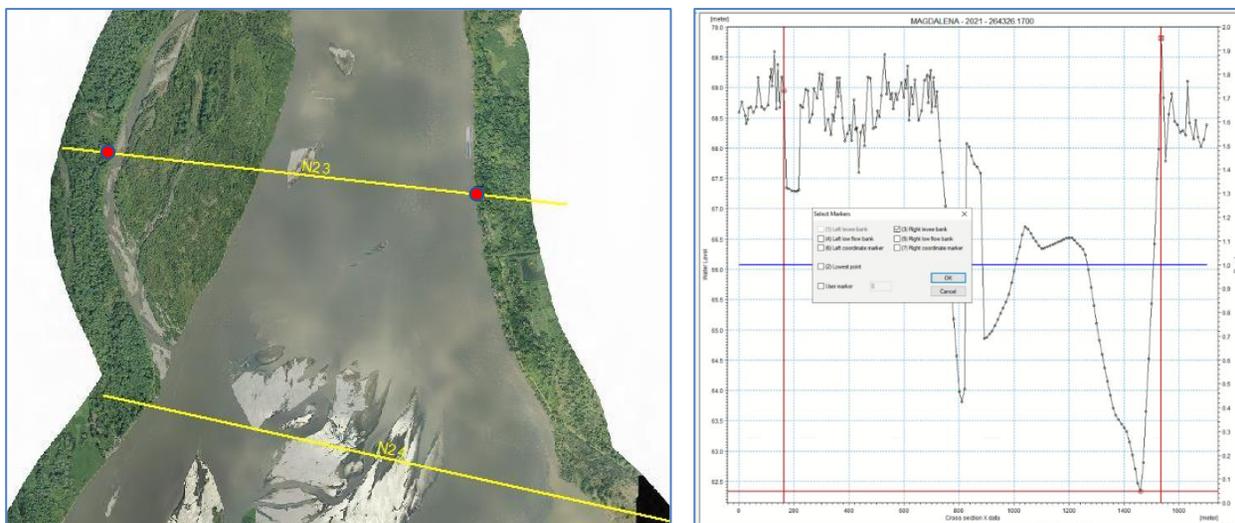


Figura 6.27 – Límites de la sección 23 (izquierda) e incorporación de los límites en el programa MIKE11 (derecha)

6.5 Calibración y validación del modelo hidráulico – caudales

6.5.1 Incorporación de estructuras hidráulicas para simular desbordamiento del cauce

Una vez se incorporó la nueva topología del río Magdalena (secciones transversales) en el modelo hidráulico y de acuerdo con los resultados del modelo hidráulico con el primer ajuste, se procedió a ajustar el número de estructuras hidráulicas (que simulan el desbordamiento del cauce) y los respectivos factores de regulación. Para la calibración del modelo hidráulico (segundo ajuste), a través de la comparación de caudales (medidos y simulados), el cauce se dividió en dos tramos: Puerto Berrío – Peñas Blancas y Peñas Blancas – Sitio Nuevo, ya que en las estaciones finales de los dos tramos se tiene información de registros de caudales. En la Figura 6.28 se muestra la ubicación de 9 estructuras hidráulicas que se incorporaron en el primer tramo del río (Puerto Berrío – Peñas Blancas) y la ubicación de 10 estructuras hidráulicas que se incorporaron en el segundo tramo del río (Peñas Blancas – Sitio Nuevo).

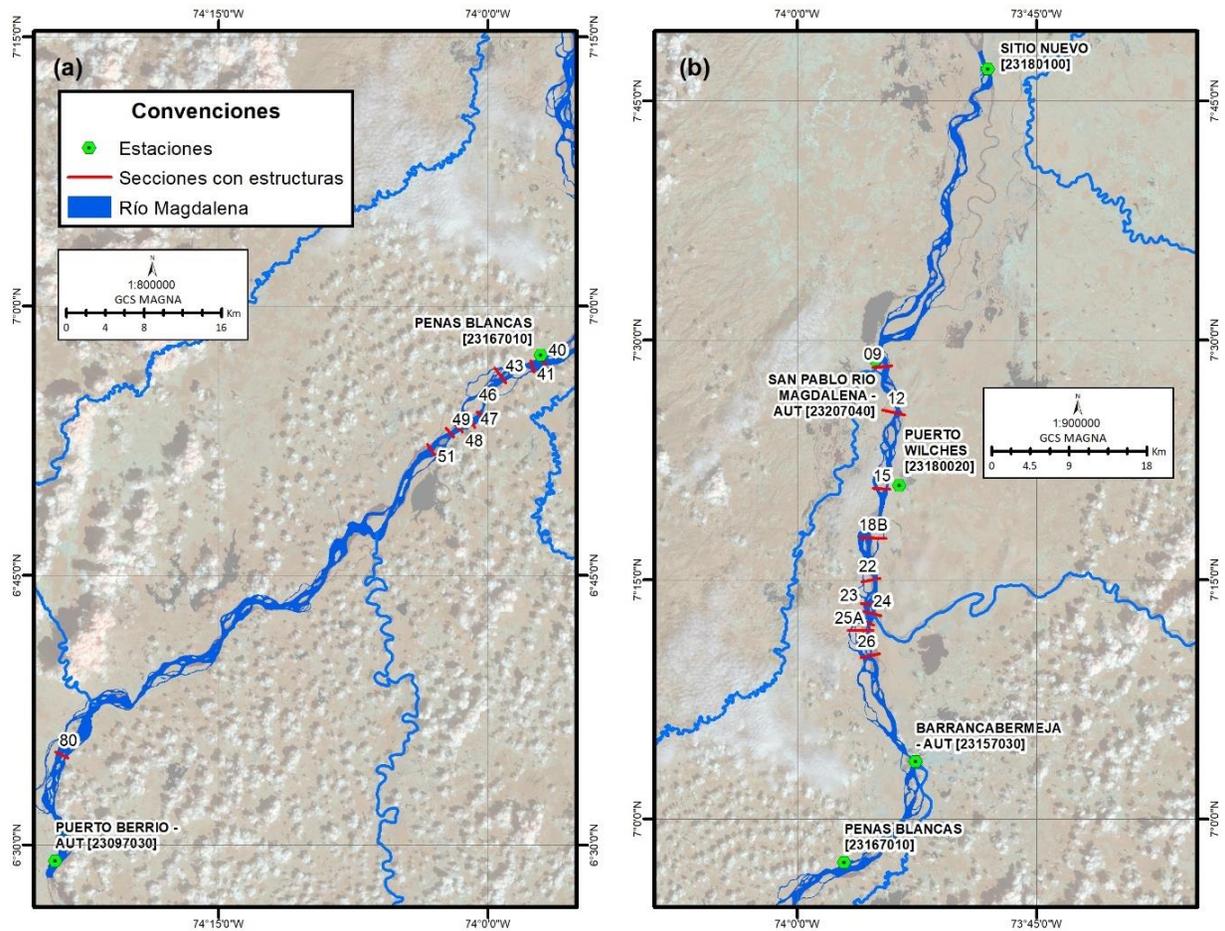


Figura 6.28 – Localización de las estructuras hidráulicas (que simulan los desbordamientos) en el cauce: (a) tramo entre Puerto Berrío y Peñas Blancas y (b) tramo entre Peñas Blancas y Sitio Nuevo

En la Figura 6.29 se muestra la incorporación de cada estructura hidráulica en el programa MIKE11, en donde se incluye la localización (abscisa), la longitud del vertedero lateral (a través de las abscisas inicial y final de la abertura lateral), el parámetro del cual es función la estructura (en este caso de la altura de agua) y los factores de regulación en función del nivel de agua. En todas las estructuras hidráulicas el ancho de la brecha lateral fue establecido en 100.0 m.

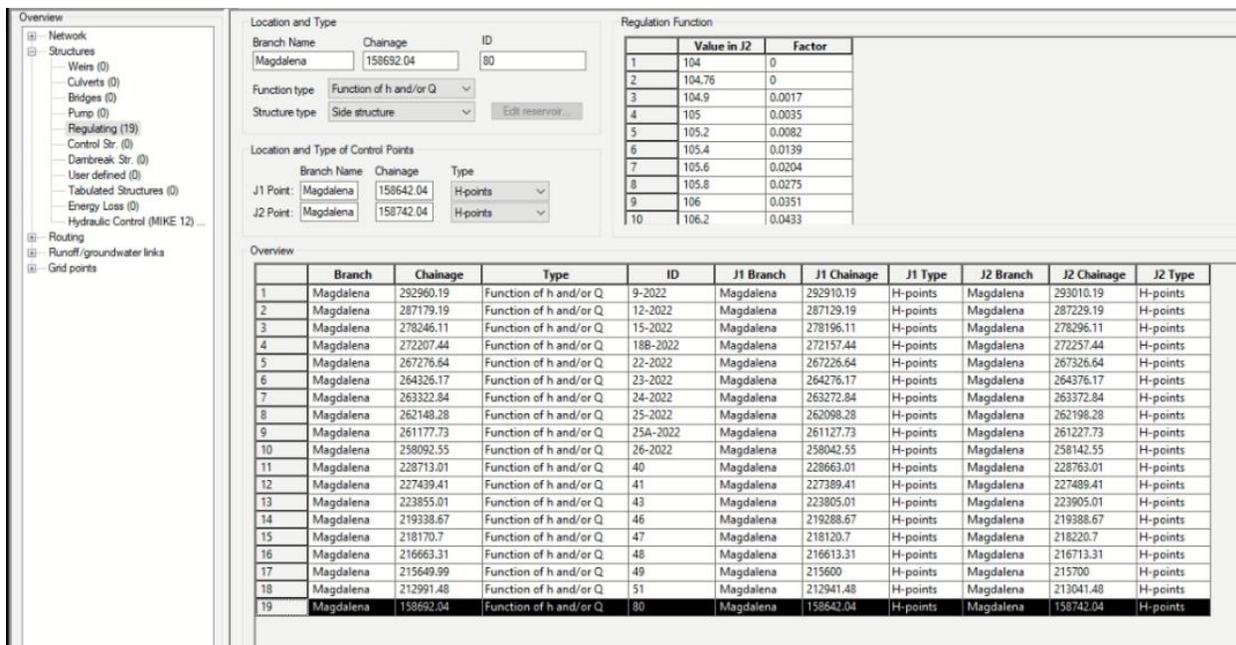


Figura 6.29 – Incorporación de las estructuras hidráulicas (vertederos laterales) en el modelo hidráulico – segundo ajuste

6.5.2 Calibración de los parámetros de las estructuras hidráulicas

Una vez incorporadas las 19 estructuras hidráulicas, el procedimiento de calibración fue:

- Incorporar los factores de regulación en las 19 estructuras hidráulicas,
- Ejecutar el modelo hidráulico con las condiciones de frontera (aportes de caudal) para el primer semestre de 2018 como se hizo en el modelo hidráulico del primer ajuste, presentado en el numeral 6.3,
- Comparar los caudales registrados en las estaciones de Peñas Blancas y Sitio Nuevo con los caudales simulados en el modelo hidráulico,
- Con base en las diferencias de caudal en la estación de Peñas Blancas, se ajustan los factores de regulación de las estructuras incorporadas en el primer tramo,
- Con base en las diferencias de caudal en la estación de Sitio Nuevo, se ajustan los factores de regulación de las estructuras incorporadas en el segundo tramo,

- Se repite el procedimiento hasta que las diferencias de caudal sean mínimas (particularmente para los caudales pico).

En la Figura 6.30 se muestran los factores de regulación de las 9 estructuras hidráulicas localizadas en el tramo Puerto Berrío – Peñas Blancas, los cuales son función del nivel de agua, y en la Figura 6.31 se muestran los factores de regulación de las 10 estructuras hidráulicas localizadas en el tramo Peñas Blancas – Sitio Nuevo, los cuales son función del nivel de agua.

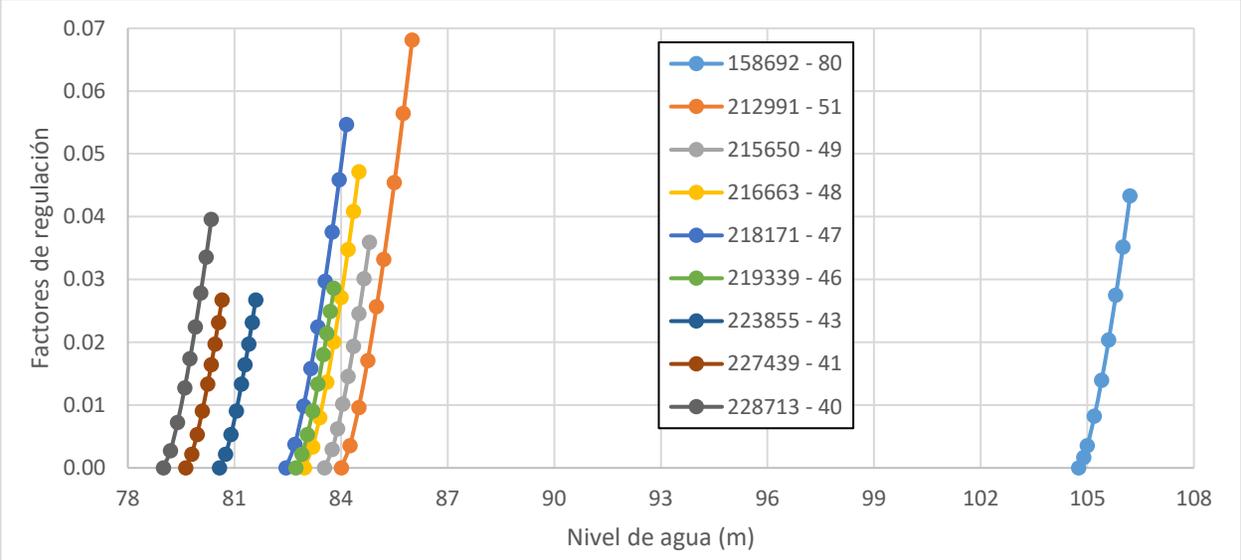


Figura 6.30 – Factores de regulación de las estructuras hidráulicas para el tramo Puerto Berrío – Peñas Blancas

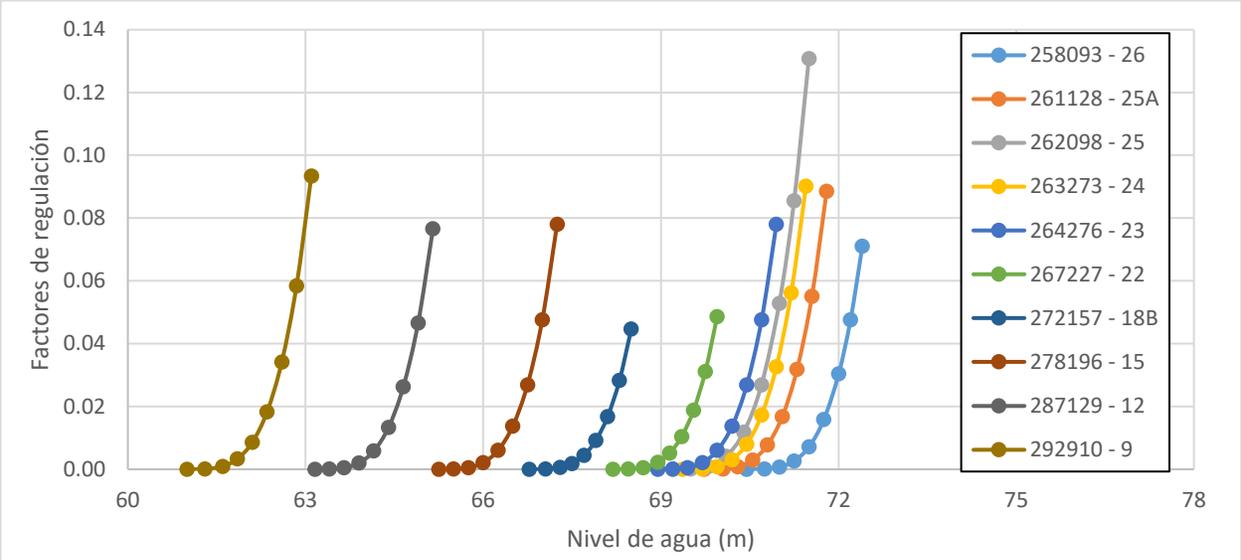


Figura 6.31 – Factores de regulación de las estructuras hidráulicas para el tramo Peñas Blancas – Sitio Nuevo



En la Figura 6.32 se muestra la comparación de los caudales registrados y simulados en la estación de Peñas Blancas, en donde se observa que el modelo hidráulico representa adecuadamente los caudales registrados.

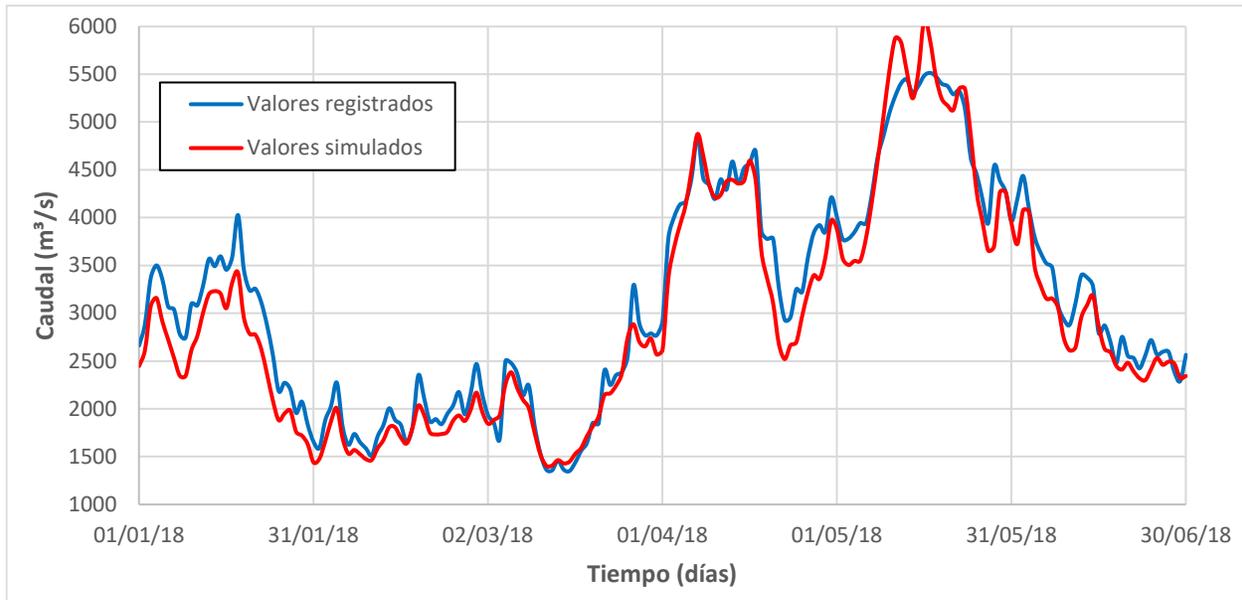


Figura 6.32 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Calibración

Mientras que en la Figura 6.33 se muestra la comparación de los caudales registrados y simulados en la estación de Sitio Nuevo, en donde se observa que el modelo hidráulico representa adecuadamente los caudales registrados.

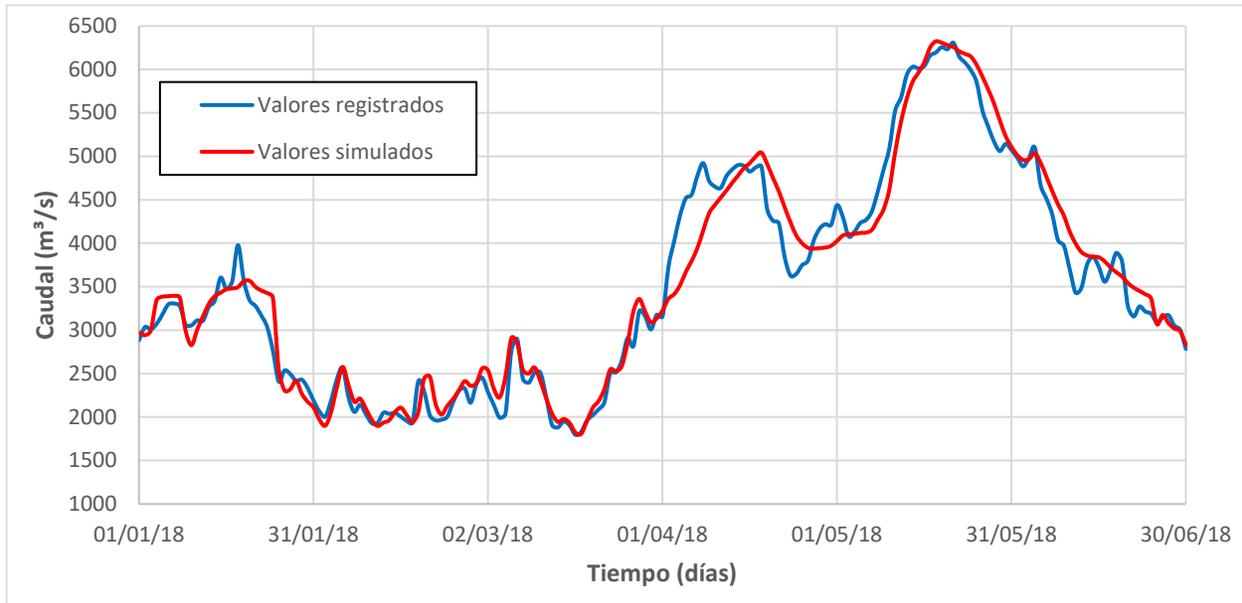


Figura 6.33 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Calibración

En la Figura 6.34 se muestra la comparación de los caudales registrados y simulados en relación con la línea de perfecto ajuste, en donde se observa que los valores de caudal simulados se encuentran en un rango de $\pm 22\%$ el valor registrado en las dos estaciones, obteniéndose una mejora en relación con el análisis del modelo hidráulico con el primer ajuste.

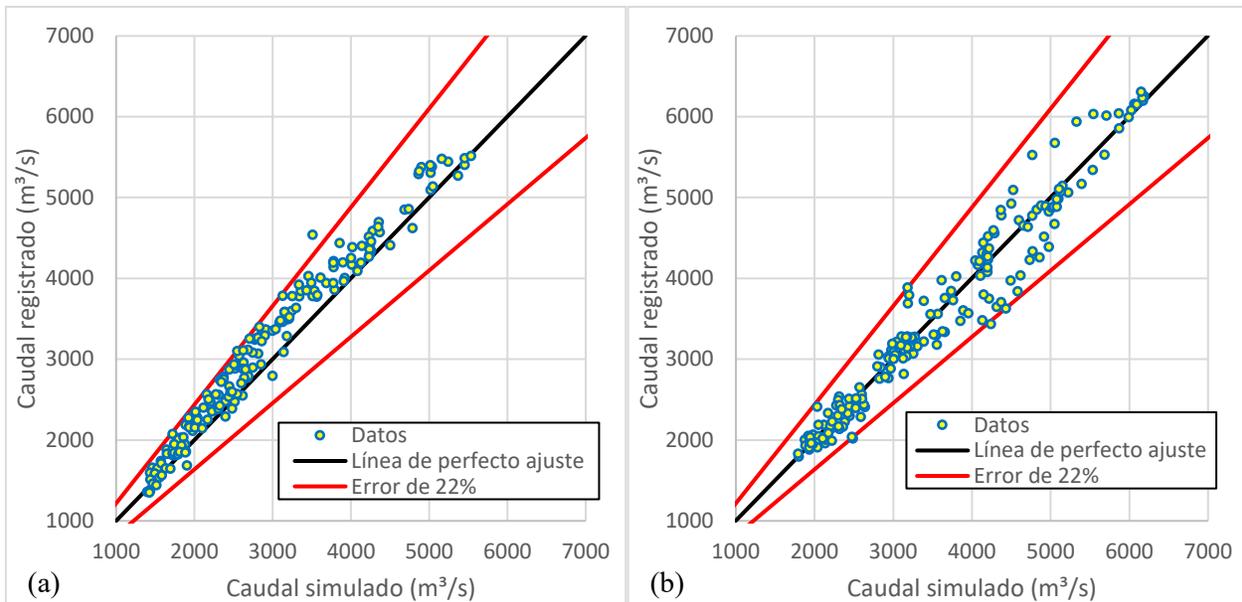


Figura 6.34 – Comparación de los caudales en las estaciones de (a) Peñas Blancas y (b) Sitio Nuevo – Segundo ajuste (calibración)

6.5.3 Validación del modelo hidráulico

Para validar el modelo hidráulico calibrado se utilizará la información medida (registrada) de caudales en las estaciones del tramo de estudio (Puerto Berrío – Sitio Nuevo) entre el 1 de septiembre de 2010 hasta el 31 de diciembre de 2011, período de desbordamiento del río Magdalena.

Las condiciones de frontera establecidas en el modelo hidráulico para la validación son: (1) en la abscisa K145+956, condición de aguas arriba, se utilizó la información registrada en la estación Puerto Berrío – AUT [23097030], como se muestra en la Figura 6.35; (2) en la abscisa K165+698 se utilizó la información registrada en la estación La Bodega [23107020], para simular el aporte del río San Bartolomé, como se muestra en la Figura 6.36; (3) en la abscisa K201+834 se utilizó la información registrada en la estación Barretero Finca [23127050], para simular el aporte del río Carare, como se muestra en la Figura 6.37; (4) en la abscisa K244+493 se utilizó la información registrada en la estación Puente Ferrocarril [23147020], para simular el aporte del río Opón, como se muestra en la Figura 6.38; (5) en la abscisa K263+323 se utilizó la información registrada en la estación Puente Sogamoso [24067020], para simular el aporte del río Sogamoso, como se muestra en la Figura 6.39; (6) en la abscisas K292+960 se utilizó la misma información del río San Bartolomé para simular el aporte del río Cimitarra, como se muestra en la Figura 6.40; y (7) en la abscisa K338+040 se utilizó la información de la estación Sitio Nuevo (curva de gasto) para simular la condición de frontera de aguas abajo del tramo de modelación, como se muestra en la Figura 6.41 (incluida la curva de gasto).

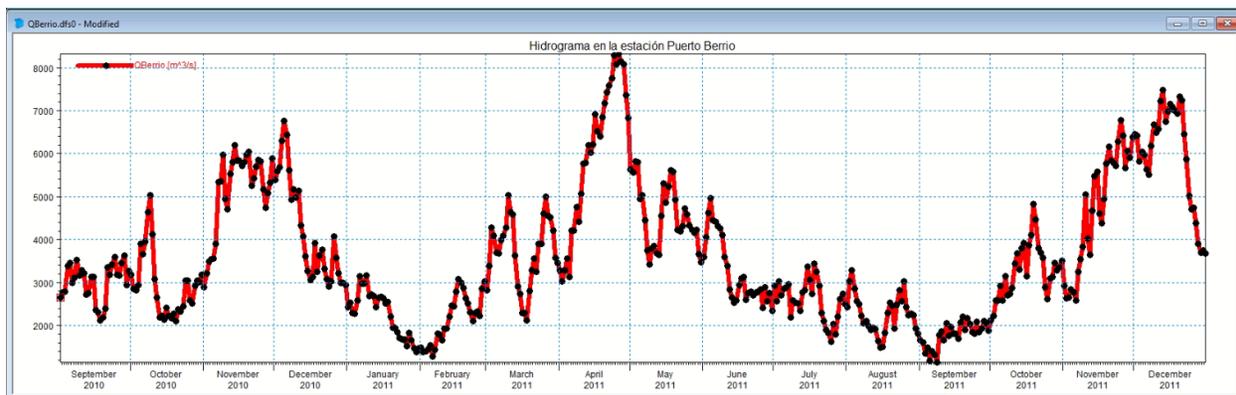


Figura 6.35 – Condición de frontera aguas arriba, estación Puerto Berrío – Validación

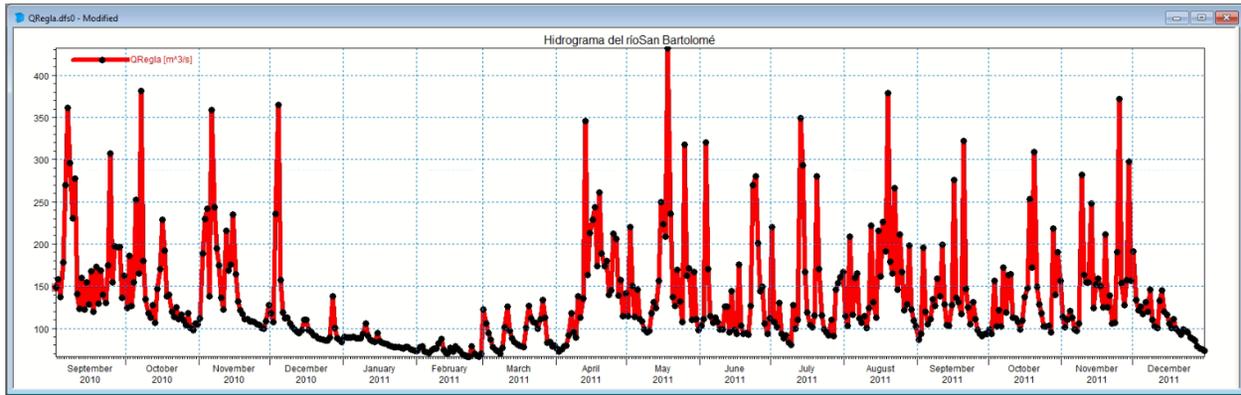


Figura 6.36 – Aporte del río San Bartolomé, estación La Bodega – Validación

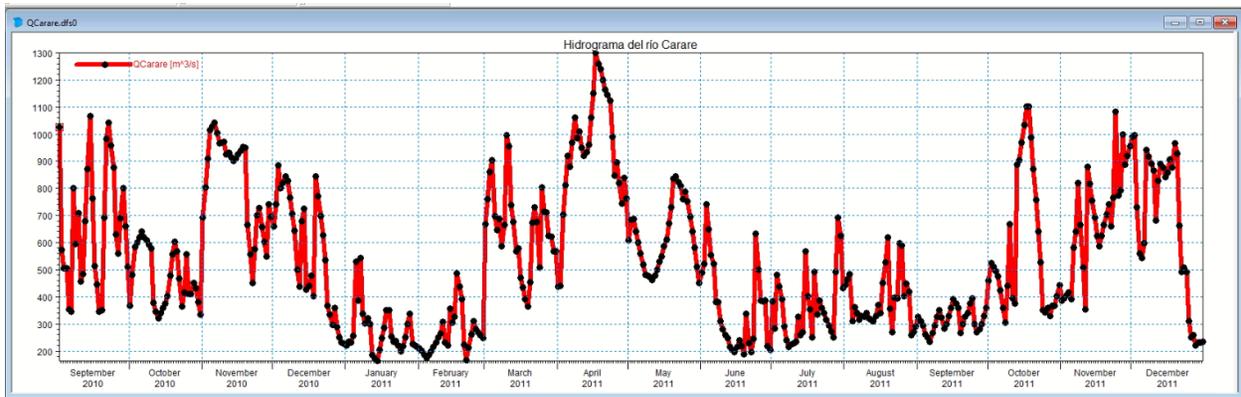


Figura 6.37 – Aporte del río Carare, estación Barretero Finca – Validación

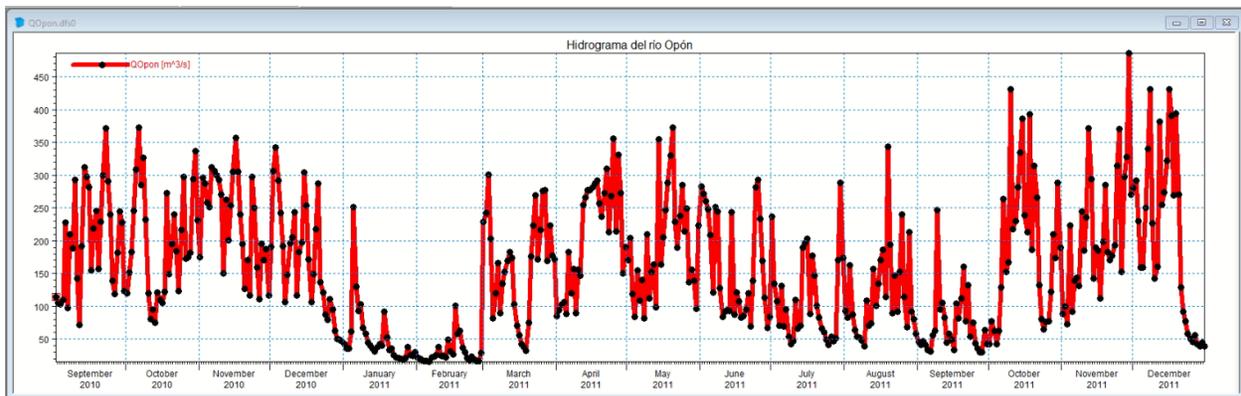


Figura 6.38 – Aporte del río Opón, estación Puente Ferrocarril – Validación

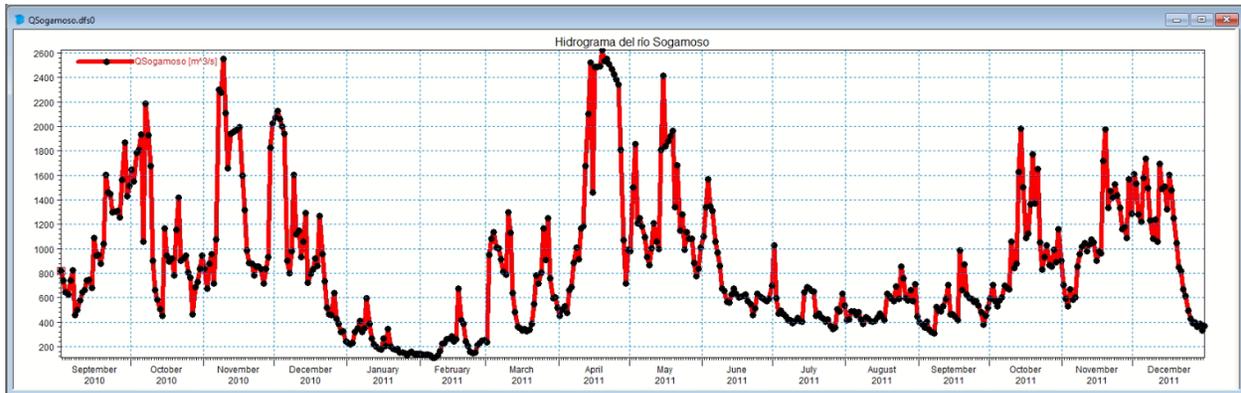


Figura 6.39 – Aporte del río Sogamoso, estación Puente Sogamoso – Validación

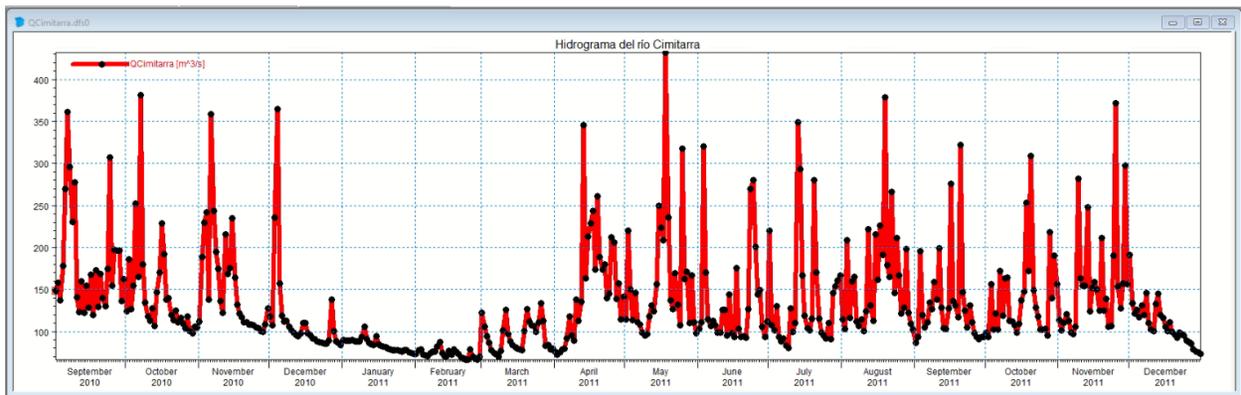


Figura 6.40 – Aporte del río Cimitarra – Validación

Boundary Description	Boundary Type	Branch Name	Chainage	Chainage	Gate ID	Boundary ID
1	Open	Inflow	Magdalena	145956	0	PuertoBerrío
2	Point Source	Inflow	Magdalena	165698	0	SanBartolome
3	Point Source	Inflow	Magdalena	193545	0	SanJuan
4	Point Source	Inflow	Magdalena	201834	0	Carare
5	Point Source	Inflow	Magdalena	215650	0	Chucurí
6	Point Source	Inflow	Magdalena	244493	0	OponColorada
7	Point Source	Inflow	Magdalena	263323	0	Sogamoso
8	Point Source	Inflow	Magdalena	292960	0	Cimitarra
9	Open	Q-h	Magdalena	338040,18	0	SitioNuevo

h	Q	
1	46.5	700
2	48.38	1250
3	48.58	1425
4	49.08	1900
5	49.58	2420
6	50.08	3000
7	50.58	3633.4
8	51.08	4413.9

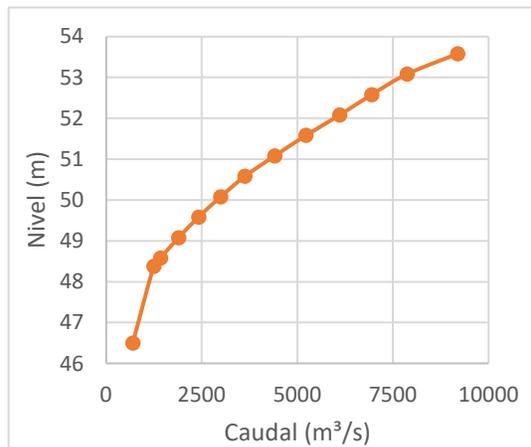


Figura 6.41 – Condición de frontera aguas abajo, estación Sitio Nuevo – Validación

En la Figura 6.42 se muestra la comparación de los caudales registrados y simulados en la estación de Peñas Blancas, en donde se observa que el modelo hidráulico representa adecuadamente los caudales registrados. Mientras que en la Figura 6.43 se muestra la comparación de los caudales registrados y simulados en la estación de Sitio Nuevo, en donde se observa que el modelo hidráulico representa adecuadamente los caudales registrados.

