

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>3</b>
<b>6 RECURSO HIDRICO .....</b>	<b>6</b>
6.1 INTRODUCCIÓN.....	6
6.2 GENERALIDADES .....	7
6.2.1 Descripción General de la Cuenca del Río Sinú.....	7
6.2.2 Estudios Anteriores.....	10
6.3 HIDROGRAFÍA .....	11
6.3.1 CUENCA ALTA .....	11
6.3.1.1 Hidrografía proveniente del nudo de Paramillo que tributa al Sinú .....	11
Río Esmeralda .....	12
Río Manso.....	12
Quebrada Cruz Grande.....	12
6.3.1.2 Hidrografía que tributa a la cuenca del río Sinú en el área del embalse de URRÁ .....	12
Río Verde.....	12
Quebrada Urrá.....	13
Río Nain .....	13
Quebrada Tucurá.....	13
6.3.1.3 Hidrografía que tributa al río Sinú aguas abajo del embalse de URRÁ .....	13
6.4 RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL.....	14
6.4.1 Determinación de la Oferta Hídrica en la Cuenca del Río Sinú.....	14
6.4.1.1 Inventario y Delimitación de Cuencas y Microcuencas Tributarias .....	14
6.4.1.2 Inventario de Ciénagas y Cuerpos de Agua .....	26
6.4.1.3 Generación de Caudales Sintéticos .....	27
6.4.1.4 Determinación de Rendimiento Hídrico y Oferta Hídrica .....	30
6.4.1.5 Análisis de Duración de Caudales Estación Angostura de Urrá.....	40
6.4.2 Análisis Estadístico.....	46
6.4.2.1 Análisis de Frecuencia .....	46
Periodo de Retorno.....	46
Análisis de Frecuencia utilizando Posiciones de Graficación .....	47
Análisis de Frecuencia utilizando Factores de Frecuencia .....	48
Análisis de Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 h. ....	51
Análisis de Frecuencia de Caudal Máximo Mensual .....	56
Análisis de Frecuencia de Caudal Mínimo Mensual .....	60
6.4.3 Modelo Hidráulico del Río Sinú.....	62
6.4.3.1 Introducción .....	62
6.4.3.2 Descripción del Software HEC-RAS .....	62
6.4.3.3 Configuración del Modelo Hidráulico del Río Sinú .....	65
Calibración del modelo .....	68
Verificación del modelo.....	72
6.4.3.4 Simulaciones Realizadas con el Modelo.....	73
Caño Betancí .....	75
Caño Aguas Prietas .....	83
Simulación de Eventos Extremos .....	88
6.5 RECURSO HÍDRICO SUBTERRANEO .....	94
6.5.1 HIDROGEOLOGÍA .....	94
6.5.1.1 Generalidades .....	94
6.5.1.2 Densidad de la Información Hidrogeológica .....	94
6.5.1.3 Mapa hidrogeológico .....	95
Sedimentos y Rocas con Flujo Intergranular. ....	95
Rocas con Flujos Esencialmente a través de fracturas (Rocas Fracturadas y/o Carstificadas).....	95

Sedimentos y Rocas con limitados recursos de Agua Subterránea .....	95
6.5.1.4 Descripción de las Unidades Acuíferas existentes en la cuenca del río Sinú .....	96
Acuífero Betulia (Q1b) .....	96
Acuífero de Depósitos Aluviales. (Qal).....	96
Acuífero El Cerrito. (N1ec). ....	97
6.5.1.5 Descripción del Modelo Conceptual (INGEOMINAS 2004).....	97
6.5.2 <b>VULNERABILIDAD</b> .....	100
6.5.2.1 Generalidades .....	100
6.5.2.2 Metodología GOD.....	100
6.5.2.3 Valoración de los Parámetros GOD Para los Principales Acuíferos. ....	102
Acuíferos Aluviales y de Terrazas Aluviales.....	102
Acuífero Betulia .....	102
Acuífero El Cerrito.....	103
6.5.2.4 Calculo de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación. ....	103
Acuífero Aluviales y de Terrazas Aluviales. ....	103
Acuífero Betulia .....	104
Acuífero El Cerrito.....	104
6.5.3 <b>POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO</b> .....	104
6.5.3.1 Estimación de Reservas .....	104
6.5.3.2 Estimación de Recursos .....	105
6.6 <b>CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL</b> .....	106
6.6.1 <i>Generalidades</i> .....	106
6.6.2 <i>Metodología utilizada para el Análisis de la Calidad del Recurso Hídrico</i> .....	107
6.6.3 <i>Parámetros Monitoreados</i> .....	108
6.6.4 <i>Datos</i> .....	109
6.6.5 <i>Análisis de los Parámetros Monitoreados</i> .....	110
6.6.5.1 Análisis en la Zona del Alto Sinú - Embalse .....	110
6.6.5.2 Análisis en la Zona del Alto Sinú - Cauce del Río .....	112
6.6.5.3 Análisis de la Zona del Sinú Medio .....	117
6.6.5.4 Análisis de la Zona del Bajo Sinú. ....	119
6.6.6 <i>Análisis de la Calidad del agua en las Ciénagas:</i> .....	122
6.6.7 <i>Análisis del agua del Delta en el río Sinú</i> .....	127
6.6.7.1 Caracterización de la calidad del agua del Delta del río Sinú .....	127
6.6.7.2 Conclusiones Calidad del agua del Delta del río Sinú .....	133
6.6.8 <i>Consideraciones sobre Calidad de Agua</i> .....	134
6.7 <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	137
6.7.1 <i>Recurso Hídrico Superficial</i> .....	137
6.7.2 <i>Recurso Hídrico Subterráneo</i> .....	141
6.7.3 <i>Calidad del Recurso Hídrico</i> .....	141
6.8 <b>REFERENCIAS</b> .....	148
6.8.1 <i>Recurso Hídrico Superficial</i> .....	148
6.8.2 <i>Recurso Hídrico Subterráneo</i> .....	149
6.8.3 <i>Calidad del Recurso Hídrico</i> .....	153
<b>ANEXOS</b> .....	155

## INDICE DE TABLAS

TABLA No. 1	CORRIENTES DE ORDEN 5 Y 6 QUE DRENAN AL SINÚ AGUAS ABAJO DEL EMBALSE DE URRRA .....	13
TABLA No. 2	MICROCUENCAS QUE COMPONEN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ .....	15
TABLA No. 3	PRINCIPALES SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RÍO SINÚ .....	24
TABLA No. 4	PARÁMETROS DE FORMA DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO SINÚ .....	25
TABLA No. 5	INVENTARIO DE CUERPOS DE AGUA EXISTENTES EN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ .....	26
TABLA No. 6	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS UTILIZADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA .....	28
TABLA No. 7	MATRIZ DE CORRELACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS UTILIZADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA .....	28
TABLA No. 8	CAUDAL Y RENDIMIENTO HÍDRICO MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS SOBRE EL RÍO SINÚ .....	31
TABLA No.9	OFERTA HÍDRICA QUE SE GARANTIZA EL 75% DEL TIEMPO EN LAS MICROCUENCAS DEL RÍO SINÚ .....	35
TABLA No. 10	ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS Y PLUVIOMÉTRICAS EMPLEADAS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS ISOYETAS .....	52
TABLA No. 11	RESULTADO DE LA PRUEBA $\chi^2$ EFECTUADA SOBRE LA SERIE DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 H DE LA ESTACIÓN TIERRALTA .....	54
TABLA No. 12	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS DE FRECUENCIA .....	56
TABLA No. 13	RESULTADO DE LA PRUEBA $\chi^2$ EFECTUADA SOBRE LA SERIE DE CAUDAL MÁXIMO ANUAL DE LA ESTACIÓN MONTERÍA .....	57
TABLA No. 14	LOCALIZACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES UTILIZADAS EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO SINÚ EN HEC-RAS .....	66
TABLA No. 15	CURVA DE COTA – ÁREA – VOLUMEN PARA LA CIENAGA DE BETANCÍ .....	67
TABLA No. 16	CURVA DE COTA – ÁREA – VOLUMEN PARA LA CIENAGA DE GRANDE DE LORICA .....	67
TABLA No.17	CONDICIONES PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO SINÚ .....	69
TABLA No. 18	VOLÚMENES DE RESERVAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	105
TABLA No. 19	RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	105
TABLA No. 20	PARÁMETROS MONITOREADOS .....	109
TABLA No. 21	ALGUNAS VARIABLES FÍSICO QUÍMICAS EN LA CIENAGA GRANDE DEL BAJO SINÚ .....	123

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA NO. 1 RENDIMIENTO HÍDRICO COMO FUNCIÓN DE LA ABCISA SOBRE PUNTOS LOCALIZADOS EN EL RÍO SINÚ.....	32
FIGURA NO. 2 RENDIMIENTO HÍDRICO COMO FUNCIÓN DEL ÁREA DE DRENAJE PARA PUNTOS LOCALIZADOS SOBRE EL RÍO SINÚ.....	32
FIGURA NO. 3 ESQUEMA EXPLICATIVO PARA EL CÁLCULO DE LA OFERTA HÍDRICA EN UNA SUBCUENCA (I) A PARTIR DE DOS PUNTOS DE RENDIMIENTO HÍDRICO CONOCIDO. (A Y B) .....	33
FIGURA NO. 4 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Q DIARIO ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ.....	41
FIGURA NO. 5 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES DIARIOS ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ .....	42
FIGURA NO. 6 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Q DIARIO ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ.....	43
FIGURA NO. 7 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES DIARIOS ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ .....	44
FIGURA NO. 8 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA Q DIARIO ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ.....	45
FIGURA NO. 9 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES DIARIOS ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ .....	46
FIGURA NO. 10 CAUDALES Y PERIODOS DE RETORNO ASOCIADOS PARA LAS ESTACIONES SOBRE EL RÍO SINÚ.....	59
FIGURA NO. 11 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE CAUDAL MÁXIMO MENSUAL PARA LA ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ .....	60
FIGURA NO. 12 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE CAUDAL MÍNIMO MENSUAL PARA LA ESTACIÓN ANGOSTURA DE URRÁ .....	61
FIGURA NO. 13 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS TÉRMINOS DE LA ECUACIÓN DE ENERGÍA .....	64
FIGURA NO. 14 RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL NDE MANNING ( $N = 0.028$ EN EL FONDO DEL LECHO Y $N = 0.050$ EN LAS BANCAS) PARA CAUDAL BAJO.....	70
FIGURA NO. 15 RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL NDE MANNING ( $N = 0.028$ EN EL FONDO DEL LECHO Y $N = 0.050$ EN LAS BANCAS) PARA CAUDAL MEDIO.....	71
FIGURA NO. 16 RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL NDE MANNING ( $N = 0.028$ EN EL FONDO DEL LECHO Y $N = 0.050$ EN LAS BANCAS) PARA CAUDAL ALTO.....	71
FIGURA NO. 17 RESULTADO DE LA VERIFICACIÓN DEL MODELO .....	72
FIGURA NO. 18 ESQUEMA DEL MODELO HIDRÁULICO CONFIGURADO EN HEC-RAS PARA EL RÍO SINÚ .....	74
FIGURA NO. 19 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES HISTÓRICAS EN EL CAÑO BETANCÍ. SE APRECIA QUE CUANDO EL NIVEL DE LA CIÉNAGA ES SUPERIOR AL DEL RÍO, EL FLUJO EN EL CAÑO ES POSITIVO PERO CUANDO EL NIVEL DEL RÍO ES MAYOR SE TIENE FLUJO NEGATIVO Y ESTE INGRESA HASTA LA CIÉNAGA.....	76
FIGURA NO. 20 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN EL CAÑO BETANCÍ EN LOS AÑOS EN QUE HA OPERADO LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URRÁ. LAS POSIBILIDADES DE FLUJO NEGATIVO DISMINUYEN NOTABLEMENTE AUNQUE SIN EMBARGO AUN SE PUDO HABER PRESENTADO (2001) .....	79
FIGURA NO. 21 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN EL CAÑO BETANCÍ PARA EL AÑO 2003 SUPONIENDO QUE NO EXISTÍA “TAPA”.....	80
FIGURA NO. 22 RESUMEN DE CAUDAL EN EL CAÑO BETANCÍ PARA LOS AÑOS EN QUE HUBO FLUJO NEGATIVO.....	81
FIGURA NO. 23 RESUMEN DE CAUDAL EN EL CAÑO BETANCÍ PARA LOS AÑOS EN QUE NO HUBO FLUJO NEGATIVO .....	82
FIGURA NO. 24 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN DEL AÑO 2002 SUPONIENDO QUE HUBIERA COMPUERTA EN LA “TAPA” .....	83
FIGURA NO. 25 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES HISTÓRICAS EN EL CAÑO AGUAS PRIETAS. SE APRECIA QUE CUANDO EL NIVEL DE LA CIÉNAGA ES SUPERIOR AL DEL RÍO, EL FLUJO EN EL CAÑO ES POSITIVO PERO CUANDO EL NIVEL DEL RÍO ES MAYOR SE TIENE FLUJO NEGATIVO Y ESTE INGRESA HASTA LA CIÉNAGA.....	84
FIGURA NO. 26 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN EL CAÑO AGUAS PRIETAS EN LOS AÑOS EN QUE HA OPERADO LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URRÁ.....	86
FIGURA NO. 27 RESUMEN DE CAUDAL EN EL CAÑO AGUAS PRIETAS .....	88
FIGURA NO. 28 HISTOGRAMA DE ENTRADA EN ANGOSTURA DE URRÁ DEL EVENTO EXTREMO OCURRIDO EL 27 DE JULIO DE 2003 CUYO CAUDAL PICO REGISTRADO FUE DE $3262 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	89

