

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO A REALIZAR.....	5
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	6
2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS UTILIZADOS	8
2.1 ESTADO DEL ARTE	8
2.1.1 <i>Modelos métricos</i>	9
2.1.2 <i>Modelos conceptuales</i>	9
2.1.3 <i>Modelos de base física</i>	9
2.1.4 <i>Modelos híbridos métricos conceptuales</i>	10
2.2 SELECCIÓN Y CALIBRACIÓN.....	10
2.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN ESTE ESTUDIO.....	12
2.4 MIKE NAM	13
2.4.1 <i>Antecedentes</i>	13
2.4.2 <i>Estructura y fundamentos físicos</i>	14
2.4.3 <i>Parámetros del modelo</i>	18
2.5 HEC-HMS.....	23
2.5.1 <i>Antecedentes</i>	23
2.5.2 <i>Características principales</i>	23
2.5.3 <i>Estimación de las pérdidas iniciales</i>	25
2.5.4 <i>Orden de cálculo en el modelo</i>	28
2.5.5 <i>Aplicabilidad y limitaciones de los modelos de volumen de escorrentía</i>	29
2.5.6 <i>Modelación del escurrimiento en la cuenca</i>	30
2.5.7 <i>Modelación del flujo base</i>	31
2.5.8 <i>Rastreo de caudales</i>	32

2.6	CONCEPTUAL MODEL DEVELOPER (CMD)	36
2.6.1	<i>Antecedentes</i>	36
2.6.2	<i>Estructura y descripción técnica del modelo</i>	37
3	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	47
3.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES	47
3.1.1	<i>Meteorología</i>	49
3.1.2	<i>Precipitaciones</i>	50
3.1.3	<i>Hidrometría</i>	51
3.1.4	<i>Clima</i>	55
3.1.5	<i>Geomorfología</i>	55
3.1.6	<i>Uso de suelos</i>	55
4	CALIBRACIÓN Y RESULTADOS INICIALES	57
4.1	TEORÍA Y LINEAMIENTOS	57
4.2	MIKE-NAM	59
4.2.1	<i>Implementación</i>	59
4.2.2	<i>Calibración y validación</i>	60
4.3	HEC-HMS	66
4.3.1	<i>Implementación</i>	66
4.3.2	<i>Ajuste y calibración</i>	66
4.4	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	68
5	CONCEPTUALIZACIÓN APLICANDO EL CMD	70
5.1	CONCEPTUALIZACIÓN	70
5.2	IMPLEMENTACIÓN MIKE-NAM	70
5.3	IMPLEMENTACIÓN HEC-HMS	72
5.4	RESUMEN DE ESTRUCTURAS Y PARÁMETROS OBTENIDOS	74
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	76
6.1	INTRODUCCIÓN	76
6.2	ANÁLISIS DE LOS HIDROGRAMAS OBTENIDOS	76
6.2.1	<i>Comparación MIKE-NAM con CMD</i>	77
6.2.2	<i>Comparación HEC-HMS con CMD</i>	78
6.3	LIMITACIONES EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CMD	79
6.4	ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE MODELO	81
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
7.1	CONCLUSIONES	85