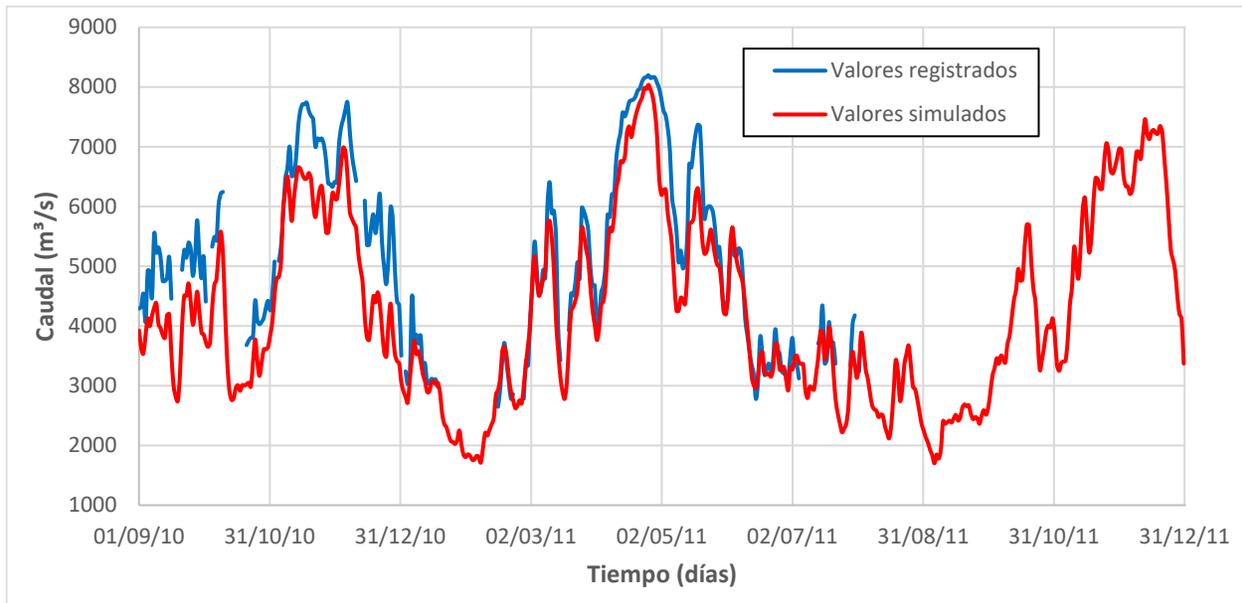


Figura 6.42 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – Validación

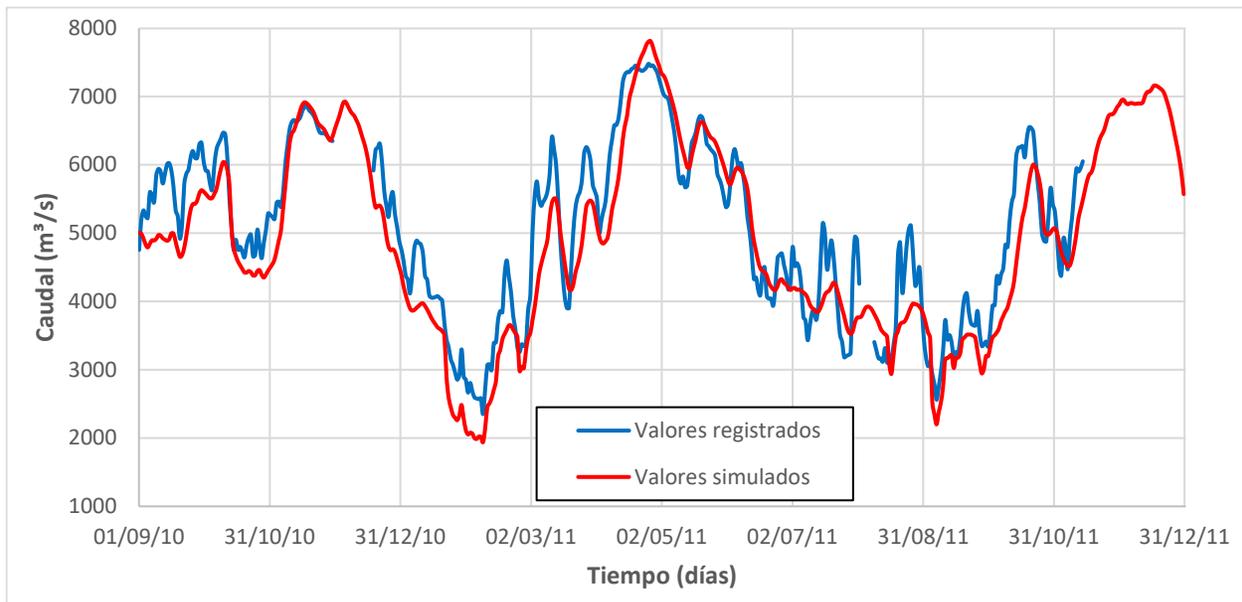


Figura 6.43 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – Validación

6.6 Calibración y validación del modelo hidráulico – niveles de agua

6.6.1 Rugosidades de estudios previos

Para el tramo de modelación hidráulica, entre las estaciones de Puerto Berrío y Sitio Nuevo, el IDEAM no cuenta con información granulométrica del material del lecho del cauce del río Magdalena. Por lo tanto, se realizó una recopilación de documentos técnicos de estudios hidráulicos sobre el río Magdalena con el propósito de cuantificar valores de rugosidad (n de Manning) de referencia para iniciar el proceso de calibración. A continuación, se hace un resumen de los documentos analizados:

- En el estudio de Santos et al. (2008) se generó un modelo hidráulico del río Magdalena en el programa HEC-RAS para el tramo comprendido entre las localidades de Barrancanueva y San Pedrito. De la calibración de ese modelo hidráulico se obtuvieron coeficientes de rugosidad n de Manning entre 0.023 y 0.031, en donde las diferencias de nivel (medidas y simuladas) fueron de ± 10 cm.
- En la presentación de Odebrecht (2014) sobre la recuperación de la navegabilidad en el río Magdalena se establece que el diámetro medio de las partículas del material del lecho en las estaciones de Puerto Berrío y Barrancabermeja es 0.2 mm y 0.1 mm (análisis granulométrico), respectivamente.
- En el estudio de Oliveros-Acosta et al. (2015) se generó un modelo hidráulico del río Magdalena en el programa DELFT 3D para el tramo comprendido entre las localidades de Barrancabermeja y La Coquera. En todo el tramo de estudio se utilizó un coeficiente de rugosidad n de Manning de 0.035.
- En el estudio de Gaitán (2016) se generó un modelo hidráulico del río Magdalena en el programa HEC-RAS para el tramo comprendido entre las estaciones de Peñas Blancas y Barrancabermeja. En todo el tramo de estudio se utilizó un coeficiente de rugosidad n de Manning de 0.031.

- En el estudio de Sánchez (2017) se generó un modelo hidráulico del río Magdalena en el programa SOBEK para el tramo comprendido entre las estaciones de Puerto Salgar y Dársena Barranquilla. De acuerdo con la calibración del modelo hidráulico se estableció que en la estación de Puerto Berrío el coeficiente de rugosidad es aproximadamente 0.032, en la estación de Peñas Blancas en 0.030, en la estación de Barrancabermeja es 0.040, en la estación de Puerto Wilches es 0.032, en la estación de San Pablo es 0.030 y en la estación de Sitio Nuevo es 0.031.

6.6.2 *Coeficientes de rugosidad*

Para la calibración de los coeficientes de rugosidad, el tramo de modelación hidráulica entre las estaciones de Puerto Berrío y Sitio Nuevo se dividió en 6 tramos, como se muestra en la Figura 6.44. En la calibración los tramos 1 y 2 se considerarán en conjunto mientras que en la validación se considerarán por separado. Para los tramos 1 y 2 en la calibración de niveles se utilizará la información de niveles registrados en la estación de Peñas Blancas, para el tramo 3 se utilizará la información de la estación de Barrancabermeja, para el tramo 4 se utilizará la información de la estación de Puerto Wilches, para el tramo 5 se utilizará la información de la estación de San Pablo y para el tramo 6 se utilizará la información de la estación de Sitio Nuevo.

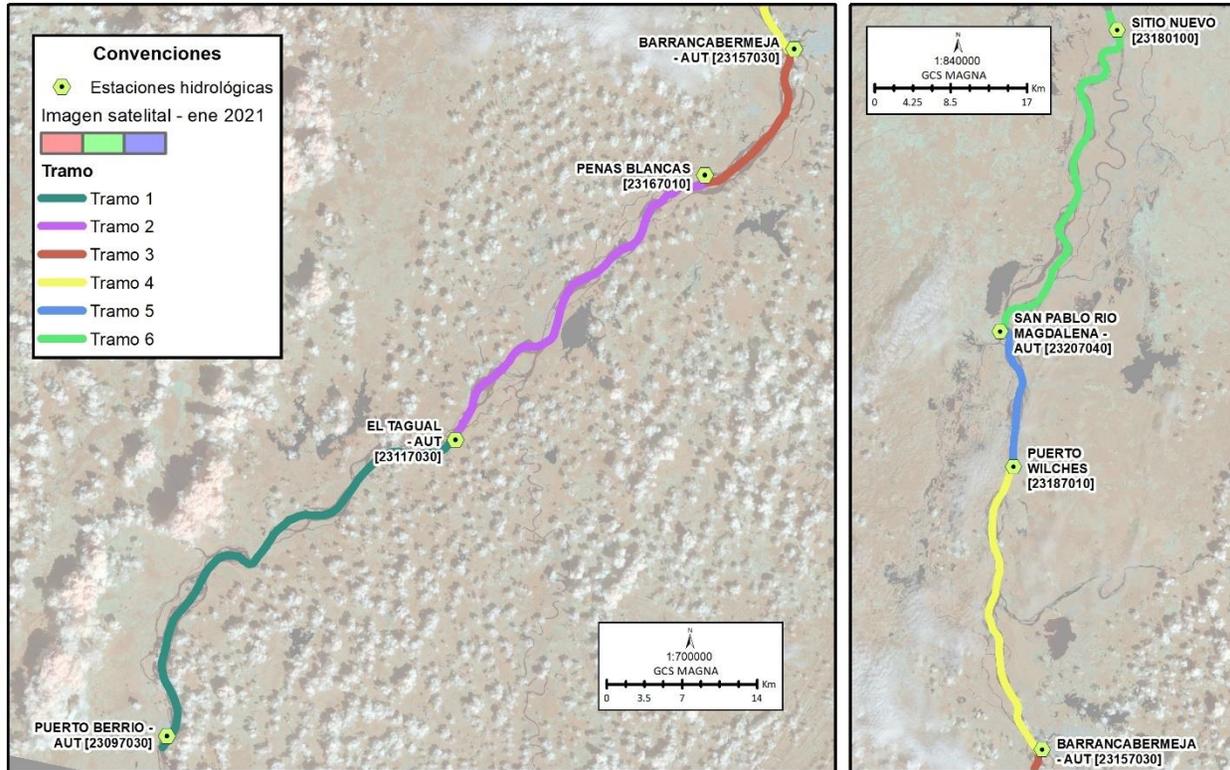


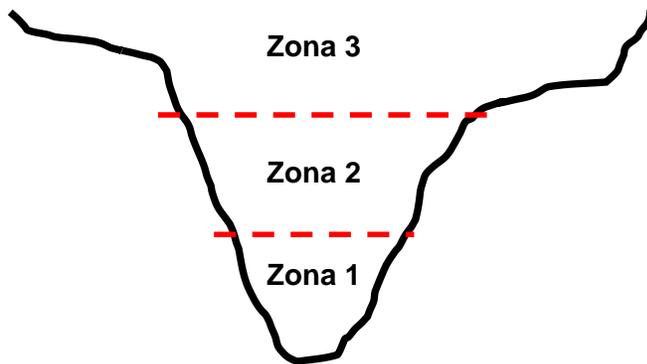
Figura 6.44 – Tramos para la calibración de rugosidades

En el programa MIKE11 se dan dos opciones de coeficientes de rugosidad, un valor único (uniforme) en toda la sección transversal, como se muestra en la Figura 6.45, o tres valores de rugosidad asociados al fondo del cauce (zona 1), la parte media del cauce (zona 2) y la parte alta de desbordamiento (zona 3, incluida la planicie de inundación), como se muestra en la Figura 6.46. En el modelo hidráulico se incorporan las abscisas en donde se pretenden establecer los valores de rugosidad ya sea de un valor uniforme y de las tres zonas.



Flood Plain Resist.		User Def. Marks	Encroachment	Heat Balance	S
Initial	Wind	Bed Resist.	Bed Resist. Toolbox	Wave Approx	
Approach		Resistance Formula			
<input checked="" type="radio"/> Uniform Section <input type="radio"/> Tripple zone		Manning (n)			
Global Values					
Resistance Number: <input type="text" value="0.017"/>					
Local Values					
	River Name	Chainage	Resistance		
1	Magdalena	145956.000000	0.044000		
2	Magdalena	193545.000000	0.044000		
3	Magdalena	228713.000000	0.044000		
4	Magdalena	244493.000000	0.027000		
5	Magdalena	278246.000000	0.034000		
6	Magdalena	293920.000000	0.044000		
7	Magdalena	338040.000000	0.019000		

Figura 6.45 – Definición de rugosidades para una zona en cada abscisa: esquema (izquierda) y ventana del programa MIKE11 (derecha)



Flood Plain Resist.		User Def. Marks	Encroachment	Heat Balance	Stratification
Initial	Wind	Bed Resist.	Bed Resist. Toolbox	Wave Approx	Default Value
Approach		Resistance Formula			
<input type="radio"/> Uniform Section <input checked="" type="radio"/> Tripple zone		Manning (n)			
Global Values					
Resistance Number:					
Zone 1: <input type="text" value="0.065"/>		Zone 2: <input type="text" value="0.04"/>		Zone 3: <input type="text" value="0.017"/>	
Local Values					
	River Name	Chainage	Zone 1 (lo)	Zone 2 (mi)	Zone 3 (up)
1	Magdalena	145956.000000	0.044000	0.044000	0.044000
2	Magdalena	193545.000000	0.044000	0.044000	0.044000
3	Magdalena	228713.000000	0.044000	0.044000	0.044000
4	Magdalena	244493.000000	0.027000	0.027000	0.027000
5	Magdalena	278246.000000	0.034000	0.034000	0.034000
6	Magdalena	293920.000000	0.044000	0.044000	0.044000
7	Magdalena	338040.000000	0.019000	0.019000	0.019000

Figura 6.46 – Definición de rugosidades para 3 zonas en cada abscisa: esquema (izquierda) y ventana del programa MIKE11 (derecha)

A continuación, se presenta la calibración del modelo hidráulico, iniciando con valores uniformes de rugosidad en las diferentes abscisas de análisis (estaciones de la Figura 6.44) y posteriormente, el refinamiento de la calibración utilizando la definición de rugosidades por tres zonas.

6.6.3 Calibración de los coeficientes de rugosidad – una zona

Para la calibración de los coeficientes de rugosidad con un valor global, se realizaron 17 combinaciones de rugosidades como se presenta en la Tabla 6.3, en donde el mismo valor de rugosidad de la estación de Peñas Blancas se utilizó en las estaciones de El Tagual y Puerto Berrío (Figura 6.44). En la tabla se incorporó el error cuadrático medio (RMSE) de cada serie.

Tabla 6.3 – Evaluación de los coeficientes de rugosidad – calibración

#	Peñas Blancas		Barrancabermeja		Puerto Wilches		San Pablo		Sitio Nuevo	
	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)
1	0.018	1.630	0.018	1.368	0.018	2.081	0.018	2.702	0.018	0.036
2	0.020	1.230	0.020	0.732	0.020	1.549	0.020	2.151	0.020	0.033
3	0.022	0.864	0.022	0.356	0.022	1.120	0.022	1.724	0.020	0.034
4	0.024	0.647	0.024	0.156	0.024	0.783	0.024	1.363	0.020	0.035
5	0.026	0.423	0.026	0.066	0.026	0.523	0.026	1.062	0.020	0.036
6	0.028	0.284	0.028	0.044	0.028	0.327	0.028	0.816	0.020	0.038
7	0.030	0.165	0.030	0.072	0.030	0.188	0.030	0.615	0.020	0.040
8	0.032	0.089	0.032	0.139	0.032	0.096	0.032	0.453	0.020	0.042
9	0.034	0.038	0.034	0.235	0.034	0.045	0.034	0.326	0.020	0.044
10	0.036	0.022	0.036	0.356	0.036	0.029	0.036	0.230	0.020	0.046
11	0.038	0.027	0.038	0.493	0.038	0.043	0.038	0.161	0.020	0.048
12	0.040	0.057	0.040	0.646	0.040	0.082	0.040	0.114	0.020	0.050
13	0.042	0.097	0.042	0.810	0.042	0.143	0.042	0.087	0.020	0.052
14	0.044	0.151	0.044	0.983	0.044	0.221	0.044	0.076	0.020	0.054
15	0.046	0.232	0.046	1.163	0.046	0.315	0.046	0.080	0.020	0.056
16	0.048	0.341	0.048	1.349	0.048	0.421	0.048	0.097	0.020	0.058
17	0.050	0.425	0.050	1.539	0.050	0.537	0.050	0.123	0.020	0.060

En la Figura 6.47 se muestran los resultados de RMSE de la Tabla 6.3 en función del coeficiente de rugosidad para cada una de las estaciones. De cada serie se pueden identificar mínimos globales. A partir de esos mínimos se establecen los rangos de variación (Tabla 6.4) que se utilizarán para refinar la calibración.

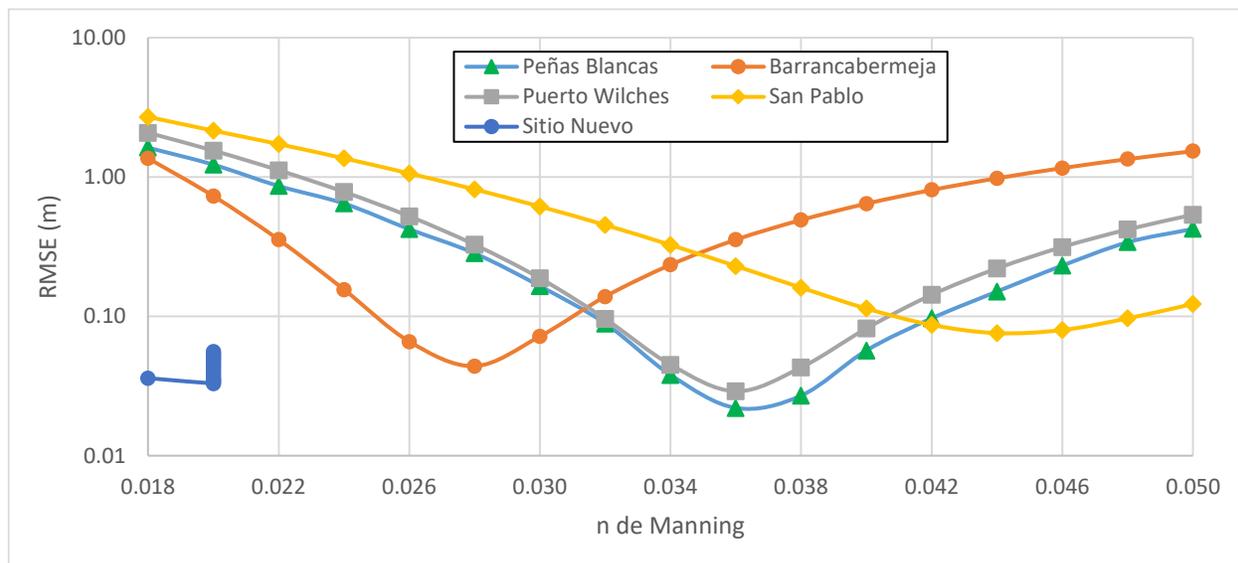


Figura 6.47 – RMSE en función del coeficiente de rugosidad

Tabla 6.4 – Rango de variación de los coeficientes de rugosidad

Estación	Rango de variación del n de Manning
Puerto Berrío	0.034 – 0.040
Peñas Blancas	0.034 – 0.040
Barrancabermeja	0.026 – 0.030
Puerto Wilches	0.034 – 0.038
San Pablo	0.042 – 0.046
Sitio Nuevo	0.019 – 0.021

Posteriormente, se realizaron otras 13 combinaciones de rugosidades de acuerdo con los rangos establecidos en la Tabla 6.4 con el objetivo de mejorar el desempeño del modelo hidráulico. En la Tabla 6.5 se muestran los resultados de esas 13 combinaciones, en donde se incluyó el RMSE promedio de las 5 estaciones. En la combinación 30 se obtiene el menor valor de RMSE promedio, 0.038 m.

Tabla 6.5 – Evaluación de los coeficientes de rugosidad – refinamiento de la calibración

#	Peñas Blancas		Barrancabermeja		Puerto Wilches		San Pablo		Sitio Nuevo		RMSE prom. (m)
	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	
18	0.036	0.043	0.025	0.073	0.035	0.056	0.046	0.064	0.020	0.032	0.054
19	0.034	0.057	0.030	0.086	0.034	0.036	0.044	0.052	0.019	0.032	0.053
20	0.037	0.025	0.028	0.061	0.038	0.070	0.042	0.063	0.020	0.032	0.050
21	0.035	0.055	0.026	0.054	0.036	0.056	0.044	0.052	0.020	0.032	0.050
22	0.039	0.018	0.025	0.078	0.035	0.043	0.044	0.053	0.019	0.032	0.045
23	0.035	0.055	0.026	0.056	0.034	0.036	0.044	0.052	0.019	0.032	0.046
24	0.037	0.028	0.026	0.058	0.035	0.049	0.045	0.056	0.020	0.032	0.045
25	0.038	0.021	0.026	0.058	0.036	0.049	0.043	0.055	0.020	0.032	0.043
26	0.039	0.017	0.027	0.055	0.036	0.048	0.043	0.056	0.019	0.032	0.042
27	0.040	0.018	0.027	0.056	0.035	0.047	0.045	0.056	0.019	0.032	0.042
28	0.039	0.018	0.028	0.059	0.035	0.042	0.044	0.054	0.019	0.032	0.041
29	0.039	0.017	0.027	0.055	0.035	0.043	0.044	0.054	0.019	0.032	0.040
30	0.039	0.017	0.027	0.055	0.034	0.035	0.044	0.053	0.019	0.032	0.038

En la Figura 6.48 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Peñas Blancas con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados. Mientras que en la Figura 6.49 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Barrancabermeja con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados, con excepción de la época de caudales máximos en donde el modelo hidráulico da valores más bajos de nivel (aproximadamente 40 cm).

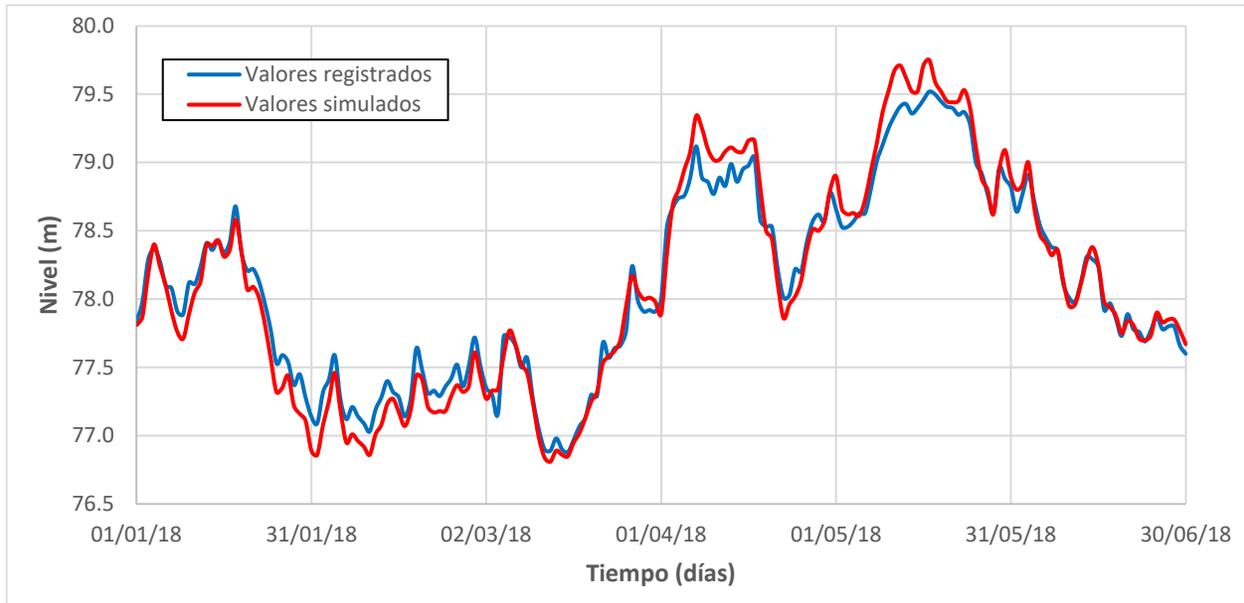


Figura 6.48 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – calibración

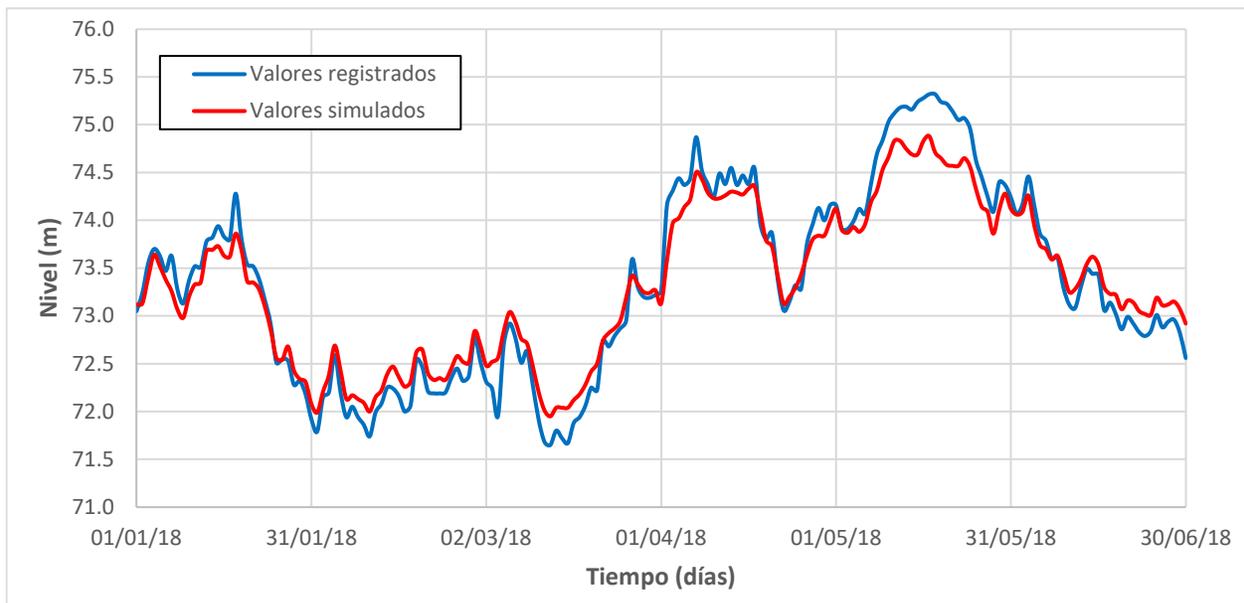


Figura 6.49 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – calibración

En la Figura 6.50 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Puerto Wilches con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados.

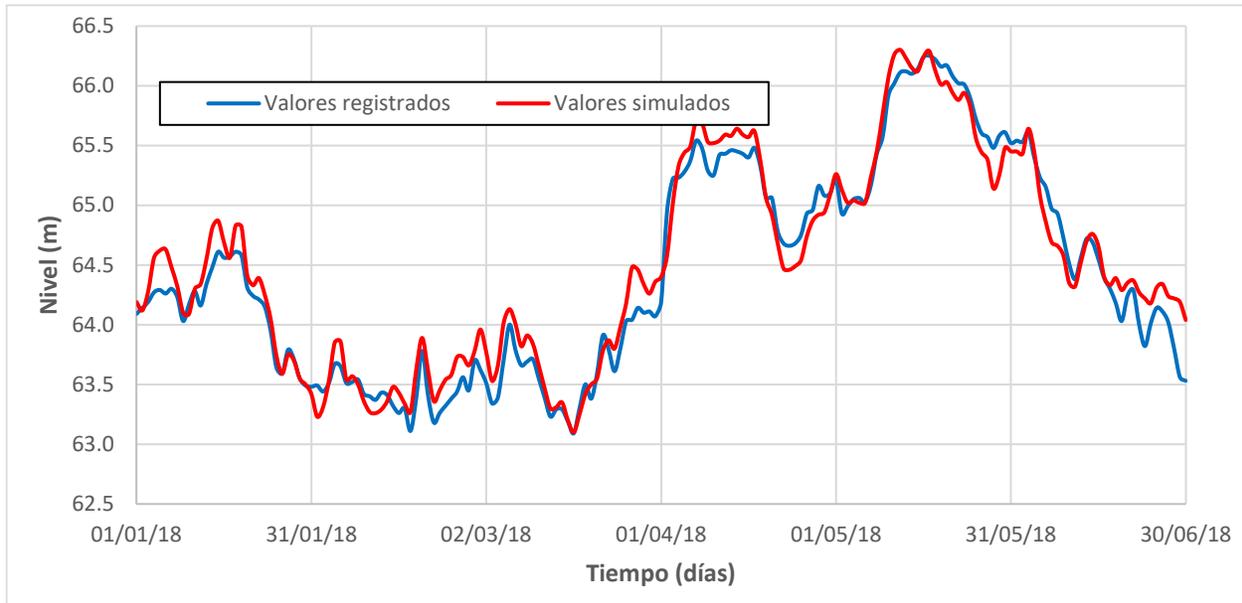


Figura 6.50 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – calibración

En la Figura 6.51 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de San Pablo con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados, con excepción de la época de caudales máximos en donde el modelo hidráulico da valores más bajos de nivel (aproximadamente 25 cm). Mientras que en la Figura 6.52 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados.

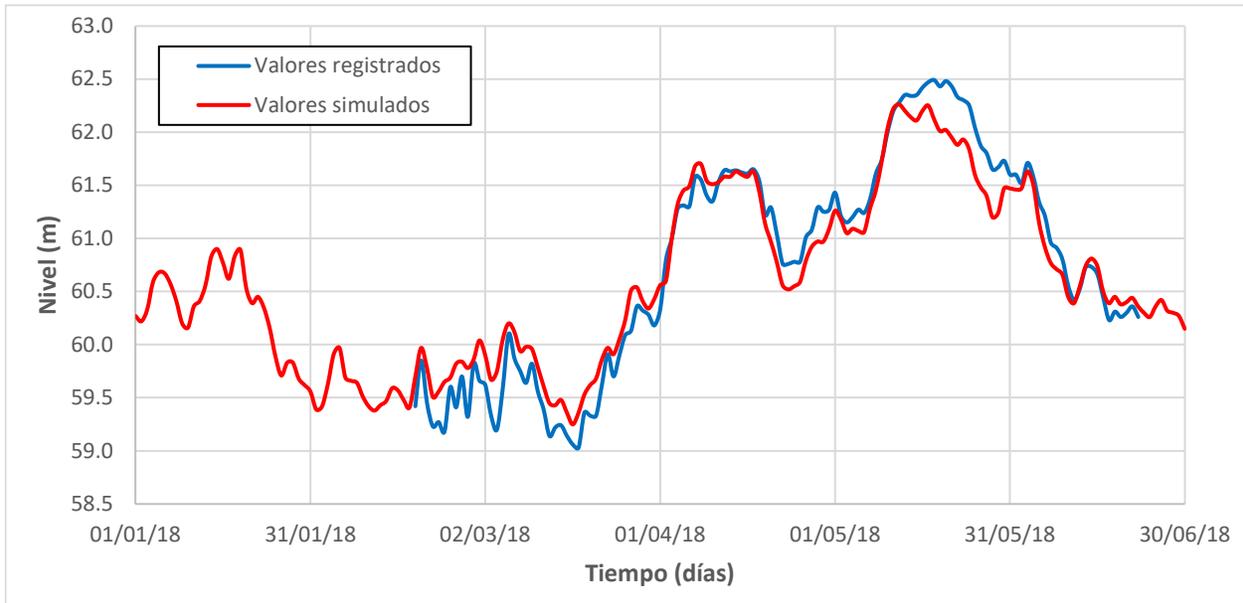


Figura 6.51 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – calibración

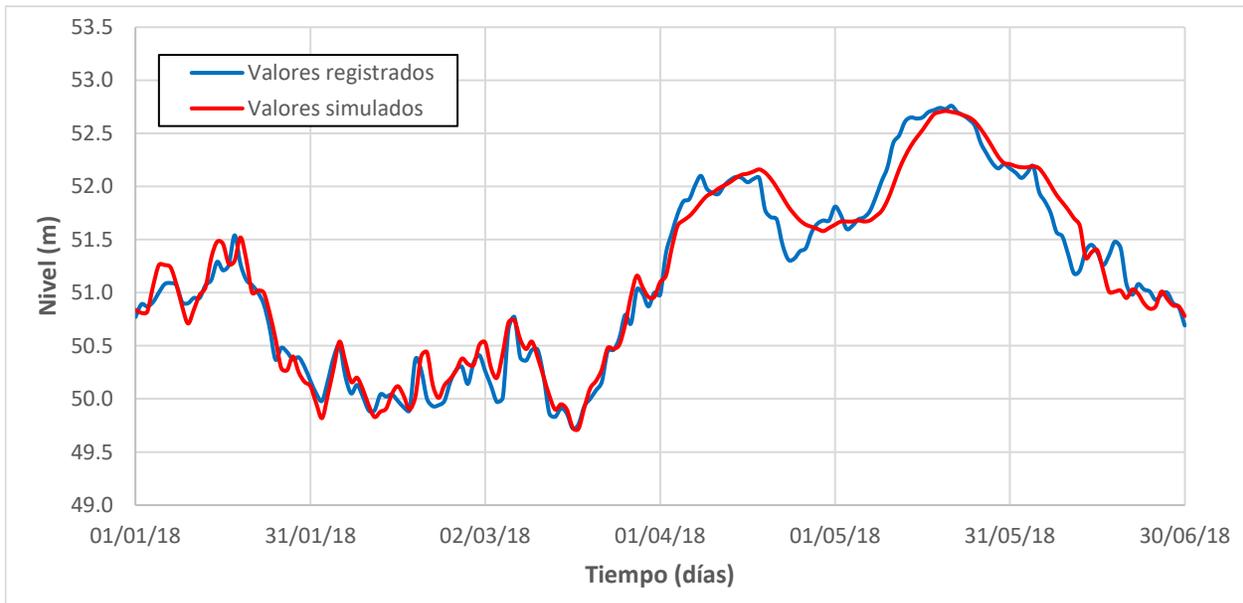


Figura 6.52 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – calibración

6.6.4 Calibración de los coeficientes de rugosidad – tres zonas

Para la calibración de los coeficientes de rugosidad utilizado la definición de tres zonas (Figura 6.46) se debe determinar los niveles a los cuales se definen las tres zonas. Para esto y teniendo en cuenta la serie de caudales registrados en la estación de Puerto Berrío (Figura 2.2) se hizo un análisis estadístico de la serie y se determinaron los caudales bajo y alto que determinan la división de las tres zonas, niveles en el cauce para estos caudales. De acuerdo con el análisis estadístico se estableció un caudal bajo de $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ como se muestra en la Figura 6.53 (línea punteada de color verde), límite en el cual el 30% de los datos de caudal se encuentran por debajo, y se estableció un caudal alto de $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ como se muestra en la Figura 6.53 (línea punteada de color azul), límite en el cual el 97% de los datos de caudal se encuentran por debajo.

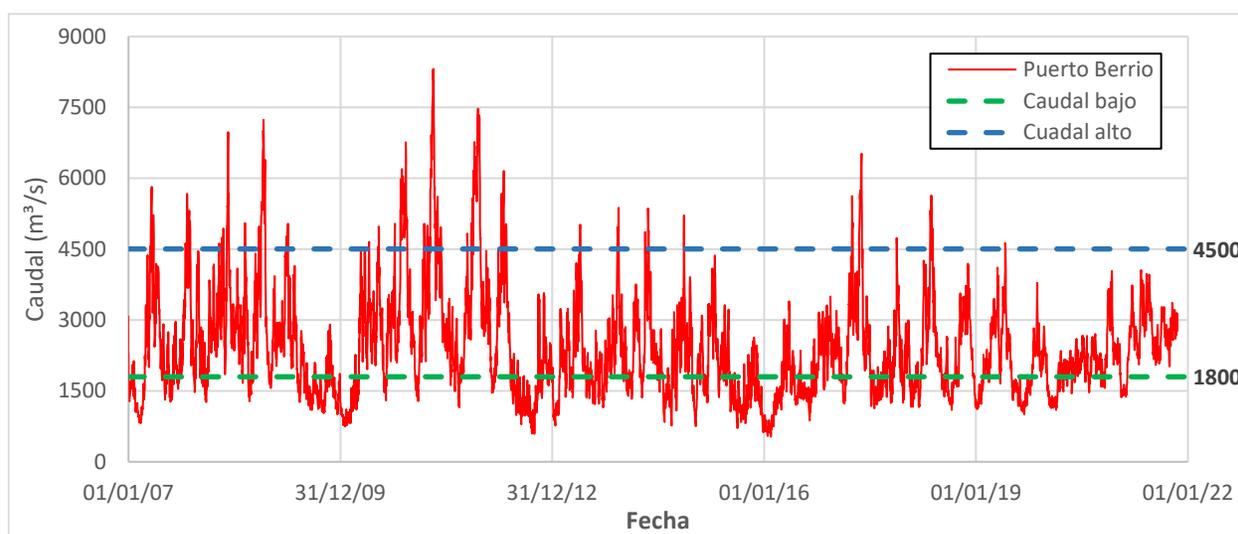


Figura 6.53 – Variación de caudales en la estación de Puerto Berrío

A través del modelo hidráulico se establecieron los niveles de agua en las abscisas que relacionan las estaciones de Puerto Berrío, El Tagual, Peñas Blancas, Barrancabermeja, Puerto Wilches, San Pablo y Sitio Nuevo para los caudales antes establecidos (1800 y $4500 \text{ m}^3/\text{s}$). En la Figura 6.54 se muestra la incorporación de los niveles, que delimitan las zonas en las abscisas de las estaciones, en el modelo hidráulico.

Initial	Wind	Bed Resist.	Bed Resist. Toolbox	Wave Approx	Default Values	Quasi Steady	Reach Lengths	Add. Output
Flood Plain Resist.	User Def. Marks	Encroachment	Heat Balance	Stratification	Time Series Output	Maps	Groundwater Leakage	

	Mark title	Interpolat
1	ZONE1-2	<input checked="" type="checkbox"/>
2	ZONE2-3	<input checked="" type="checkbox"/>

	River Name	Chainage	ZONE1-2	ZONE2-3	
1	MAGDALENA	145956.000000	107.58	109	Puerto Berrío
2	MAGDALENA	193545.000000	90.22	91.85	El Tagual
3	MAGDALENA	228713.000000	77.82	78.98	Peñas Blancas
4	MAGDALENA	244493.000000	72.95	74.76	Barrancabermeja
5	MAGDALENA	278246.000000	63.94	65.75	Puerto Wilches
6	MAGDALENA	2923920.000000	59.84	61.81	San Pablo
7	MAGDALENA	338040.000000	49.76	51.85	Sitio Nuevo

Figura 6.54 – Incorporación de los niveles que definen las tres zonas para la calibración de los coeficientes de rugosidad

Teniendo en cuenta los resultados del numeral anterior (rugosidades de la combinación 30) se realizaron otras 9 combinaciones de rugosidades, en donde se variaron los coeficientes de rugosidad en las tres zonas para minimizar el RMSE y ajustar los niveles para caudales bajos, medios y altos (crecientes). En la Tabla 6.6 se muestran los resultados de esas 6 combinaciones, en donde se incluyó el RMSE promedio de las 5 estaciones. La combinación 31 corresponde a dejar el mismo coeficiente de rugosidad global (de la combinación 30) en las tres zonas, para lo cual el modelo hidráulico da los mismos resultados (niveles) que la simulación obtenida en la combinación 30, como se muestra en la Figura 6.55. Se adopta la combinación 39 que tiene un RMSE de 0.046 m y que visualmente representa adecuadamente las series registradas en las estaciones.