FIGURA NO. 29 HIDROGRAMAS RESULTADO DE LA SIMULACIÓN DE LA CRECIENTE OCURRIDA EL 27 DE JULIO DE 2003 SI NO EXISTIERA EL EMBALSE DE URRÁ.....	90
FIGURA NO. 30 HIDRÓGRAMA DE ENTRADA EN ANGOSTURA DE URRÁ DEL EVENTO EXTREMO OCURRIDO EL 8 DE OCTUBRE DE 1988 CUYO CAUDAL PICO REGISTRADO FUE DE 1815 M <sup>3</sup> /S.....	91
FIGURA NO. 31 HIDRÓGRAMAS RESULTADO DE LA SIMULACIÓN DE LA CRECIENTE OCURRIDA EL 8 DE OCTUBRE DE 1988.....	92
FIGURA NO. 32 PERFIL VERTICAL DE LA TEMPERATURA EN EL EMBALSE URRÁ.....	111
FIGURA NO. 33 PERFILES VERTICALES DE PH Y OD. EN EL EMBALSE URRÁ.....	112
FIGURA NO. 34 COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTO PROMEDIO ANUAL A LO LARGO DEL RÍO SINÚ DESDE LA PRESA Y AGUAS ABAJO.....	117
FIGURA NO. 35 COMPORTAMIENTO DBO5 PROMEDIO ANUAL A LO LARGO DEL RÍO SINÚ Y AGUAS DEBAJO DE LA PRESA.....	120
FIGURA NO. 36 COMPORTAMIENTO HIERRO FE 3+ PROMEDIO ANUAL A LO LARGO DEL RÍO AGUA DEBAJO DE LA PRESA.....	121
FIGURA NO. 37 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD – CIENAGA GRANDE DEL BAJO SINÚ EN ÉPOCA DE LLUVIA.....	124
FIGURA NO. 38 IMAGEN LANDSAT (CIENAGA DE BETANCÍ).....	126
FIGURA NO. 39 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD – CIENAGA GRANDE DEL BAJO SINÚ EN ÉPOCA SECA.....	127
FIGURA NO. 40 IMAGEN LANDSAT (CIENAGA GRANDE DEL BAJO SINÚ).....	128
FIGURA NO. 41 COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE 24 HORAS EN LOS MESES DE ABRIL, MAYO, AGOSTO, Y OCTUBRE DE 2002 Y ENERO DE 2003.....	132

## 6 RECURSO HIDRICO

### 6.1 INTRODUCCIÓN

Este informe presenta los trabajos y análisis realizados dentro de la fase de diagnóstico del ***Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú –POMCA Río Sinú-*** en lo referente a la caracterización del recurso hídrico existente en la cuenca del río Sinú. El estudio fue realizado por La Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge, CVS mediante convenio No. 192026 suscrito con el Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo –FONADE-.

La elaboración del diagnóstico comprendió una evaluación de la situación actual en la cuenca de modo que esto permita llevar a cabo un proceso de planificación ordenada y concienzuda. El enfoque principal es el de conservar, preservar y proteger la riqueza hídrica de la cuenca a través de políticas, planes, programas y proyectos que permitan asegurar un manejo sostenible del recurso contribuyendo al desarrollo integral de la región.

Para los análisis realizados se partió de la información cartográfica generada a partir de imágenes de satélite, fotografías aéreas e imágenes de radar, registros con información climatológica e hidrométrica del IDEAM de numerosas estaciones ubicadas en toda la cuenca del río Sinú e información suministrada por la Empresa Urrá S.A. E.S.P. Adicionalmente se contó con informes y estudios anteriores localizados en el Centro de Documentación de la CVS.

En la sección 2 se presenta una descripción general de la cuenca hidrográfica del río Sinú, la sección 3 presenta lo referente a la hidrografía de la cuenca. En la sección 4 se describen las actividades realizadas en el área de hidrología tales como inventario de microcuencas, oferta hídrica y análisis estadístico de frecuencia. De igual manera se presenta el modelo hidráulico que se configuró en HEC-RAS para el río Sinú y los sistemas cenagosos que conforman su cuenca hidrográfica, así como las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos.

La sección 5 muestra las características generales del recurso hídrico subterráneo, la sección 6 presenta un análisis de la calidad de agua del río Sinú. Finalmente en la sección 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones generales del estudio, en la sección 8 se presentan las referencias consultadas.

## 6.2 GENERALIDADES

### 6.2.1 Descripción General de la Cuenca del Río Sinú

La región del Sinú está localizada en tierras de la costa atlántica del noroeste de Colombia entre los 8° y 9° de latitud norte y 75° 30" de longitud oeste. Ocupa la parte occidental del departamento de Córdoba y una pequeña porción del norte de Antioquia.

El Río Sinú nace en el municipio de Ituango departamento de Antioquia en el Nudo de Paramillo y desciende desde el área de páramo aproximadamente desde la cota 3700 m.s.n.m y desemboca directamente al mar en la zona del delta de Tinajones a través de tres bocas denominadas Mireya, Medio y Corea localizadas en jurisdicción del municipio de San Bernardo del Viento.

El área de la cuenca es de aproximadamente 13.952 Km<sup>2</sup> con una longitud total del cauce de 437.97 kilómetros desde su nacimiento hasta su desembocadura, de acuerdo con el sistema de clasificación de Horton es una corriente de orden 7 a escala 1:100000. El río presentaba antes de la puesta en marcha de la Hidroeléctrica de Urrá, según datos de IDEAM entre enero de 1970 y diciembre de 1999, un caudal promedio diario de 397 m<sup>3</sup>/s con caudales máximos hasta de 858 m<sup>3</sup>/s y mínimos de 29 m<sup>3</sup>/s en la estación de la Doctrina próximo a su delta. En el capítulo de cartografía se presenta la localización general de la cuenca y el abscisado del río.

Con respecto a la pendiente longitudinal promedio del río, este se puede dividir en cuatro tramos principalmente:

Urrá – Pasacaballos	S	=	$1.0 \times 10^{-3}$ m/m
Pasacaballos – Río Nuevo	S	=	$6.3 \times 10^{-4}$ m/m
Río Nuevo – Montería	S	=	$2.1 \times 10^{-4}$ m/m
Montería – mar Caribe	S	=	$1.4 \times 10^{-4}$ m/m

El ancho del río Sinú es relativamente constante a lo largo del tramo entre Urrá y el mar Caribe, con un valor de sección llena que varía entre 120 m y 160 m. Los valores de caudales a banca llena, dependiendo de la localización, varían entre 650 m<sup>3</sup>/s y 1200 m<sup>3</sup>/s. En la mayoría de secciones, la profundidad de la lámina de agua para un rango de caudal alto está entre 5 m y 8 m.

Antes de recibir al río Verde, el río Sinú corta su camino a través de un cañón profundo. Aguas abajo, y fluyendo en dirección norte, el río forma un segundo cañón en el cual está ubicada actualmente la presa de Urrá. Entre estos dos cañones el río fluye a través de un valle estrecho que fue inundado por el embalse. Precisamente en el sitio de presa el río termina su recorrido entre las montañas para enfilarse gradualmente por entre una planicie aluvial suavemente inclinada, ancha y alargada por donde sigue su curso hasta el mar Caribe para desembocar en la boca de Tinajones.

El río alimenta durante época de crecientes varias ciénagas pequeñas sobre su margen izquierda y dos muy importantes sobre la derecha: la Ciénaga de Betancí comunicada en forma bidireccional con el río por el Caño Betancí y la Ciénaga Grande del Bajo Sinú comunicada igualmente con el río por el Caño Aguas Prietas. Estas ciénagas juegan un papel supremamente importante para el hábitat de las especies de peces que se encuentran a lo largo del río.

La cuenca del río Sinú puede dividirse en cuatro sectores de acuerdo a su dinámica: la cuenca alta, la cuenca media, la cuenca baja (o delta) y un delta interior.

El alto Sinú se localiza aguas arriba de la presa de Urrá, y se considera la zona de mayor producción de caudal y de sedimentos.

El medio Sinú se localiza desde este sector hasta Montería aproximadamente, en donde el río se torna meándrico y divagante con una llanura aluvial compuesta por abanicos y llanuras de inundación.

A partir de Montería el delta interior se abre en una especie de abanicos de paleocauces que se dirige hacia el norte y donde la cuenca se ensancha hasta alcanzar 40 km en promedio.

Sistema de ciénagas y pantanos de la Ciénaga Grande del Bajo Sinú, con ríos y paleocauces poco sinuosos con muy bajo gradiente. Finalmente el paisaje fluvial evoluciona a litoral en el delta fluvio marino en la costa Caribe con sus fases de progradación, cordones litorales y manglares (IDEAM, 1998).

En su recorrido, el río une cuatro de los más importantes biomas del planeta: Páramo, selva húmeda, humedales y estuarios, pasando por diferentes zonas de vida así: en el Alto Sinú, se presenta el bosque pluvial en las cumbres más



elevadas del Macizo de Paramillo, bosque muy húmedo en la cuenca del río Esmeralda y hacia la parte central del Parque Nacional Natural Paramillo, bosque húmedo en los alrededores del municipio de Tierralta y la ciénaga de Betancí, y finalmente, se presenta el bosque seco a todo lo largo del río recorriendo las ciudades de Tierralta, Montería, Cereté, San Pelayo, Lórica, San Bernardo del Viento y San Antero hasta la desembocadura en el delta de Tinajones.

Los bosques se presentan en las serranías en el Alto Sinú. En los alrededores del embalse de Urrá hasta la desembocadura del río, la cuenca se caracteriza por la ausencia del bosque natural, desarrollándose áreas con pastos y agricultura establecida, y finalmente en el Delta de Tinajones se presentan los bosques de manglar.

El valle aluvial del río Sinú aguas abajo de la presa de Urrá esta morfológicamente compuesto por una planicie inundable que se encuentra delimitada por colinas y lomeríos así como por terrazas fluviales y fluvio marinas. Desde Urrá hasta la población de Las Palomas el río ha presentado a lo largo del tiempo frecuentes variaciones en el trazado de su cauce. A partir de esta población y hasta la desembocadura las variaciones en el cauce se siguen presentando aunque en menor grado. Esta dinámica se debe al control que sobre el cauce imponen ciertos rasgos geomorfológicos y geológicos locales.

El valle del río Sinú es la zona agrícola más importante de la región y corresponde al cuaternario; forma parte de la planicie fluvio-lacustre, que comprende diques naturales, basines, complejos de diques y basines, valles estrechos y terrazas (IGAC, 1983).

En la cuenca del Sinú se encuentra el 76.3% de la población urbana de Córdoba, con importantes poblaciones como Tierralta, Montería, Cereté, San Pelayo, Lórica y San Bernardo del Viento. El río Sinú, en su recorrido suministra agua a diferentes municipios de la cuenca y recibe las aguas residuales de varias poblaciones localizadas en sus riberas, en el mapa de infraestructura del capítulo de cartografía se presentan los sitios de captación y vertimientos sobre el río Sinú.