7.2	RECOMENDACIONES	86
8	BIBLIOGRAFÍA.....	88
9	ANEXOS.....	93
	ANEXO A CONCEPTUAL MODEL DEVELOPER.....	94
	ANEXO B ECUACIONES DE DESCARGA ESTACIONES SISTEMA CORANI	97
	ANEXO C DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS.....	98
	ANEXO C HIDROGRAMAS GENERADOS CON EL CMD	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Contenido de humedad en cm^3/cm^3 , saturación y valores de pF de $\theta_{2.5}$ y $\theta_{4.2}$ para diez clases de suelos. Adaptado de (1)Rawls et al.(1982); (2) Cosby et al. (1984); (3) Rijtema (1969).	18
Tabla 2.2.- Profundidad freática para a un flujo capilar de 1mm/día en distintos suelos Rijtema (1969).	21
Tabla 2.3.- Parámetros a calibrar y valores límite recomendados.....	23
Tabla 2.4.- Métodos disponibles para el cálculo de los distintos procesos.	25
Tabla 2.5.- Grupos de suelos y tasas de infiltración, adaptado de SCE, 1986.	25
Tabla 2.6.- Clases de textura estimadas (Rawls, et al., 1982).	27
Tabla 2.7.- Pros y contras de los modelos de pérdida del HEC-HMS adaptado del HMS Technical Reference Manual (2000).....	29
Tabla 2.8.- Valores típicos de la constante de recesión.	32
Tabla 2.9.- Sumario de criterios para la elección de modelos.	36
Tabla 3.1.- Características de la ubicación de la zona de estudio.....	47
Tabla 3.2.- Características de las cuencas estudiadas.....	48
Tabla 3.3.- Datos climatológicos disponibles	49
Tabla 3.4.- Estaciones hidrométricas disponibles a escala diaria y horaria.	51
Tabla 3.5.- Valores de temperatura promedio anual, periodo 2002-2010.	55
Tabla 4.1.- Influencia porcentual de las estaciones en cada sub-cuenca (Polígonos de Thiessen).	58
Tabla 4.2.- Tabla resumen de parámetros calibrados para las cuencas en estudio.	65
Tabla 4.3.- Tabla resumen de parámetros calibrados para las cuencas del sistema Palca.	68
Tabla 4.4.- Coeficientes de eficiencia de Nash Sutcliffe, para los modelos utilizados.	69
Tabla 5.1.- Resumen de coeficientes de eficiencia de Nash obtenidos NAM-CMD.....	71
Tabla 5.2.- Resumen de coeficientes de eficiencia obtenidos para la modelación HMS-CMD.....	74
Tabla 5.3.- Estructura de modelos obtenidos para las cuencas estudio.	75
Tabla 6.1.- Tabla de caudales pico y relación $Q_{\text{nam}}/Q_{\text{cmd}}$	77
Tabla 6.2.- Tabla de caudales pico y relación $Q_{\text{hec}}/Q_{\text{cmd}}$	78
Tabla 6.3.- Coeficientes de escorrentía media anual para los modelos HMS-CMD y NAM-CMD..	79
Tabla 0.1.- Ecuaciones H-Q utilizadas para cada estación.	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Sistema de cuencas en paralelo conducidas por un cauce de hormigón.	4
Figura 1.2.- Esquema de desarrollo de actividades.....	5
Figura 2.1.- Esquema de relación entre flujo total, caudal filtrado y aportes de escorrentía.....	13
Figura 2.3.- Estructura física del modelo (NAM-DHI, 2007).	15
Figura 2.4.- Generación del flujo superficial.....	20
Figura 2.5.- Esquema de la estructura del modelo (guía técnica).	24
Figura 2.6.- Esquema conceptual del algoritmo SMA. Adaptado de Bennett, 1998.....	28
Figura 2.7.- ET Función del almacenaje en la zona de tensión. Adaptado de Bennett, 1998.....	27
Figura 2.8.- Cuenca representada con el modelo de la onda cinemática.	30
Figura 2.9.- Cuenca representada con el modelo de la onda cinemática.	31
Figura 2.10.- Perfiles de agua en flujo permanente (US-ACE, 2000).....	33
Figura 2.11.- Almacenamiento en cuña, adaptado de Linsley et al, 1982.	34
Figura 2.12.- Región factible para la elección de parámetros, modelo Muskingum, adaptado del HMS Technical Reference Manual (2000).	34
Figura 2.13.- Arreglo de reservorios representando estructuras de a) [2, 3, 0], b) [3, 1, 0].....	41
Figura 2.14.- Resultados del SCEM-UA para un segmento de río, estructura [1 1 1] a) β y ck_1 después de 5000 iteraciones, b) Distribución de probabilidades posterior para β y ck_1	43
Figura 2.15.- Representación esquemática del modelo Takagi-Sugeno (Villazón, 2011).....	44
Figura 2.16.- Transformación no lineal de datos de entrada para un segmento de río e hidrograma con periodo de retorno 500 años.	45
Figura 2.17.- Modelo SIMULINK para un segmento con una planicie de inundación (en caja segmentada) Adaptado de Villazón, 2011.	46
Figura 3.1.- Ubicación del sistema de cuencas que aporta sus aguas al embalse CORANI.	47
Figura 3.2.- Esquema unifilar sistema Palca.....	48
Figura 3.3.- Disposición espacial de las estaciones meteorológicas.....	49
Figura 3.4.- Curva acumulada estación CORANI Embalse.	50
Figura 3.5.- Precipitación de Logger y del pluviómetro estación CORANI Embalse.	51
Figura 3.6.- disposición espacial de las estaciones hidrométricas.	52
Figura 3.7.- Hidrograma para Descarga Palca con datos observados superpuestos.	53
Figura 3.8.- Volúmenes acumulados para todas las cuencas de aporte y el control en descarga Palca.....	54
Figura 3.9.- Verificación de la propagación del error debido a los valores negativos del balance...	54

Figura 3.10.- Porcentaje de cada tipo de cobertura.....	56
Figura 3.11.- Mapa temático de uso de suelos.	56
Figura 4.1.- Mapa distribución espacial de la precipitación.	58
Figura 4.2.- Flujo base filtrado para Inicio Palca.	59
Figura 4.3.- Resumen del filtrado de interflujo Palca.	60
Figura 4.4.- Parámetros utilizados Palca inicio.	61
Figura 4.5.- Calibración inicio Palca.....	62
Figura 4.6.- Calibración Pisle.	63
Figura 4.7.- Parámetros utilizados Pisle.	63
Figura 4.8.- Parámetros utilizados corrida Laterales Palca.	64
Figura 4.9.- Corrida Palca laterales.	65
Figura 4.10.- Calibración Palca.	67
Figura 4.11.- Calibración Pisle.	67
Figura 4.12. Calibración aportes laterales.	67
Figura 4.13. Dispersión entre caudales generados por los modelos NAM y HMS.....	69
Figura 5.1.- Parametrización y resultados obtenidos caso Pisle.	71
Figura 5.2.- Hidrograma Modelado NAM-CMD para descarga Palca, periodo 2002-2008.	72
Figura 5.3.- Volumen acumulado periodo 2000-2011 Descarga Palca.	72
Figura 5.4.- Parametrización y resultados obtenidos caso Pisle, modelo HMS.	73
Figura 5.5.- Volumen acumulado periodo 08/00 a 04/11	73
Figura 5.6.- Hidrograma HMS-CMD Correspondiente a la cuenca Pisle, periodo 2002-2008.	74
Figura 5.7.- Variación de los parámetros obtenidos con el CMD.	75
Figura 6.1.- Muestreo de los caudales máximos anuales.....	77
Figura 6.2.- Dispersión de los datos modelados con HMS-CMD vs. Observados.	80
Figura 6.3.- Dispersión de los datos modelados con NAM-CMD vs. Observados.	80
Figura 6.4.- Efectos de la operación en los hidrogramas observados a) Palca, b) Pisle.	81