Tabla 6.6 – Evaluación de los coeficientes de rugosidad para 3 zonas – calibración

#	Peñas Blancas		Barrancabermeja		Puerto Wilches		San Pablo		Sitio Nuevo		RMSE prom. (m)
	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	
31	0.039	0.017	0.027	0.055	0.034	0.035	0.044	0.053	0.019	0.030	0.038
	0.039		0.027		0.027		0.044		0.019		

#	Peñas Blancas		Barrancabermeja		Puerto Wilches		San Pablo		Sitio Nuevo		RMSE prom. (m)
	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	n de Manning	RMSE (m)	
	0.039		0.027		0.027		0.044		0.019		
32	0.037	0.029	0.030	0.084	0.034	0.032	0.046	0.058	0.019	0.029	0.046
	0.039		0.028		0.033		0.044		0.018		
	0.037		0.025		0.032		0.042		0.018		
33	0.037	0.016	0.026	0.090	0.034	0.032	0.045	0.061	0.019	0.027	0.045
	0.039		0.028		0.033		0.044		0.017		
	0.040		0.025		0.032		0.042		0.017		
34	0.037	0.017	0.028	0.092	0.034	0.032	0.044	0.063	0.019	0.027	0.046
	0.039		0.027		0.033		0.044		0.017		
	0.041		0.025		0.032		0.042		0.017		
35	0.036	0.016	0.029	0.092	0.034	0.035	0.045	0.072	0.019	0.027	0.048
	0.038		0.028		0.033		0.045		0.017		
	0.041		0.025		0.032		0.041		0.017		
36	0.036	0.016	0.027	0.092	0.034	0.039	0.046	0.088	0.019	0.026	0.052
	0.038		0.027		0.033		0.044		0.017		
	0.041		0.025		0.032		0.040		0.017		
37	0.036	0.016	0.030	0.092	0.034	0.032	0.046	0.062	0.019	0.027	0.046
	0.038		0.028		0.033		0.044		0.017		
	0.041		0.025		0.032		0.042		0.017		
38	0.034	0.015	0.030	0.092	0.035	0.032	0.046	0.062	0.019	0.027	0.046
	0.038		0.028		0.033		0.044		0.017		
	0.041		0.025		0.032		0.042		0.017		
39	0.034	0.015	0.026	0.092	0.035	0.032	0.045	0.062	0.019	0.027	0.046
	0.038		0.028		0.033		0.044		0.017		
	0.041		0.025		0.032		0.042		0.017		

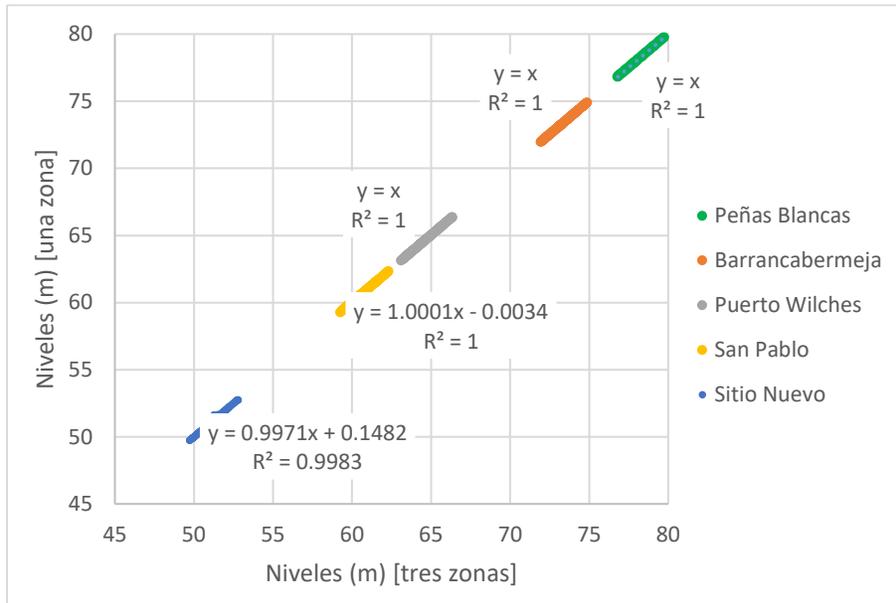


Figura 6.55 – Comparación de resultados de las combinaciones 30 (coeficiente de rugosidad global) y la combinación 31 (el mismo coeficiente de rugosidad en las 3 zonas)

En la Figura 6.56 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Peñas Blancas con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados. Mientras que en la Figura 6.57 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Barrancabermeja con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados, con excepción de la época de caudales máximos en donde el modelo hidráulico da valores más bajos de nivel (aproximadamente 40 cm).

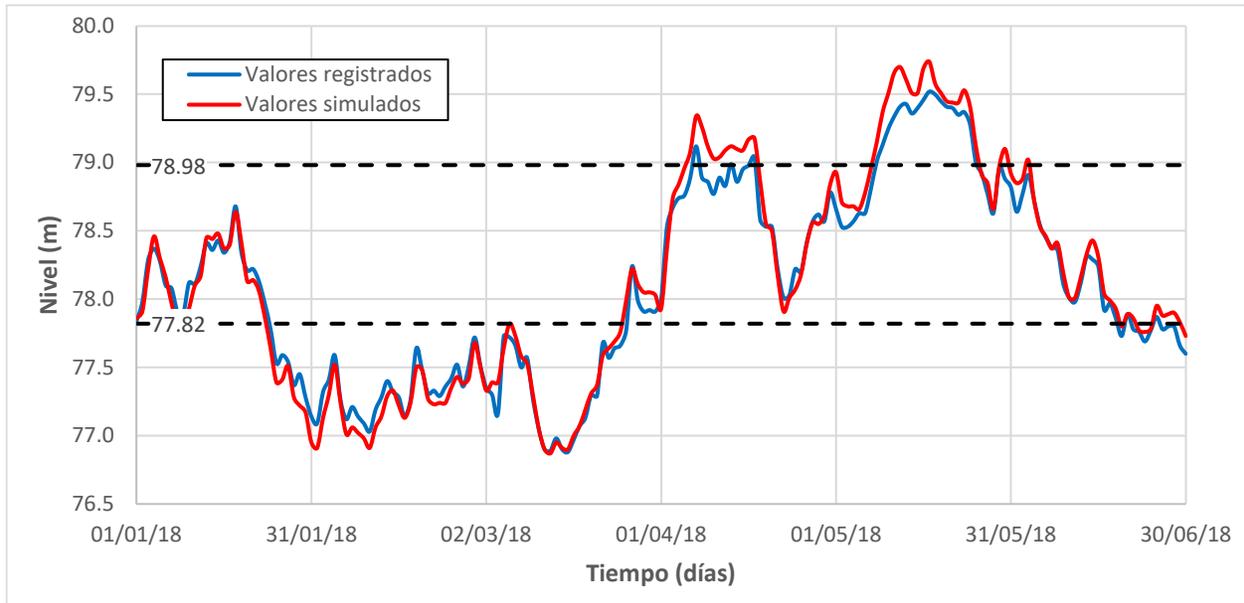


Figura 6.56 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – calibración

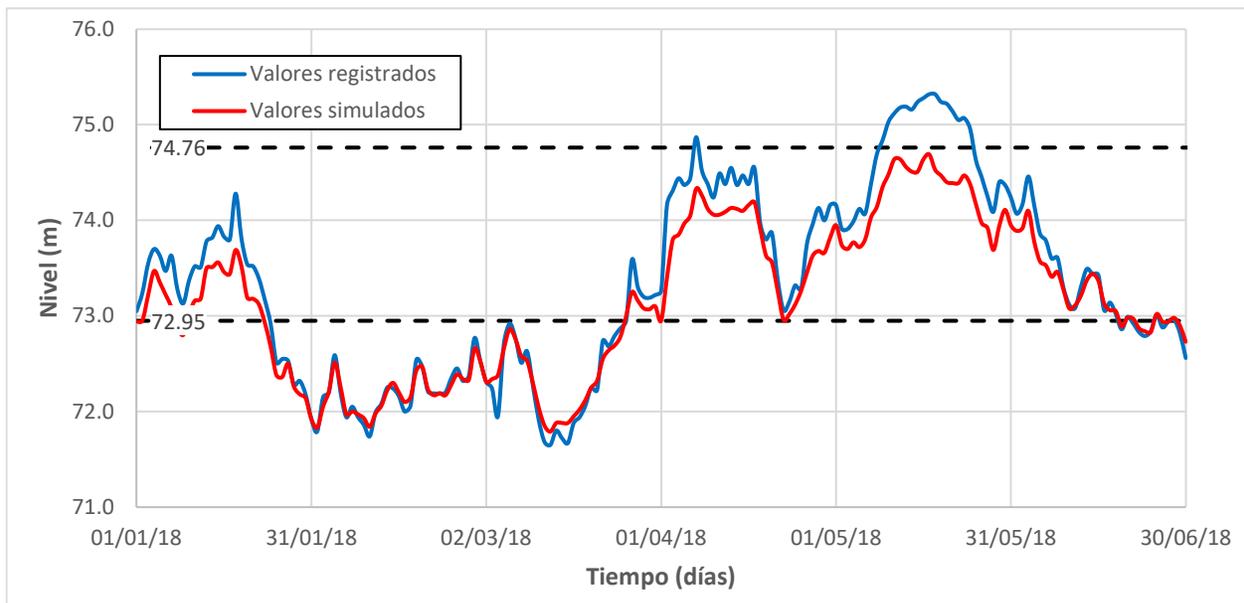


Figura 6.57 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – calibración

En la Figura 6.58 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Puerto Wilches con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados.

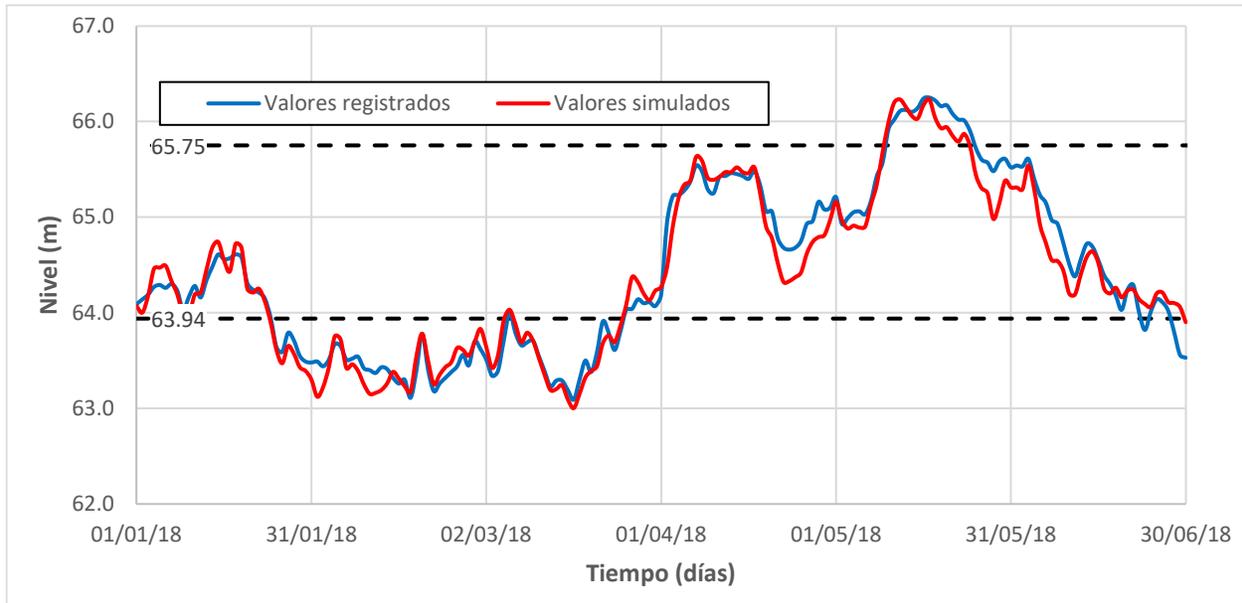


Figura 6.58 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – calibración

En la Figura 6.59 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de San Pablo con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados, con excepción de la época de caudales máximos en donde el modelo hidráulico da valores más bajos de nivel (aproximadamente 25 cm). Mientras que en la Figura 6.60 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados.

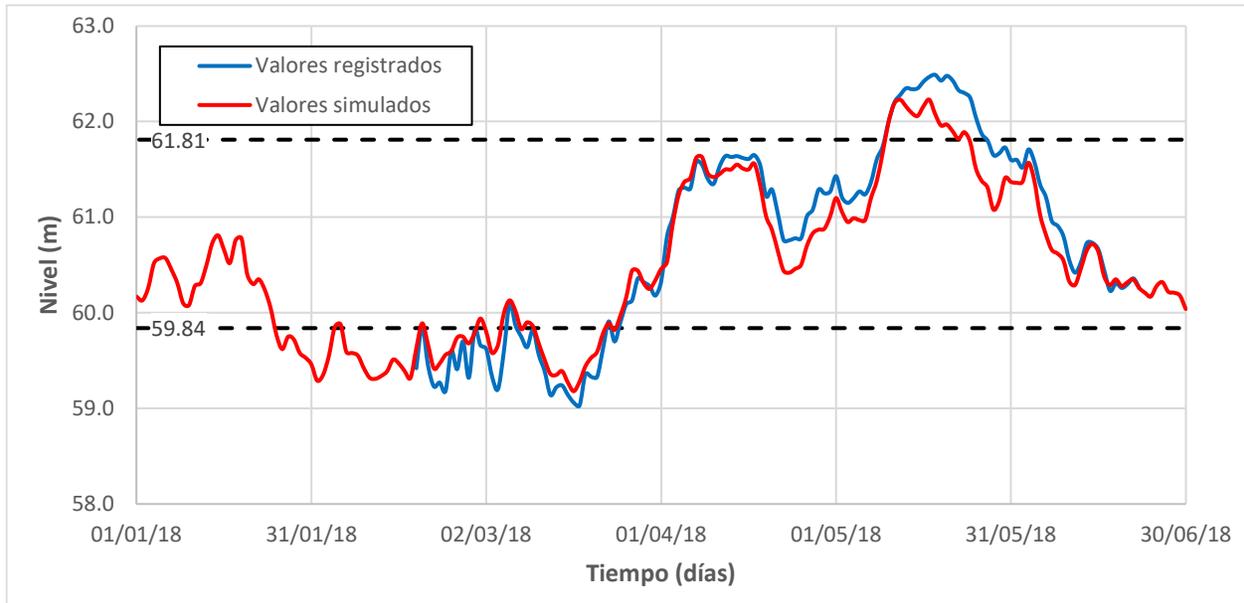


Figura 6.59 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – calibración

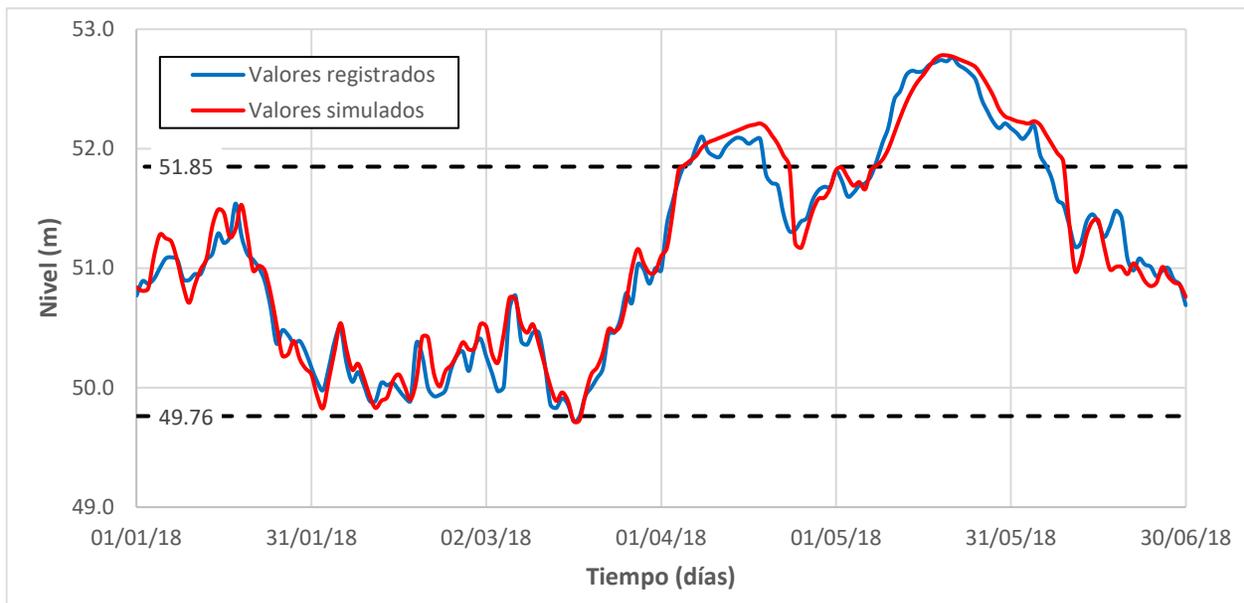


Figura 6.60 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – validación

6.6.5 Validación del modelo hidráulico

En la Figura 6.61 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Peñas Blancas con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados. Mientras que en la Figura 6.62 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Barrancabermeja con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados, con excepción de la época de caudales máximos en donde el modelo hidráulico da valores más bajos de nivel (aproximadamente 70 cm). Este comportamiento también se observó en la calibración.

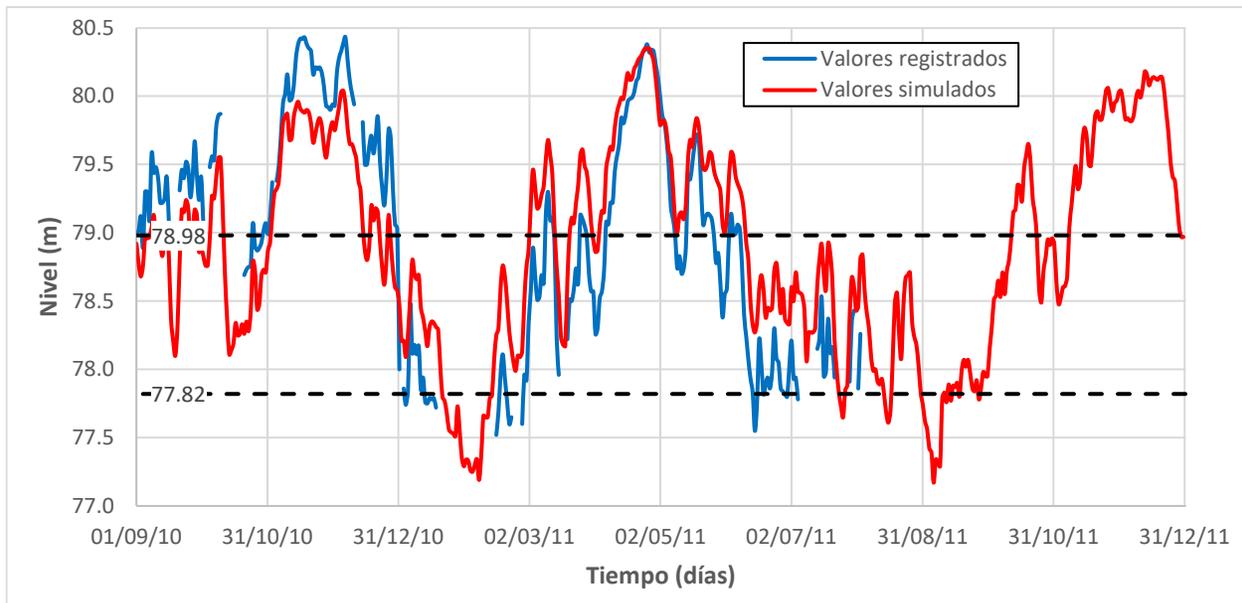


Figura 6.61 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Peñas Blancas – validación

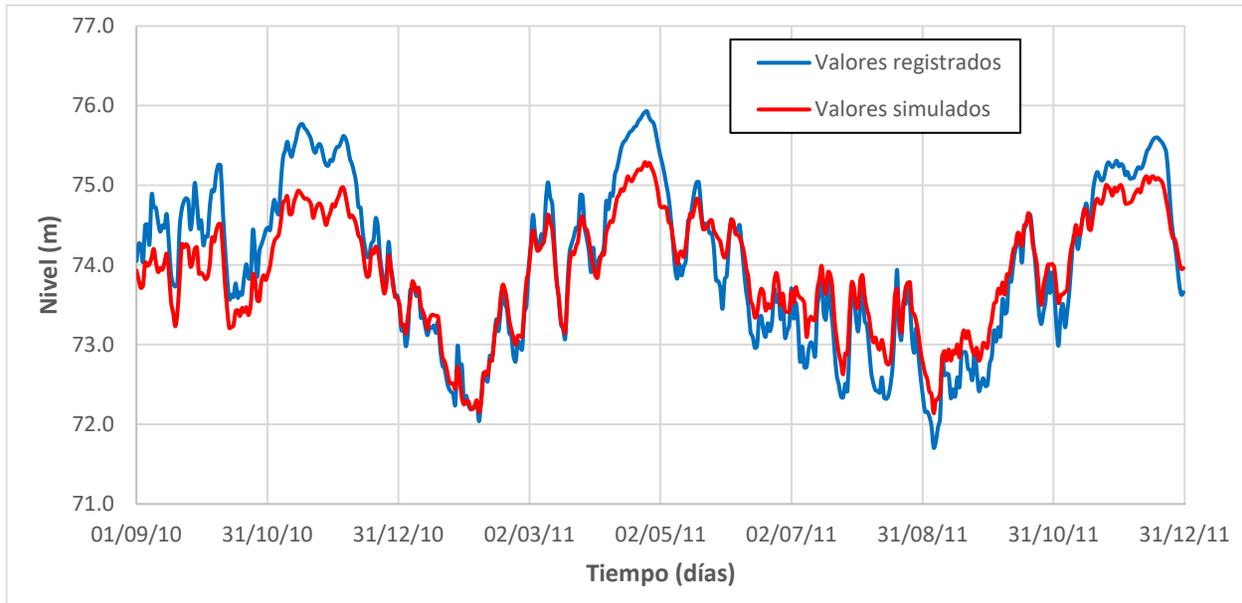


Figura 6.62 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Barrancabermeja – validación

En la Figura 6.63 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Puerto Wilches con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados.

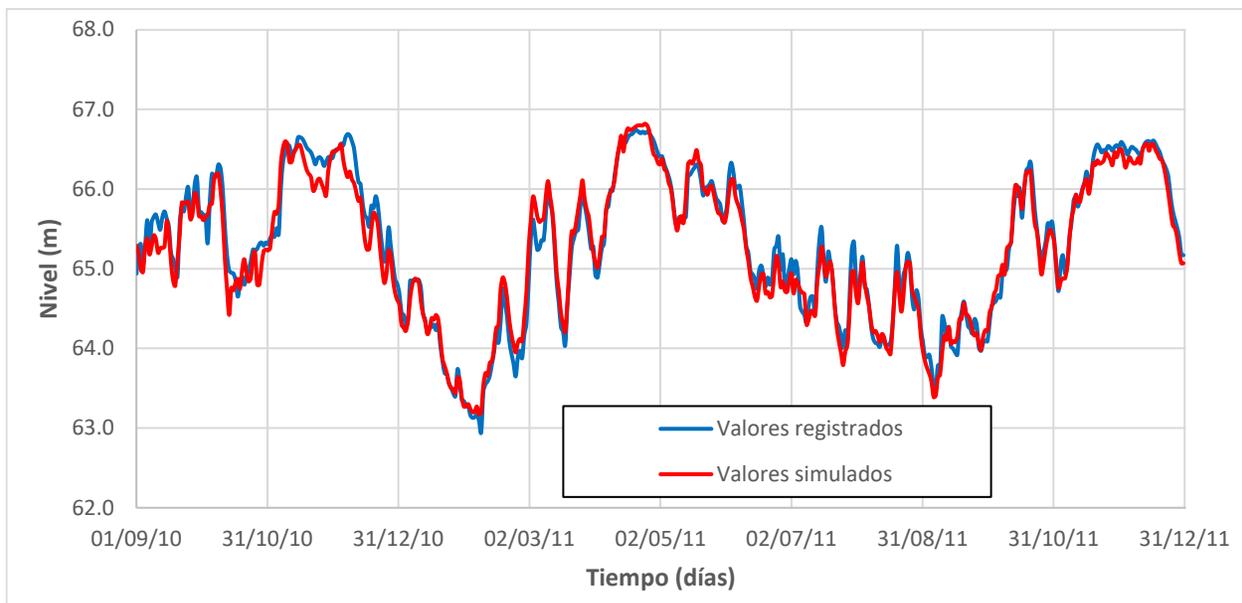


Figura 6.63 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Puerto Wilches – validación

En la Figura 6.64 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de San Pablo con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados.

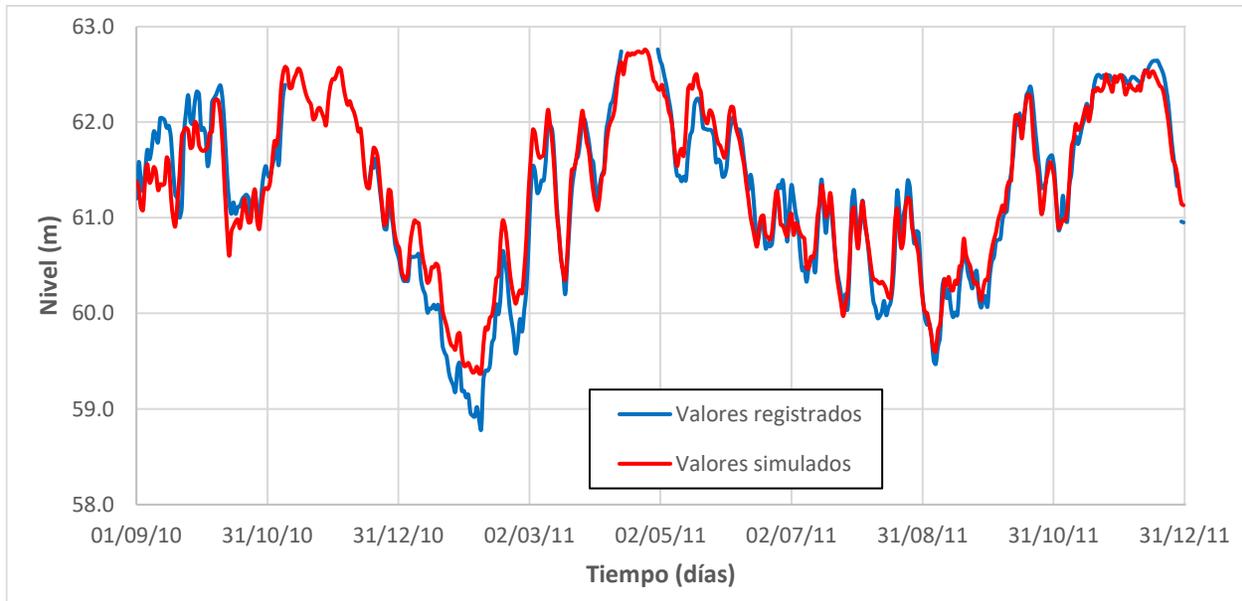


Figura 6.64 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de San Pablo – calibración

Mientras que en la Figura 6.65 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo con los niveles simulados en el modelo hidráulico calibrado, en donde se observa que el modelo representa adecuadamente los valores de niveles registrados.

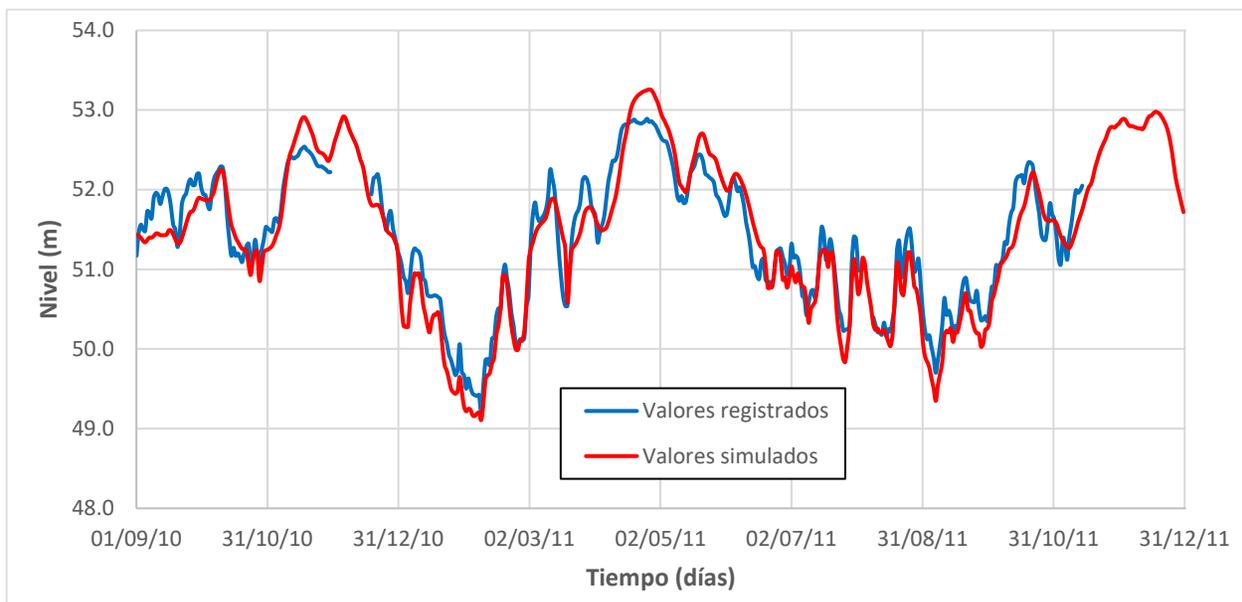


Figura 6.65 – Comparación de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – calibración

6.7 Validación de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico

Teniendo en cuenta la calibración del modelo hidráulico (primer y segundo ajuste) se procedió a evaluar el desempeño del modelo hidráulico cuando se incorporan las series de caudal obtenidas en los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico para las cuencas del río Opón y Sogamoso. Para el análisis hidrológico se utilizaron dos modelos: el modelo Génie Rural à 4 paramètres Journalie (GR4J), modelo conceptual desarrollado por Edijatno et al. (1999), y el modelo TUWmodel, que es un modelo conceptual de lluvia-escorrentía que sigue la estructura del modelo HBV (Parajka et al. 2007). Para cada uno de los dos modelos hidrológicos se utilizaron los siguientes tres productos de precipitación: (1) Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP), producto de precipitación global con una resolución de 0.1° cada 3 horas que cubre un período de tiempo desde 1979 a más o menos 3 horas en tiempo real; (2) Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP), producto de precipitación global con una resolución de 0.1° cada hora que cubre un período de tiempo desde 2007 a más o menos 1 hora en tiempo real; y (3) Random Forest Merging Procedure (RF-MEP), que combina dos o más conjuntos de datos basados en satélites con observaciones terrestres para producir un nuevo conjunto de datos con una distribución espacio-temporal mejorada.

En la Figura 6.66 se muestran los resultados de los dos modelos hidrológicos (con los tres productos de precipitación) para la cuenca del río Opón, mientras que, en la Figura 6.67 se muestran los resultados de los dos modelos hidrológicos (con los tres productos de precipitación) para la cuenca del río Sogamoso para el mismo período de evaluación del modelo hidráulico (enero – junio de 2018). Adicionalmente, se incorporaron los resultados del ensamble, que corresponde a la media de las 6 configuraciones de modelo hidrológico – producto de precipitación.

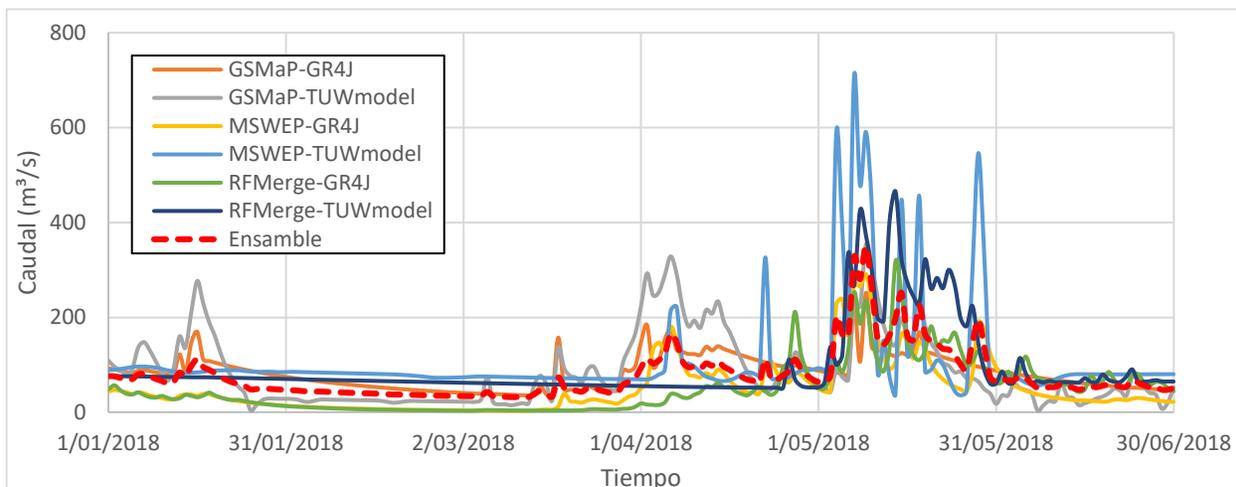


Figura 6.66 – Resultados de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico para la cuenca del río Opón

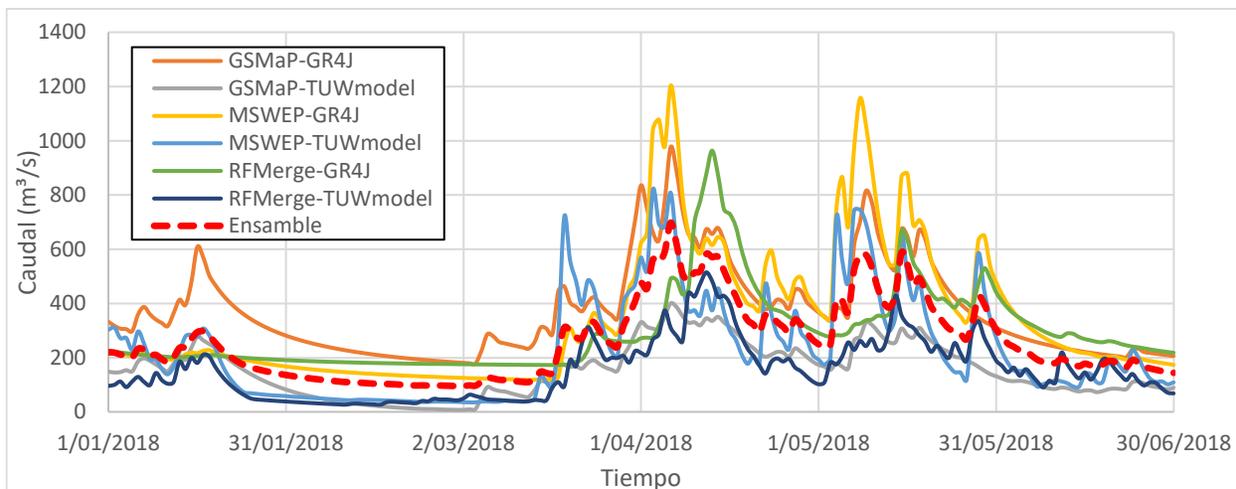


Figura 6.67 – Resultados de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico para la cuenca del río Sogamoso

Las series de caudal obtenidas de los ensambles, mejores resultados de los modelos hidrológicos, en las cuencas de los ríos Opón y Sogamoso fueron incorporados en el modelo hidráulico calibrado, como se muestra en la Figura 6.68. En los otros ríos tributarios se mantuvo la información registrada en las estaciones de referencia, como se mostró en la calibración.

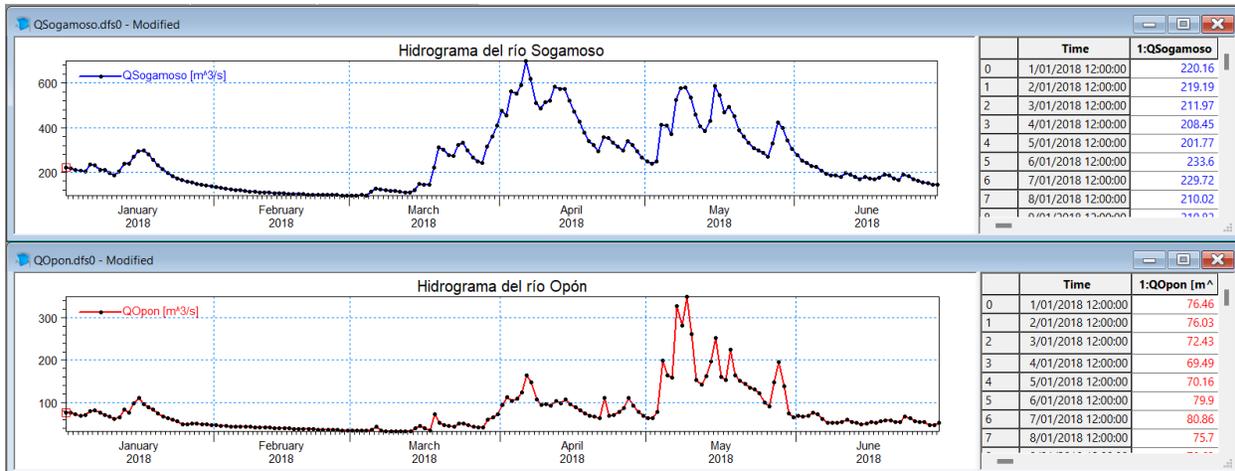


Figura 6.68 – Incorporación de las series de caudales de los ríos Opón y Sogamoso (resultados de modelos hidrológicos) en el modelo hidráulico calibrado

Posteriormente, las características de simulación se establecen de manera similar a las ingresadas en la Figura 3.37, y se obtienen resultados de nivel y caudal en el tramo de modelación hidráulica. En la Figura 6.69 se muestra la comparación de los niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo con los niveles simulados del modelo hidráulico, mientras que, en la Figura 6.70 se muestra la comparación de los caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo con los caudales simulados en el modelo hidráulico. En las dos figuras se incluyeron los resultados de la simulación del modelo calibrado con fines de comparación. De las dos figuras es claro que el modelo hidráulico alimentado por los resultados de los dos modelos hidrológicos subestima los niveles y caudales en relación con las mediciones y con los resultados del modelo hidráulico calibrado (alimentado con los valores de caudal registrados en las estaciones de los ríos tributarios).