En el tema de inundaciones solamente en el año de 1988 las pérdidas materiales ascendieron a la suma de 25 mil millones de pesos (Comité Regional de Emergencia 1990). La llanura aluvial, que ha sido totalmente deforestada y que sufrió una transformación a un uso pecuario y agrícola, tiene una pendiente desde el río hacia fuera, de tal manera que las crecientes tienden a permanecer en la propia llanura aluvial. Los caudales máximos que a menudo ocurren en la estación

de lluvias, permiten que el agua fluya desde el río Sinú a través de los caños hacia las ciénagas; por otra parte cuando el nivel del río disminuye las ciénagas reciben escorrentía de sus propias hoyas hidrográficas, y el flujo ocurre en dirección contraria, es decir desde las ciénagas hacia el río Sinú.

### 6.2.2 Estudios Anteriores

Los estudios e informes que sirvieron como fuente de información para este diagnóstico son los siguientes:

El informe de la Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica, CORELCA del año 1977 denominado *Desarrollo Hidroeléctrico del Alto Sinú Estudio de Factibilidad* –lleva a cabo un estudio de factibilidad técnica para la construcción de las centrales hidroeléctrica Urrá I y Urrá II, la desviación de los Río Verde y San Jorge. En el volumen IV, *Hidrología Estudios de Sistemas Evaluación de Alternativas* se consideran aspectos tales como clima, régimen de precipitación, caudales medios, periodos de retorno, duración de caudales, transporte de sedimentos, crecientes de diseño de las cuencas del río Sinú y del San Jorge. Este informe dió algunas pautas sobre aspectos que se consideraron en el presente estudio.

La CVS formuló en 1980 el *Plan Maestro de Desarrollo Integral en la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú* con el objetivo de dotar a la Corporación de un instrumento de análisis para orientar sus acciones hacia el logro de metas en cuanto al desarrollo de la región. Los estudios hidrológicos quedaron consignados en el volumen Hidrología del río Sinú, en donde se estudiaron temas como hidroclimatología, hidrología del río y de las quebradas, problemas particulares como la Ciénaga de Betancí y Grande del Bajo Sinú, aguas subterráneas y pozos, etc.

El ingeniero Mario Díaz-Granados Ortiz desarrolló para la Empresa Urrá S.A. E.S.P. en Mayo de 1997 el *Estudio Preliminar de las Inundaciones Aguas Abajo del Proyecto Urrá I* con el fin de evaluar el comportamiento de las ciénagas de Betancí y Grande de Lórica ante escenarios potenciales de régimen hídrico causados por la construcción y operación del proyecto Urrá. En este estudio se formuló un modelo hidrológico de balance hídrico entre el río Sinú y los sistemas cenagosos mencionados.

En 1993 se llevo a cabo la *Modelación Hidrológica e Hidráulica de la Cuenca del Río Sinú* por parte de la Universidad de los Andes. Allí se formuló un modelo

matemático de interacción entre el río y las ciénagas configurado por medio de un modelo computacional escrito en Turbo pascal 6.0.

El informe final de la Fase I del *Plan de Seguimiento y Monitoreo de la Zona Deltáica Estuariana del Río Sinú* adelantado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis INVEMAR, en Enero de 2001, y cuyo objeto fue el de determinar si la entrada en operación de la Central Hidroeléctrica de Urrá generó impactos ambientales negativos o positivos en la cuenca baja del río Sinú.

Adicionalmente se consultaron los *Planes de Ordenamiento Territorial, POT* de los municipios del departamento de Córdoba en los cuales se plantean las directrices y líneas generales para la planificación en cuanto a medio ambiente, integración regional, productividad urbana y convivencia ciudadana.

### **6.3 HIDROGRAFÍA**

La cuenca alta del río Sinú constituye la zona más importante desde el punto de vista de generación de oferta hídrica, aguas arriba del embalse de Urrá se localizan los principales afluentes del Sinú, muchos de ellos provenientes del Nudo de Paramillo y algunos provenientes del cerro Murrucucú. Dentro del área del embalse y aguas abajo del embalse existen otros afluentes del río Sinú que no representan un aporte de caudal similar al proveniente de aguas arriba del embalse. A continuación se presentan por zonas las características generales de la red hídrica que constituye la cuenca hidrográfica del río Sinú.

#### **6.3.1 CUENCA ALTA**

Para diferenciar mejor los drenajes ubicados en la cuenta alta del río Sinú se han tomado varias consideraciones; en primer lugar, la zona de nacimiento y su desembocadura teniendo en cuenta la localización del embalse de Urrá.

##### *6.3.1.1 Hidrografía proveniente del nudo de Paramillo que tributa al Sinú*

Dentro de estas corrientes se cuentan las siguientes.

### **Río Esmeralda**

El río Esmeralda nace aproximadamente hacia la cota 3000 m.s.n.m y recorre una longitud de 114.2 Km hasta su desembocadura en el río Sinú, el área de la cuenca es de 1043.8 Km<sup>2</sup> y el número de orden de esta corriente es 6, dentro de sus principales tributarios se cuentan el río Antazales entre otros.

### **Río Manso**

El río Manso nace en el Cerro de Murrucucú hacia la cota 1100 m.s.n.m y es la única corriente principal de la cuenca que drena de Norte a Sur entre sus afluentes recibe las aguas del río Tigre, la longitud del cauce hasta su confluencia con el río Sinú es de 78.4 Km y drena un área de 600.4 km<sup>2</sup>, esta corriente tienen un número de orden 5.

### **Quebrada Cruz Grande**

La Quebrada Cruz Grande nace en el sector oriental del Embalse de Urra y drena un área de 197.4 Km<sup>2</sup> hasta su desembocadura recorre una longitud de 26.6 Km, es una corriente de orden 5.

#### *6.3.1.2 Hidrografía que tributa a la cuenca del río Sinú en el área del embalse de Urra*

Dentro de estas corrientes tenemos:

### **Río Verde**

El río Verde nace hacia la cota 2400 m.s.n.m. en el sector occidental del nudo de Paramillo y recorre 145.6 Km hasta su desembocadura en el embalse de Urrá, el área de esta cuenca es de 1084.7 km<sup>2</sup> y recibe como tributarios aguas de por lo menos 7 quebradas con aportes significativos al régimen de caudales de esta cuenca. De acuerdo con el número de orden de Horton esta corriente es de orden 5.

### **Quebrada Urrá**

La quebrada Urrá tiene un área de drenaje de 39 Km<sup>2</sup> y nace en el sector oriental del embalse de URRÁ hacia los 1100 m.s.n.m hasta su desembocadura recorre una longitud de 15.1 Km y presenta un número de orden 4.

### **Río Nain**

Esta corriente nace en la serranía de Abibe hacia los 1000 m.s.n.m y drena un área de 131.9 Km<sup>2</sup> recorriendo una longitud de 31.4 km hasta su desembocadura, esta corriente es de orden 4.

### **Quebrada Tucurá**

La Quebrada Tucurá drena hacia el área del embalse por el sector occidental del mismo y proviene de la serranía de Abibe donde nace en los 900 m.s.n.m, cubre un área de 237.1 km<sup>2</sup> en un trayecto de 33 Km, de acuerdo con la clasificación de Horton esta corriente es de orden 5.

#### *6.3.1.3 Hidrografía que tributa al río Sinú aguas abajo del embalse de URRÁ*

Aguas abajo del embalse de URRÁ el río Sinú recibe las aguas de un gran número de corrientes, en la Tabla No. 1 se indican las características generales de algunas de ellas:

**Tabla No. 1 Corrientes de orden 5 y 6 que drenan al Sinú aguas abajo del embalse de URRÁ**

<b>Nombre de la Corriente</b>	<b>Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Longitud del cauce principal (Km)</b>	<b>Número de Orden de la corriente</b>
Quebrada Pirú	245	47.6	5
Caño Betancí	1865.9		5
Caño El Vidrial	1121	67.6	6
Caño El Tigre	131.9	42	5
Caño Aguas Prietas	2059.3	65.3	6

## **6.4 RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL**

### **6.4.1 Determinación de la Oferta Hídrica en la Cuenca del Río Sinú**

Como parte del diagnóstico del Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de la Cuenca Hidrográfica del río Sinú es de vital importancia determinar la oferta del recurso hídrico con el fin de conocer a ciencia cierta de que se dispone en cuanto a fuentes de agua. Sin duda, la principal es el río Sinú pero sin embargo hay que considerar fuentes adicionales como los afluentes del río.

En el río Sinú se cuenta con estaciones hidrométricas que cubren aceptablemente bien la totalidad de su curso, sobretodo aguas abajo del Embalse de Urrá. Estas cumplen el propósito de determinar la oferta hídrica del río como tal. Sin embargo, en las corrientes tributarias no existen estaciones hidrométricas (salvo contados casos) y no se dispone de mediciones directas de caudal. Por esta razón se debe acudir a un método indirecto para la determinación de caudales aportantes por las microcuencas de dichas corrientes tributarias. En este caso se utilizó una metodología especial basada en rendimientos hídricos de las cuencas de drenaje parciales.

#### *6.4.1.1 Inventario y Delimitación de Cuencas y Microcuencas Tributarias*

Se hizo un inventario de corrientes existentes en la cuenca del río Sinú con el fin de crear una base de datos de los recursos hídricos con los que cuenta la región. En esta base de datos se consignan las principales características de cada subcuenca como área, número de orden, densidad de drenaje, nombre de la corriente de drenaje principal y su longitud.

En la Tabla No. 2 se muestra el inventario de todas las microcuencas que componen la cuenca del río Sinú. En ella se puede observar el número de corrientes pertenecientes a cada tipo de orden de cauce como también a donde tributa cada una de ellas.

Vale aclarar que en la parte alta de la cuenca no fue posible encontrar el nombre de algunas microcuencas debido a la falta de información (cartografía). Como es el caso de algunas microcuencas que forman la red de drenaje de los ríos Esmeralda y Verde, sin embargo se numeraron teniendo en cuenta la corriente principal donde aportan sus aguas.

**Tabla No. 2 Microcuencas que componen la cuenca del río Sinú**

			NUMERO DE ORDEN (Cantidad)						
	Afluente	Entrega a	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	Orden 6	Orden 7
Cuenca Río Esmeralda	Río Sinú alto	Río Sinú	68	22	4	1			
	Río Sinucito	Río Sinú	125	28	7	1			
	Río Esmeralda 5	Río Esmeralda 3	166	35	10	1	1		
	Río Esmeralda 3	Río Esmeralda	170	45	10	2	1	1	
	Río Esmeralda 2	Río Esmeralda	272	59	10	2	1		
	Río Esmeralda 4	Río Esmeralda	68	11	1				
	Río Esmeralda 6	Río Esmeralda	95	17	1	1			
	Río Esmeralda 1	Río Esmeralda	79	14	3	1			
	Río Antazales	Río Esmeralda	151	41	8	1			
	Río Esmeralda	Río Sinú	479	135	18				
Cuenca Río Verde	Río Verde 6	Río Verde 5	66	17	4	1			
	Río Verde 4	Río Verde 5	42	11	4	1			
	Río Verde 7	Río Verde 5	24	6	2	1			
	Río Verde 5	Río Verde	120	22	3	1	1		
	Río Verde 1	Río Verde	226	44	6	1			
	Río Verde 3	Río Verde	37	11	3	1			
	Río Verde 2	Río Verde	36	14	2	1			
	Qda. Pechi	Río Verde	54	12	4	1			
	Qda. El Tagual	Río Verde	24	5	1				
	Qda. Borrascosa	Río Verde	41	13	2	1			
	Qda. El Bosque	Río Verde	18	2	1				
	Qda. La Clara	Río Verde	13	3	1				
	Qda. Sumba Sumba	Río Verde	10	4	1				
	Qda. La Estrella	Río Verde	12	2	1				
	Qda. La Luna	Río Verde	28	7	1				
	Qda. Saiza	Río Verde	85	21	4	1			
	Río Choco	Río Verde	60	16	5	1			

	Afluente	Entrega a	NUMERO DE ORDEN (Cantidad)						
			Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	Orden 6	Orden 7
	Qda. Mutatá	Río Verde	87	22	3	1			
	Qda. Pánico	Río Verde	27	5	1				
	Río Verde	Embalse Urrá	291	60	12				
C. Río Manso	Río Tigre	Río Manso	54	16	2	1			
	Río Manso	Río Sinú	162	41	7	1	1		
C. Qda. Cruz Grande	Qda. Socorro	Río Sinú	49	16	2	1			
	Qda. Caimán	Río Sinú	88	25	9	3	2	1	
	Qda. Mutatá -	Río Sinú	22	5	2	1			
	Qda. Iguana	Qda. Cruz Grande	23	7	2	1			
	Qda. Cruz Grande	Río Sinú	112	23	9	2	1		
	Qda. Nain	Embalse Urrá	142	24	6	1			
	Qda. Urrá	Embalse Urrá	37	7	3	1			
	Qda. Tucurá	Embalse Urrá	102	25	8	2	1		
	Qda. Tay	Río Sinú	61	14	4	1			
	nn San Clemente - Tierralta	Río Sinú	26	7	2	1			
	Qda. Pirú	Río Sinú	143	42	13	2	1		
	Qda. Juy	Río Sinú	56	15	3	1			
	Qda. Peña	Río Sinú	7	3	1				
	Qda. Aguas Prietas	Río Sinú	39	12	4	1			
	Qda. Los Pescados	Río Sinú	88	26	6	1			
	Aryo. Los Serapios	Río Sinú	7	1					
	Qda. Matamoros	Río Sinú	47	10	3	1			
	Qda. Machena	Río Sinú	18	5	2	1			



			NUMERO DE ORDEN (Cantidad)						
	Afluente	Entrega a	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	Orden 6	Orden 7
Cuenca Caño Betancí	Qda. Viviana	Qda. las Flores	8	3	1				
	Qda. Las Flores	Caño Betancí	36	13	3	1			
	Qda. Betancí	Qda. el Neque	56	15	1				
	Qda. El Neque	Caño Betancí	13	2	1	1			
	Aryo. El Arenosito	Qda. Arroyon	15	3	1				
	Ada. Arroyon	Caño Betancí	38	21	3	1	1		
	Caño San Pues	Qda. Arroyon	13	4	2	1			
	Aryo. Corrental	Caño Betancí	24	7	2	1			
	Aryo. Vijagual	Caño Betancí	56	17	5	1	1		
	Aryo. León	Caño Betancí	9	3	1				
	Aryo. Vueltoso	Caño Betancí	57	20	5	2	1		
	Aryo. Las Lomitas	Caño Betancí	6	3	1				
	Aryo. Los Pegados	Caño Betancí	22	7	3	1			
	Aryo. Esteban	Caño Betancí	6	2	1				
	Caño Betancí	Río Sinú	25	10	1				
Cuenca Caño el Vidrial	Qda. Florisanto	Caño el Vidrial	112	25	10				
	Qda. Caña Flechas	Caño el Vidrial	137	29	5	1	1		
	Qda. La Honda	Caño el Vidrial	118	22	5	2	1		
	Qda. Morrocroyera	Caño el Vidrial	76	11	4	2	1		
	Qda. San Rafael	Caño el Vidrial	54	10	3	1			
	Qda. Monaflaca	Caño el Vidrial	5	1					
	Qda. Saltillo	Caño el Vidrial	44	10	2	1			
	Qda. La Mora	Caño el Vidrial	64	9	4	1			
	Qda. El Limón	Caño el Vidrial	106	20	6	2	1		
	Qda. Cauchera	Caño el Vidrial	10	3	1				
	Qda. Aguas Blancas	Caño el Vidrial	57	14	5	1			
	Qda. Sincelejito	Caño el Vidrial	4	2	1				
	Aryo. El Coco	Caño el Vidrial	20	7	2	1			
	Caño el Vidrial	Río Sinú	26	5	1			1	

		NUMERO DE ORDEN (Cantidad)						
		Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	Orden 6	Orden 7
	Afluente							
	Entrega a							
	Qda. El Cucharro	Río Sinú	68	13	2	1		
	Qda. Alemania	Río Sinú	16	4	1			
	Aryo. El Barroso	Río Sinú	39	8	2	1		
	Aryo. El Diluvio	Río Sinú	3	1				
	Brazo Cañaveral	Río Sinú	42	12	3	1		
	Caño Arenoso	Río Sinú	47	9	3	1		
	Caño el Tigre	Río Sinú	37	14	5	2	1	
	Aryo. La Vaina	Cqa. Charco Pescado - Bordón	21	8	2	1		
	Caño el Retiro	Río Sinú	85	29	5	1		
	Caño Mochita	Río Sinú	29	7	2	1		
	Caño Correntoso	Río Sinú	1	1				
	Aryo. San Jerónimo	Río Sinú	64	13	3	1		
	Aryo. Alemania	Río Sinú	3	2	1			
	Caño Sierra chiquita	Río Sinú	14	2	1			
Cuenca Caño Aguas Prietas	Aryo. Algarrobillo	Caño Aguas Prietas	4	3	1			
	Aryo. Mocholo	Caño Aguas Prietas	5	1	1			
	Aryo. Caño Mocho	Aryo. Trementino Alto	54	12	4	1		
	Aryo. Pital	Aryo. Boca la Ciénaga	14	6	1			
	Aryo. Boca la Ciénaga	Aryo. Trementino Alto	12	5	1	1		
	Aryo. Trementino Alto	Caño Aguas Prietas	78	21	5	1	1	
	Aryo. Grande	Caño Aguas Prietas	80	18	5	1		
	Aryo. La Palma	Caño Aguas Prietas	9	3	1			
	Aryo. Tunucana	Caño Aguas Prietas	4	1				
	Aryo. La Burra	Caño Aguas Prietas	35	9	3	1		
	Aryo. Correntoso	Caño Aguas Prietas	5	1	1			
	Aryo. Torrente	Caño Aguas Prietas	15	6	2	1		
	Aryo. Arena	Caño Aguas Prietas	18	5	1	1		
	Aryo. El Bobo	Caño Aguas Prietas	3	2	1			
	Aryo. El Venado	Aryo. Venado	26	7	2	1		

	Afluente	Entrega a	NUMERO DE ORDEN (Cantidad)						
			Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	Orden 6	Orden 7
C. Caño Aguas Prietas	Aryo. El Templo	Aryo. Venado	11	4	1				
	Aryo. Agua Colorada	Aryo. Venado	27	10	3				
	nnVereda el Curial	Aryo. Venado	10	3	1				
	Aryo. Recoveco	Aryo. Venado	11	5	2	1			
	Aryo. El Cabro	Aryo. Venado	6	3	1				
	Aryo. Venado	Caño Aguas Prietas	40	14	3				
	Aryo. Chupa Chupa	Caño Aguas Prietas	2	1					
	Aryo. El Cebo	Aryo. Trementino	10	5	1				
	Aryo. Churre	Aryo. Trementino	8	2	1				
	Aryo. Grande Alto	Aryo. Trementino	19	5	2	1			
	Aryo. Trementino	Aryo. Del Medio	4	1		1			
	Aryo. El Peñol	Aryo. Del Medio	3	1					
	Aryo. El Tigre	Aryo. Del Medio	15	7	1				
	Aryo. Del Medio	Caño Aguas Prietas	1	1		1			
	Aryo. San Francisco	Aryo. Panchomey	31	10	3	1			
	Aryo. Mocha el Bledon	Aryo. Panchomey	29	6	2	1			
	Aryo. Panchomey	Aryo. Mocha	31	11	2		1		
	Aryo. Mocha	Caño Aguas Prietas	1				1		
	Aryo. Guayacán	Caño Aguas Prietas	5	2	1				
	Aryo. Los Palmitos	Caño Aguas Prietas	14	3	1				
	Aryo. Mapurince - Alto	Aryo. Mapurince	13	1					
	Aryo. Mapurince	Caño Aguas Prietas	7	7	3	1			
	Aryo. Jején	Caño Aguas Prietas	4	2	1				
	Aryo. Ahogaindio	Caño Aguas Prietas	1	1					
	Aryo. Patico	Caño Aguas Prietas	11	5	2	1			
	Aryo. Bijao	Aryo. Bacón	14	4	1				
	Aryo. Bacón	Caño Aguas Prietas	9	5	1	1			
	Aryo. El Gamboas	Caño Aguas Prietas	4	4	1				
	Aryo. Hondo	Aryo. San Antonio	20	8	3	1			

			NUMERO DE ORDEN (Cantidad)						
	Afluente	Entrega a	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	Orden 6	Orden 7
C. Caño Aguas Prietas	Aryo. San Antonio	Caño Aguas Prietas	30	13	2	1	1		
	Caño Aguas Prietas	Río Sinú	27	10	1				
	Aryo. Almagra	Río Sinú	6	3	1				
	Aryo. Prieto	Río Sinú	3	1					
	Río Sinú	Océano Atlántico	835	114	19	1	1	1	1
	<b>Sumatoria para cada Orden de cauce</b>		<b>7567</b>	<b>1821</b>	<b>420</b>	<b>96</b>	<b>23</b>	<b>4</b>	<b>1</b>

La Tabla No.2 muestra que para el área geográfica de la cuenca del río Sinú existen 7567 corrientes de orden 1 distribuidas en todo el territorio de la misma, de igual manera existen 1821 corrientes de orden 2, 420 corrientes de orden 3, 96 corrientes de orden 4, 23 corrientes de orden 5 y 4 corrientes de orden 6 la mayoría localizadas en la cuenca alta. Es importante mencionar que esta clasificación se realizó teniendo en cuenta la información de la red de drenaje proporcionada a través del procesamiento de imágenes de satélite en la cuenca alta y la información cartográfica del IGAC en las cuencas media y baja, sin embargo, debe ser validada con otras fuentes ya que en algunos sectores de la cuenca alta la presencia de nubes impidió la caracterización de la red de drenaje y dichos sectores coinciden con los blancos de información que tiene el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

En la Tabla No. 3 y Tabla No. 4 se ilustran las principales subcuencas que tributan al río Sinú en la parte alta, media y baja de la cuenca como también las tributarias al embalse Urrá, con sus principales características.

Dentro de las subcuencas que presentan mayor extensión están las del río Verde y Esmeralda en la parte alta, y la del caño Betancí, el Vidrial y caño Aguas Prietas en la parte media y baja.

La columna que muestra (longitud red de drenaje) es el resultado de la sumatoria de la longitud de todas las corrientes existentes en cada subcuenca en Km. Entre las que presentan mayor longitud de red de drenaje se encuentra la del río Verde, Esmeralda, caño Betancí, caño el Vidrial y caño Aguas Prietas.

La densidad de drenaje permite tener un conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la subcuenca. Este valor se calcula dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca (longitud red de drenaje) por el área total que las contiene y es el parámetro que sirve para identificar entre otras las áreas de producción de agua y las zonas con susceptibilidad de ser sujetas a remoción en masa.

A fin de catalogar una subcuenca como bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje; se puede considerar que valores próximos a  $0.5 \text{ Km/Km}^2$  corresponden a una cuenca pobremente drenada mientras que valores de  $3.5 \text{ Km/Km}^2$  o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje (Jiménez, 1986).

Por tal motivo se puede afirmar que el sistema de drenaje de las subcuencas del Sinú, presentan una eficiencia de mediana a pobre por presentar valores bajos.

Como es el caso de la cuenca del río Manso y la del caño Betanci que presentan valores de  $0.89 \text{ Km/Km}^2$  y  $0.87 \text{ Km/Km}^2$  respectivamente.

La subcuenca del río Nain es la que presenta el mayor valor de densidad de drenaje con  $1.93 \text{ Km/Km}^2$ , el cual es un valor aceptable para evaluar una subcuenca en el sistema de drenaje.

El factor de forma nos permite saber que tan achatada es o no la subcuenca, este factor resulta del dividir el área de la subcuenca por la longitud medida desde el punto más alejado de ella hasta la salida, elevada al cuadrado.

Valores del factor de forma superiores a la unidad, indican el grado de achatamiento de ella o un cauce principal corto y por consecuencia tienen tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando avenidas torrenciales.

Como se puede apreciar en las subcuencas del río Sinú el factor de forma es inferior a la unidad en todos los casos. El mayor valor es de 0.86 y lo presenta la subcuenca de la quebrada Tucura y el mínimo es de 0.16 del caño aguas prietas. Es por eso que se puede asegurar que las subcuencas del Sinú presentan una forma alargada y salvo en casos como el de la quebrada Tucura se originan crecientes repentinas.

El coeficiente de compacidad (adimensional), compara la forma de la subcuenca a la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma superficie de la subcuenca en estudio.

Tiene por definición un valor de 1 para subcuencas imaginarias de forma exactamente circular. El grado de aproximación de éste índice a la unidad indica la tendencia de la subcuenca a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento.

Los valores obtenidos en las subcuencas del Sinú muestran que la mayoría presentan una tendencia no tan marcada a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento.