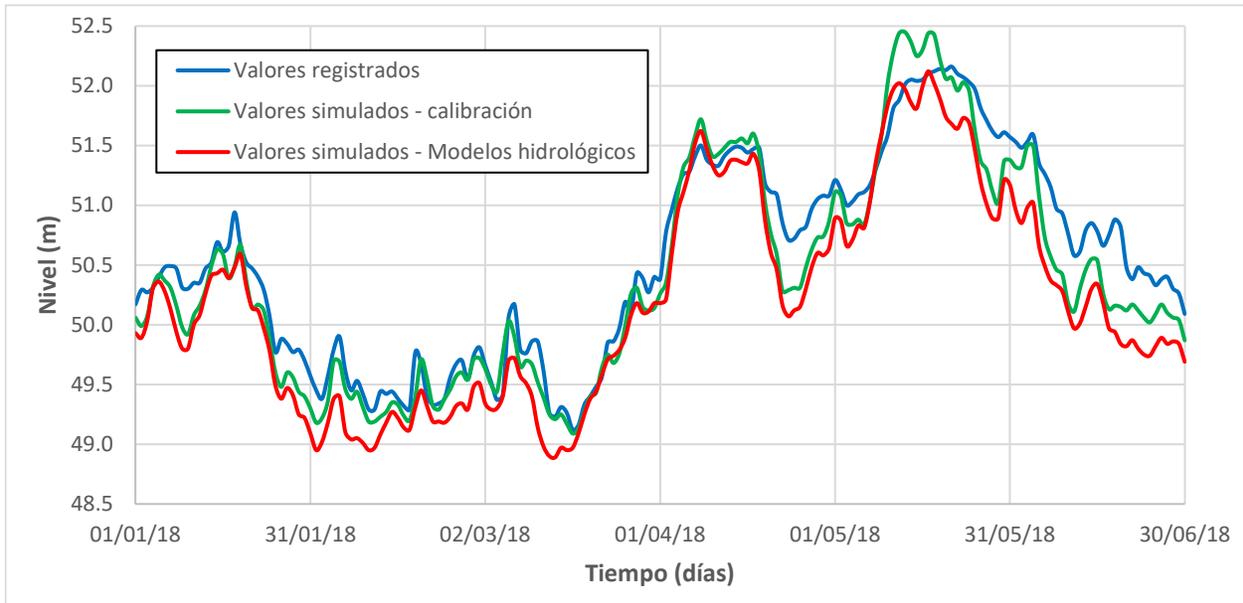


Figura 6.69 – Comparación de series de niveles simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – con las series de caudal de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico de los ríos Opón y Sogamoso

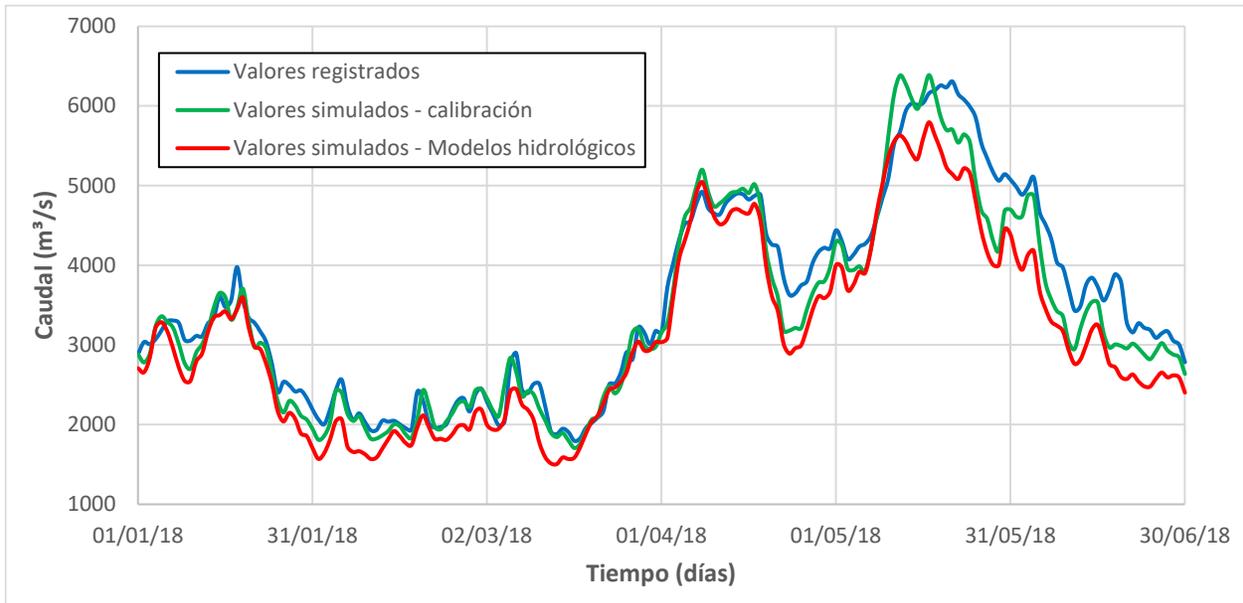


Figura 6.70 – Comparación de series de caudales simulados y registrados en la estación de Sitio Nuevo – con las series de caudal de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico de los ríos Opón y Sogamoso

6.8 Conclusiones y recomendaciones

6.8.1 Conclusiones

A continuación, se presentan algunas conclusiones de acuerdo con el análisis del modelo hidráulico configurado en el programa MIKE11:

- En el primer ajuste del modelo hidráulico se adecuó la topología, eliminación del brazo del río Sogamoso y eliminación de los cambios bruscos del lecho del río Magdalena, y se adecuaron algunas condiciones de frontera de caudal: para el aporte de caudal del río San Bartolomé se utilizó la información registrada en la estación La Bodega y se utilizó una serie similar para el aporte del río Cimitarra, dadas las características similares identificadas en la caracterización hidrológica de los ríos tributarios del río Magdalena. Así mismo, se incorporaron estructuras hidráulicas que simulan los desbordes del cauce e inundación de la planicie, mediante vertederos laterales. Con estos ajustes se logró mejorar el desempeño del modelo hidráulico, en donde los caudales máximos (cuando ocurren desbordamientos del cauce) registrados y simulados son similares.
- En el segundo ajuste del modelo hidráulico se cambió el alineamiento del cauce, se ajustó la topología que representa el cauce en donde se incluyó la información topo batimétrica levantada entre las secciones 31 y 5 del modelo hidráulico. De la misma manera que en el primer ajuste, se incorporaron 19 estructuras hidráulicas para simular el desbordamiento del cauce para caudales altos, en donde se calibraron los factores de regulación mediante la comparación de los caudales simulados y registrados en las estaciones de Peñas Blancas y Sitio Nuevo. Se realizó la calibración de los coeficientes de rugosidad mediante la división del tramo de análisis en 6 subtramos y mediante la comparación de niveles simulados y registrados en las estaciones de Peñas Blancas, Barrancabermeja, Puerto Wilches, San Pablo y Sitio Nuevo.
- Para la validación se utilizaron los registros de niveles y caudales en el período del 1 de septiembre de 2010 al 31 de diciembre de 2011. En donde el modelo hidráulico calibrado representa adecuadamente los valores registrados en las estaciones.

- Teniendo en cuenta el modelo hidráulico calibrado se procedió a evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos sugeridos para pronóstico para las cuencas del río Opón y Sogamoso. Para el análisis hidrológico se utilizaron dos modelos (GR4J y TUWmodel) y tres productos de precipitación (MSWEP, GSMaP y RF-MEP). De los resultados del modelo hidráulico se puede concluir que el modelo hidráulico alimentado por los resultados de los dos modelos hidrológicos subestima los niveles y caudales en relación con las mediciones y con los resultados del modelo hidráulico calibrado (alimentado con los valores de caudal registrados en las estaciones de los ríos tributarios).

7 Análisis de los umbrales de alerta

7.1 Umbrales incorporados en la plataforma FEWS-Colombia

En la plataforma de FEWS-Colombia se cuenta con un archivo en donde se encuentran los atributos de todas las estaciones incorporadas, del cual se consultó la información referente a los valores de umbrales de alerta para las estaciones localizadas en el tramo de modelación hidráulica del río Magdalena, como se muestra en la Tabla 7.1. En esta tabla se incluyeron los umbrales de alerta roja, alerta naranja, alerta amarilla y de alerta de niveles bajos, los cuales están referenciados a las lecturas de mira en cada una de las estaciones.

Tabla 7.1 – Umbrales incorporados en la plataforma FEWS-Colombia para las estaciones localizadas en el tramo de modelación hidráulica

Estación	Umbral de alerta roja (m)	Umbral de alerta naranja (m)	Umbral de alerta amarilla (m)	Umbral de alerta de niveles bajos (m)
Puerto Berrío [23097030]	5.72	5.22	4.72	1.71
El Tagual [23117030]	8.00	7.70	7.40	4.55
Peñas Blancas [23167010]	-	-	-	1.37
Barrancabermeja [23157030]	4.61	4.11	3.61	0.25
Puerto Wilches [231887010]	7.57	7.07	6.57	2.00
San Pablo [23207040]	7.26	6.76	6.26	2.38
Sitio Nuevo [23187280]	6.02	5.52	5.02	0.72

De acuerdo con el IDEAM, las definiciones de las tres alertas son:

- Alerta Roja (para tomar acción): advierte a los sistemas de prevención y atención de desastres sobre la amenaza que puede ocasionar un fenómeno con efectos adversos sobre la población, el cual requiere la atención inmediata por parte de la población y de los cuerpos de atención y socorro. Se emite una alerta sólo cuando la identificación de un

evento extraordinario indique la probabilidad de amenaza inminente y cuando la gravedad del fenómeno implique la movilización de personas y equipos, interrumpiendo el normal desarrollo de sus actividades cotidianas.

- Alerta Naranja (para prepararse): indica la presencia de un fenómeno. No implica amenaza inmediata y como tanto es catalogado como un mensaje para informarse y prepararse. El aviso implica vigilancia continua ya que las condiciones son propicias para el desarrollo de un fenómeno, sin que se requiera permanecer alerta.
- Alerta Amarilla (para informarse): es un mensaje oficial por el cual se difunde información. Por lo regular se refiere a eventos observados, registrados o registrados y puede contener algunos elementos de pronóstico a manera de orientación. Por sus características pretéritas y futuras difiere del aviso y de la alerta, y por lo general no está encaminado a alertar sino a informar.

7.2 Cotas cero de las miras en las estaciones sobre el río Magdalena

Dado que el modelo hidráulico da niveles de agua en cada una de sus secciones transversales y que en las estaciones sobre el río Magdalena solamente registran la lectura de agua en la mira, se deben convertir esas lecturas de agua en niveles de agua mediante las cotas cero de las miras instaladas en cada estación de análisis. En la Tabla 6.1 se muestran los valores de cota cero relacionadas en el Producto 5 de este convenio.

Tabla 7.2 – Cotas cero de las estaciones del tramo del río Magdalena en donde se miden niveles

Estación	Valor adoptado	Observación
Peñas Blancas	74.30 m	Valor adoptado de acuerdo con el perfil hidráulico del tramo del río, dado que el valor del área operativa no es consistente con los resultados de la modelación hidráulica
Barrancabermeja	70.57 m	Valor adoptado de acuerdo con el levantamiento realizado por la firma INCIGE en diciembre de 2021

Estación	Valor adoptado	Observación
Puerto Wilches	59.60 m	Valor adoptado de acuerdo con el levantamiento realizado por la firma INCIGE en diciembre de 2021
San Pablo	54.81 m	Valor adoptado de acuerdo con el levantamiento realizado por la firma INCIGE en diciembre de 2021
Sitio Nuevo	46.58 m	Valor adoptado en la plataforma FEWS-Colombia

7.3 Metodología para determinar los umbrales de alerta

La determinación y/o actualización de umbrales de afectación por inundación, en el sitio donde se encuentran emplazadas las estaciones hidrométricas, tiene como propósito establecer niveles de referencia ante los cuales se emiten las alertas hidrológicas. En el proyecto: "Escalando las prácticas de gestión del agua resilientes al clima para las comunidades vulnerables en La Mojana" se planteó una metodología para determinar los umbrales de alerta (IDEAM, 2021), la cual se resume a continuación:

- Realizar un levantamiento detallado de cada sección en donde se determine: (1) la cota cero de la mira (cota del valor cero de la mira y que esté asociada a un punto de referencia de cota conocida, BMs del IGAC) y (2) cota de desbordamiento del cauce (nivel de agua en la cual el agua sale del cauce hacia la planicie de inundación),
- Recopilar la información disponible de la estación, en particular curvas de gasto y registros de niveles medios diarios y niveles instantáneos,
- Recopilar información de reportes de eventos de inundación y que sean consolidados por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y/o medios de comunicación digitales,
- Se realiza un análisis de tendencia y homogeneidad de las series de nivel, generalmente se hace por medio gráfico en donde se puedan observar las tendencias, cambios, irreversibilidad, intermitencia, entre otros. Ese análisis se realiza para intervalos de 12 o 72 horas,

- Del análisis anterior se establecen los ascensos y descensos de nivel, de donde se puede extraer una nueva serie de dato en la que se incluyen sólo los ascensos de nivel y se le aplica un análisis visual y/o analítico (Prueba de Grubbs y Beck) para la detección de datos anómalos que pudiesen afectar significativamente los parámetros estadísticos a calcularse y eliminarlos de los análisis posteriores,
- Se realiza un análisis de frecuencia de la serie de ascenso (cada 12 o 72 horas) en donde se relacionan la magnitud de los eventos de ascenso de nivel con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de la distribución de probabilidad normal,
- Por último, se hace la validación de los umbrales mediante los reportes de inundaciones.

A continuación, se aplica la metodología antes descrita para las estaciones Peñas Blancas, Barrancabermeja, Puerto Wilches, San Pablo y Sitio Nuevo.

7.4 Umbrales de alerta para la estación Peñas Blancas

En la Figura 7.1 se muestra la serie de lecturas de agua en la mira de la estación de Peñas Blancas, correspondiente al valor medio diario de los últimos 15 años (2007 – 2021), en donde se verificará la tendencia y homogeneidad, así como la detección de datos anómalos. De la figura se observa que las lecturas siguen una tendencia similar en los diferentes años, con lecturas máximas en 2007 y 2010-2011 (fenómeno de La Niña). A inicios de 2007 se observan unas lecturas por debajo de 200 cm (valores mínimos de otros años).

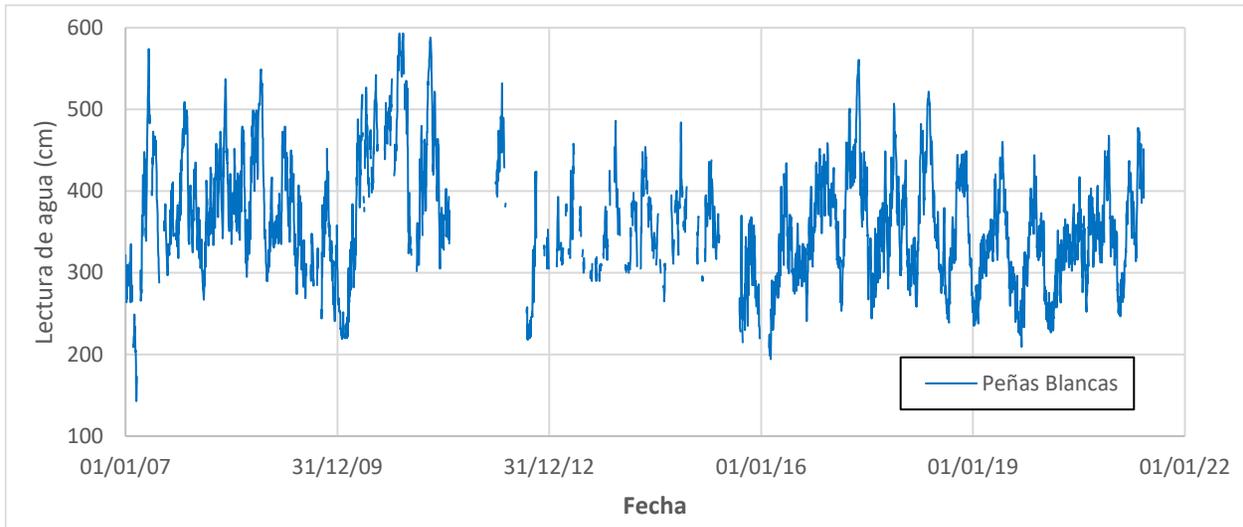


Figura 7.1 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Peñas Blancas

En la Figura 7.2 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 24 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 17.9 cm), que obedece al 68.2% de los datos.

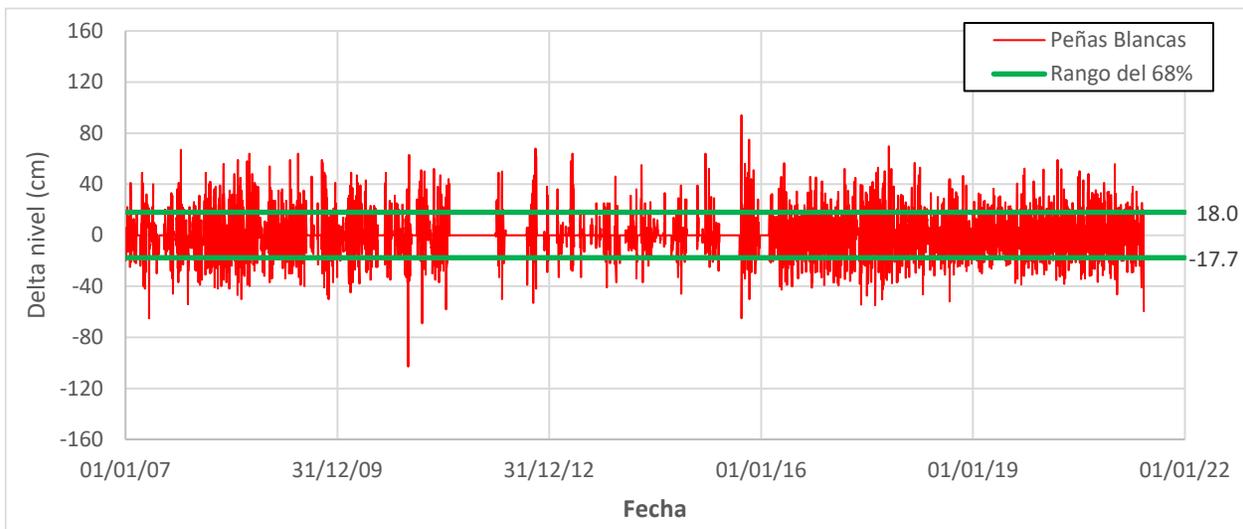


Figura 7.2 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Peñas Blancas

En la Figura 7.3 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 72 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 30.7 cm). En la Tabla 7.3 se presentan los estadísticos de la serie de ascensos y descensos para los dos períodos (24 y 72 horas).

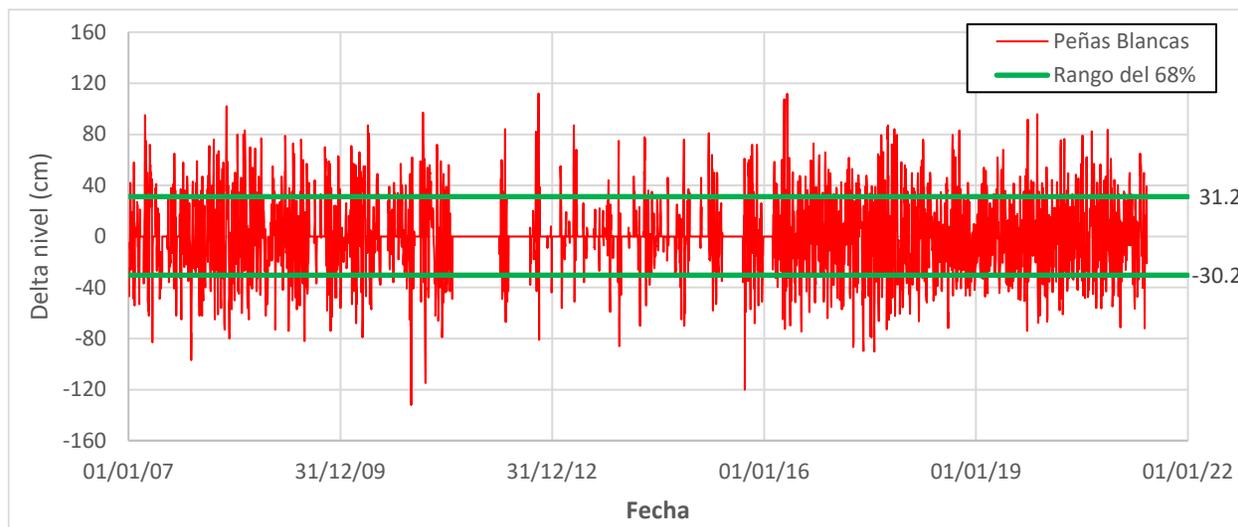


Figura 7.3 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Peñas Blancas

Tabla 7.3 – Estadísticos principales de la serie de ascensos y descensos para la estación de Peñas Blancas

Período	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
24 horas	3943	0.2 cm	17.9 cm	-103.0 cm	94.0 cm
72 horas	3826	0.5 cm	30.8 cm	-132.0 cm	112.0 cm

Para el caso de los umbrales de alerta se tiene en cuenta solamente los ascensos de nivel de agua en la sección transversal de la estación de Peñas Blancas. En la Figura 7.4 se muestra la relación de los ascensos de nivel con los caudales registrados, en la gráfica de la izquierda se muestran los datos para el período de 24 horas y en la gráfica de la derecha se muestran los datos para el período de 72 horas. Adicionalmente, se incorporó el delta de ascenso al cual se obtenía un 68.2% de los datos.

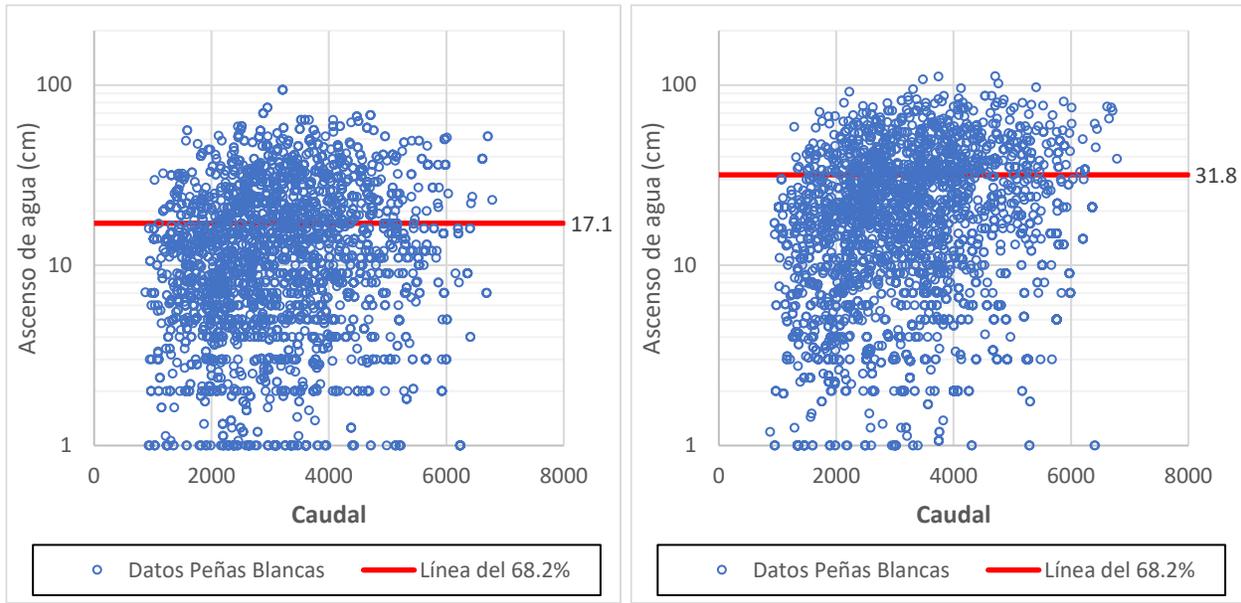


Figura 7.4 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Peñas Blancas: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)

Del modelo hidráulico se determinó que el nivel de desbordamiento en la sección transversal (asociada a la estación de Peñas Blancas) es 79.0 m, como se muestra en la Figura 7.5. Esa cota de desbordamiento corresponderá al umbral de alerta roja, que traducido a lecturas en la mira de la estación sería 470 cm (de acuerdo con la cota cero de la mira registrado en la Tabla 6.1, valor de 74.3 m).

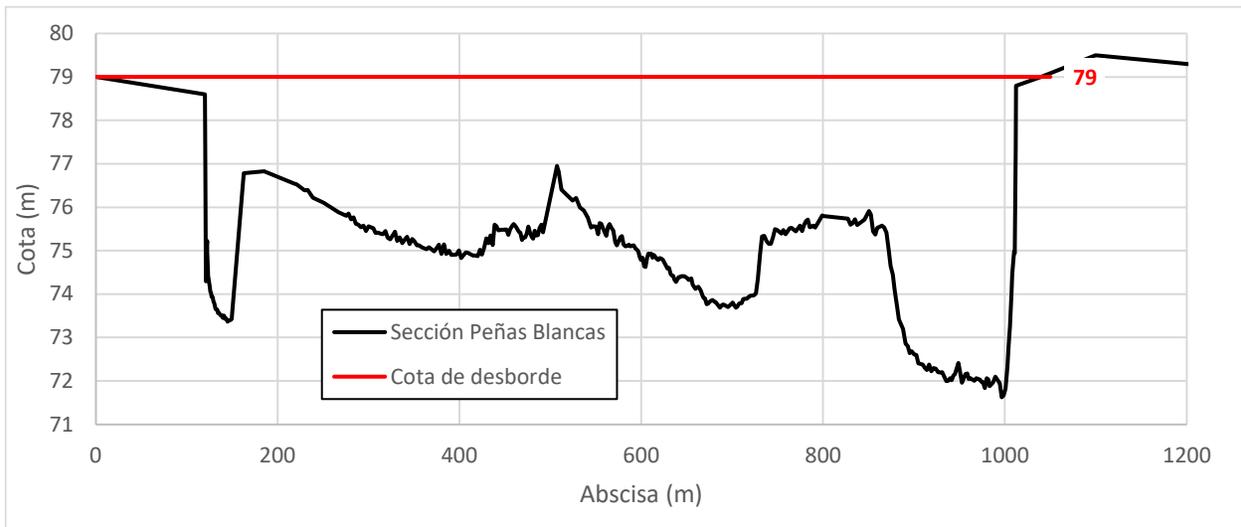


Figura 7.5 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Peñas Blancas

En la Figura 7.6 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 24 horas, mientras que, en la Figura 7.7 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas.

El umbral de alerta naranja corresponderá al valor del umbral de alerta roja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.4 para los dos períodos de ascenso (al cual se obtenía un 68.2% de los datos) y el umbral de alerta amarilla corresponderá al valor del umbral de alerta naranja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.4.

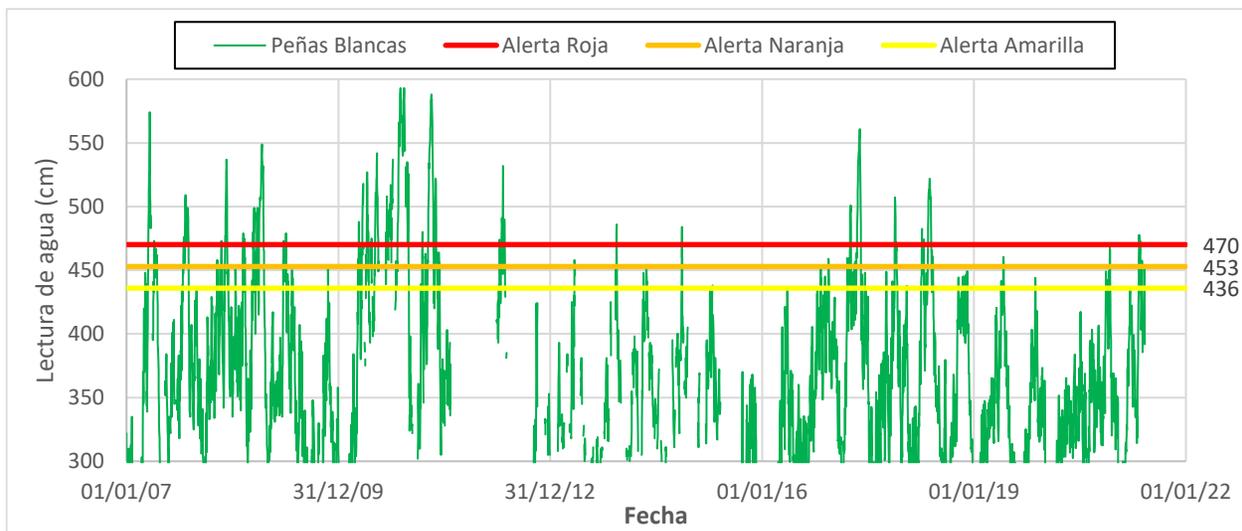


Figura 7.6 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Peñas Blancas

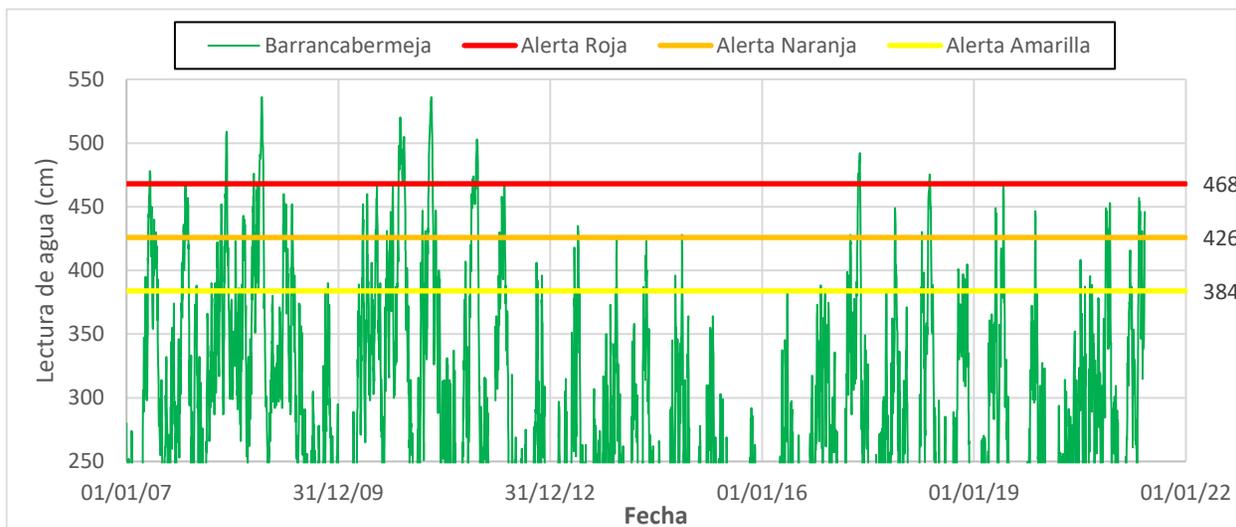


Figura 7.7 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Peñas Blancas

En la Tabla 7.4 se relacionan los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla, así como el número de eventos en los que se igualó o supera cada umbral y su correspondiente probabilidad de excedencia. Estos valores corresponden al análisis de los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas, ya que los rangos de variación de los ascensos del nivel de agua para el período de 24 horas son muy pequeños.

Tabla 7.4 – Umbrales de alerta para la estación de Peñas Blancas

Umbral	Nivel del umbral (m)	Valor del umbral en la mira (cm)	# de eventos en que se supera el umbral	Probabilidad de excedencia (%)
Umbral de alerta roja	79.00	470	307	7.6%
Umbral de alerta naranja	78.68	438	611	15.1%
Umbral de alerta amarilla	78.36	406	1042	25.8%

7.5 Umbrales de alerta para la estación Barrancabermeja

En la Figura 7.8 se muestra la serie de lecturas de agua en la mira de la estación de Barrancabermeja, correspondiente al valor medio diario de los últimos 15 años (2007 – 2021), en donde se verificará la tendencia y homogeneidad, así como la detección de datos anómalos. De la figura se observa una tendencia muy similar entre los diferentes años.

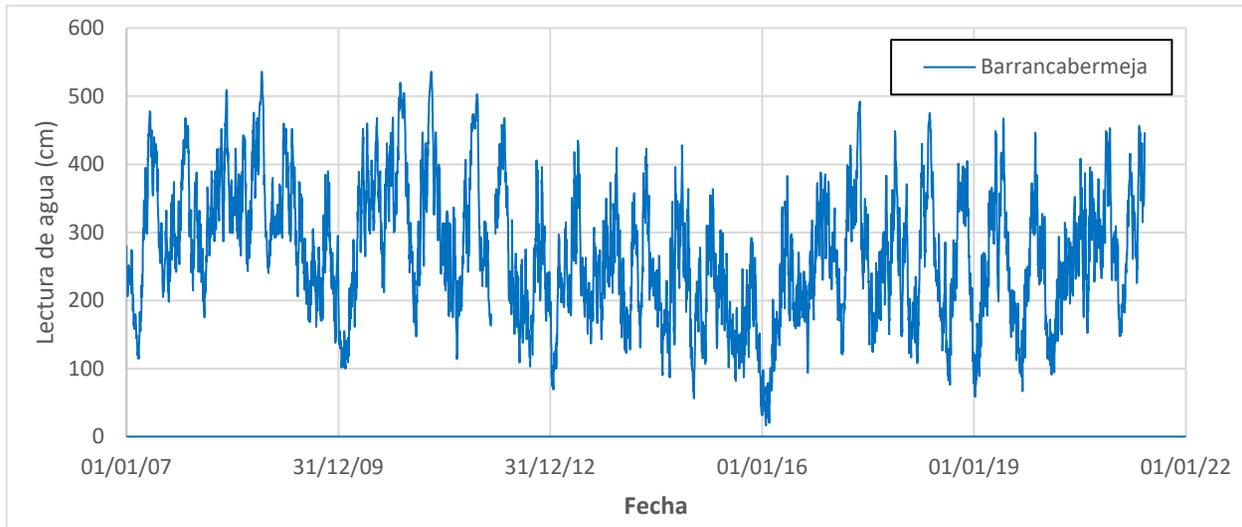


Figura 7.8 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Barrancabermeja

En la Figura 7.9 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 24 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 24.6 cm).

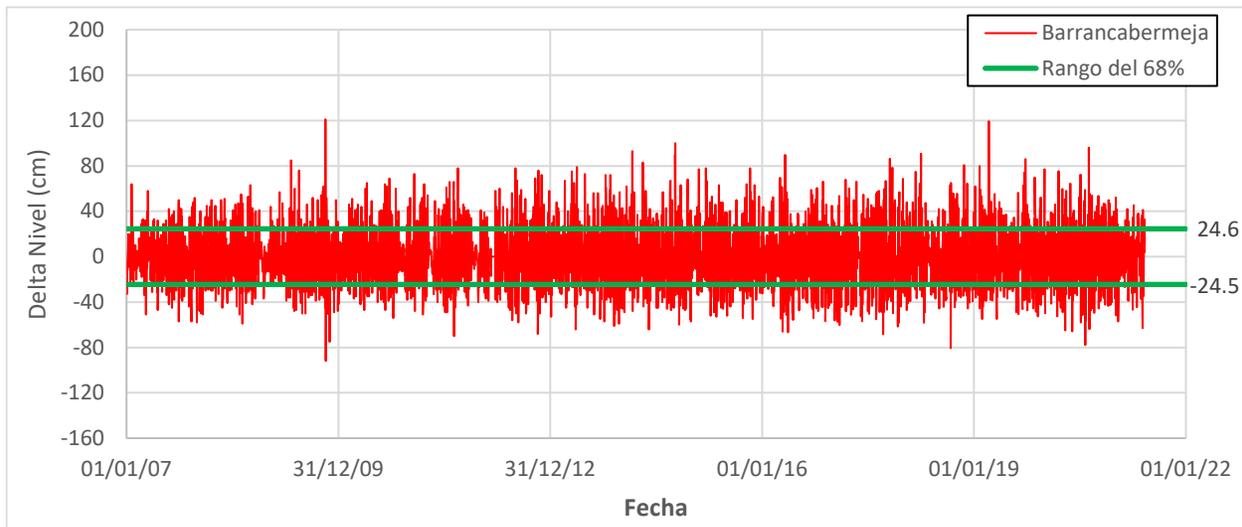


Figura 7.9 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Barrancabermeja

En la Figura 7.10 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 72 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 42.8 cm). En la Tabla 7.5 se presentan los estadísticos de la serie de ascensos y descensos para los dos períodos (24 y 72 horas).

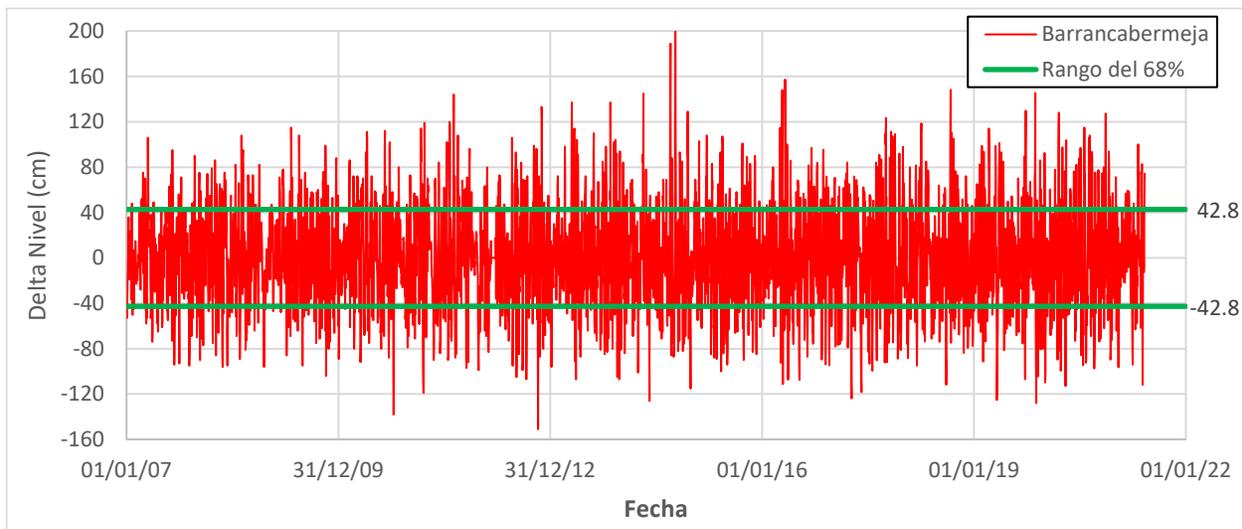


Figura 7.10 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Barrancabermeja

Tabla 7.5 – Estadísticos principales de la serie de ascensos y descensos para la estación de Barrancabermeja

Período	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
24 horas	5221	0.0 cm	24.6 cm	-92.0 cm	121.0 cm
72 horas	5214	0.0 cm	42.8 cm	-151.0 cm	235.0 cm

Para el caso de los umbrales de alerta se tiene en cuenta solamente los ascensos de nivel de agua en la sección transversal de la estación de Barrancabermeja. En la Figura 7.11 se muestra la relación de los ascensos de nivel con los caudales registrados, en la gráfica de la izquierda se muestran los datos para el período de 24 horas y en la gráfica de la derecha se muestran los datos para el período de 72 horas. Adicionalmente, se incorporó el delta de ascenso al cual se obtenía un 68.2% de los datos.