El índice de alargamiento relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca medida en el sentido del río principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente.

Cuando este índice toma valores mucho mayores a la unidad, se trata de subcuencas alargadas mientras que para valores cercanos a 1 se trata de una subcuenca cuya red de drenaje presenta la forma de abanico y puede tenerse un río principal corto.

En las subcuencas del Sinú se presentan los dos casos, ya que hay valores altos como el del caño el Tigre, río Verde y río Esmeralda y valores relativamente bajos como el de la quebrada Cruz Grande, quebrada Tucura, río Naín y quebrada Urrá.

**Tabla No. 3 Principales subcuencas de la cuenca del río Sinú**

	<b>Nombre del Cuerpo de agua</b>	<b>Localización</b>	<b>Número de Orden</b>	<b>Cota de Nacimiento (m.s.n.m)</b>	<b>Cota de Entrega (m.s.n.m)</b>	<b>Municipio en que Nace</b>	<b>Municipio en que Termina la Corriente</b>	<b>Cuerpo de Agua al que Entrega</b>
Cuencas tributarias de la parte alta	Río Verde	Cuenca Alta	5	2200	200	Ituango Antioquia	Tierralta Córdoba	Embalse Urrá
	Río Esmeralda	Cuenca Alta	6	3000	200	Ituango Antioquia	Tierralta Córdoba	Río Sinú
	Río Manso	Cuenca Alta	5	1100	200	Tierralta Córdoba	Tierralta Córdoba	Río Sinú
	Qda. Cruz Grande	Cuenca Alta	5	1100	200	Tierralta Córdoba	Tierralta Córdoba	Río Sinú
Cuencas tributarias del embalse Urrá	Qda. Urrá	Cuenca Alta	4	1100	200	Tierralta Córdoba	Tierralta Córdoba	Embalse Urrá
	Río Nain	Cuenca Alta	4	1000	200	Tierralta Córdoba	Tierralta Córdoba	Embalse Urrá
	Qda. Tucura	Cuenca Alta	5	900	200	Tierralta Córdoba	Tierralta Córdoba	Embalse Urrá
Cuencas tributarias de la parte media y baja	Qda. Pirú	Cuenca Alta	5	400	50	Valencia Córdoba	Valencia Córdoba	Río Sinú
	Caño Betancí	Cuenca Media	5	-	-	Tierralta Córdoba	Montería Córdoba	Río Sinú
	Caño el Vidrial	Cuenca Media	6	50	20	Montería Córdoba	San Pelayo Córdoba	Río Sinú
	Caño el Tigre	Cuenca Baja	5	100	20	Lorica Córdoba	Lorica Córdoba	Río Sinú
	Caño Aguas Prietas	Cuenca Baja	6	50	20	Montería Córdoba	Lorica Córdoba	Río Sinú



Tabla No. 4 Parámetros de forma de las subcuencas del río Sinú

	Nombre del Cuerpo de agua	Área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )	Longitud del cauce (Km)	Longitud Red de drenaje (Km)	Perímetro (Km)	Densidad de Drenaje (Km/Km <sup>2</sup> )	Factor de Forma	Coeficiente de compacidad	Índice de Alargamiento
Cuencas tributarias de la parte alta	Río Verde	1084,7	145,6	1783,2	197,20	1,64	0,24	1,68	4,07
	Río Esmeralda	1043,8	114,2	1957,7	210,00	1,88	0,19	1,82	4,08
	Río Manso	600,4	78,4	533,5	184,50	0,89	0,26	2,11	3,93
	Qda. Cruz Grande	197,4	26,6	253,1	65,20	1,28	0,47	1,30	1,57
Cuencas tributarias del embalse Urrá	Qda. Urrá	39,0	15,1	62,2	33,60	1,59	0,38	1,51	1,96
	Río Nain	131,9	31,4	254,8	55,00	1,93	0,39	1,34	1,96
	Qda. Tucura	237,1	33,0	286,0	66,30	1,21	0,86	1,21	1,95
Cuencas tributarias de la parte media y baja	Qda. Pirú	245,0	47,6	357,8	88,40	1,46	0,37	1,58	1,36
	Caño Betancí	1865,9	-	1624,6	228,00	0,87	0,64	1,48	-
	Caño el Vidrial	1121,0	67,6	1632,4	207,00	1,46	0,22	1,73	2,19
	Caño el Tigre	131,9	42,0	147,1	70,00	1,12	0,20	1,71	5,75
	Caño Aguas Prietas	2059,3	65,3	2601,4	341,80	1,26	0,16	2,11	3,79

#### 6.4.1.2 *Inventario de Ciénagas y Cuerpos de Agua*

En la Tabla No. 5 se presenta un inventario de los principales cuerpos de agua existentes en la cuenca del río Sinú; con sus respectivas áreas (espejo de agua) en invierno y verano.

Las áreas en épocas de verano fueron obtenidas directamente de la interpretación y procesamiento de las imágenes de satélite, para la determinación de las áreas de espejo de agua en épocas de invierno se tuvo en cuenta las áreas de verano más las áreas de vegetación de ciénaga aledañas a los cuerpos de agua que generalmente tienden a inundarse en invierno. Sin embargo, es necesario hacer un análisis multitemporal con imágenes tomadas en invierno que permitan obtener resultados para las épocas de invierno y de esta manera establecer los máximos niveles de estos cuerpos de agua.

**Tabla No. 5 Inventario de cuerpos de agua existentes en la cuenca del río Sinú**

Nombre del Cuerpo de Agua	Área en Verano (Ha)	Área en Invierno (Ha)
Cga. Grande del Bajo Sinú	11076,7	16828,2
Cga. de Betancí	1605,6	2382,8
Cga. Buena Parte	58,4	
Cga. Caiman	69,0	109,9
Cga. Ciénaga del Sinú	44,0	
Cga. Chambú	52,2	72,2
Cga. Charco Grande	984,2	1186,4
Cga. Corralito	89,4	259,8
Cga. Culebra	19,7	73,4
Cga. de Baño	113,2	
Cga. de Fumera	148,3	346,1
Cga. de los Mangones	38,3	
Cga. del Quemado	33,1	434,7
Cga. el Corozo	40,8	
Cga. el Garzal	77,8	
Cga. el Moro	8,0	206,3
Cga. El Vidrial	6,9	38,1
Cga. Hojea	1,8	54,1
Cga. La Hicotea	36,3	130,5
Cga. Los Galas	44,8	
Cga. Los Negros	65,6	271,0
Cga. Manuel Vicente	21,6	

Nombre del Cuerpo de Agua	Área en Verano (Ha)	Área en Invierno (Ha)
Cga. Navio	129,7	
Cga. Ostional	191,5	
Cga. Pepino	13,7	
Cga. Pozo Bonito	11,2	30,7
Cga. Redonda	115,3	1041,6
Cga. Remedía Pobres	77,1	
Cga. Sardina	3,8	38,9
Cga. Soledad	473,8	
Cga. Tumina	8,6	
Cgas. El Regalo	24,4	
Charco Hicotea	32,0	220,5
Charco Pescado	170,9	196,9
Pantano la Pena	5,0	48,1
Pantanos de Sanatu	32,2	92,8
Pozo Pantano Grande	4,4	140,5
Poza Cazuela	17,5	
Poza de Feroz	14,9	
Poza de Topacio	34,3	
Poza el Cangrejo	26,5	
Poza el Zarzal	8,7	128,7
Poza Garzalito	15,5	
Poza las Moras	12,2	
<b>Sumatoria de todas las áreas</b>	<b>16058,9</b>	<b>24332,2</b>

#### 6.4.1.3 Generación de Caudales Sintéticos

La base para la estimación de la oferta hídrica son los registros históricos de caudales medios mensuales en 10 estaciones hidrométricas que están ubicadas sobre el río Sinú. Estas se encuentran relacionadas en la Tabla No. 6

**Tabla No. 6 Estaciones hidrométricas utilizadas para la determinación de la oferta hídrica**

Código IDEAM	Longitud (m)	Latitud (m)	Elevación (m.s.n.m)	Nombre	Tipo	Municipio	Años de Registro	Fecha instalación	Fecha suspensión
1303701	765770	1379090	77.0	Angostura de Urrá	LG	Tierralta	44	Ago-59	
1304705	770221	1383730	65.0	Pasacaballos	LG	Tierralta	13	Jun-90	
1303704	777446	1394853	55.0	Carrizola	LM	Tierralta	13	Jun-90	
1304703	780983	1397664	50.0	Tierralta	LM	Valencia	13	Jun-90	
1305701	790582	1432137	20.0	Nueva Colombia	LM	Montería	13	Jun-90	
1306702	800263	1460062	17.0	Montería	LG	Montería	40	Feb-63	
1307701	805455	1491098	8.0	Sabana Nueva	LM	San Pelayo	40	Feb-63	
1307703	808661	1509140	6.0	La Palma	LM	Lorica	50	Jun-53	
1307706	806904	1512223	5.0	Cotoca	LG	Lorica	33	Feb-70	
1307704	800559	1519632	4.0	La Doctrina	LM	Lorica	40	Feb-63	

Los registros históricos para éstas estaciones no están completos en ciertos periodos y fue necesario completarlos por medio de regresiones numéricas con otras estaciones que si poseen registros para los mismos periodos.

El primer paso fue generar una matriz de correlación, la cual indica cuales estaciones tienen un alto grado de relación entre ellas para la variable en cuestión (caudal medio mensual). Esto se cuantifica con el coeficiente de correlación y este valor oscila entre 0 (nada de correlación) y 1.0 (correlación óptima). En la Tabla No. 7 se muestran los coeficientes. Los números en negrilla indican cuales estaciones fueron completadas por pares (i.e. para completar los registros de Pasacaballos se utilizaron los de Montería).

**Tabla No. 7 Matriz de correlación de las estaciones hidrométricas utilizadas para la determinación de la oferta hídrica**

	Angostura	Pasacaballos	Carrizola	Tierralta	Nueva Colombia	Montería	Sabana Nueva	Palma central	Cotoca Abajo	La Doctrina
Angostura	1	0.929	0.794	0.886	0.893	<b>0.938</b>	0.920	0.933	0.868	0.881
Pasacaballos	0.929	1	0.761	0.886	0.838	0.925	0.837	0.892	0.855	0.836
Carrizola	0.794	0.761	1	0.787	0.685	0.795	0.778	0.768	0.741	0.762
Tierralta	0.886	0.886	0.787	1	0.862	0.894	0.852	0.870	0.820	0.830
Nueva Colombia	0.893	0.838	0.685	0.862	1	0.920	0.845	0.893	0.829	0.838
Montería	0.938	<b>0.925</b>	<b>0.795</b>	<b>0.894</b>	<b>0.920</b>	1	<b>0.940</b>	0.963	0.931	<b>0.919</b>
Sabana Nueva	0.920	0.837	0.778	0.852	0.845	0.940	1	0.932	0.914	0.909
Palma central	0.933	0.892	0.768	0.870	0.893	<b>0.963</b>	0.932	1	0.989	0.979
Cotoca Abajo	0.868	0.855	0.741	0.820	0.829	0.931	<b>0.914</b>	<b>0.989</b>	1	<b>0.974</b>
La Doctrina	0.881	0.836	0.762	0.830	0.838	0.919	0.909	0.979	0.974	1

Como se puede apreciar todos los pares de estaciones correlacionados para efectuar la regresión presentan valores altos del coeficiente de correlación (excepto el par Carrizola – Montería). De esta forma se llevaron a cabo las regresiones para completar los registros de caudal medio mensual faltante. Las ecuaciones de regresión obtenidas son las siguientes:

$$Pasacaballos = \left( \frac{Monteria}{1.6072} \right)^{\frac{1}{1.9172}}$$

$$Pasacaballos = \left( \frac{Monteria}{1.6072} \right)^{\frac{1}{1.9172}}$$

$$Carrizola = \left( \frac{Monteria}{0.3348} \right)^{\frac{1}{1.167}}$$

$$Tierralta = \left( \frac{Monteria}{1.8046} \right)^{\frac{1}{0.8989}}$$

$$Nueva Colombia = \left( \frac{Monteria}{22.614} \right)^{\frac{1}{0.5287}} \text{ de 1999 en adelante}$$

$$Monteria = \begin{cases} \left( \frac{Angostura}{1.7689} \right)^{\frac{1}{0.8854}} & \text{de 1991 hacia atras} \\ \left( \frac{Palma Central}{0.9792} \right)^{\frac{1}{1.007}} & \text{de 1991 hacia adelante} \end{cases}$$

$$Sabana Nueva = \frac{\left( \frac{Monteria}{1.1491} \right)^{\frac{1}{0.9791}} + \left( \frac{Cotoca}{1.0361} \right)^{\frac{1}{1.007}}}{2}$$

(Se hace por medio de dos estaciones debido a que el periodo a completar es bastante extenso y de esta forma el análisis es más consistente)

$$Palma\ Central = \left( \frac{Cotoca}{0.933} \right)^{\frac{1}{1.0289}}$$

$$La\ Doctrina = \frac{\frac{Cotoca + 21.505}{1.0865} + \frac{Monteria - 26.61}{0.898}}{2}$$

$$Lorica = \begin{cases} \left( \frac{Cotoca}{30.288} \right)^{\frac{1}{0.5782}} & \text{de 1997 hacia atras} \\ \left( \frac{Cotoca}{61.981} \right)^{\frac{1}{0.5252}} & \text{de 1997 hacia adelante} \end{cases}$$

Las tablas obtenidas de este análisis se muestran en el Anexo 1.