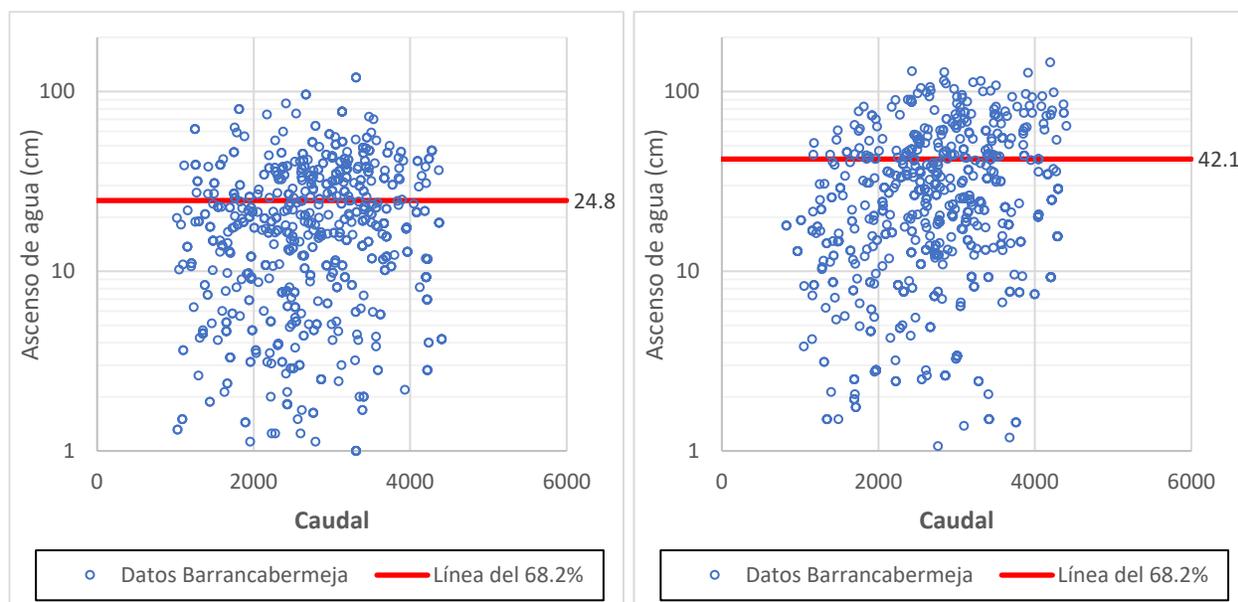


Figura 7.11 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Barrancabermeja: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)

Del modelo hidráulico se determinó que el nivel de desbordamiento en la sección transversal (asociada a la estación de Barrancabermeja) es 75.25 m, como se muestra en la Figura 7.12. Esa cota de desbordamiento corresponderá al umbral de alerta roja, que traducido a lecturas en la mira

de la estación sería 468 cm (de acuerdo con la cota cero de la mira registrado en la Tabla 6.1, valor de 70.57 m).

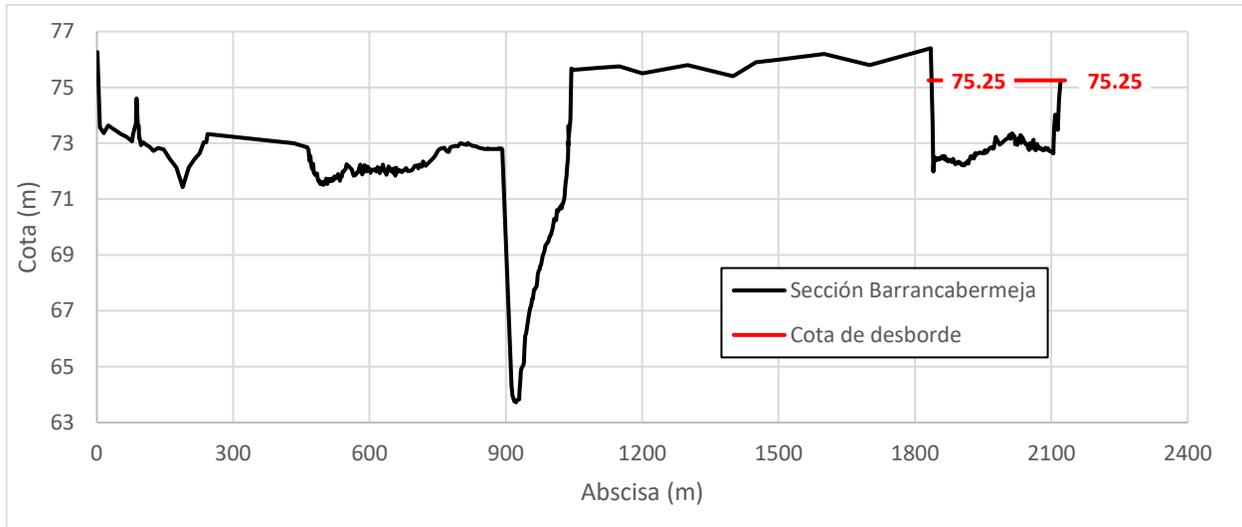


Figura 7.12 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Barrancabermeja

En la Figura 7.13 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 24 horas, mientras que, en la Figura 7.14 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas.

El umbral de alerta naranja corresponderá al valor del umbral de alerta roja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.11 para los dos períodos de ascenso (al cual se obtenía un 68.2% de los datos) y el umbral de alerta amarilla corresponderá al valor del umbral de alerta naranja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.11.

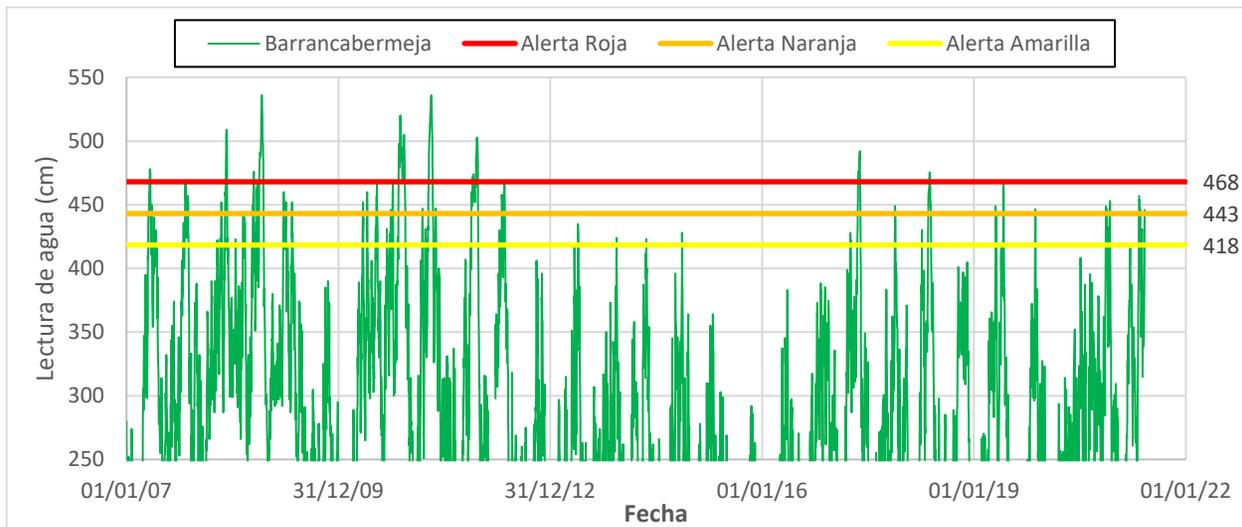


Figura 7.13 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Barrancabermeja

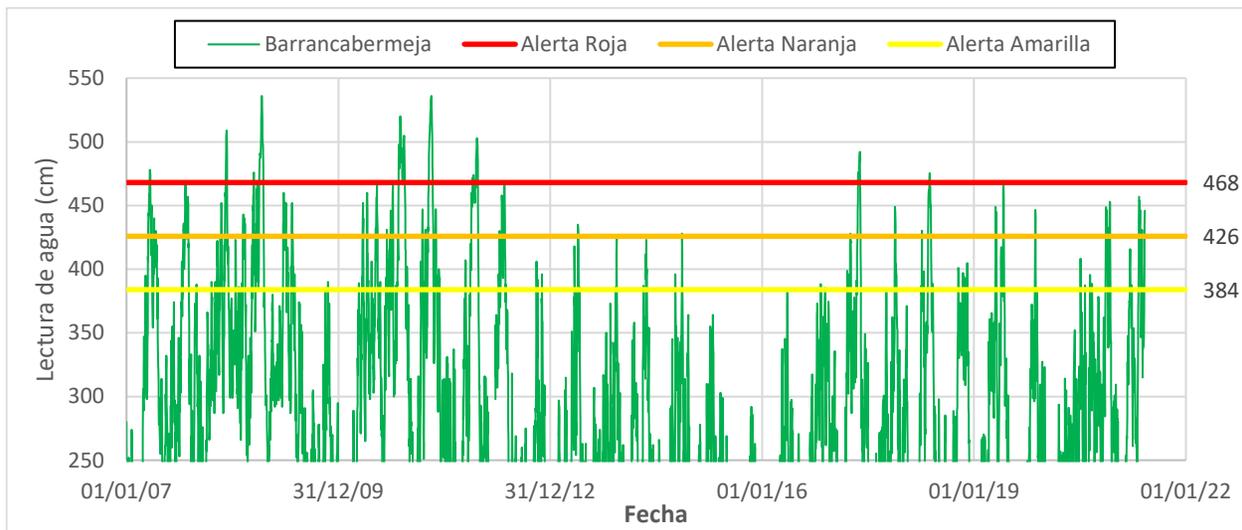


Figura 7.14 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Barrancabermeja

En la Tabla 7.6 se relacionan los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla, así como el número de eventos en los que se igualó o supera cada umbral y su correspondiente probabilidad de excedencia. Estos valores corresponden al análisis de los ascensos del nivel de agua en un período

de 24 horas, ya que los rangos de variación de los ascensos del nivel de agua para el período de 24 horas son muy pequeños.

Tabla 7.6 – Umbrales de alerta para la estación de Barrancabermeja

Umbral	Nivel del umbral (m)	Valor del umbral en la mira (cm)	# de eventos en que se supera el umbral	Probabilidad de excedencia (%)
Umbral de alerta roja	75.25	468	118	2.9%
Umbral de alerta naranja	74.83	426	344	8.5%
Umbral de alerta amarilla	74.41	384	667	16.5%

7.6 Umbrales de alerta para la estación Puerto Wilches

En la Figura 7.15 se muestra la serie de lecturas de agua en la mira de la estación de Puerto Wilches, correspondiente al valor medio diario de los últimos 15 años (2007 – 2021), en donde se verificará la tendencia y homogeneidad, así como la detección de datos anómalos. De la figura se observa una tendencia muy similar entre los diferentes años. A inicio de 2019 se observan valores bajos en comparación con los mínimos de los otros años.

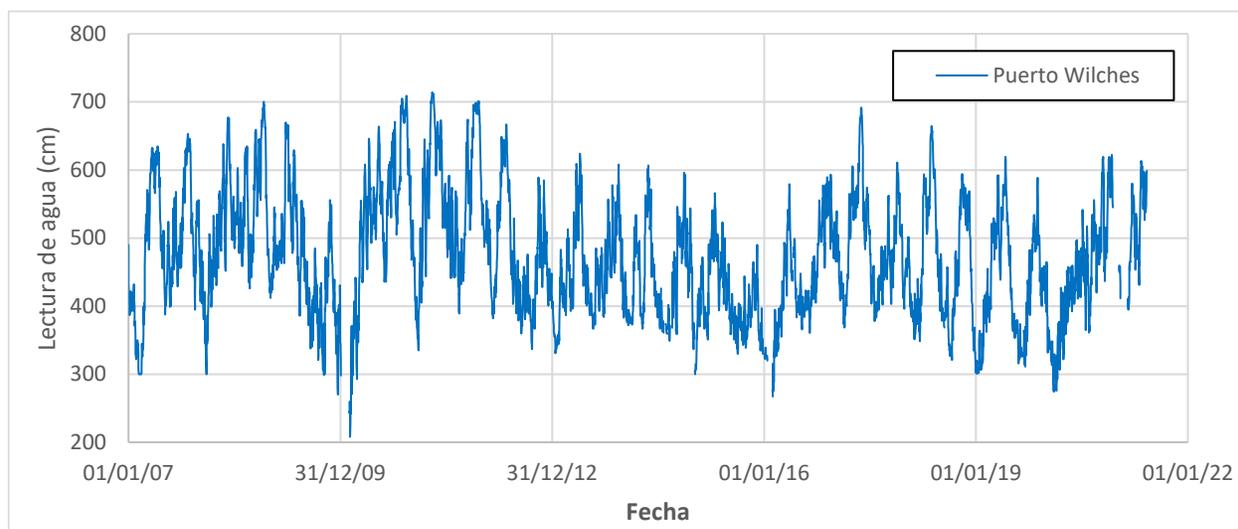


Figura 7.15 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Puerto Wilches

En la Figura 7.16 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 24 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 18.5 cm).

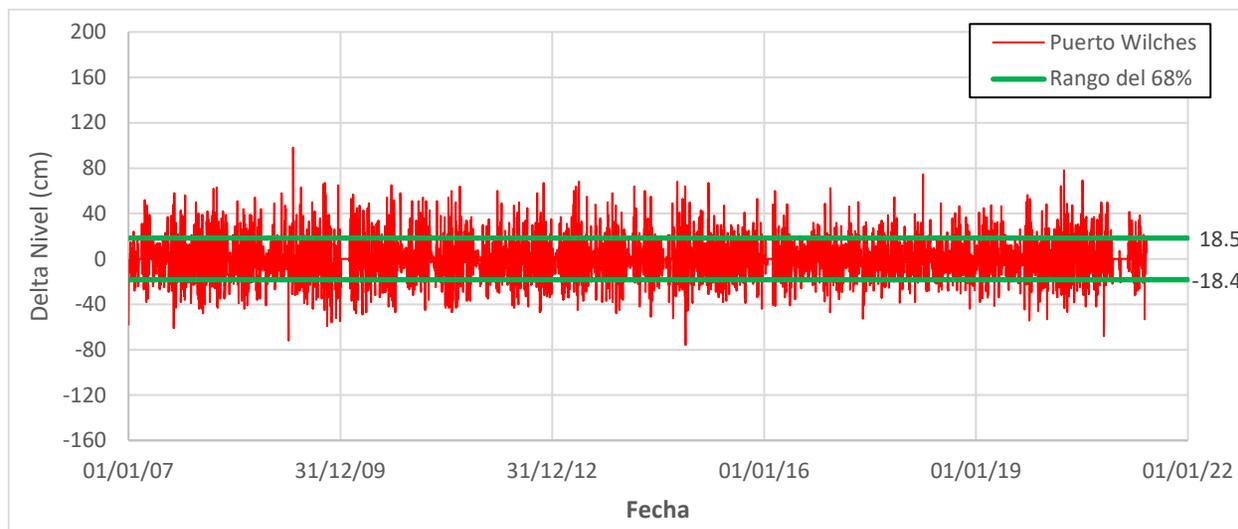


Figura 7.16 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Puerto Wilches

En la Figura 7.17 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 72 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 34.8 cm). En la Tabla 7.7 se presentan los estadísticos de la serie de ascensos y descensos para los dos períodos (24 y 72 horas).

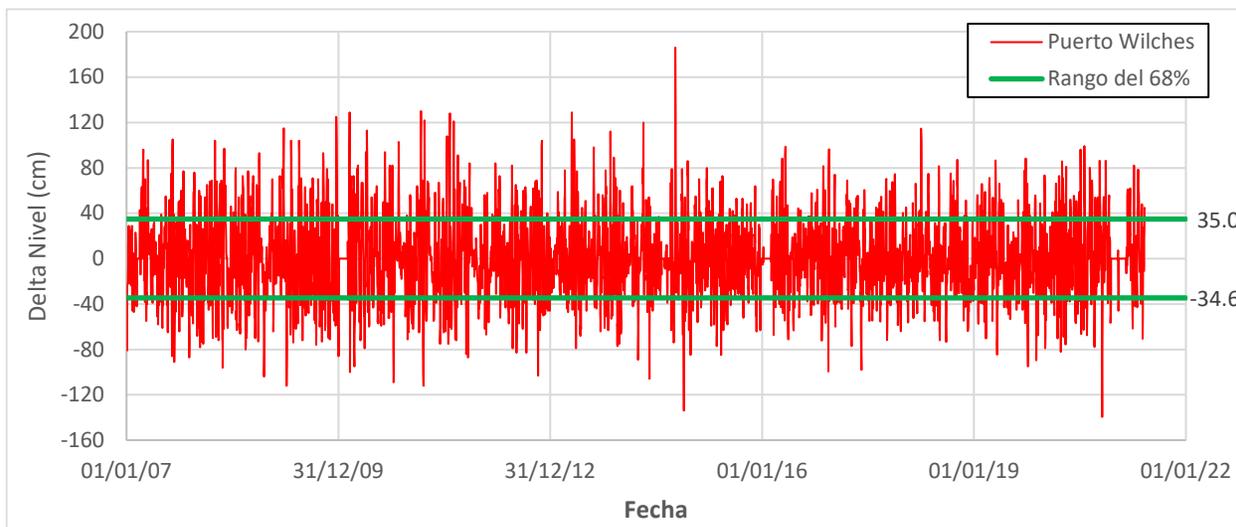


Figura 7.17 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Puerto Wilches

Tabla 7.7 – Estadísticos principales de la serie de ascensos y descensos para la estación de Puerto Wilches

Período	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
24 horas	5061	0.1 cm	18.5 cm	-76.0 cm	98.0 cm
72 horas	5041	0.2 cm	34.8 cm	-139.0 cm	186.0 cm

Para el caso de los umbrales de alerta se tiene en cuenta solamente los ascensos de nivel de agua en la sección transversal de la estación de Peñas Blancas. En la Figura 7.18 se muestra la relación de los ascensos de nivel con los caudales registrados, en la gráfica de la izquierda se muestran los datos para el período de 24 horas y en la gráfica de la derecha se muestran los datos para el período de 72 horas. Adicionalmente, se incorporó el delta de ascenso al cual se obtenía un 68.2% de los datos.

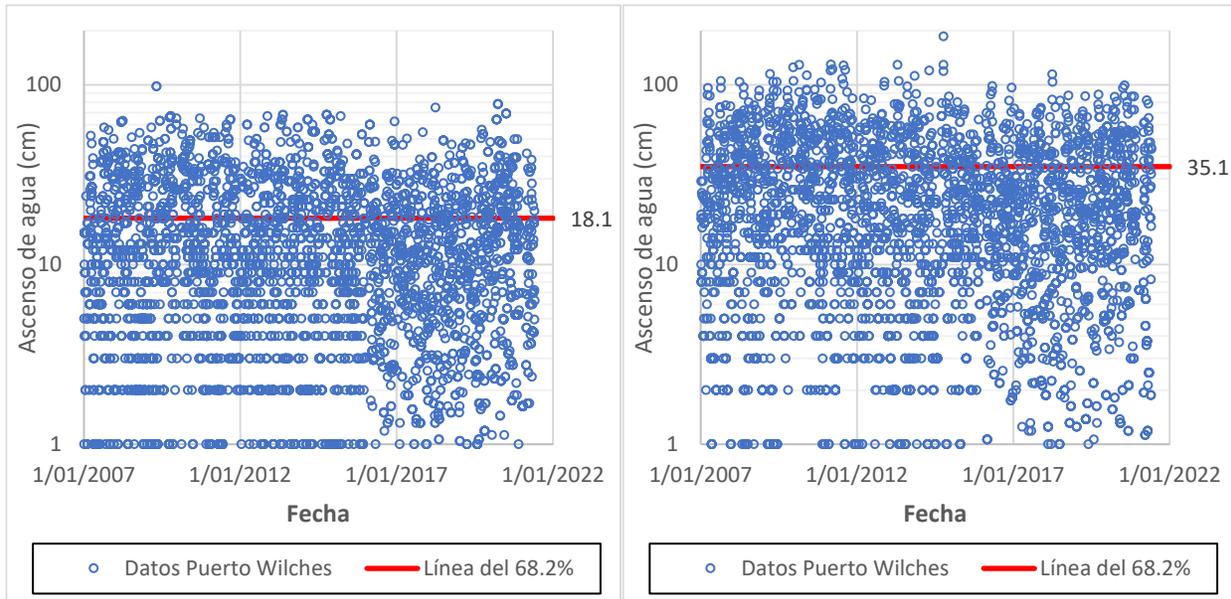


Figura 7.18 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Puerto Wilches: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)

Del modelo hidráulico se determinó que el nivel de desbordamiento en la sección transversal (asociada a la estación de Puerto Wilches) es 65.65 m, como se muestra en la Figura 7.19. Esa cota de desbordamiento corresponderá al umbral de alerta roja, que traducido a lecturas en la mira de la estación sería 605 cm (de acuerdo con la cota cero de la mira registrado en la Tabla 6.1, valor de 59.60 m).

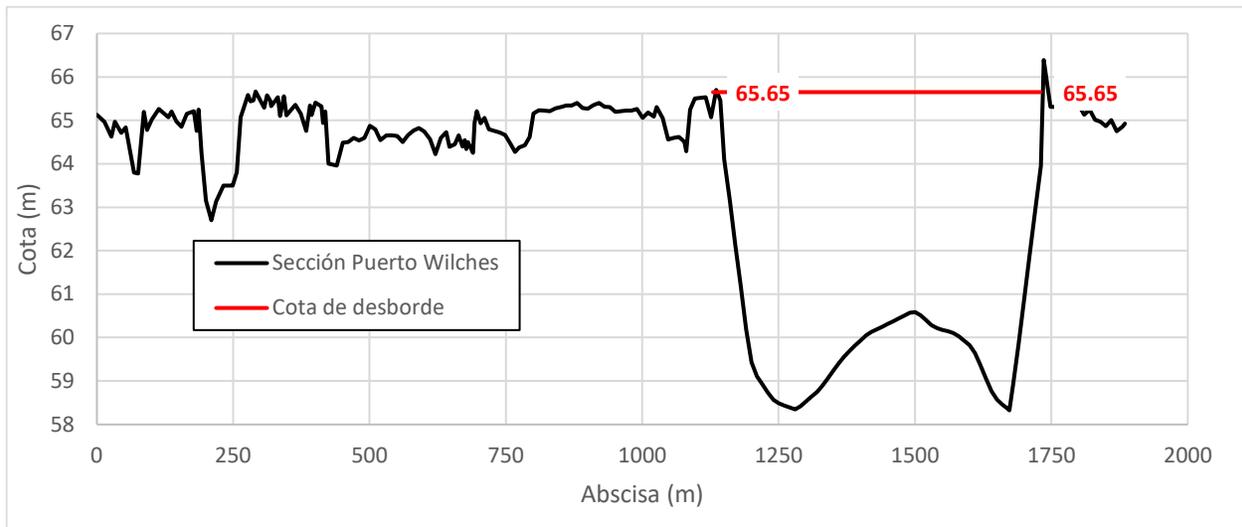


Figura 7.19 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Puerto Wilches

En la Figura 7.20 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 24 horas, mientras que, en la Figura 7.21 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas.

El umbral de alerta naranja corresponderá al valor del umbral de alerta roja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.18 para los dos períodos de ascenso (al cual se obtenía un 68.2% de los datos) y el umbral de alerta amarilla corresponderá al valor del umbral de alerta naranja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.18.

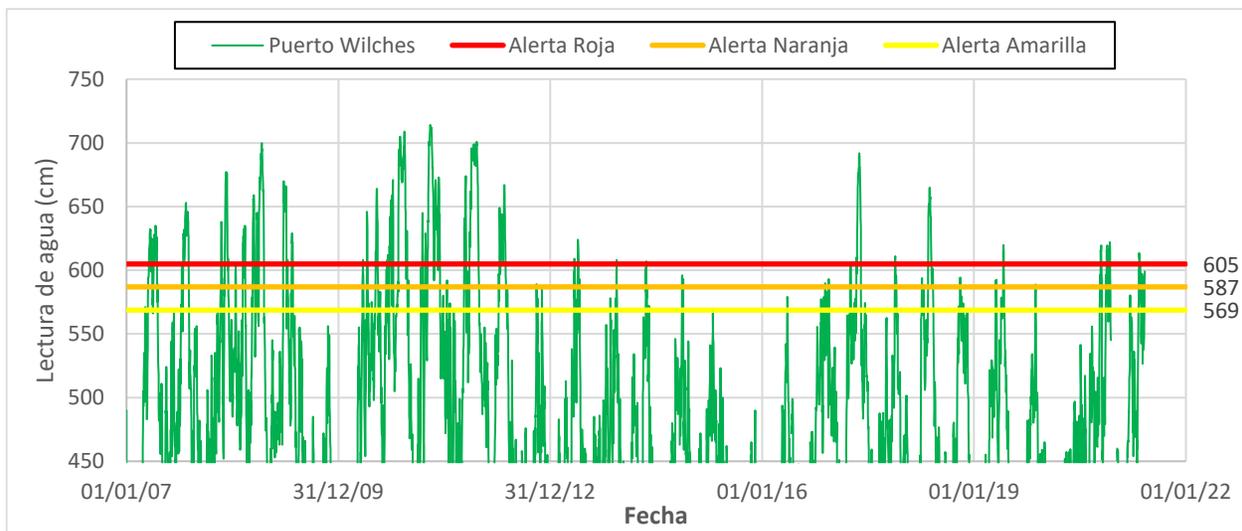


Figura 7.20 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Puerto Wilches

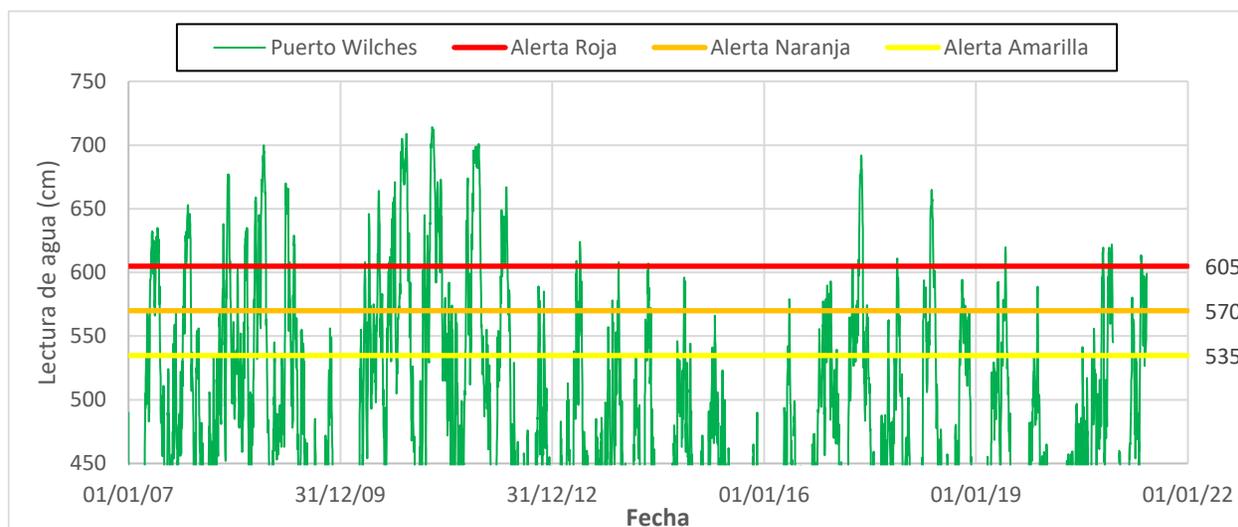


Figura 7.21 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Puerto Wilches

En la Tabla 7.8 se relacionan los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla, así como el número de eventos en los que se igualó o supera cada umbral y su correspondiente probabilidad de excedencia. Estos valores corresponden al análisis de los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas, ya que los rangos de variación de los ascensos del nivel de agua para el período de 24 horas son muy pequeños.

Tabla 7.8 – Umbrales de alerta para la estación de Puerto Wilches

Umbral	Nivel del umbral (m)	Valor del umbral en la mira (cm)	# de eventos en que se supera el umbral	Probabilidad de excedencia (%)
Umbral de alerta roja	65.65	605	454	11.3%
Umbral de alerta naranja	65.30	570	769	19.1%
Umbral de alerta amarilla	64.95	535	1253	31.1%

7.7 Umbrales de alerta para la estación San Pablo

En la Figura 7.22 se muestra la serie de lecturas de agua en la mira de la estación de San Pablo, correspondiente al valor medio diario de los últimos 15 años (2007 – 2021), en donde se verificará la tendencia y homogeneidad, así como la detección de datos anómalos. De la figura se observa una tendencia muy similar entre los diferentes años.

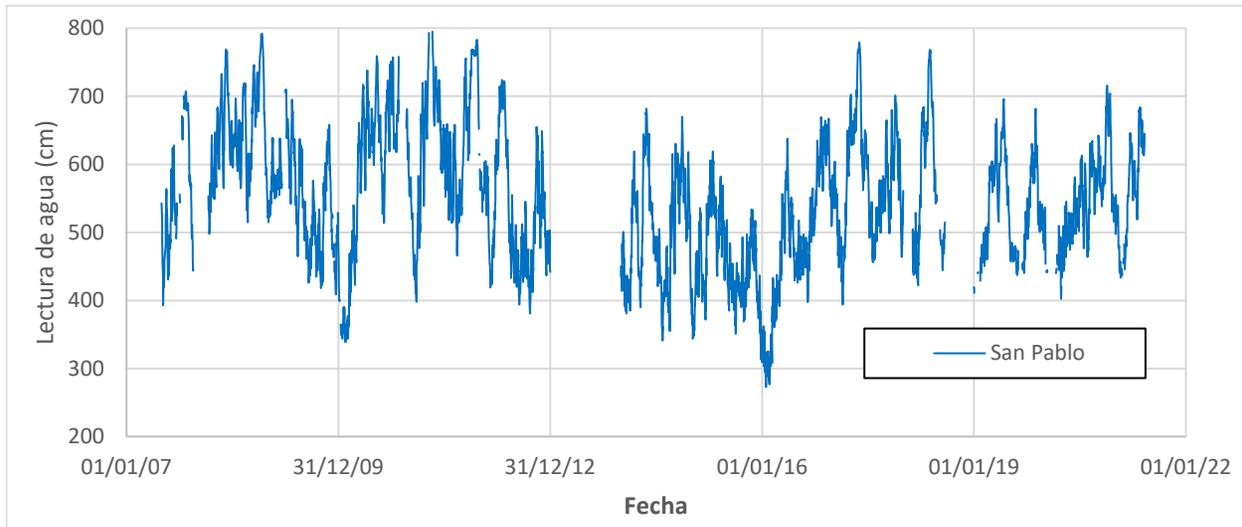


Figura 7.22 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de San Pablo

En la Figura 7.23 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 24 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 18.2 cm).

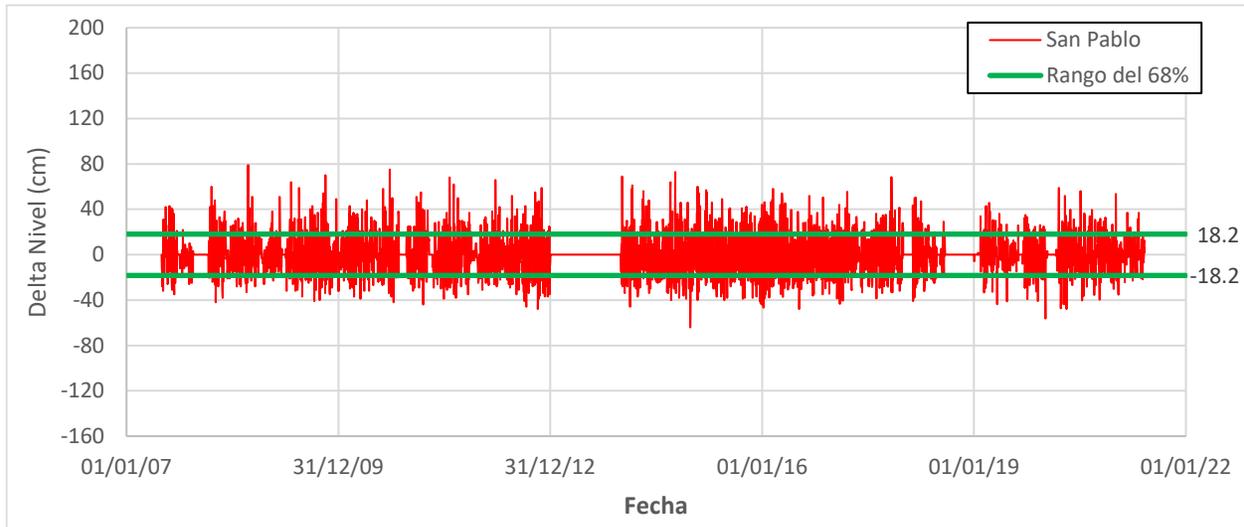


Figura 7.23 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de San Pablo

En la Figura 7.24 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 72 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 34.9 cm). En la Tabla 7.9 se presentan los estadísticos de la serie de ascensos y descensos para los dos períodos (24 y 72 horas).

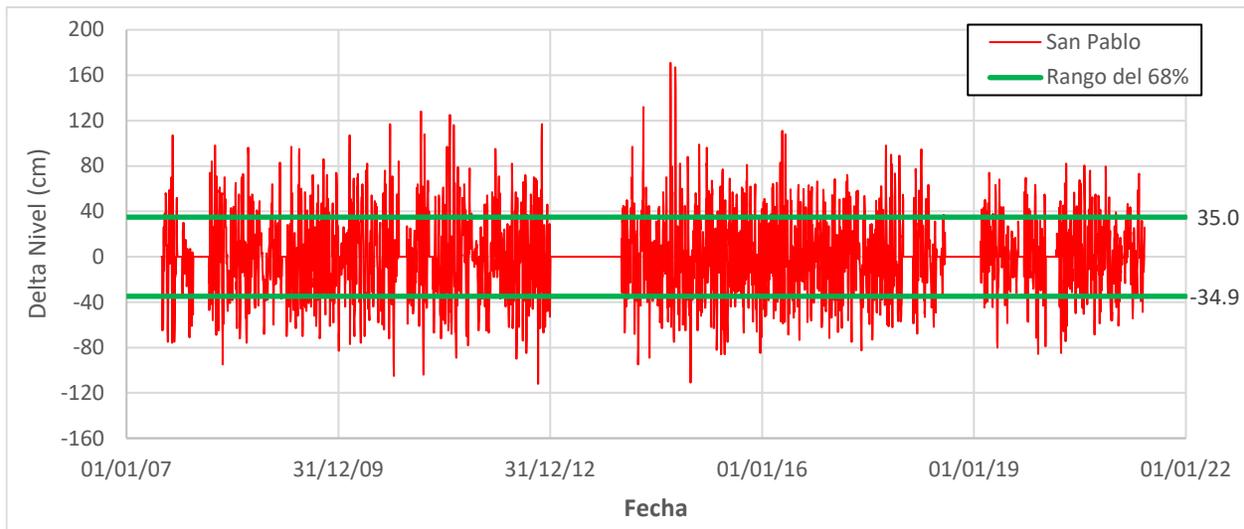


Figura 7.24 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de San Pablo

Tabla 7.9 – Estadísticos principales de la serie de ascensos y descensos para la estación de San Pablo

Período	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
24 horas	4174	0.0 cm	18.2 cm	-64.0 cm	79.0 cm
72 horas	4132	0.1 cm	34.9 cm	-112.0 cm	171.0 cm

Para el caso de los umbrales de alerta se tiene en cuenta solamente los ascensos de nivel de agua en la sección transversal de la estación de Peñas Blancas. En la Figura 7.25 se muestra la relación de los ascensos de nivel con los caudales registrados, en la gráfica de la izquierda se muestran los datos para el período de 24 horas y en la gráfica de la derecha se muestran los datos para el período de 72 horas. Adicionalmente, se incorporó el delta de ascenso al cual se obtenía un 68.2% de los datos.

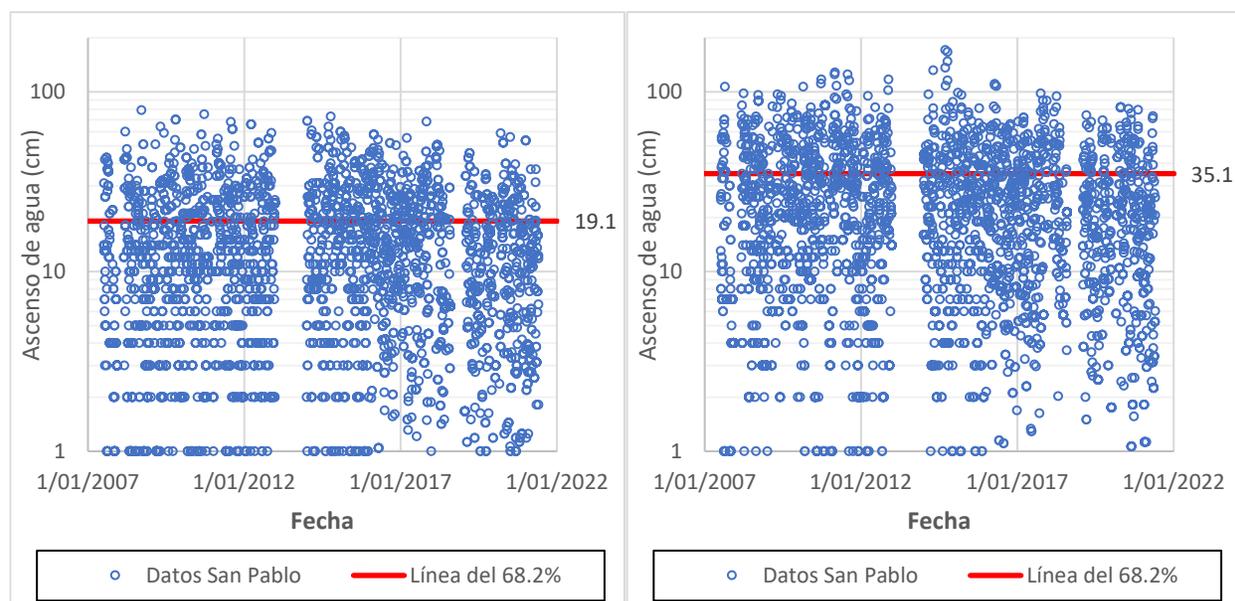


Figura 7.25 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de San Pablo: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)

Del modelo hidráulico se determinó que el nivel de desbordamiento en la sección transversal (asociada a la estación de San Pablo) es 62.18 m, como se muestra en la Figura 7.26. Esa cota de desbordamiento corresponderá al umbral de alerta roja, que traducido a lecturas en la mira de la estación sería 737 cm (de acuerdo con la cota cero de la mira registrado en la Tabla 6.1, valor de 54.81 m).

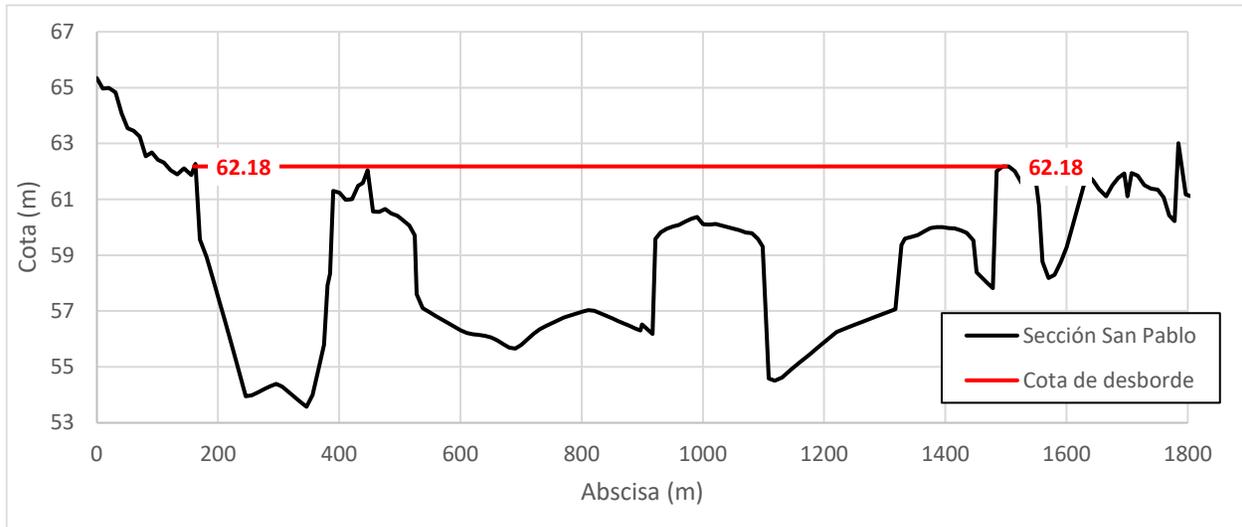


Figura 7.26 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de San Pablo

En la Figura 7.27 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 24 horas, mientras que, en la Figura 7.28 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas.

El umbral de alerta naranja corresponderá al valor del umbral de alerta roja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.25 para los dos períodos de ascenso (al cual se obtenía un 68.2% de los datos) y el umbral de alerta amarilla corresponderá al valor del umbral de alerta naranja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.25.

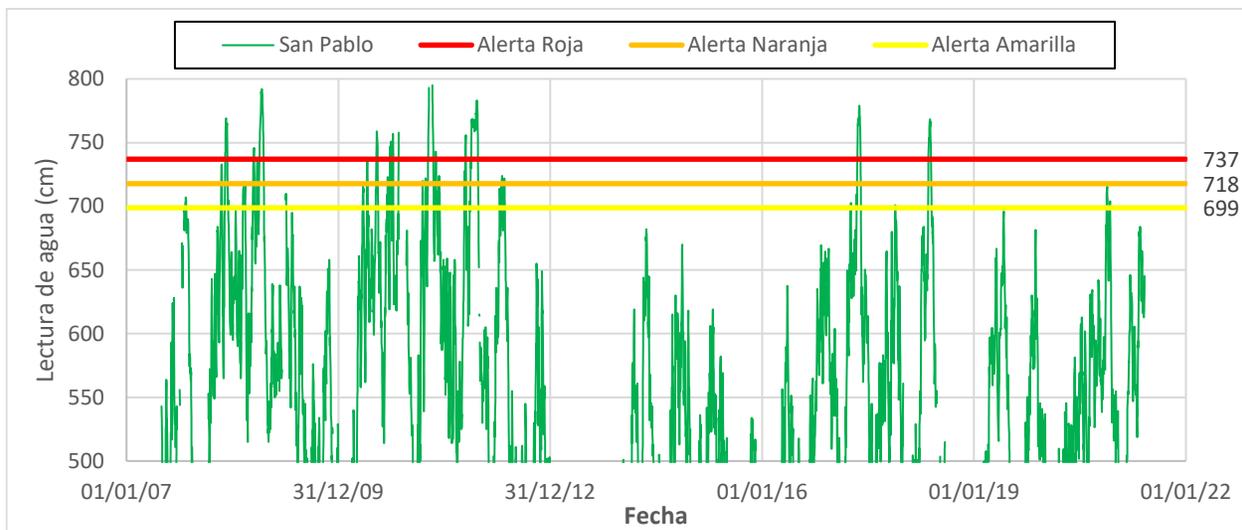


Figura 7.27 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de San Pablo

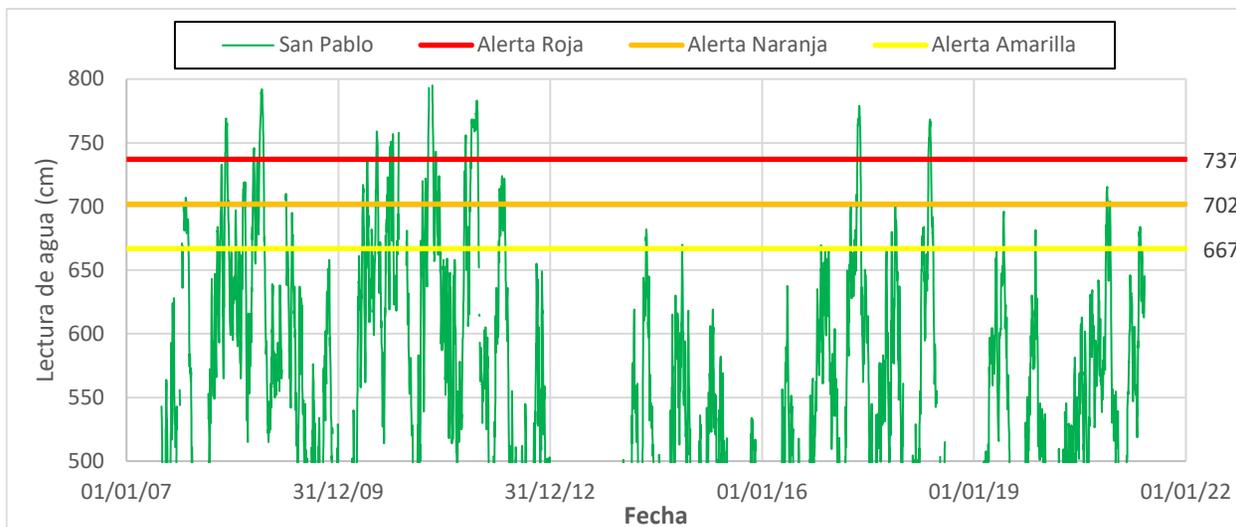


Figura 7.28 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de San Pablo

En la Tabla 7.10 se relacionan los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla, así como el número de eventos en los que se igualó o supera cada umbral y su correspondiente probabilidad de excedencia. Estos valores corresponden al análisis de los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas, ya que los rangos de variación de los ascensos del nivel de agua para el período de 24 horas son muy pequeños.

Tabla 7.10 – Umbrales de alerta para la estación de San Pablo

Umbral	Nivel del umbral (m)	Valor del umbral en la mira (cm)	# de eventos en que se supera el umbral	Probabilidad de excedencia (%)
Umbral de alerta roja	62.18	737	142	3.5%
Umbral de alerta naranja	61.83	702	289	7.2%
Umbral de alerta amarilla	61.48	667	534	13.2%

7.8 Umbrales de alerta para la estación Sitio Nuevo

En la Figura 7.29 se muestra la serie de lecturas de agua en la mira de la estación de Sitio Nuevo, correspondiente al valor medio diario de los últimos 15 años (2007 – 2021), en donde se verificará la tendencia y homogeneidad, así como la detección de datos anómalos. De la figura se observa una tendencia muy similar entre los diferentes años. Mientras que a inicio de 2009 se observan valores más bajos que los mínimos observados en los otros años.

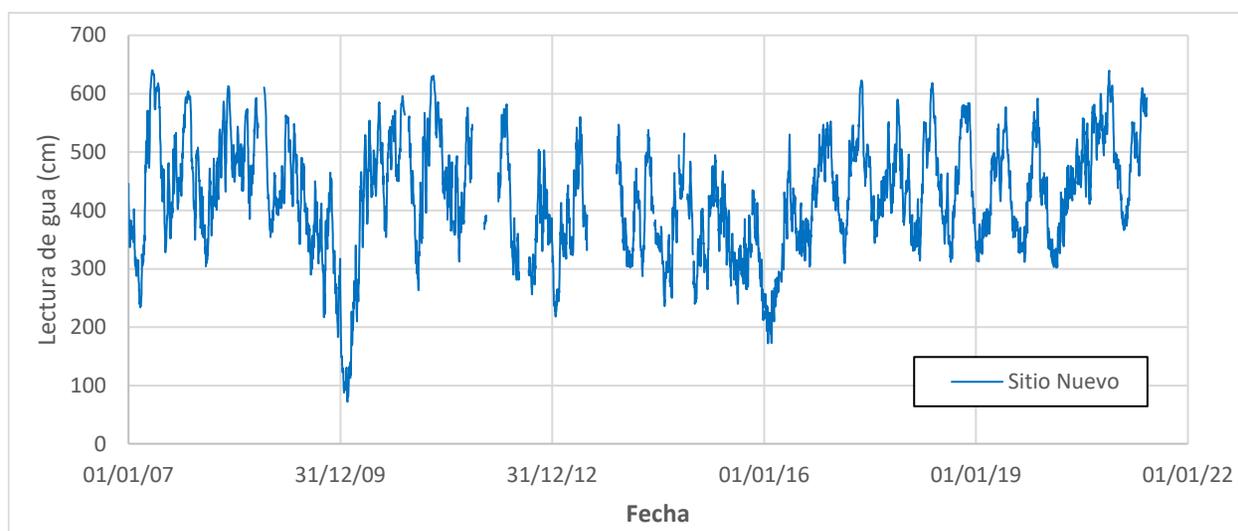


Figura 7.29 – Análisis visual de tendencia y detección de datos anómalos en la serie de nivel medio diario para la estación de Sitio Nuevo

En la Figura 7.30 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 24 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 16.0 cm).

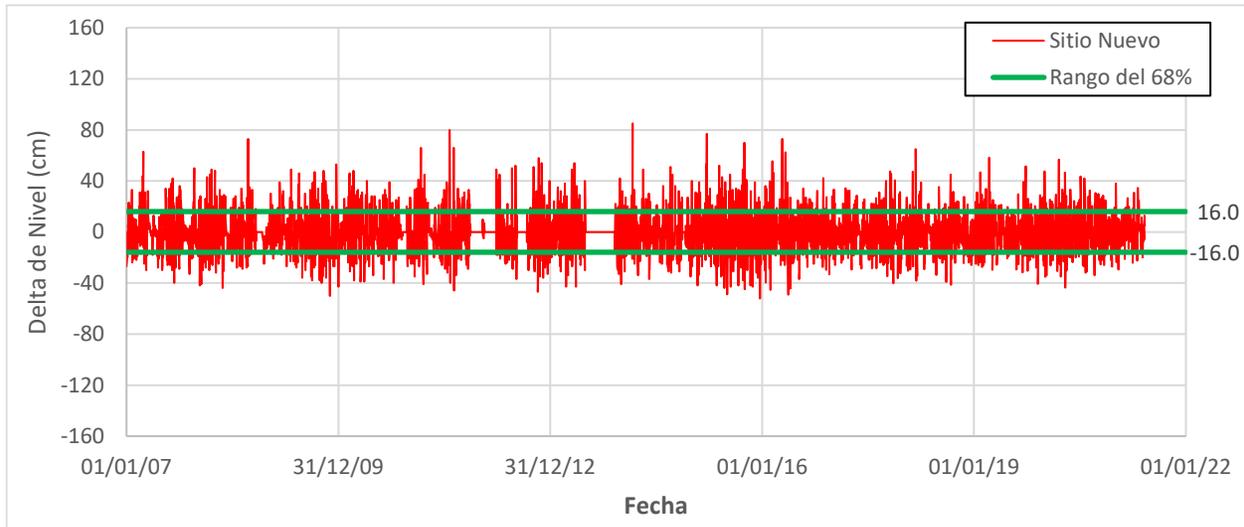


Figura 7.30 – Serie de diferencias de nivel de agua en 24 horas para los datos registrados en la estación de Sitio Nuevo

En la Figura 7.31 se aprecia la serie de variaciones de nivel de agua (ascensos y descensos) para un período de 72 horas. En la gráfica se incluyó el rango correspondiente a más o menos una desviación estándar de los datos (± 31.6 cm). En la Tabla 7.11 se presentan los estadísticos de la serie de ascensos y descensos para los dos períodos (24 y 72 horas).

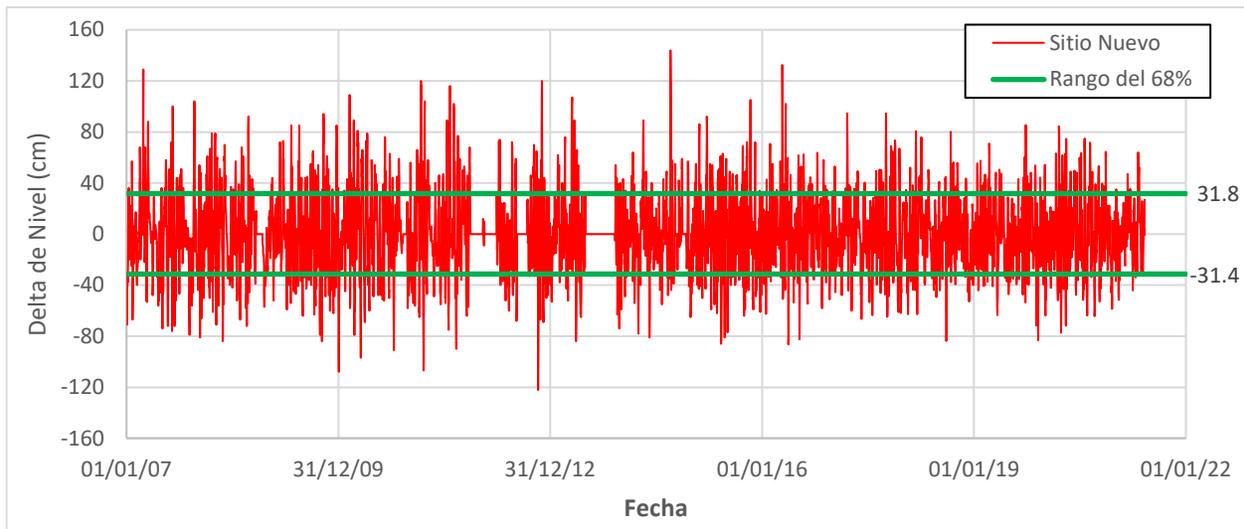


Figura 7.31 – Serie de diferencias de nivel de agua en 72 horas para los datos registrados en la estación de Sitio Nuevo

Tabla 7.11 – Estadísticos principales de la serie de ascensos y descensos para la estación de Sitio Nuevo

Período	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
24 horas	4838	0.0 cm	16.0 cm	-52.0 cm	85.0 cm
72 horas	4814	0.2 cm	31.6 cm	-122.0 cm	144.0 cm

Para el caso de los umbrales de alerta se tiene en cuenta solamente los ascensos de nivel de agua en la sección transversal de la estación de Sitio Nuevo. En la Figura 7.32 se muestra la relación de los ascensos de nivel con los caudales registrados, en la gráfica de la izquierda se muestran los datos para el período de 24 horas y en la gráfica de la derecha se muestran los datos para el período de 72 horas. Adicionalmente, se incorporó el delta de ascenso al cual se obtenía un 68.2% de los datos.

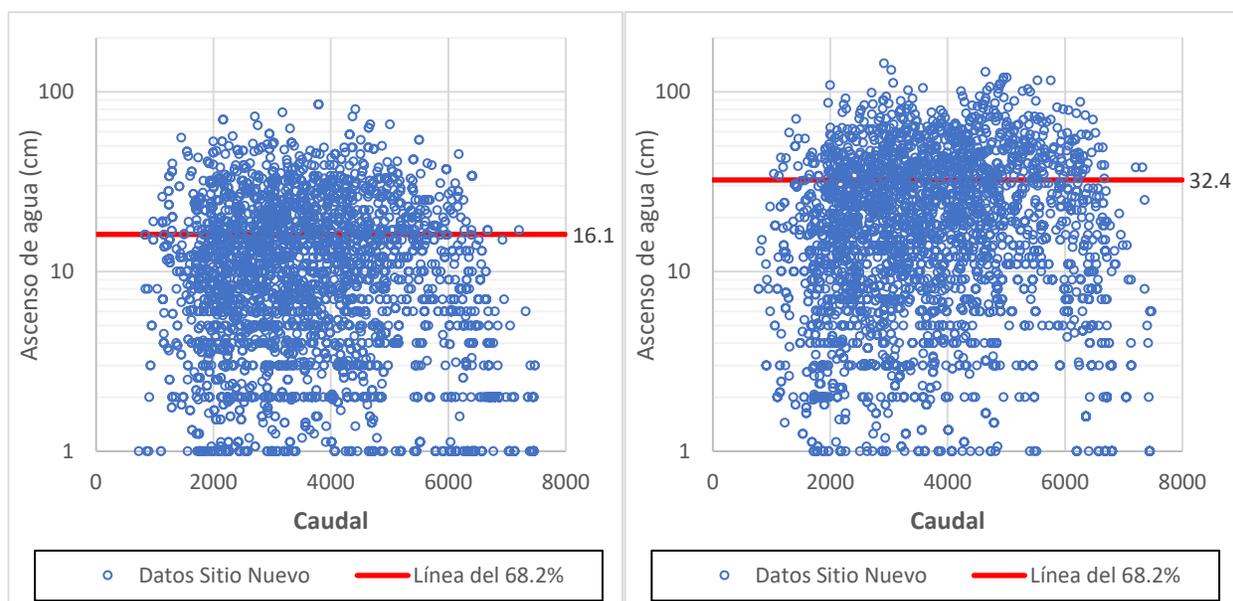


Figura 7.32 – Relación de ascensos del nivel de agua con los caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo: período de 24 horas (izquierda) y período de 72 horas (derecha)

Del modelo hidráulico se determinó que el nivel de desbordamiento en la sección transversal (asociada a la estación de Sitio Nuevo) es 52.19 m, como se muestra en la Figura 7.33. Esa cota de desbordamiento corresponderá al umbral de alerta roja, que traducido a lecturas en la mira de la estación sería 561 cm (de acuerdo con la cota cero de la mira registrado en la Tabla 6.1, valor de 46.58 m).

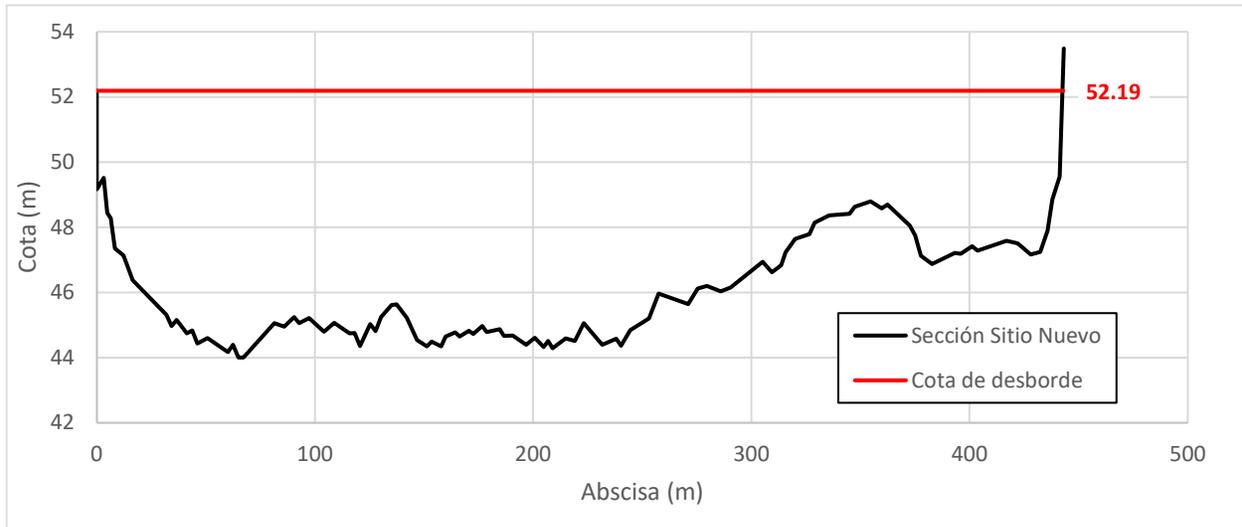


Figura 7.33 – Cota de desbordamiento en la sección transversal de la estación de Sitio Nuevo

En la Figura 7.34 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 24 horas, mientras que, en la Figura 7.35 se muestran los registros de nivel y los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla calculados de acuerdo con los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas.

El umbral de alerta naranja corresponderá al valor del umbral de alerta roja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.32 para los dos períodos de ascenso (al cual se obtenía un 68.2% de los datos) y el umbral de alerta amarilla corresponderá al valor del umbral de alerta naranja menos el delta de ascenso registrado en la Figura 7.32.

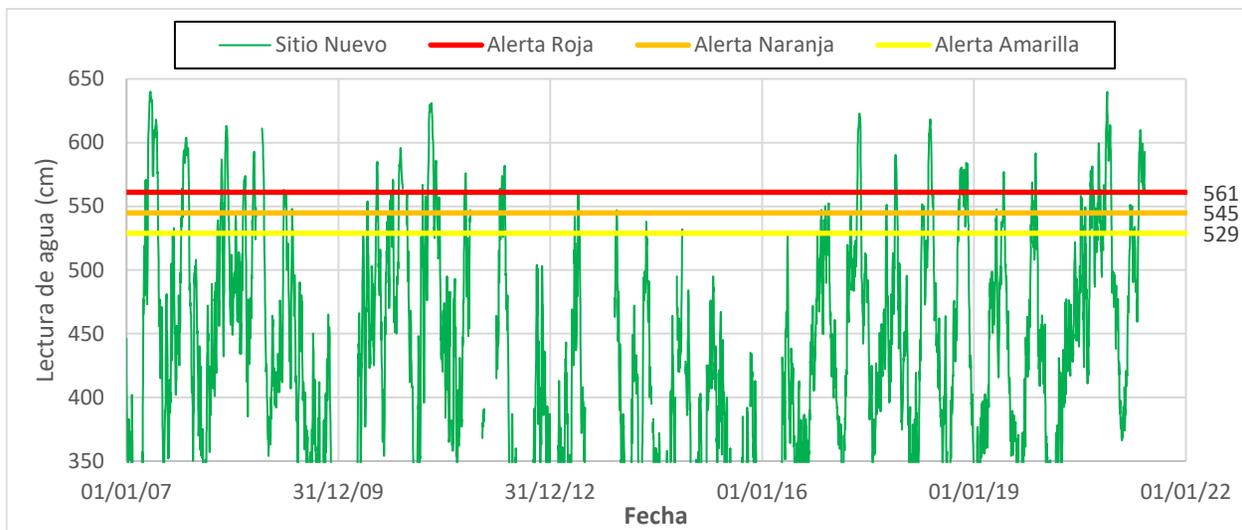


Figura 7.34 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 24 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Sitio Nuevo

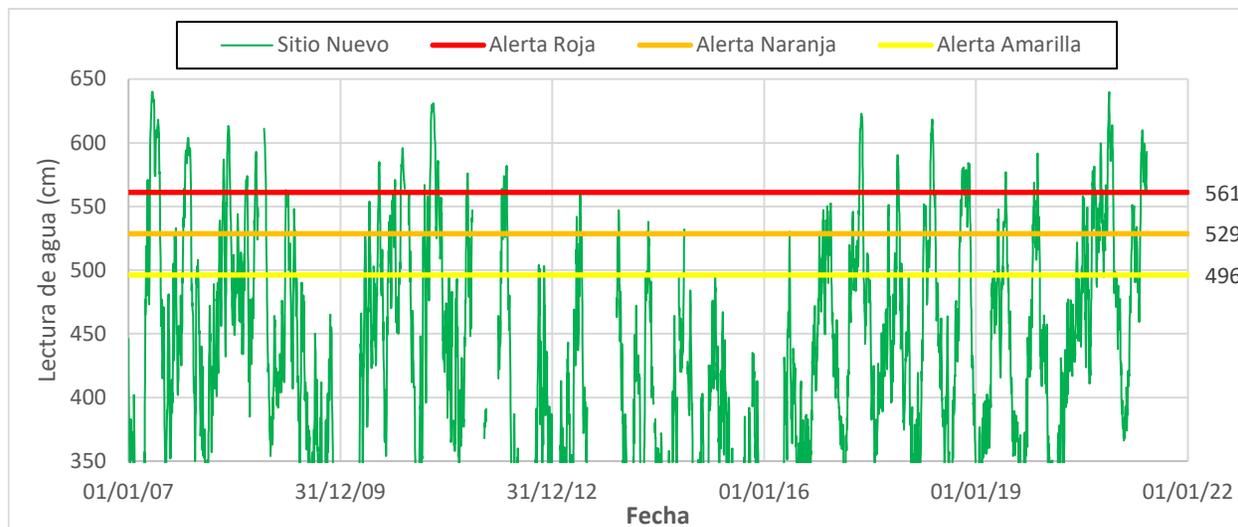


Figura 7.35 – Eventos en los que se igualó o superó el valor definido para los umbrales de alerta (para un período de ascenso de 72 horas) durante el período 2007-2020 en la estación de Sitio Nuevo

En la Tabla 7.12 se relacionan los umbrales de alerta roja, naranja y amarilla, así como el número de eventos en los que se igualó o supera cada umbral y su correspondiente probabilidad de excedencia. Estos valores corresponden al análisis de los ascensos del nivel de agua en un período de 72 horas, ya que los rangos de variación de los ascensos del nivel de agua para el período de 24 horas son muy pequeños.

Tabla 7.12 – Umbrales de alerta para la estación de Sitio Nuevo

Umbral	Nivel del umbral (m)	Valor del umbral en la mira (cm)	# de eventos en que se supera el umbral	Probabilidad de excedencia (%)
Umbral de alerta roja	52.19	561	400	9.9%
Umbral de alerta naranja	51.87	529	766	19.0%
Umbral de alerta amarilla	51.54	496	1148	28.5%

8 Adecuación del modelo hidráulico en la plataforma FEWS-Colombia

8.1 Descripción de los modelos hidráulicos configurados en la plataforma FEWS-Colombia

En la plataforma FEWS-Colombia, para la modelación y pronóstico del río Magdalena se cuenta con tres modelos hidráulicos: (1) uno de la parte Alta, entre las estaciones de Puerto Salgar [23037010] y Barrancabermeja [23157030], (2) uno de la parte Media, entre las estaciones de Puerto Berrío [23097030] y Sitio Nuevo [23187280], y (3) uno de la parte Baja, entre las estaciones de Sitio Nuevo [23187280] y El Banco [25027020], como se esquematiza en la Figura 8.1. Los modelos hidráulicos de los tres tramos se encuentran configurados en el programa MIKE 11, los cuales son modelos unidimensionales en estado no permanente.

De la figura se observa que el tramo de la parte alta y el tramo de la parte Media tienen un traslapeo entre las estaciones de Puerto Berrío y Barrancabermeja, lo cual permite mejorar las condiciones de frontera y resultados del pronóstico; sin embargo, para los tramos Medio y Bajo tienen la estación Sitio Nuevo en común, fin de un tramo e inicio del otro, lo cual puede influir en las condiciones de frontera de esos dos modelos.

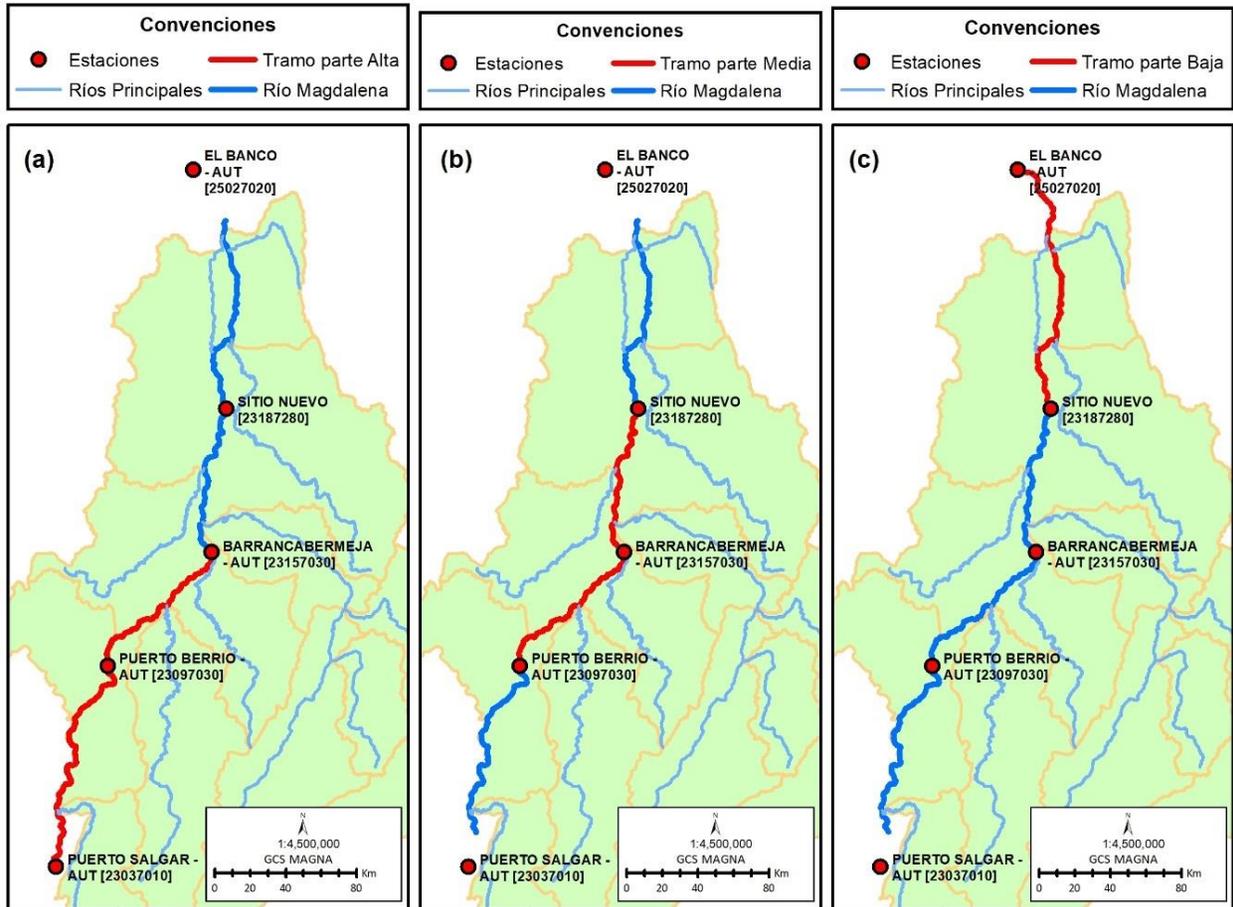


Figura 8.1 – Tramos de modelación hidráulica del río Magdalena: (a) parte Alta, (b) parte Media y (c) parte Baja

De acuerdo con los análisis presentados en los productos 4 y 5 de este acuerdo de cooperación – AC No. 4 (3034153), se realizó la actualización del modelo hidráulico del Valle Medio del río Magdalena, que va desde la estación de Puerto Berrio (aguas arriba) hasta la estación de Sitio Nuevo (aguas abajo). La actualización del modelo hidráulico consistió principalmente en:

- Eliminar la topología del tramo del río Sogamoso,
- Ajustar la topología del río Magdalena: ajuste del alineamiento del cauce, incorporación de las nuevas secciones transversales (de acuerdo con los levantamientos topo batimétricos) y el ajuste de los cambios bruscos en el lecho del río Magdalena de las secciones existentes,

- Incorporar nuevas condiciones de frontera, correspondientes a aportes de cuencas tributarias al río Magdalena que no se encontraban consideradas en el modelo inicial (aporte de río San Bartolomé, río Cimitarra y otros directos),
- Incorporar estructuras hidráulicas (vertederos laterales) que permitieran simular los desbordamientos en el río Magdalena, de tal manera que se garantice hasta cierto nivel los volúmenes de agua transitados,
- Ajustar los parámetros de rugosidad del cauce.

8.2 Ajustes del adaptador de la simulación hidráulica

El programa de simulación hidráulica MIKE 11 tiene su propio adaptador para que las simulaciones hidráulicas puedan ser ejecutadas a través de la plataforma FEWS-Colombia. Este adaptador (1) transforma la información exportada por la plataforma FEWS-Colombia (en formato xml) al formato de series de tiempo (formato dfs0) del programa MIKE 11, (2) ajusta el archivo de configuración de la simulación (sim11) con las fechas apropiadas y (3) crea un archivo con las series de tiempo simuladas en formato leíble por la plataforma FEWS-Colombia (formato xml). Considerando todo lo anterior, se realizaron los ajustes a la configuración de todo el módulo que ejecutará las simulaciones hidráulicas. Los cambios se realizaron en el archivo de configuración del adaptador, donde se incluyeron y se ajustaron las abscisas e identificadores (ID) de las nuevas condiciones de frontera. Adicionalmente, se realizó el ajuste de todas las abscisas de los puntos de interés que se exportarán para la plataforma FEWS-Colombia (en las estaciones donde se visualizarán los resultados de las simulaciones), como se muestra en la Figura 6.28.

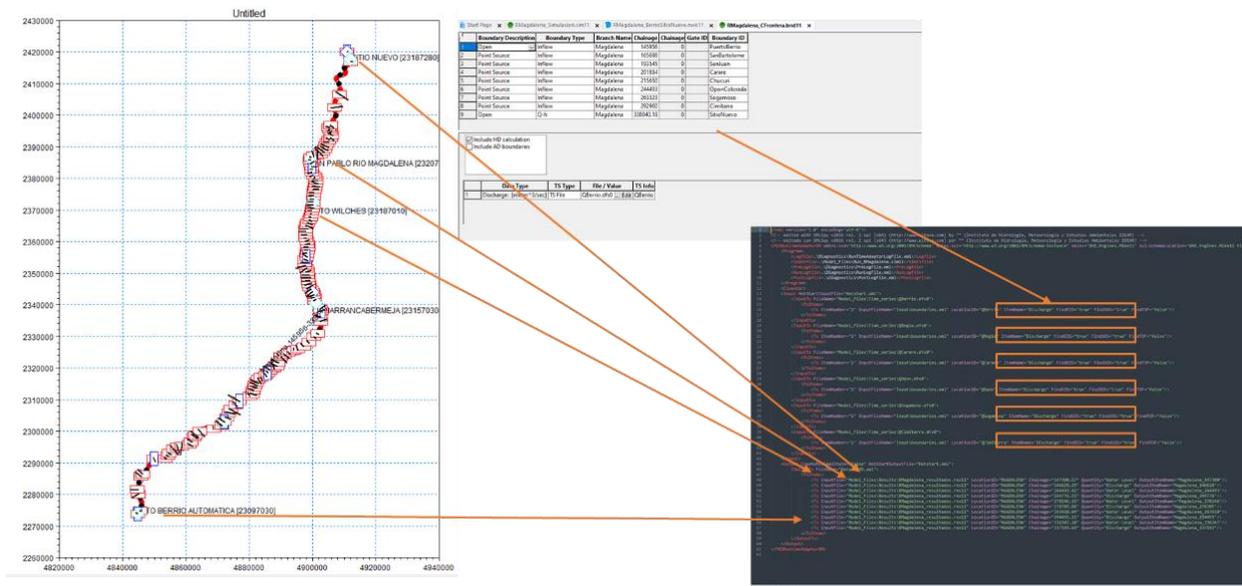


Figura 8.2 – Explicación esquemática de los cambios en el archivo de configuración del adaptador

8.3 Pruebas del acople del modelo hidráulico en la plataforma FEWS-Colombia

8.3.1 Configuración

Toda la cascada de procesos configurada en el proyecto se pone a prueba en el sistema Stand Alone. Las pruebas se realizan para cada una de las cascadas alimentadas por los diversos forzamientos o fuentes de información (JAXA, MSWEP, MSWX, red IDEAM y combinación de las anteriores). Para las pruebas de acople se seleccionó un año específico de análisis, y para este período se ejecutó todo el proceso de cálculo tratando de simular las condiciones del sistema operacional. Inicialmente, las pruebas se realizarán para el entorno histórico, de esta manera se puede evaluar la configuración de la cascada de procesos antes de iniciar el análisis del pronóstico. El año de evaluación seleccionado fue el 2018, período que coincide con la calibración del modelo hidráulico, permitiendo comparar los resultados en condiciones operacionales y de modelación tradicional.

En la Figura 8.3 se muestra el pantallazo de la plataforma FEWS-Colombia, en donde se observa la configuración de la cascada de procesos (rectángulo rojo).

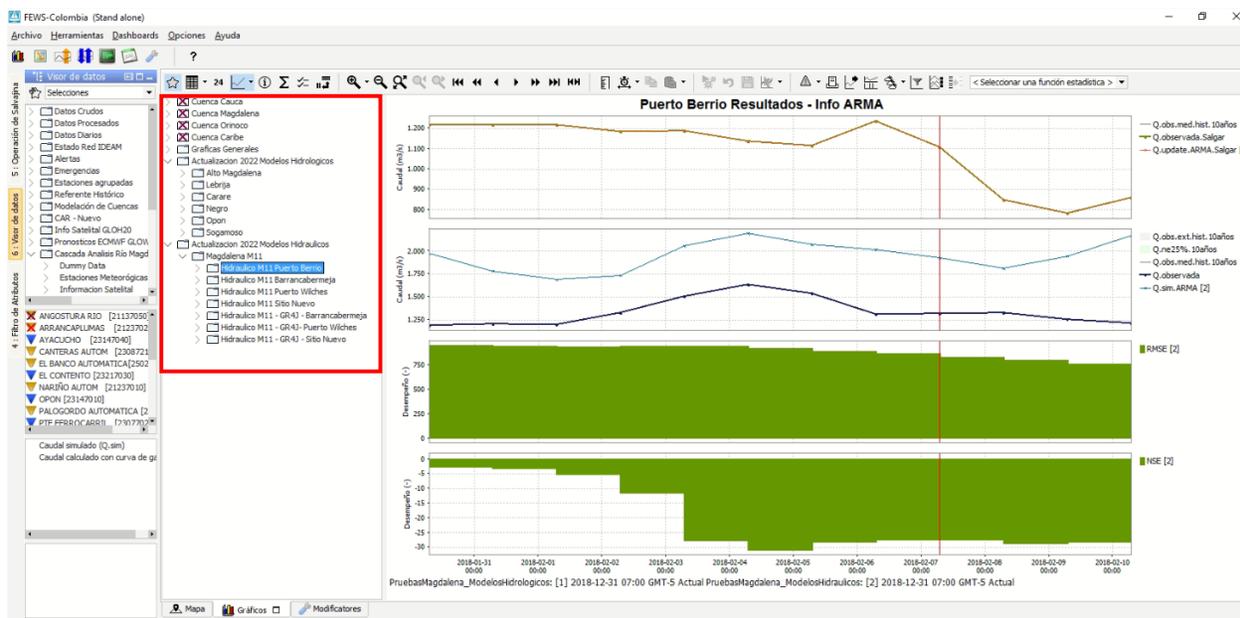


Figura 8.3 – Configuración de la cascada de procesos en la plataforma FEWS-Colombia

8.3.2 Primera prueba

De las configuraciones de cascada de procesos, en la primera prueba se utilizará la cascada “Actualización 2022 Modelos Hidráulicos” (rectángulo rojo de la Figura 8.3) en la cual los caudales de las condiciones de frontera (propio en la estación de Puerto Berrío y de los ríos tributarios) del modelo hidráulico se obtienen de la implementación del ARMA sobre los registros históricos. La cascada se ejecuta en modo “Batch” con paso de tiempo de 1 día, modo que permite hacer la simulación por lotes, con tiempos de 10 días previos para cada espacio de tiempo, como se muestra en la Figura 8.4. En la Figura 8.5 se muestran las condiciones de frontera que la plataforma-FEWS calculó para el río Magdalena (aguas arriba en la estación de Puerto Berrío) y para los 5 ríos tributarios del tramo de análisis del modelo hidráulico (aporte del río Carare, aporte del río Opón, aporte del río Sogamoso, aporte del río San Bartolomé y aporte del río Cimitarra).