#### 6.4.1.4 Determinación de Rendimiento Hídrico y Oferta Hídrica

Para determinar la oferta hídrica se planteó una metodología indirecta de estimación de caudales de las cuencas afluentes del río Sinú. Para ello el primer paso consistió en delimitar las subcuencas de drenaje parciales cuyo punto de vertimiento son las estaciones relacionadas en la Tabla No. 6. Para todas estas cuencas se determinó rendimiento hídrico medio mensual (ver Tabla No. 8)

$$R = 1000 \frac{Q}{A}$$

donde

$R$  = rendimiento hídrico medio mensual (l/s/km<sup>2</sup>)  
 $Q$  = caudal medio mensual (estimado de la serie de caudales sintéticos generada (m<sup>3</sup>/s).  
 $A$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

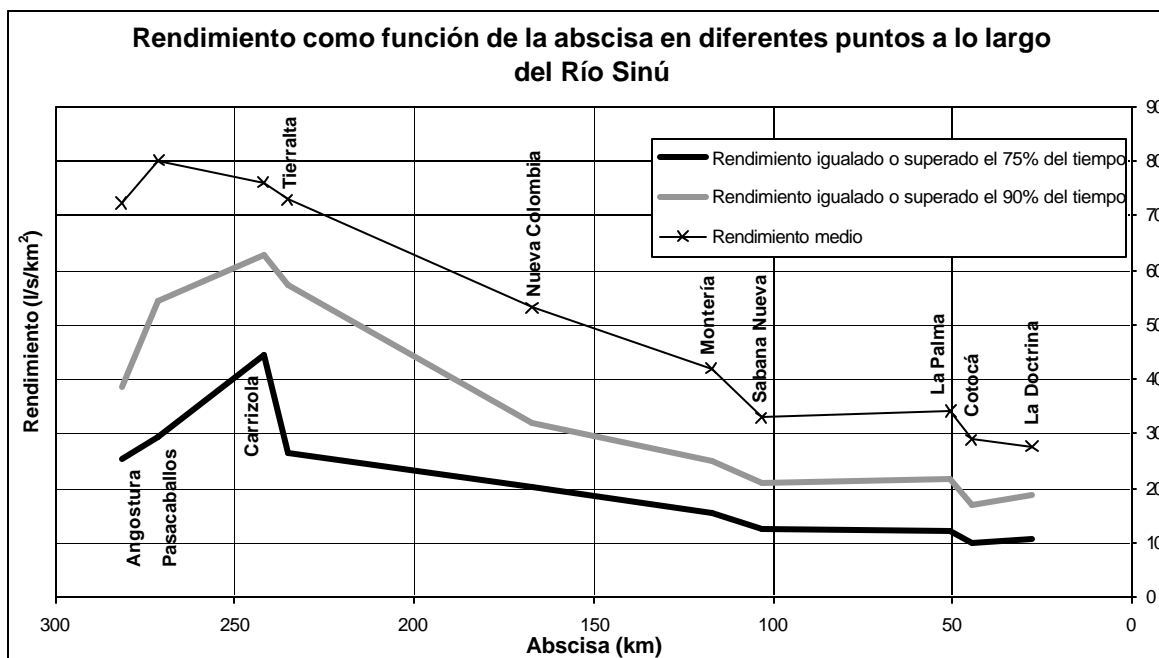
**Tabla No. 8 Caudal y rendimiento hídrico medio mensual en las estaciones hidrométricas sobre el río Sinú**

Estación	Abscisa (km)	Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s)	Área propia (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	Rendimiento hídrico medio mensual (km <sup>2</sup> )
Angostura	281.4	339.4	4691.5	4691.5	72.3
Pasacaballos	271.1	378.2	37.4	4728.9	80.0
Carrizola	241.9	399.2	516.2	5245.1	76.1
Tierralta	235.5	384.5	29.1	5274.2	72.9
Nueva Colombia	167	341.7	1181.5	6455.7	52.9
Montería	117.3	376.6	2512.7	8968.4	42.0
Sabana Nueva	103.3	345.7	1544.7	10513.1	32.9
La Palma	50.3	364.3	188.4	10701.4	34.0
Cotoca	44.7	389.8	2758.4	13459.8	29.0
La Doctrina	27.6	382.6	443.3	13903.1	27.5

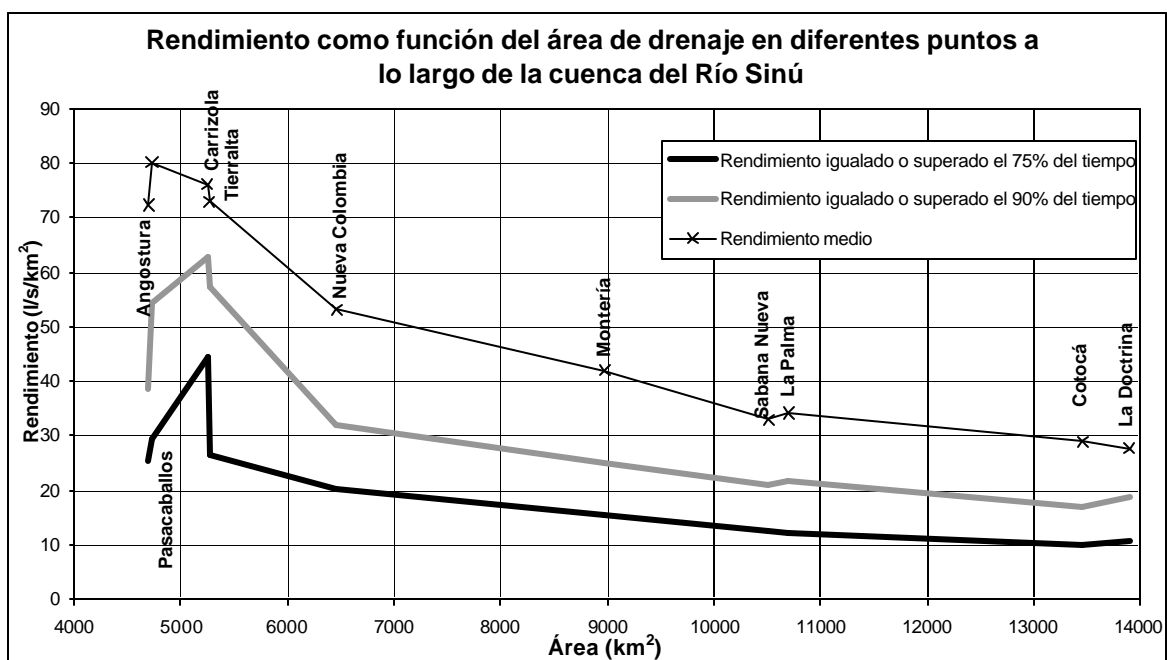
Por otro lado se estimó para cada estación la curva de duración de caudal mensual. Esta curva está basada en el histograma de frecuencias de caudal medio mensual. La curva da como resultado la probabilidad en el tiempo de que un cierto caudal sea igualado o excedido. De igual forma se estimó la curva de duración de rendimiento hídrico y su interpretación es análoga a la de caudal. Ver Anexo 2.

Igualmente se determinó para cada estación con base en las anteriores curvas el rendimiento hídrico correspondiente al 75% y 90% del tiempo. Para ambos casos se observa que en el sitio de Urrá el valor para el rendimiento hídrico es de 25.6 l/s/km<sup>2</sup> y 38.4 l/s/km<sup>2</sup> respectivamente. A medida que se desciende hacia las estaciones de Pasacaballos y Carrizola el rendimiento hídrico se incrementa hasta 44.2 l/s/km<sup>2</sup> y 62.6 l/s/km<sup>2</sup> en esta última. Posteriormente se presenta un descenso abrupto en Tierralta (26.4 y 57.1 l/s/km<sup>2</sup>) y finalmente un descenso gradual desde este punto hasta La Doctrina en donde el valor estimado fue de 10.9 y 18.7 respectivamente. Estos resultados se pueden apreciar en la Figura No. 1 y Figura No.2

**Figura No. 1 Rendimiento hídrico como función de la abscisa sobre puntos localizados en el río Sinú**



**Figura No. 2 Rendimiento hídrico como función del área de drenaje para puntos localizados sobre el río Sinú**

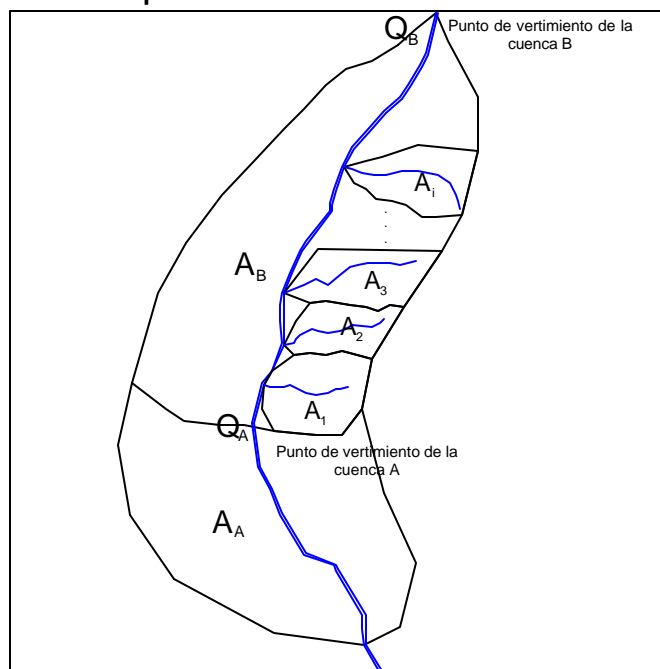




El ascenso en rendimiento hídrico hasta el sitio de Carrizola se puede explicar si se tiene en cuenta que hasta este punto el río Sinú viene recogiendo todos los aportes de las corrientes que drenan desde la Serranía de Abibe por la margen izquierda y de la Serranía de San Jerónimo por la derecha. Más aún, en el tramo Urrá – Carrizola, se reciben los aportes directos del Cerro de Murrucucú, el cual tiene su cima a tan solo 15 km del río Sinú y presenta alturas hasta de 1000 m.s.n.m. Por esta razón el pico de rendimiento hídrico se encuentra en este tramo del río. De este punto en adelante la topografía de la cuenca es bastante plana y de ahí que su rendimiento hídrico disminuya de forma gradual hasta el sitio de La Doctrina. Este hecho confirma que en la parte media y baja de la cuenca no existe ningún tributario de importancia que modifique estas condiciones de rendimiento hídrico.

La oferta hídrica fue determinada con base en las curvas de rendimiento hídrico de cada estación, de las cuales se extrajo el valor que se iguala o supera el 75% del tiempo (ver Figura No.1). Se planteó una metodología indirecta para hallar el caudal aportado por las quebradas que tributan al río Sinú. Se estableció una ponderación de rendimiento hídrico con respecto al área de drenaje y de esta forma se halla el caudal de un área que se encuentre ubicada entre dos puntos con caudal conocido. El procedimiento se ilustra en la Figura No. 3.