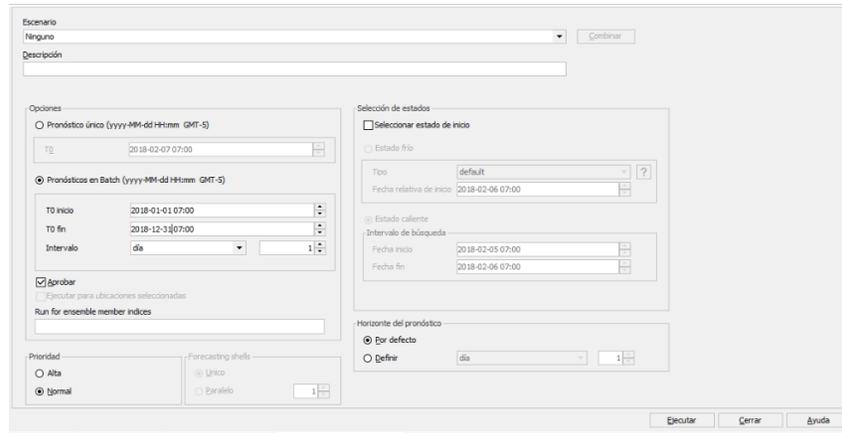


Figura 8.4 – Corrida de la cascada de procesos en modo “batch” en la plataforma FEWS-Colombia

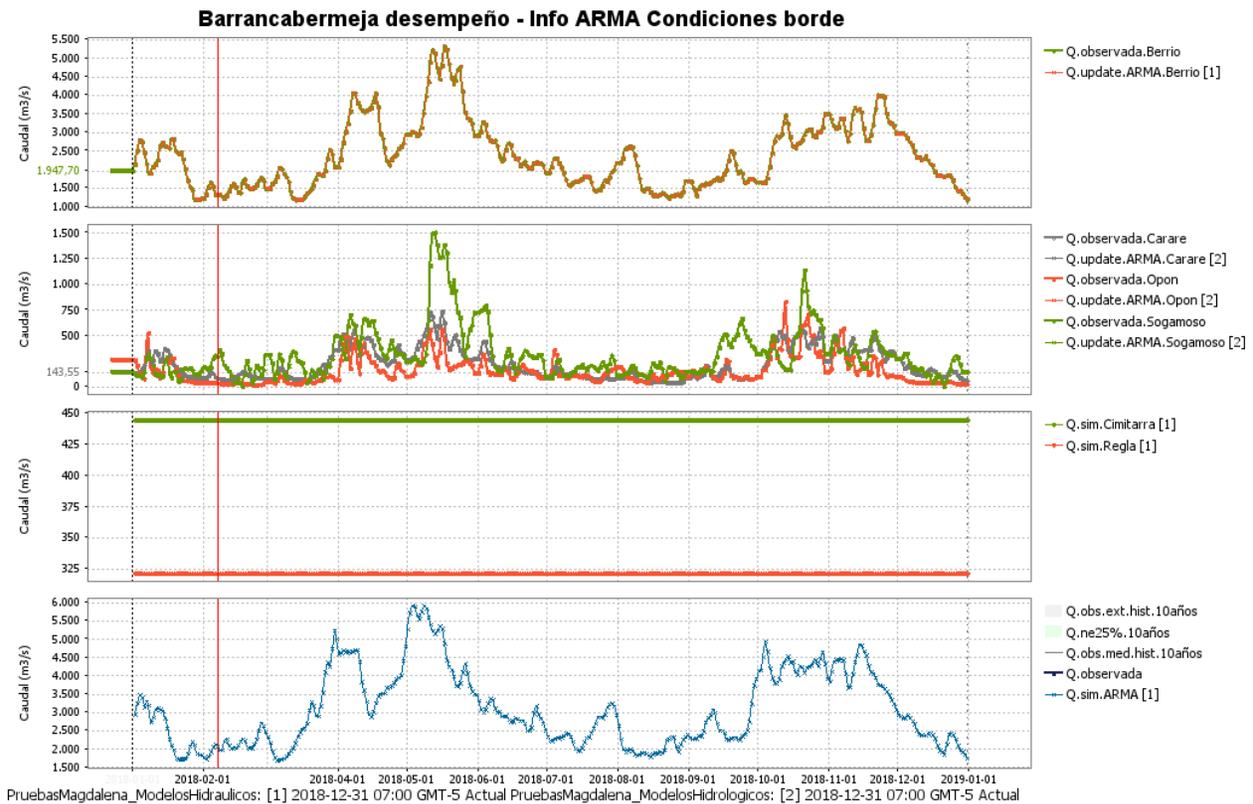


Figura 8.5 – Condiciones de frontera de caudal de la plataforma FEWS

En la Figura 8.6 se muestran los resultados de caudal que la plataforma FEWS-Colombia da en las estaciones de Barrancabermeja, Puerto Wilches y Sitio Nuevo luego de la simulación del período seleccionado.

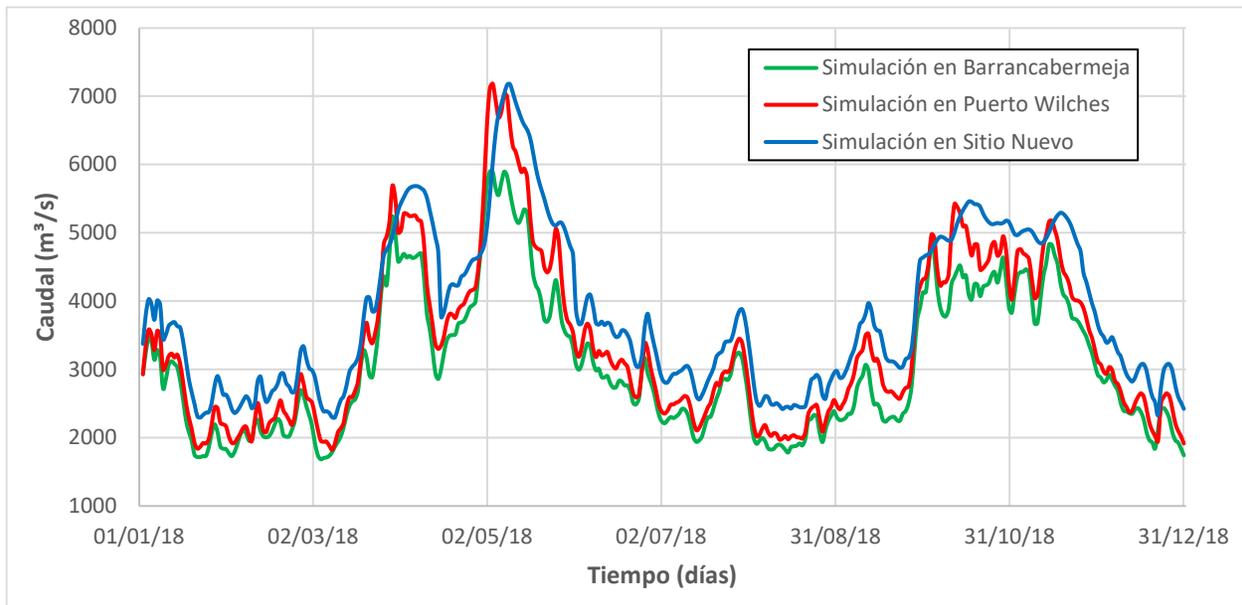
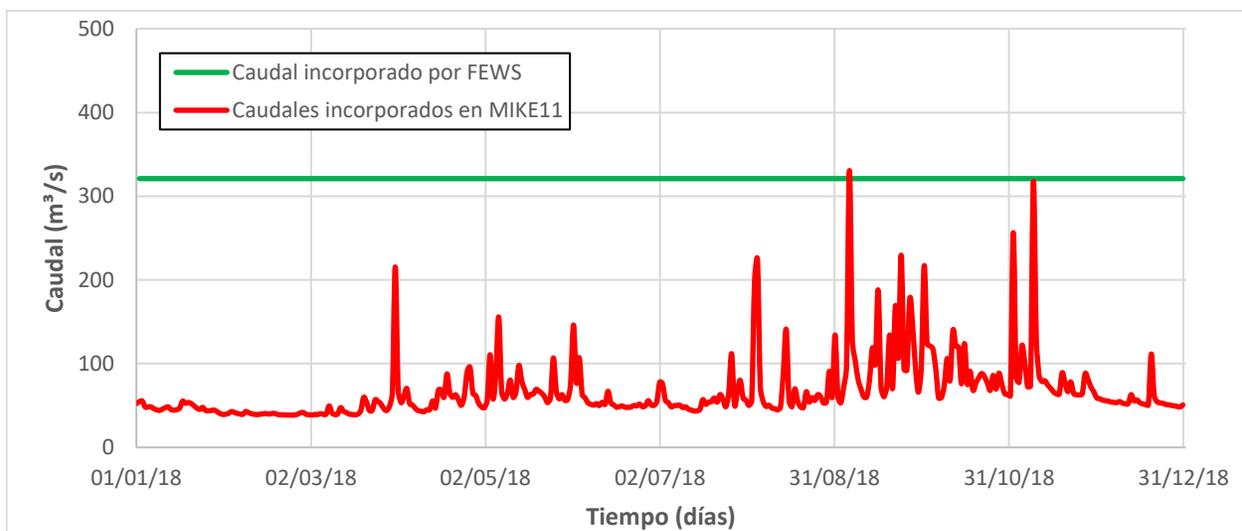


Figura 8.6 – Resultados de caudal en las estaciones de Barrancabermeja, Puerto Wilches y Sitio Nuevo, obtenidos en la plataforma FEWS-Colombia – Primera prueba

De las condiciones de frontera, que la plataforma FEWS-Colombia calculó para el año 2018, se puede mencionar que en los ríos tributarios San Bartolomé (La Regla) y Cimitarra la plataforma calculó una serie de caudales constantes, en comparación de la serie variable de caudales que se puede tener para los dos ríos, como se muestra en la Figura 8.7. Serie que se obtuvo a partir del análisis de información hidrológica para la estación La Regla y por similitud de cuencas para el río Cimitarra.



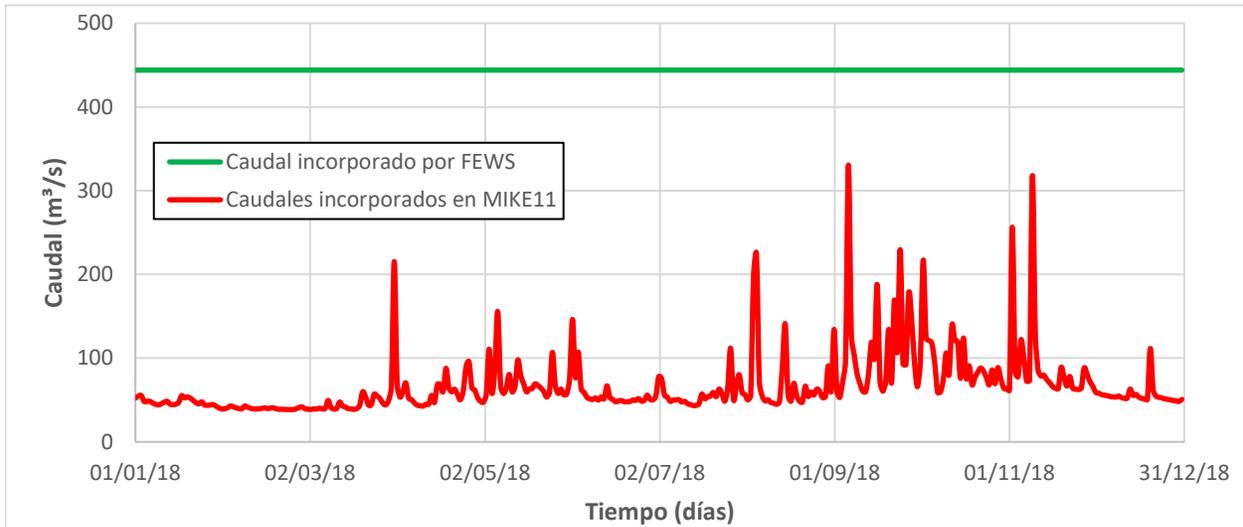


Figura 8.7 – Comparación de las series de caudal incorporadas como condiciones de frontera en los ríos tributarios: (a) San Bartolomé (arriba) y Cimitarra (abajo)

Las series de tiempo de la plataforma FEWS-Colombia (Figura 8.5) se incorporan al modelo hidráulico calibrado de MIKE11, como se muestra en la Figura 8.8, con el fin de validar los resultados del modelo hidráulico acoplado en la plataforma FEWS.

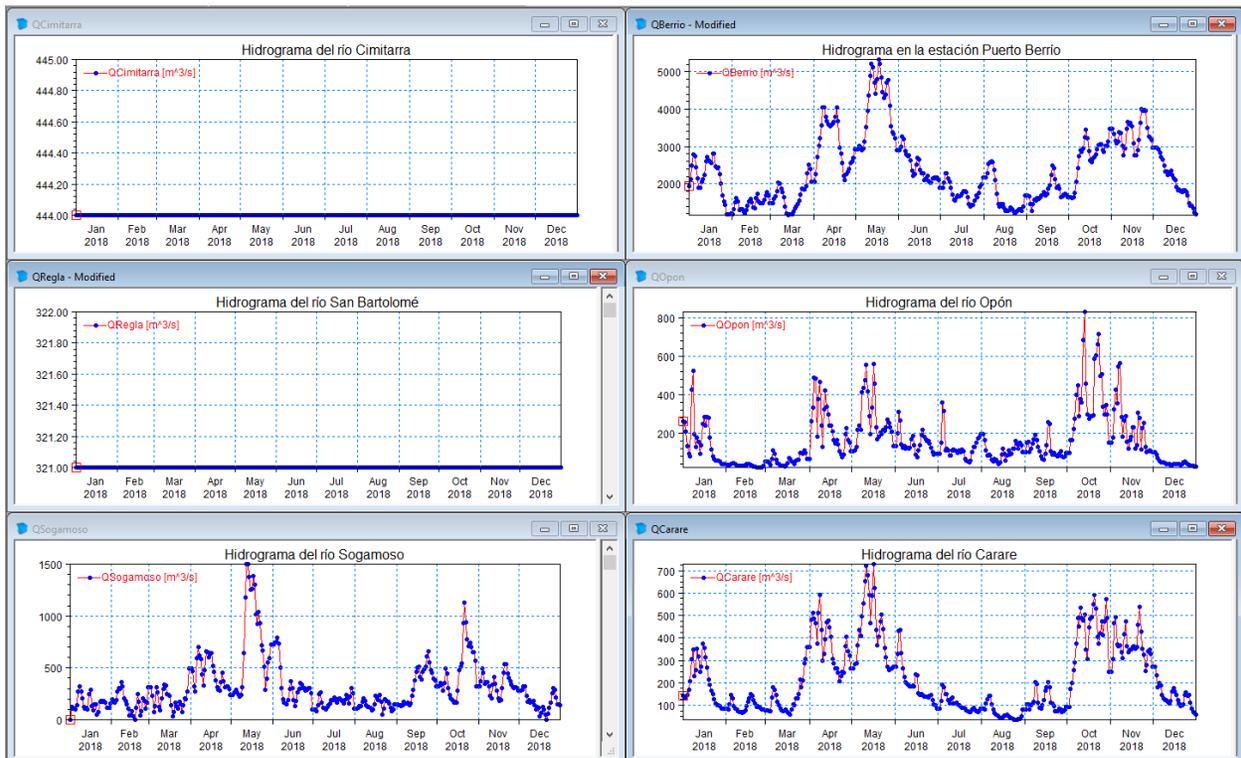


Figura 8.8 – Condiciones de frontera de caudal incorporadas en el modelo hidráulico como series de tiempo

Adicional al ajuste de las condiciones de frontera de caudal, se ajustaron los tiempos de simulación del 01/01/2018 al 31/12/2018, como se muestra en la Figura 8.9, y se mantuvieron las características de las estructuras hidráulicas incorporadas para tener en cuenta los desbordamientos del río Magdalena en época de crecientes y se mantuvieron los coeficientes de rugosidad determinados en el proceso de calibración.

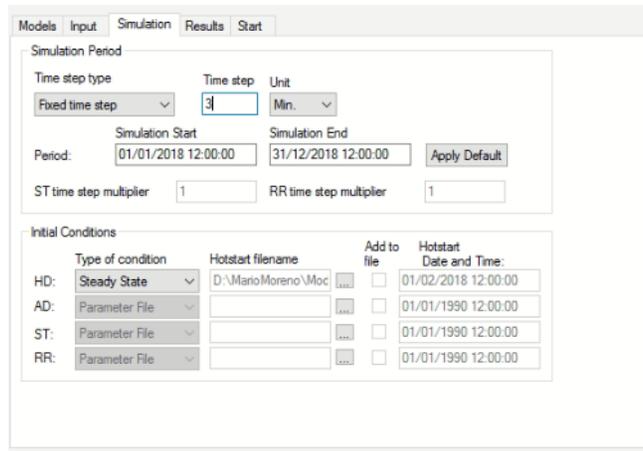


Figura 8.9 – Tiempos de simulación del modelo hidráulico de MIKE11

En la Figura 8.10 se muestra la comparación de las simulaciones de caudal en la estación de Barrancabermeja, a través de la plataforma FEWS-Colombia (línea de color verde, datos de la Figura 8.6) y a través del modelo hidráulico calibrado en MIKE 11 (línea de color rojo). La misma comparación para la estación de Sitio Nuevo se muestra en la Figura 8.11.

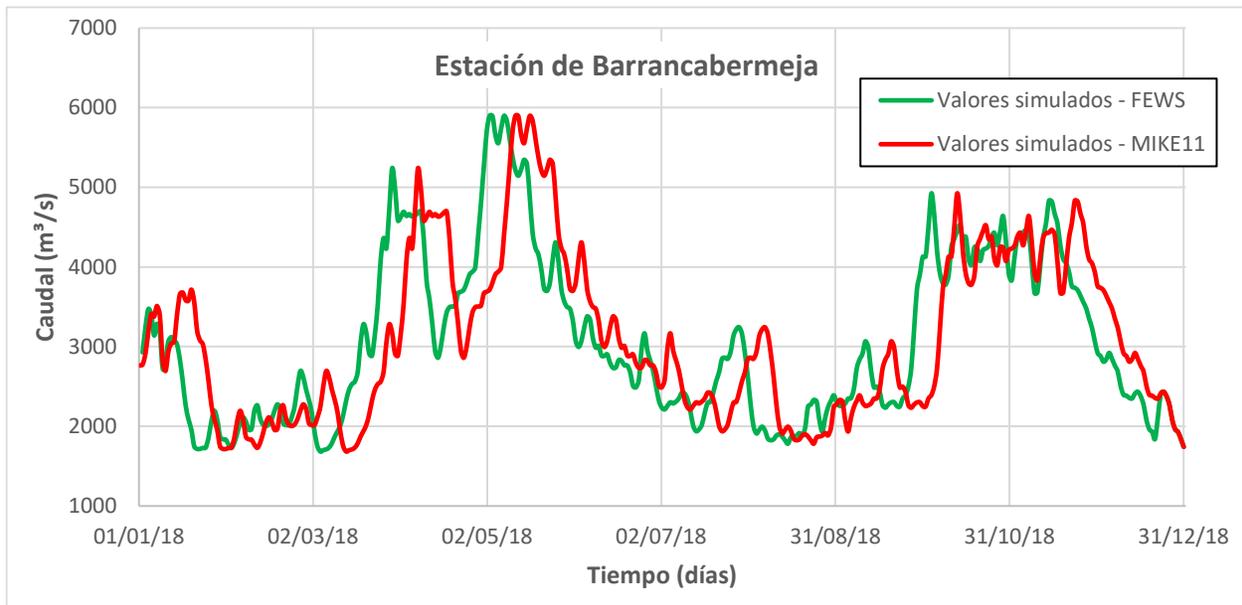


Figura 8.10 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Primera prueba

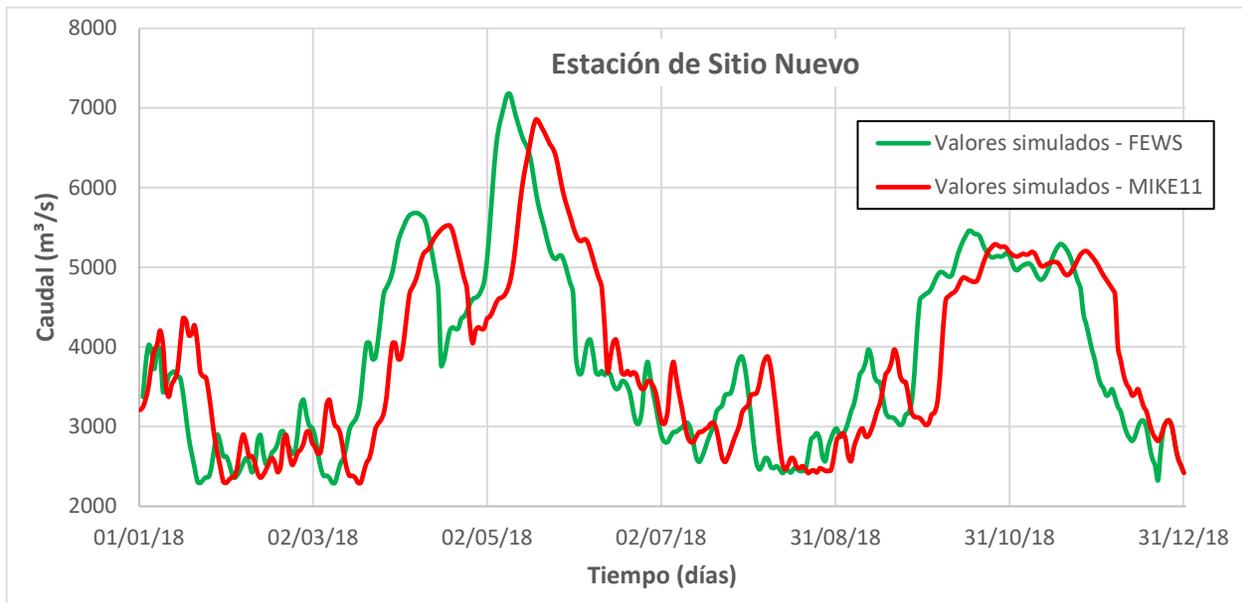


Figura 8.11 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Sitio Nuevo a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Primera prueba

En la Figura 8.10 y la Figura 8.11 se observa que la tendencia de las series es similar; sin embargo, los resultados de la plataforma FEWS-Colombia presentan un rezago de aproximadamente 9 días, lo cual puede estar asociado al tiempo de calentamiento del modelo.

Dado que los caudales de la simulación hidráulica no coincidían (Figura 8.10 y Figura 8.11) entre la plataforma FEWS y el programa MIKE 11, no se realizó el análisis de los niveles en las estaciones intermedias localizadas sobre el río Magdalena en el tramo de estudio.

8.3.3 Segunda prueba

De los resultados de la primera prueba se ajustaron las condiciones del calentamiento del modelo, en donde se utilizaron 2 días previos en vez de 10. Para la cascada de procesos se sigue utilizando la configuración “Actualización 2022 Modelos Hidráulicos”, en la cual los caudales de las condiciones de frontera del modelo hidráulico se obtienen de la implementación del ARMA sobre los registros históricos.

En la Figura 8.12 se muestran los resultados de caudal que la plataforma FEWS-Colombia da en las estaciones de Barrancabermeja, Puerto Wilches y Sitio Nuevo luego de la simulación del período seleccionado.

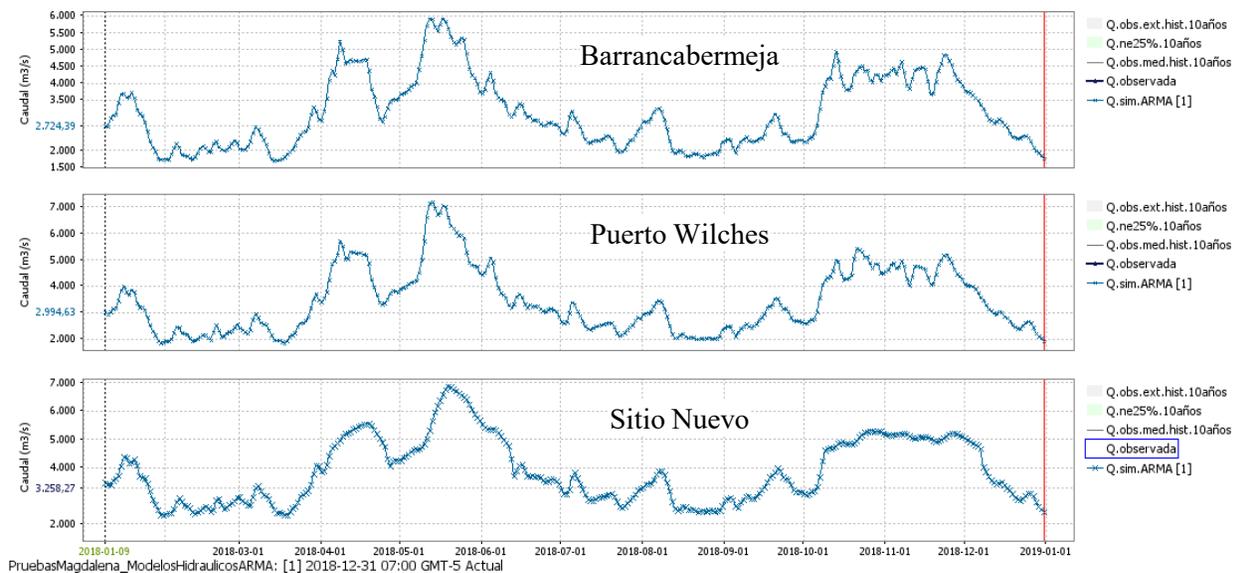


Figura 8.12 – Resultados de caudal en las estaciones de Barrancabermeja (arriba), Puerto Wilches (medio) y Sitio Nuevo (abajo), obtenidos en la plataforma FEWS-Colombia – Segunda prueba

Las condiciones de frontera de caudal incorporadas en el modelo hidráulico de MIKE 11 son las mismas que se definieron para la primera prueba de acople (Figura 8.8). Por lo tanto, se procede a comparar los resultados de la Figura 8.12 con los resultados de la simulación del modelo hidráulico en MIKE 11.

En la Figura 8.13 se muestra la comparación de las simulaciones de caudal en la estación de Barrancabermeja, a través de la plataforma FEWS-Colombia (línea de color verde, datos de la Figura 8.12) y a través del modelo hidráulico calibrado en MIKE 11 (línea punteada de color rojo). La misma comparación para la estación de Sitio Nuevo se muestra en la Figura 8.14.

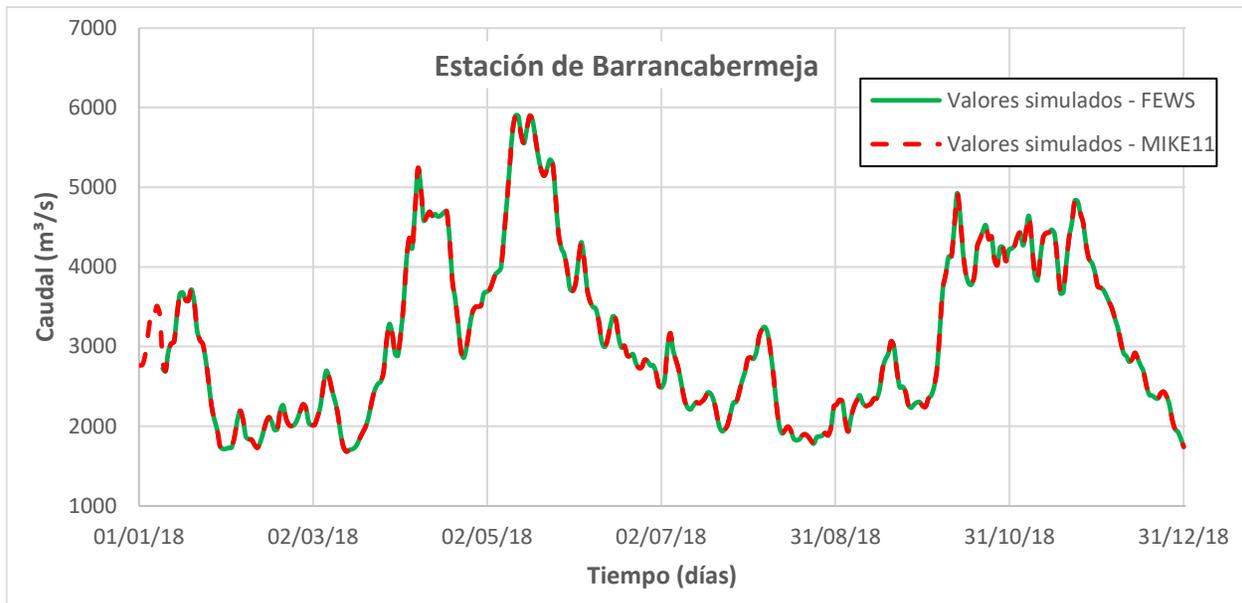


Figura 8.13 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba

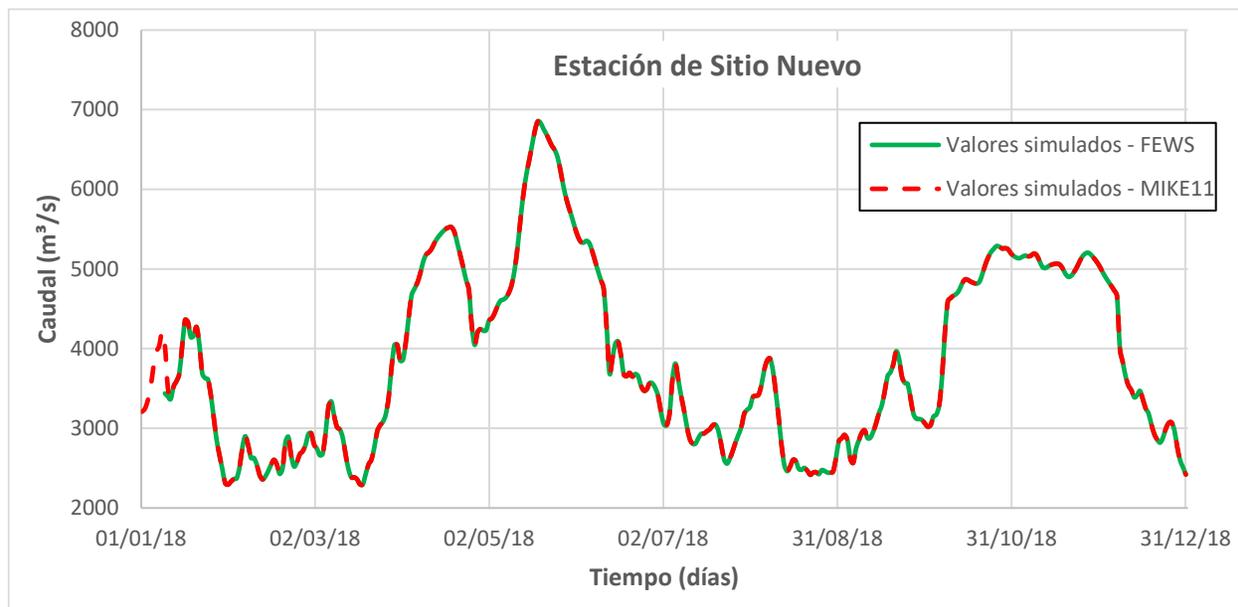


Figura 8.14 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Sitio Nuevo a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba

De la Figura 8.13 y la Figura 8.14 se observa que los resultados de la simulación de caudal en la plataforma FEWS-Colombia es igual a realizar la simulación en el programa MIKE 11 con las mismas condiciones de frontera que calcula la plataforma FEWS-Colombia. Resultados similares se observan para la estación de Puerto Wilches.

En la Figura 8.15 se muestra la comparación de las simulaciones de nivel (lectura de agua con respecto al cero de la mira) en la estación de Barrancabermeja, a través de la plataforma FEWS-Colombia (línea de color verde) y a través del modelo hidráulico calibrado en MIKE 11 (línea punteada de color rojo). La misma comparación para la estación de Puerto Wilches se muestra en la Figura 8.16 y para la estación de Sitio Nuevo se muestra en la Figura 8.17 (utilizando los resultados de la abscisa K336+347).

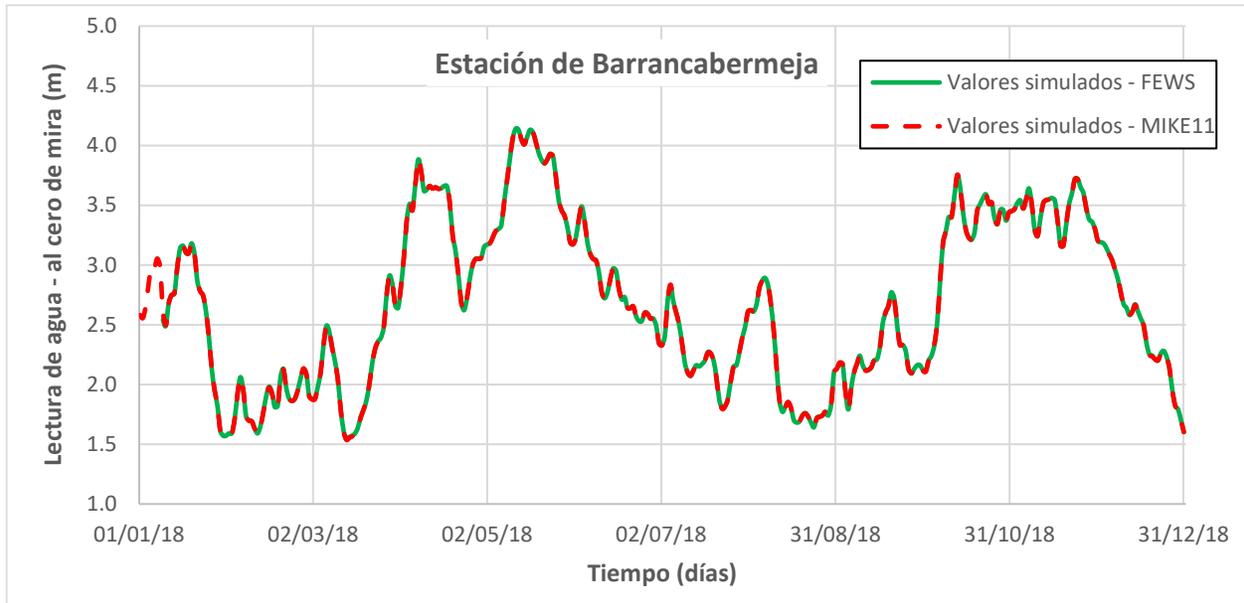


Figura 8.15 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba

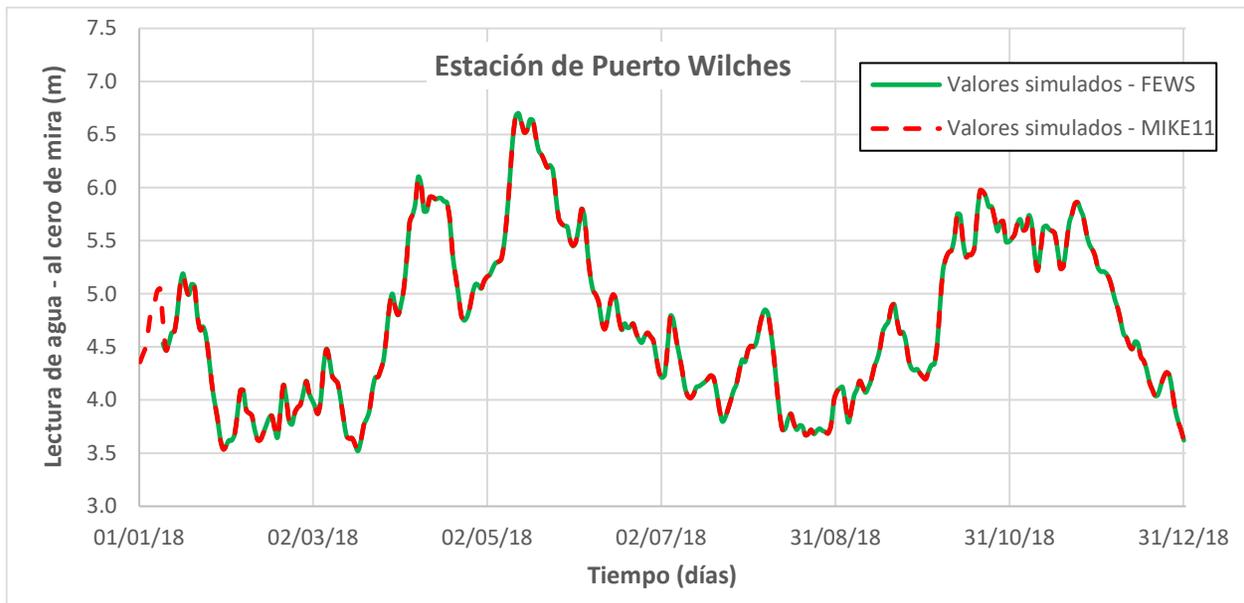


Figura 8.16 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Puerto Wilches a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba

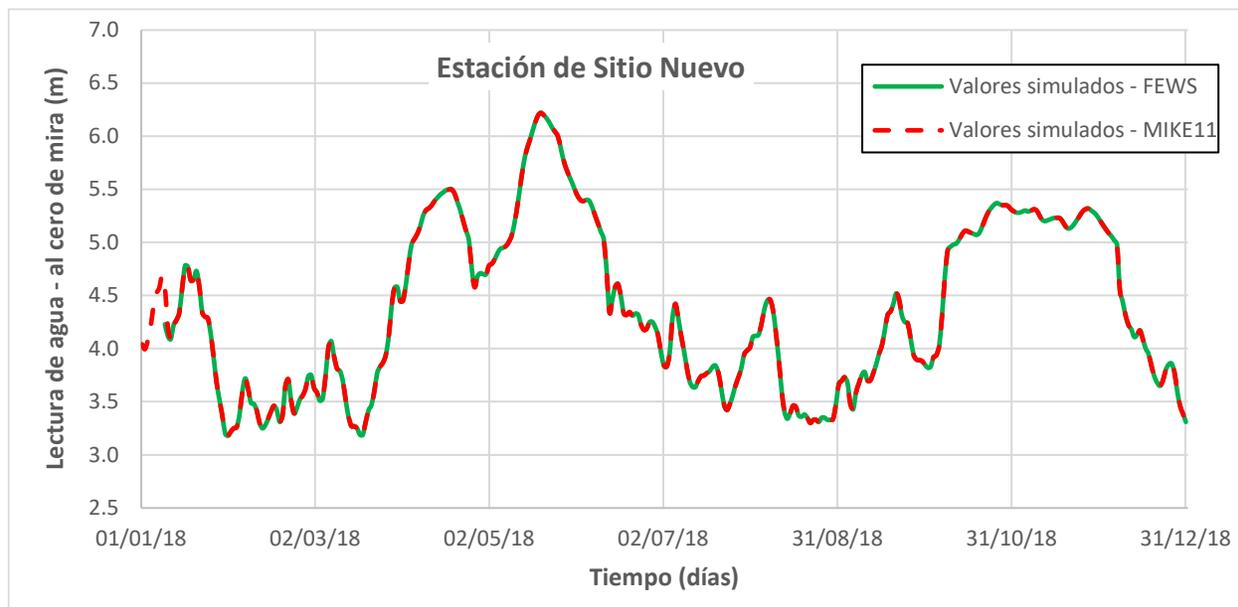


Figura 8.17 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Sitio Nuevo a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Segunda prueba

Los resultados de la simulación de nivel en la plataforma FEWS-Colombia es igual a realizar la simulación en el programa MIKE 11 para las estaciones de Barrancabermeja (Figura 8.15), Puerto Wilches (Figura 8.16) y Sitio Nuevo (Figura 8.17).

En el modelo hidráulico se va a incluir una nueva sección de tal manera que un punto de niveles de en la misma abscisa de la estación de Sitio Nuevo, abscisa 336009.

8.3.4 Tercera prueba

De los resultados de la primera prueba se ajustaron las condiciones de frontera de caudal de los aportes de los ríos tributarios San Bartolomé y Cimitarra, en donde en vez de un caudal constante se utiliza una serie media histórica de los caudales en los dos ríos. Para la cascada de procesos se sigue utilizando la configuración “Actualización 2022 Modelos Hidráulicos”, en la cual los caudales de las condiciones de frontera del modelo hidráulico se obtienen de la implementación del ARMA sobre los registros históricos. En la Figura 8.18 se muestran las condiciones de frontera de los ríos San Bartolomé y Cimitarra que fueron adoptadas en la plataforma FEWS-Colombia.

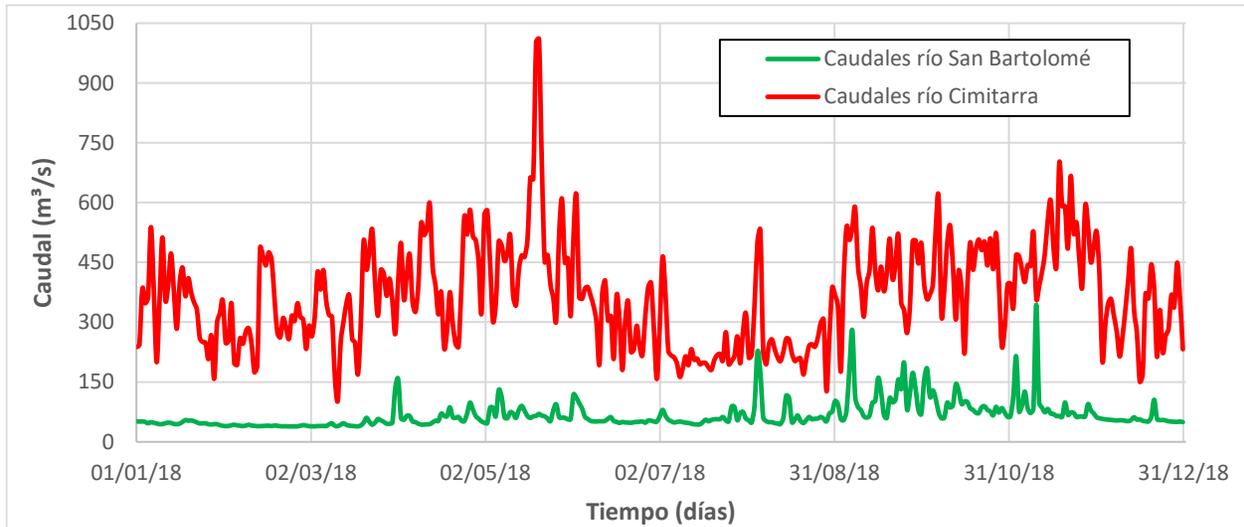


Figura 8.18 – Condiciones de frontera de caudal de la plataforma FEWS para los ríos tributarios San Bartolomé y Cimitarra

Las series de caudales de la Figura 8.18 fueron incorporadas en el modelo hidráulico de MIKE 11, y posteriormente los resultados de la simulación fueron comparados con los resultados de la plataforma FEWS-Colombia.

En la Figura 8.19 se muestra la comparación de las simulaciones de caudal en la estación de Barrancabermeja, a través de la plataforma FEWS-Colombia (línea de color verde) y a través del modelo hidráulico calibrado en MIKE 11 (línea punteada de color rojo).

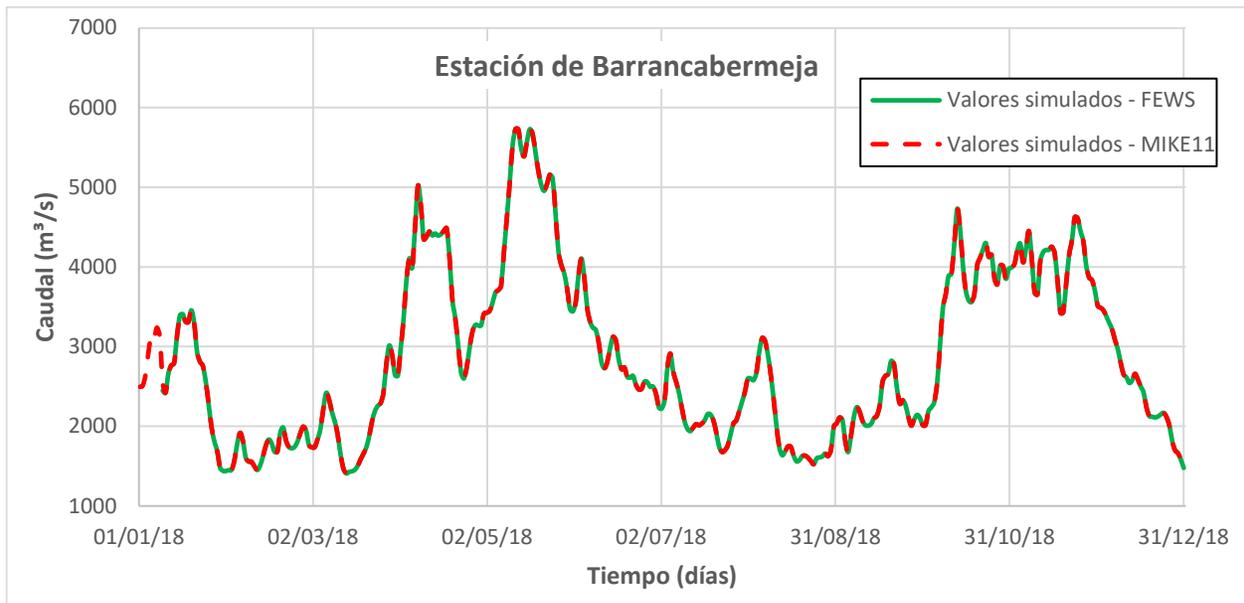


Figura 8.19 – Comparación de los resultados de caudal en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Tercera prueba

De la Figura 8.19 se observa que los resultados de la simulación de caudal en la plataforma FEWS-Colombia es igual a realizar la simulación en el programa MIKE 11 con las mismas condiciones de frontera que calcula la plataforma FEWS-Colombia. Resultados similares se observan para las estaciones de Puerto Wilches y Sitio Nuevo.

En la Figura 8.20 se muestra la comparación de las simulaciones de nivel (lectura de agua con respecto al cero de la mira) en la estación de Barrancabermeja, a través de la plataforma FEWS-Colombia (línea de color verde) y a través del modelo hidráulico calibrado en MIKE 11 (línea punteada de color rojo).

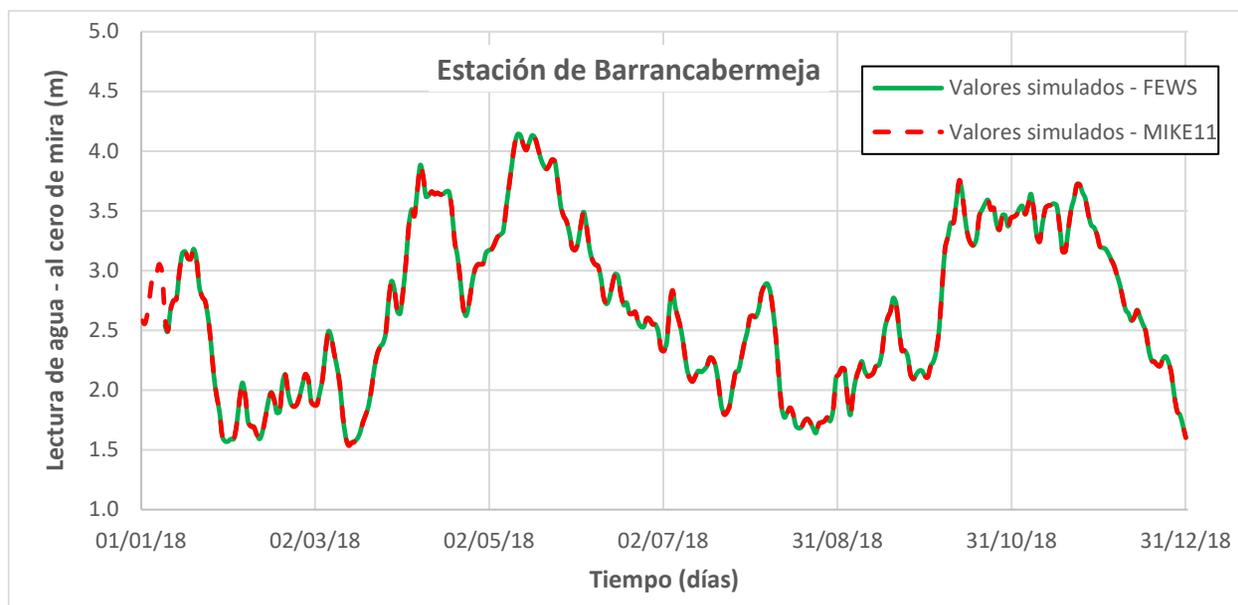


Figura 8.20 – Comparación de los resultados de nivel en la estación de Barrancabermeja a través de la plataforma FEWS-Colombia y del modelo hidráulico calibrado de MIKE 11 – Tercera prueba

De la Figura 8.20 se observa que los resultados de la simulación de nivel en la plataforma FEWS-Colombia es igual a realizar la simulación en el programa MIKE 11 con las mismas condiciones de frontera que calcula la plataforma FEWS-Colombia. Resultados similares se observan para las estaciones de Puerto Wilches y Sitio Nuevo.

En la Figura 8.21 se muestra la comparación de los valores de caudal registrados en la estación de Sitio Nuevo con los valores simulados a través de la plataforma FEWS-Colombia. Se observa que de manera general el modelo hidráulico, dentro de la plataforma FEWS-Colombia, representa adecuadamente la tendencia de los datos medidos. Sin embargo, hay algunas diferencias entre las dos series, tanto de sobrestimación como de subestimación.

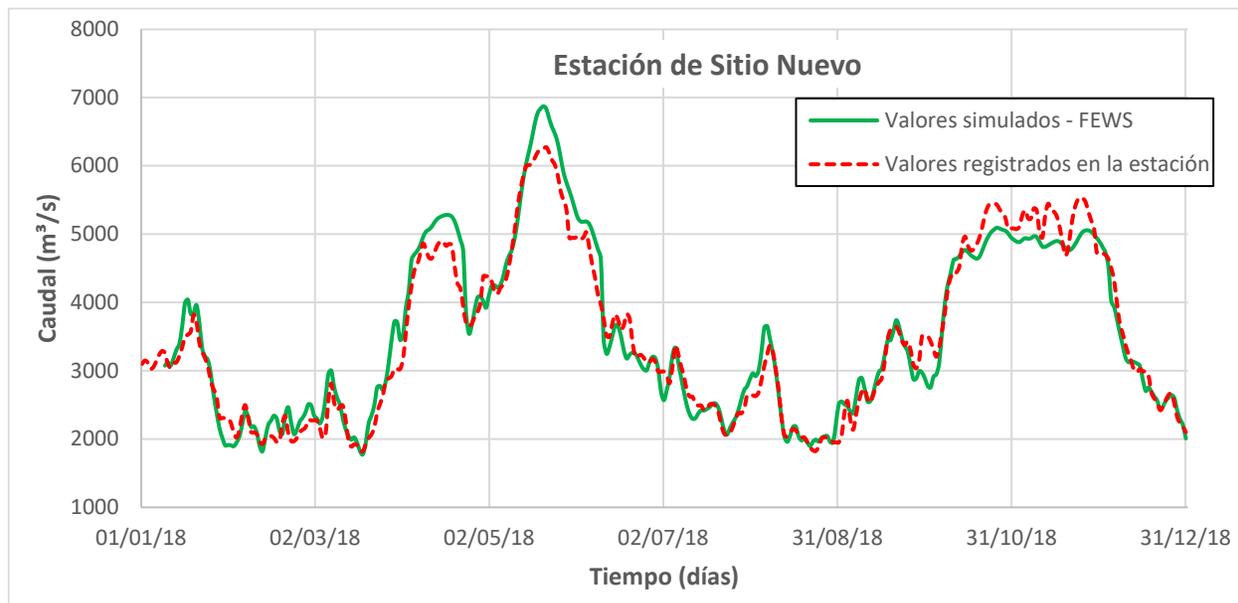


Figura 8.21 – Comparación de las series de caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo con los caudales de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia – Tercera prueba

En la Figura 8.22 se muestra la comparación de los caudales registrado y simulados para la estación de Sitio Nuevo en relación con la línea de ajuste perfecto, en donde se observa que la simulación se encuentra en un rango de $\pm 25\%$, siendo el error se reduce a medida que los caudales aumentan. En la Figura 8.23 se muestra la comparación de los niveles simulados (lectura de agua con respecto al cero de la mira) en la estación de Barrancabermeja, a través de la plataforma FEWS-Colombia (línea de color verde), y los valores registrados en la mira de la estación (línea punteada de color rojo). En promedio la diferencia de los valores de nivel es de 0.24 m, con una diferencia máxima de 0.82 m, correspondiente al evento pico del 20 de mayo de 2018.

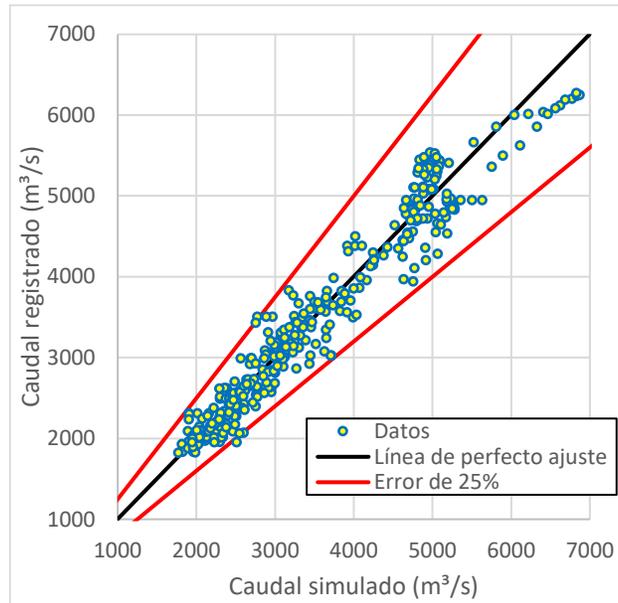


Figura 8.22 – Comparación de los caudales registrados y simulados en la estación de Sitio Nuevo y porcentaje de error de la simulación – Tercera prueba

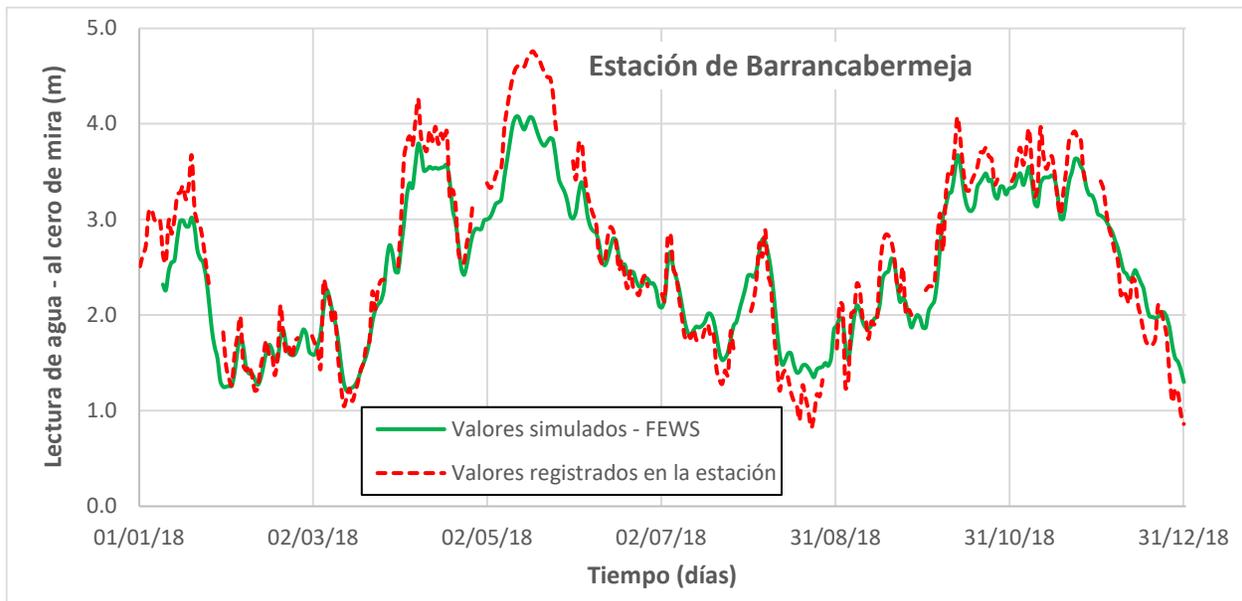


Figura 8.23 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Barrancabermeja (lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia (asociados al cero de la mira) – Tercera prueba

La misma comparación para la estación de Puerto Wilches se muestra en la Figura 8.24 y para la estación de Sitio Nuevo se muestra en la Figura 8.25 (utilizando los resultados de la abscisa K336+347). En la estación de Puerto Wilches se tiene una diferencia promedio de los niveles de 0.19 m y una diferencia máxima de 0.67 m; mientras que, en la estación de Sitio Nuevo se tiene una diferencia promedio de los niveles de 0.42 m y una diferencia máxima de 1.02 m.

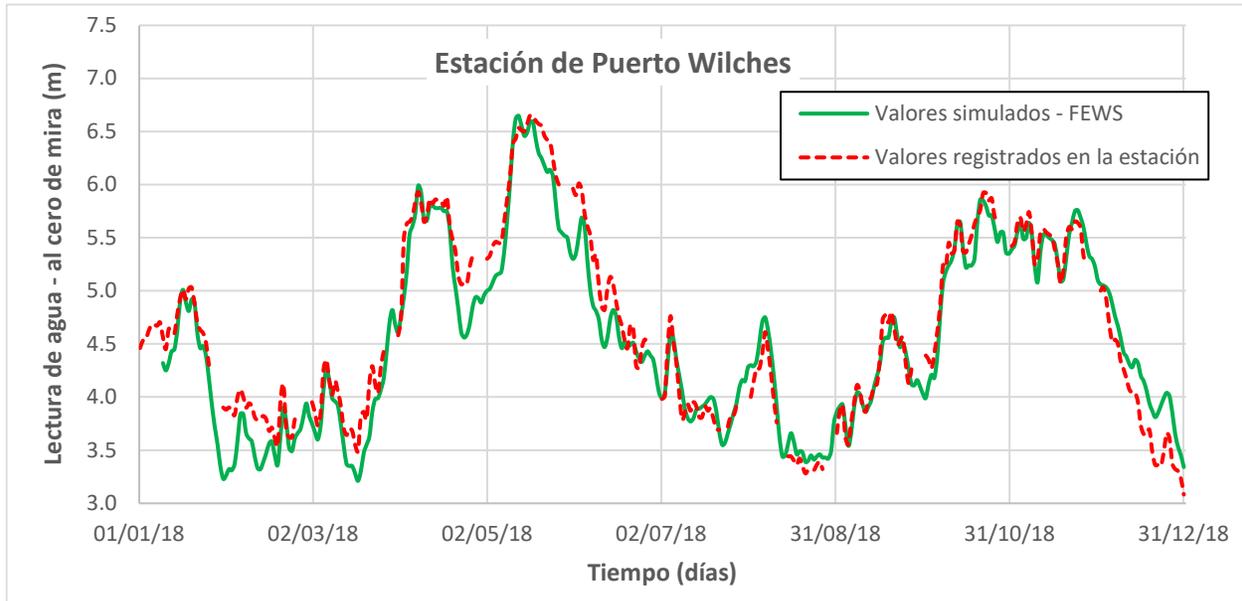


Figura 8.24 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Puerto Wilches (lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia (asociados al cero de la mira) – Tercera prueba

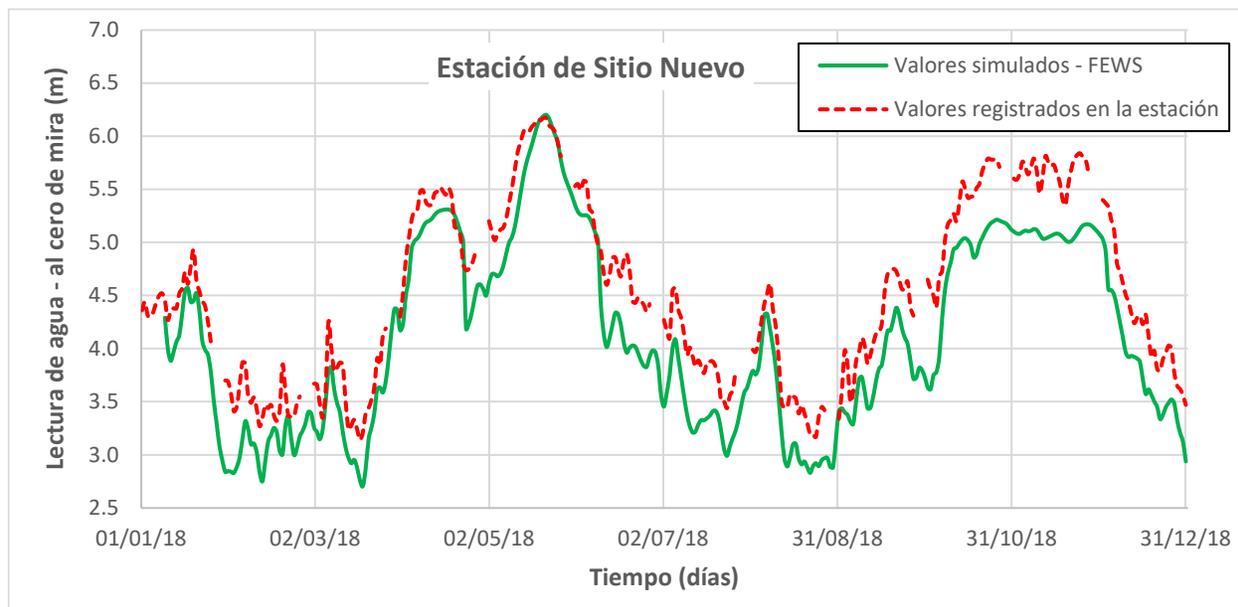


Figura 8.25 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo (lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia (asociados al cero de la mira) – Tercera prueba

8.3.5 Cuarta prueba

Dado que a la plataforma FEWS-Colombia solamente se le incorporó la información histórica de 2018, para realizar las pruebas de acople, la cuarta prueba se realizará en el modelo hidráulico de MIKE 11 externo a la plataforma, con el fin de verificar el desempeño en otros años (teniendo en cuenta la serie de caudal incorporada para los ríos de San Bartolomé y Cimitarra) y ver si es necesario hacer ajustes en los parámetros de calibración a fin de que los resultados de la plataforma FEWS-Colombia mejoren.

Para tal fin se seleccionó el período 01/07/2018 hasta 31/12/2020, en la Figura 8.26 se muestran las condiciones de frontera de caudal de los ríos tributarios.

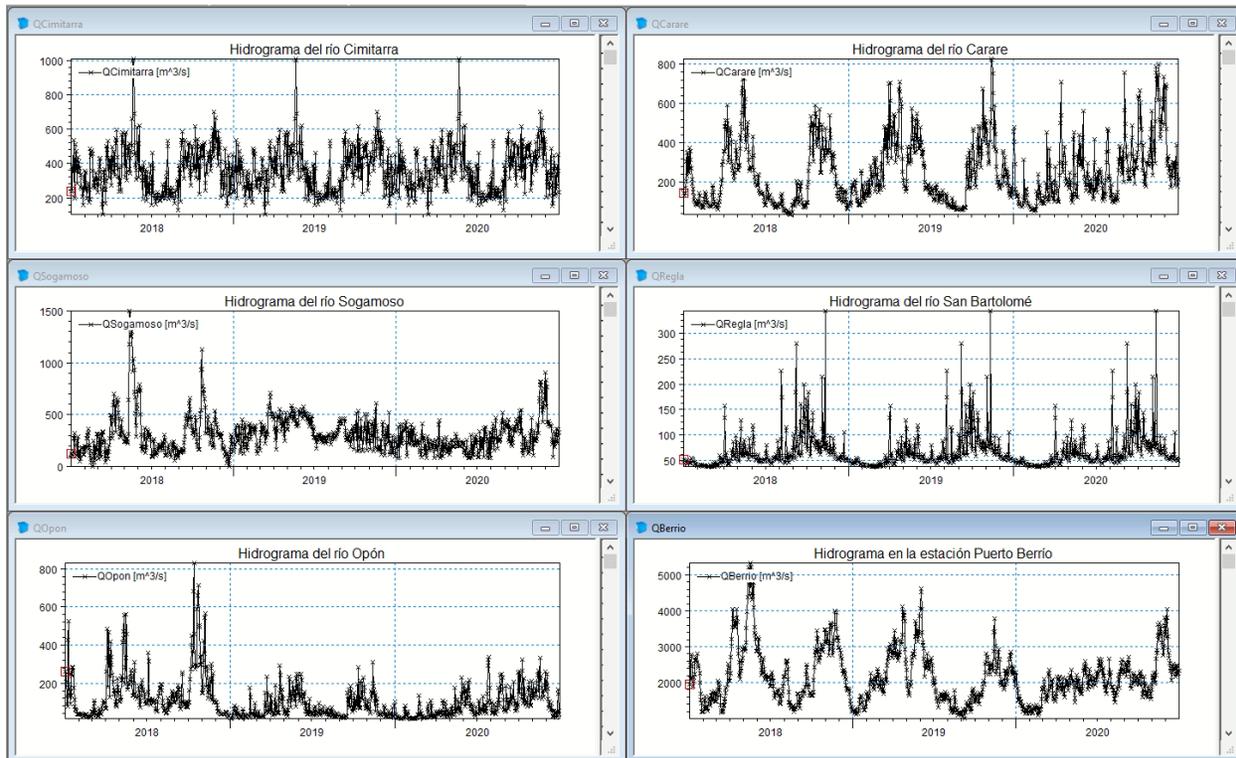


Figura 8.26 – Condiciones de frontera de caudal incorporadas en el modelo hidráulico como series de tiempo – Cuarta prueba

En la Figura 8.27 se muestra la comparación de los valores de caudal registrados en la estación de Sitio Nuevo con los valores simulados a través del modelo hidráulico de MIKE 11, para el período de 01/07/2018 – 31/12/2020. Se observa que de manera general el modelo hidráulico representa adecuadamente la tendencia de los datos medidos. Sin embargo, en los períodos de octubre y noviembre de 2018 y de febrero a junio de 2019 se observa sobrestimación del modelo hidráulico. En la Figura 8.28 se muestra la comparación de los niveles simulados en el modelo hidráulico de MIKE 11 en la estación de Barrancabermeja (línea de color rojo) y los valores registrados en la mira de la estación (convertidos a niveles con el cero de la mira, línea de color azul). La misma comparación para la estación de Puerto Wilches se muestra en la Figura 8.29 y para la estación de Sitio Nuevo se muestra en la Figura 8.30. De las tres figuras se observa que las dos series siguen la misma tendencia; sin embargo en la estación de Sitio Nuevo se observa una sobrestimación de los niveles para los mismos períodos identificados en el análisis de los caudales.

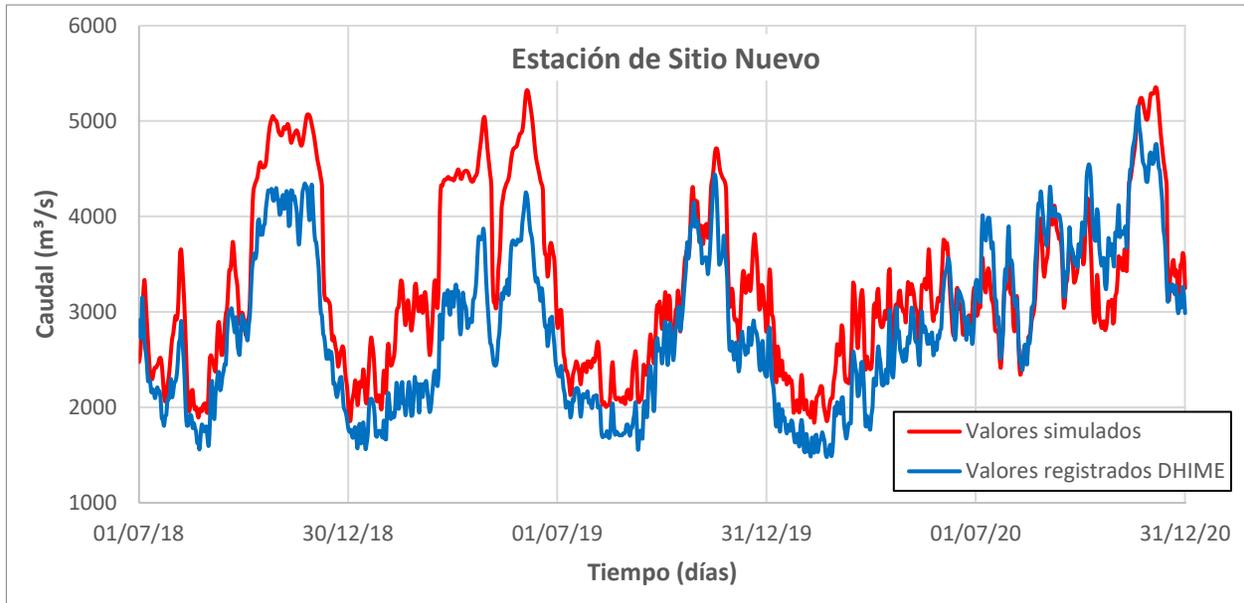


Figura 8.27 – Comparación de las series de caudales registrados en la estación de Sitio Nuevo con los caudales de la simulación del modelo hidráulico incorporado en la plataforma FEWS-Colombia – Cuarta prueba

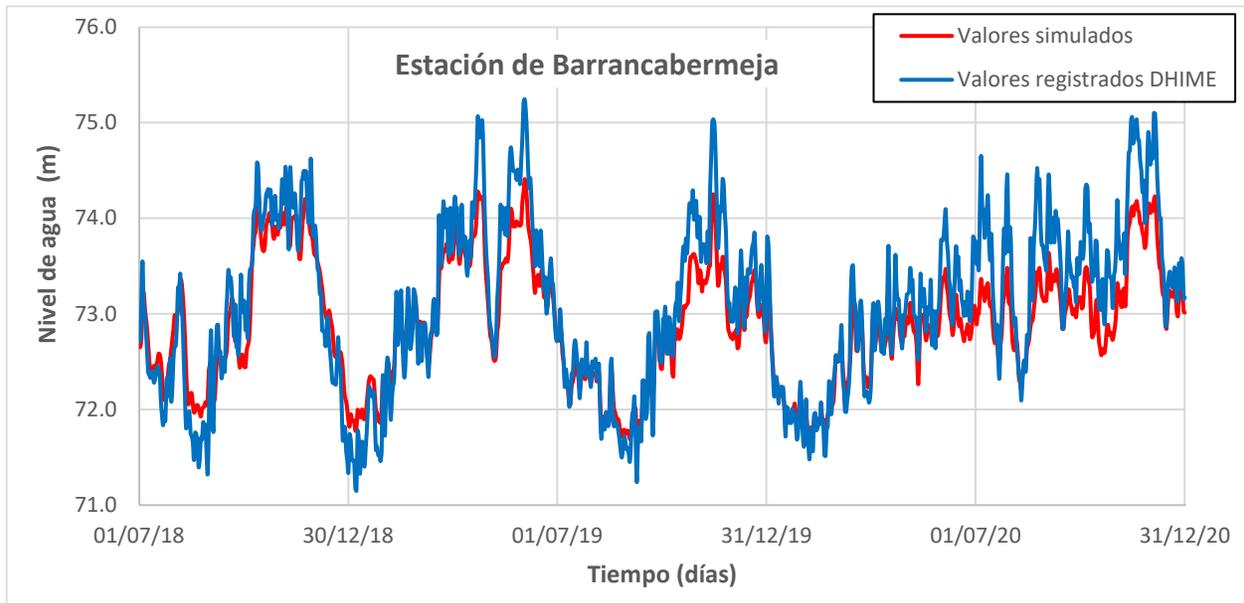


Figura 8.28 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Barrancabermeja (conversión de las lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico – Cuarta prueba

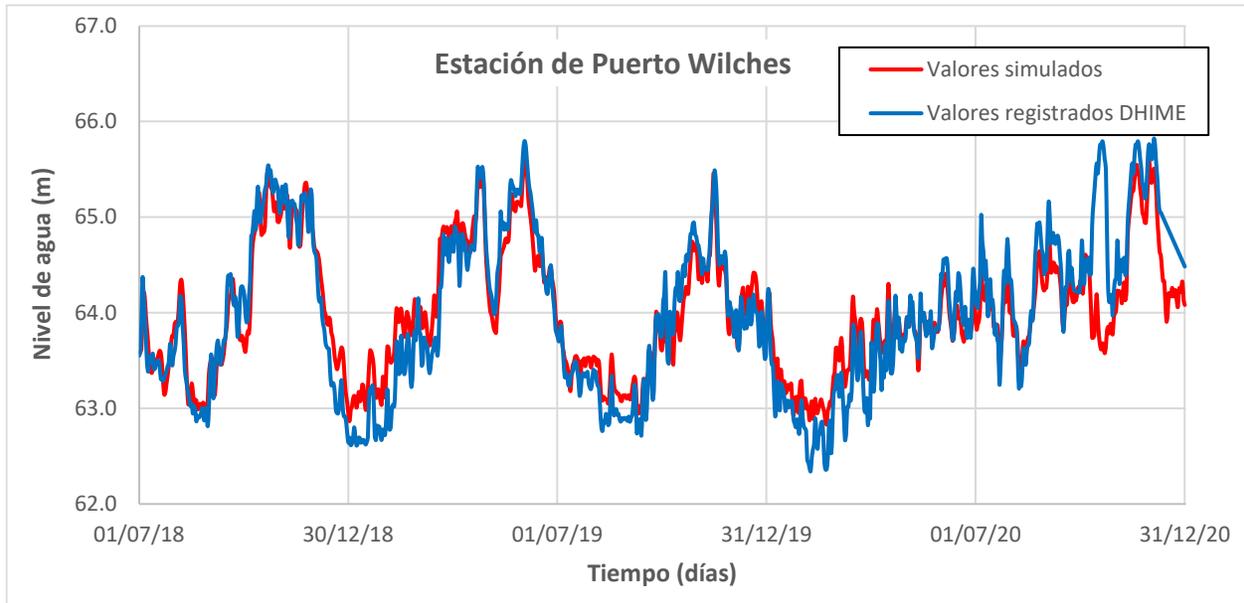


Figura 8.29 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Puerto Wilches (conversión de las lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico – Cuarta prueba



Figura 8.30 – Comparación de las series de niveles registrados en la estación de Sitio Nuevo (conversión de las lecturas de mira) con los niveles de la simulación del modelo hidráulico – Cuarta prueba

9 Bibliografía

Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Larraondo, P. R., McVicar, T. R., Pan, M., Dutra, E., and Miralles, D. G. MSWX: global 3-hourly 0.1° bias-corrected meteorological data including near real-time updates and forecast ensembles. Submetido para publicación, 2021.

Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlouf, Z., Michel, C., (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44 (2), 263–277.

IDEAM (2013). Metodología para realizar trabajos de hidrotopografía. Subdirección de Hidrología, 23 pp.

IDEAM (2021). Definición y/o actualización de umbrales en las estaciones hidrométricas, ubicadas en la región de La Mojana, como insumo para la emisión de alertas hidrológicas. Subdirección de Hidrología, 118 pp.

Gaitán, J. (2016). Propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda hidráulica de la cuenca media del río Magdalena. Sector de análisis y prueba piloto entre San Luis y Barrancabermeja. Tesis de maestría en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. 143 pp.

IDEAM (2013). Metodología para realizar trabajos de hidrotopografía. Subdirección de Hidrología, 23 pp.

INCIGE (2022). Realizar levantamiento topográfico de un modelo digital de terreno mediante el uso de tecnología aerotransportada en áreas de interés en el marco del convenio con Ecopetrol. Informes y 9 anexos.

Odebrecht. (2014). Presentación sobre la recuperación de la navegabilidad en el río Magdalena. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia.

Oliveros-Acosta, J., Escobar-Vargas, J., Yossef, M., Sanchez, J., Cardona, C. y Garay, C. (2015). Numerical Simulation of Flow and Sediment Transport Dynamics on the Magdalena River Section of Barrancabermeja – La Coquera (Colombia). E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.

Parajka, J., Merz R., Bloeschl G. (2007). Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments, *Hydrological Processes*, 21, 435-446.

- Peng, R. (2008). Simple bootstrap routines: package 'simpleboot'. Publicación 2008-05-02. Repositorio CRAN.
- Sánchez, J. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica acoplada de la cuenca media y baja del río Magdalena. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. 281 páginas.
- Santos, A., Cubillos, C. y Vargas, A. (2008). Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS. Revista Avances en Recursos Hidráulicos, número 17. Medellín, Colombia.
- Solanas, Antonio & Sierra, Vicenta. (1992). Bootstrap: fundamentos e introducción a sus aplicaciones. Anuario de Psicología. 55. 143-154.
- Urrego, J. P. (2018). Desempeño Modelos de Pronóstico Hidrológico y Evaluación Umbrales de Alerta Plataforma FEWS – Colombia – Cuenca Magdalena – Cauca. Informe de diciembre de 2018. Bogotá, D.C., 168 pp.
- Vargas, G. C. (2012). Geología, Geomorfología y Dinámica Fluvial Aplicada a Hidráulica de Ríos. XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla, Colombia.



El ambiente
es de todos

Minambiente



Bogotá, D.C. Colombia - Sur América
Sede correspondencia
Calle 25 D No. 96 B - 70 Bogotá D.C. Código postal: 110911
PBX (571) 3527160 Fax Server: 3075621 - 3527160 Opc.2
Línea Nacional 018000110012 - Pronóstico y Alertas (571) 3527180
Sede Puente Aranda: Calle 12 No 42B - 44 Bogotá D.C. PBX: 2681070
- www.ideam.gov.co