**Figura No. 3 Esquema explicativo para el cálculo de la oferta hídrica en una subcuenca (i) a partir de dos puntos de rendimiento hídrico conocido. (A y B)**



Las ecuaciones que se plantearon son:

$$R_i = R_A + \frac{(R_A - R_B) \sum_1^i A_i}{A_A - A_B}$$

$$Q_i = R_i A_i$$

donde

- $R_A$  = Rendimiento hídrico conocido en el punto A de la cuenca (l/s/km<sup>2</sup>)  
 $R_B$  = Rendimiento hídrico conocido en el punto B de la cuenca (l/s/km<sup>2</sup>)  
 $A_A$  = Área de la cuenca de drenaje acumulada hasta el punto A (km<sup>2</sup>)  
 $A_B$  = Área de la cuenca de drenaje acumulada hasta el punto B (km<sup>2</sup>)  
 $A_i$  = Área de la microcuenca de drenaje ubicada entre dos puntos de caudal conocido (km<sup>2</sup>)  
 $R_i$  = Rendimiento hídrico de la microcuenca de drenaje ubicada entre dos puntos de caudal conocido (l/s/km<sup>2</sup>)  
 $Q_i$  = Caudal aportado por la microcuenca de drenaje ubicada entre dos puntos de caudal conocido (l/s/km<sup>2</sup>)

De esta forma se obtiene el caudal aportado por lo menos el 75% del tiempo por todas las corrientes afluentes del río Sinú tanto por margen izquierda como por derecha (ver Tabla No. 9)

*De los resultados se concluye que aproximadamente el 75% de la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Sinú se produce en el área del Parque Nacional Natural Paramillo y el restante 25% aguas abajo de la presa de Urrá.*

**Tabla No.9 Oferta hídrica que se garantiza el 75% del tiempo en las microcuencas del río Sinú**

	ESTACION	Area acum Km <sup>2</sup>	Area parcial Km <sup>2</sup>	Rend. (l/s/Km <sup>2</sup> )	Nombre Subcuenca	M Izquierda Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca (m <sup>3</sup> /s)	Nombre Subcuenca	M Derecha Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca m <sup>3</sup> /s	Area escorrentía directa al río (Km <sup>2</sup> )	Q Escorrentía directa al río (m <sup>3</sup> /s)												
1	Angostura	4691.48	25.6																									
			37.43	3.51													37.4	1.09										
2	Pasacaballos	4728.91	29.1																									
			516.24	15.15													Qda Piru	250	7.34	36.43	9.11	Qda Tay	71.6	2.10	31.19	2.23	130.6	5.78
																					nn San Clemente - Tierralta	54.3	3.70	32.79	2.60			
3	Carrizola	5245.15	44.2																									
			29.07	-17.86													29.1	0.77										
4	Tierralta	5274.21	26.4																									
			1181.45	-6.27													Qda Peña	52.4	-0.28	26.10	1.37	Qda Juy	152.5	-0.81	25.57	3.90	239.5	4.82
																	Qda Aguas Prietas	210.3	-1.40	24.99	5.25	Ay Los Serapios	42.6	-1.04	25.35	1.08		
																	Qda Los Pescados	270.1	-2.83	23.55	6.36							
																	Qda Mata Moros	96.6	-3.34	23.04	2.23							
																	Qda Machena	40.3	-3.56	22.83	0.92							
															Qda El Cucharro	61.7	-3.88	22.50	1.39									

	ESTACION	Area acum Km <sup>2</sup>	Area parcial Km <sup>2</sup>	Rend. (l/s/Km <sup>2</sup> )	Nombre Subcuenca	M Izquierda Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca (m <sup>3</sup> /s)	Nombre Subcuenca	M Derecha Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca m <sup>3</sup> /s	Area escorrentia directa al río (Km <sup>2</sup> )	Q Escorrentia directa al río (m <sup>3</sup> /s)
5	Nueva Colombia	6455.67	20.1												435.3	6.54
										Qda Arroyon	389.5	-0.72	19.39	7.55		
						Qda El Neque	57.2	-0.82	19.29	1.10						
							Qda Betanci	206.1	-1.20	18.91	3.90					
							Ay Lomitas	68	-1.33	18.78	1.28					
							Qda Las Florez	376.1	-2.02	18.09	6.80					
							Ay Corrental	144.4	-2.29	17.82	2.57					
							Ay Vijagual	180	-2.62	17.49	3.15					
							Ay Leon	58.3	-2.72	17.38	1.01					
							Ay Vueltozo	120.4	-2.95	17.16	2.07					
							Ay Los Pegados	72.5	-3.08	17.03	1.23					
							Ay Esteban	20.7	-3.12	16.99	0.35					
							Ay San Jeronimo	87.4	-3.28	16.83	1.47					
							Ay Alemania	19.4	-3.31	16.79	0.33					
							Caño Sierrachiquita	16	-3.34	16.76	0.27					
6	Monteria	9215.41		15.0											513.2	6.26
			1544.68	-2.83	Qda Florisanto	58.5	-0.11	14.92	0.87							
					Qda Caña Flecha	162	-0.40	14.62	2.37							
					Qda La Honda	112.5	-0.61	14.42	1.62							
					Qda Morrocoyera	39.6	-0.68	14.34	0.57							
					Qda San Rafael	42.6	-0.76	14.26	0.61							

	ESTACION	Area acum Km <sup>2</sup>	Area parcial Km <sup>2</sup>	Rend. (l/s/Km <sup>2</sup> )	Nombre Subcuenca	M Izquierda Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca (m <sup>3</sup> /s)	Nombre Subcuenca	M Derecha Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca m <sup>3</sup> /s	Area escorrentia directa al río (Km <sup>2</sup> )	Q Escorrentia directa al río (m <sup>3</sup> /s)
	Monteria				Qda Monaflaca	9.4	-0.78	14.25	0.13							
		Qda Saltillo			41.5	-0.86	14.17	0.59								
		Qda La Mora			41	-0.93	14.10	0.58								
		Qda El Limon			73.4	-1.06	13.96	1.02								
		Qda Cauchera			32.6	-1.12	13.90	0.45								
		Qda Aguas Blancas			94.4	-1.30	13.73	1.30								
		Qda Sincelejito			18.2	-1.33	13.70	0.25								
		Ay El Coco			50.4	-1.42	13.60	0.69								
		Ay El Barroso			79.6	-1.57	13.46	1.07								
		Ay El Diluvio			24.5	-1.61	13.41	0.33								
		Brazo Cañaveral			98	-1.79	13.23	1.30								
7	Sabana Nueva	10760.08	12.2												84	1.00
			188.35	-0.33	Caño Arenosa	103.4	-0.18	12.01	1.24							
8	Palma central	10948.44		11.87											1202.5	11.87
			2511.34	-2.00						Ay Trementino Alto	235.6	-0.19	11.68	2.75		
										Ay Algarrobillo	11.3	-0.20	11.67	0.13		
										Ay Grande	135	-0.30	11.56	1.56		
										Ay La Palma	20.2	-0.32	11.55	0.23		
										Ay Tunucuna	15.3	-0.33	11.54	0.18		

	ESTACION	Area acum Km <sup>2</sup>	Area parcial Km <sup>2</sup>	Rend. (l/s/Km <sup>2</sup> )	Nombre Subcuenca	M Izquierda Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca (m <sup>3</sup> /s)	Nombre Subcuenca	M Derecha Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca m <sup>3</sup> /s	Area escorrentia directa al río (Km <sup>2</sup> )	Q Escorrentia directa al río (m <sup>3</sup> /s)					
										Ay La Burra	36.9	-0.36	11.51	0.42							
	Palma central									Ay Correntoso	20.8	-0.38	11.49	0.24							
						Ay Torrente	18.7	-0.39	11.47	0.21											
						Ay Venado	192.5	-0.55	11.32	2.18											
						Ay Arena	38.3	-0.58	11.29	0.43											
						Ay El Bobo	20.2	-0.59	11.28	0.23											
						Ay Chupachupa	23.5	-0.61	11.26	0.26											
						Ay Del Medio	276.3	-0.83	11.04	3.05											
						Ay Mocha	215.2	-1.00	10.87	2.34											
						Ay Guayacan	48.6	-1.04	10.83	0.53											
						Ay Los Palmitos	46.3	-1.08	10.79	0.50											
						Ay Mapurice	95.9	-1.15	10.71	1.03											
															Ay Jejen	47.5	-1.19	10.68	0.51		
										Ay Ahogaindio	16	-1.20	10.66	0.17							
										Ay Patico	61.7	-1.25	10.61	0.65							
										Ay Bocon	43.2	-1.29	10.58	0.46							
										Ay Bijao	24.1	-1.31	10.56	0.25							
										Ay El Gamboas	7.8	-1.31	10.55	0.08							
										Ay San Antonio	104	-1.39	10.47	1.09							
9	Cotoca Abajo	13459.78	9.9												115.4	1.26					
			443.33	1.01													Caño El Tigre	132	0.30	10.17	1.34
																	Ay La Vaina	34.5	0.38	10.25	0.35

	ESTACION	Area acum Km <sup>2</sup>	Area parcial Km <sup>2</sup>	Rend. (l/s/Km <sup>2</sup> )	Nombre Subcuenca	M Izquierda Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca (m <sup>3</sup> /s)	Nombre Subcuenca	M Derecha Area Parcial Km <sup>2</sup>	Δ Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Rend Subcuenca (l/s/Km <sup>2</sup> )	Q Subcuenca m <sup>3</sup> /s	Area escorrentía directa al río (Km <sup>2</sup> )	Q Escorrentía directa al río (m <sup>3</sup> /s)
	Cotoca Abajo				Caño El Retiro	156.7	0.73	10.61	1.66							
10	La Doctrina	13903.11		10.9												
					Caño Mochila	39.3			0.43	Ay Prieto	8.3			0.09	213	2.32
					Caño Correntoso	6			0.07	Ay Almagra	17.3			0.19		

#### *6.4.1.5 Análisis de Duración de Caudales Estación Angostura de Urrá*

Esta estación, instalada en Agosto de 1959, está ubicada en la actual área de inundación del Embalse de Urrá, en el municipio de Tierralta a una elevación de 77 m.s.n.m. Posee registros históricos de casi 40 años hasta su suspensión en Diciembre de 1998, meses antes de comenzar el llenado del embalse. A partir de esta fecha la Empresa Urrá S.A. E.S.P., ha venido registrando los caudales aguas abajo del embalse con base en tres diferentes procedencias: 1) caudal total turbinado de las 4 unidades de generación existentes, 2) caudal de la descarga de fondo y 3) caudal rebosado. Por medio de estos datos se genera una serie de caudales diarios, denominada serie de caudales “aguas abajo”. Con los datos históricos “antes de Urrá” y con la serie “aguas abajo” se realizó un análisis de duración de caudales diarios con el fin de comparar el comportamiento histórico del río en cuanto a caudales medios se refiere antes de la entrada en operación de la Central Hidroeléctrica de Urrá en Febrero de 2000 y después de esta fecha.

En primer lugar se elaboró el histograma de frecuencias de caudal diario con la serie “antes de Urrá” y después de Urrá con la serie “aguas abajo” para todo el rango de caudal (ver Figura No. 4).

La distribución de caudales medios diarios varía antes y después de Urrá. Antes de Urrá la media es de  $343 \text{ m}^3/\text{s}$  con desviación estándar de 203 y un coeficiente de asimetría de 1.01 indicando desplazamiento notable hacia la derecha, es decir hacia caudales altos. Después de Urrá la media desciende a  $328 \text{ m}^3/\text{s}$  con desviación estándar de 186 y un coeficiente de asimetría tan solo de 0.4, indicando desplazamiento también hacia caudales altos pero en mucho menor grado.

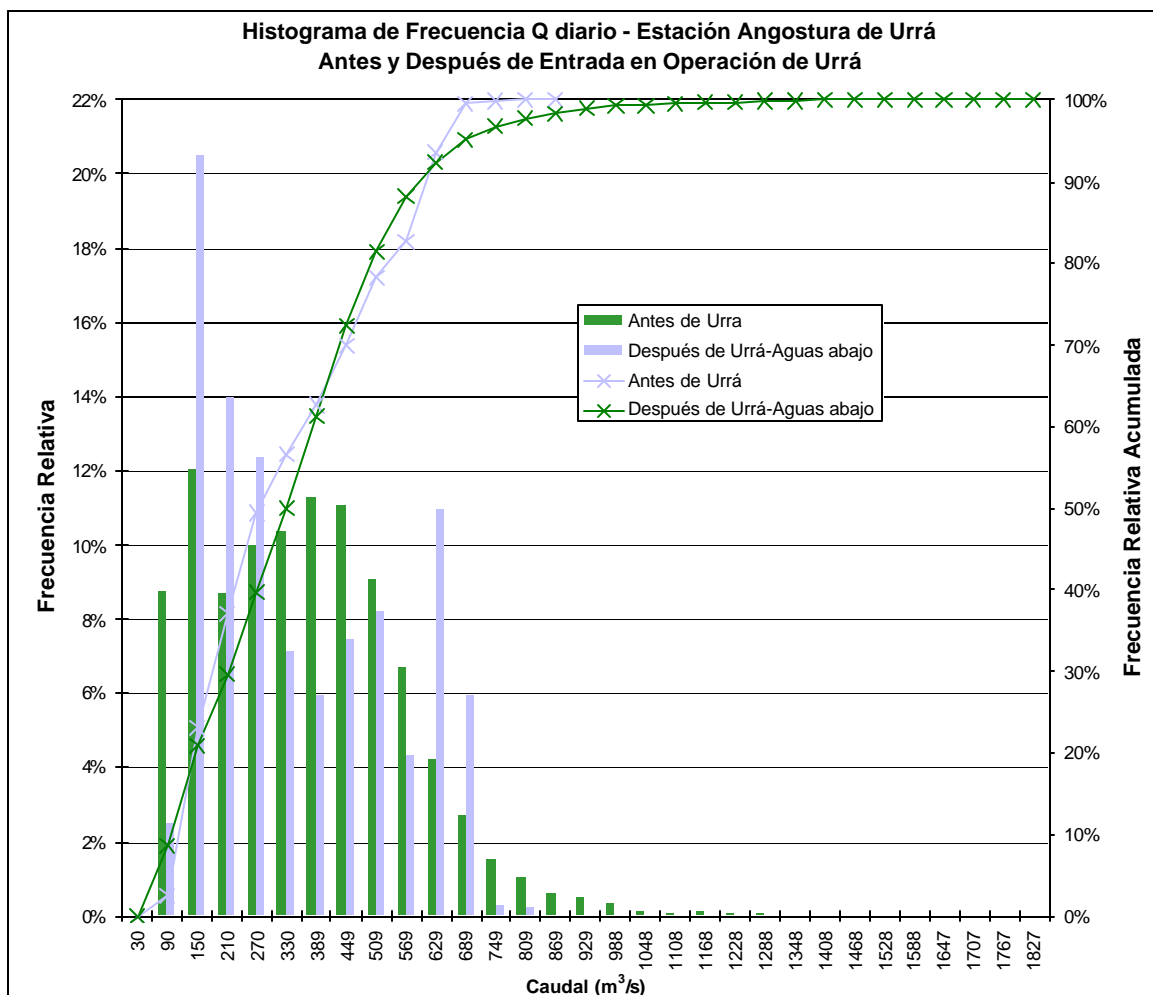
Lo que se aprecia es que antes de Urrá los caudales estaban distribuidos en un rango mucho mas amplio (hasta  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ ) con un fuerte peso hacia la cola de caudales extremos altos. Esto significa que los eventos extremos producidos por el río tendían a ser más eventos de caudal máximo y no mínimo. Por el contrario después de Urrá los caudales están más concentrados hacia la parte de la curva de caudales medios y sin ser tan marcada la cola de caudales altos.

Esto se ve reflejado en la curva de duración de caudal diario (ver Figura No. 5) en donde la curva antes de Urrá esta muy por encima de la después de Urrá en el rango de 0 a 10% (caudales altos) lo que implica que antes el río no estaba regulado dentro de este rango. Para el rango entre 10% y 40% (Q entre  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ) es la curva antes y después se comporta igual resultando indiferente

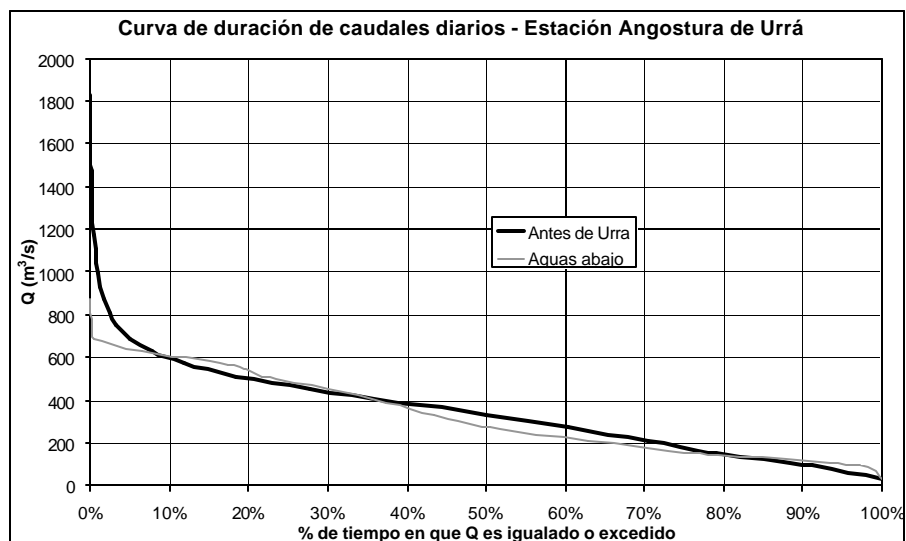


el análisis. Dentro del rango de 40% y 80% (Q entre 100 m<sup>3</sup>/s y 400 m<sup>3</sup>/s) la curva de antes de Urrá está un tanto por encima de la de después. Esto significa que para un caudal dado, este se mantenía durante más porcentaje de tiempo antes de Urrá que después.

**Figura No. 4 Histograma de frecuencia Q diario estación Angostura de Urrá**



**Figura No. 5 Curva de duración de caudales diarios estación Angostura de Urrá**



Con el fin de ser mas concluyente se dividió el rango de caudal en  $Q_{bajo}$  y  $Q_{alto}$  teniendo como criterio la media de la serie, si el caudal es menor que la media se clasifica como  $Q_{bajo}$ , de lo contrario se clasifica como  $Q_{alto}$ . Posteriormente se elaboró el histograma de frecuencias de caudal diario para rango de caudal bajo con la serie “antes de Urrá” y después de Urrá con la serie “aguas abajo” (ver Figura No.6).

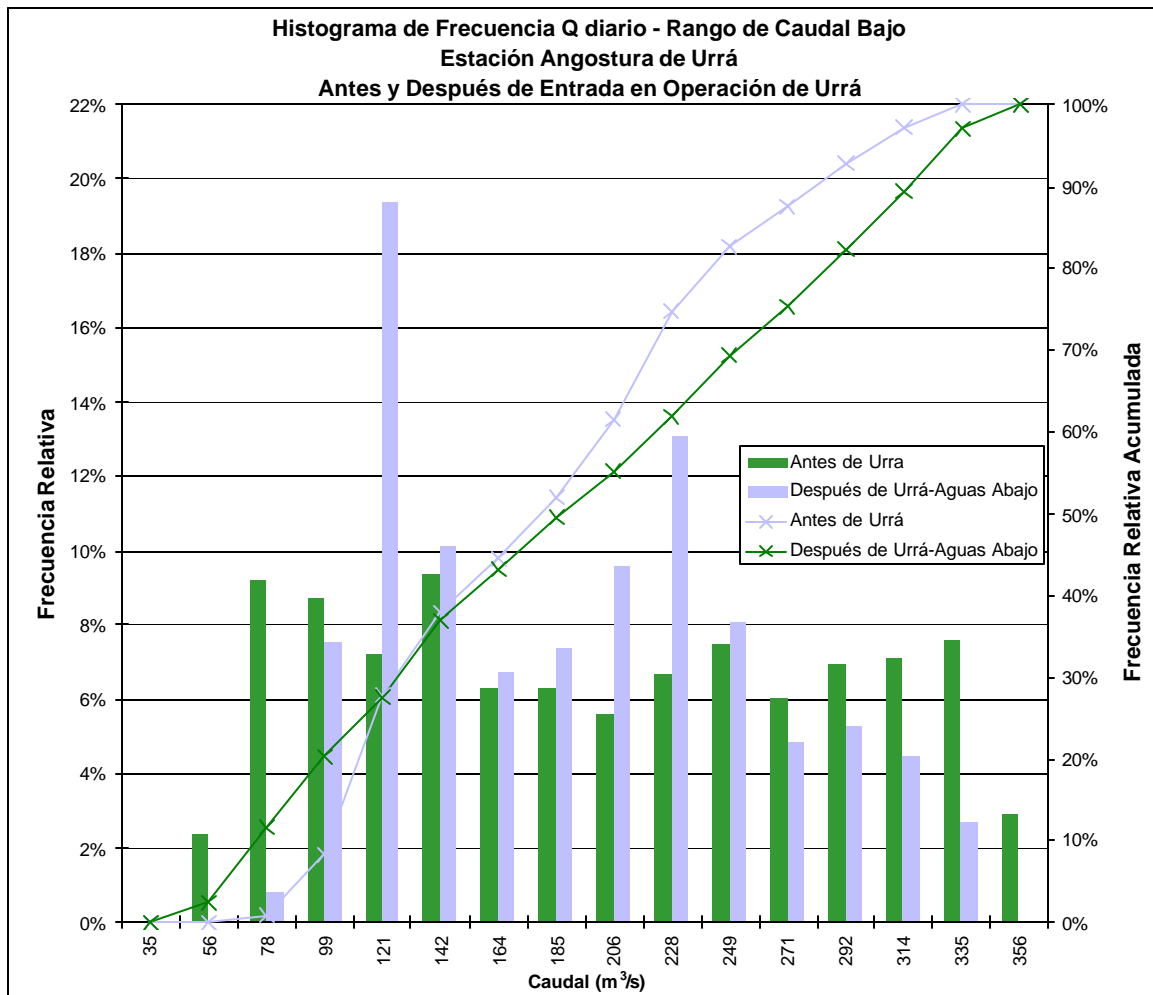
La distribución de caudales medios diarios (rango  $Q_{bajo}$ ) varía antes y después de Urrá. Antes de Urrá la media es de  $191 \text{ m}^3/\text{s}$  con desviación estándar de 88 y un coeficiente de asimetría de 0.09 indicando desplazamiento leve hacia la derecha, es decir hacia caudales medios. Después de Urrá la media desciende a  $181 \text{ m}^3/\text{s}$  con desviación estándar de 68 y un coeficiente de asimetría de 0.33, indicando desplazamiento también hacia caudales medios mas notable.

Lo que se observa es que antes de Urrá los caudales estaban distribuidos más uniformemente en el rango de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $355 \text{ m}^3/\text{s}$  con una tendencia muy leve hacia caudales medios. Por el contrario después de Urrá los caudales se encuentran mas concentrados entre  $99 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $249 \text{ m}^3/\text{s}$  de igual forma con una tendencia a caudal medio.

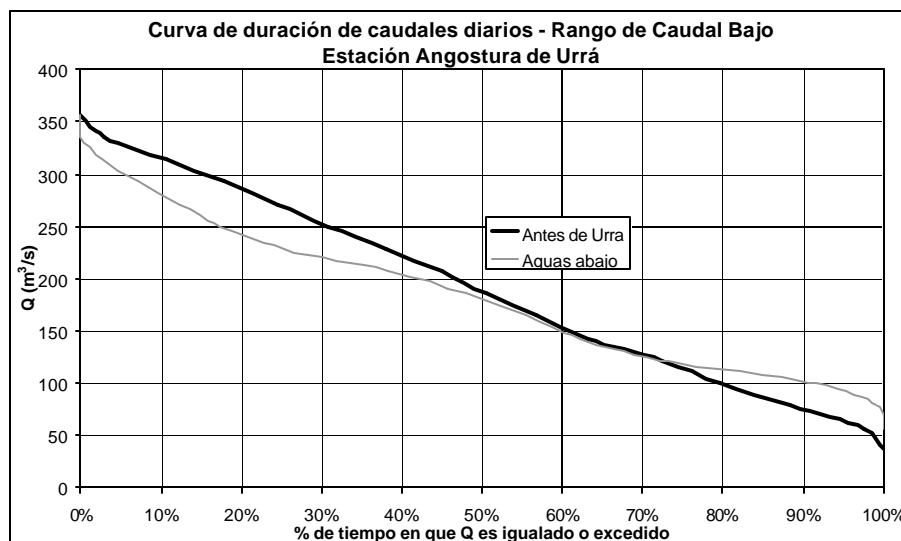
Esto se ve reflejado en la curva de duración de caudal diario (ver Figura No.7) en donde la curva de antes de Urrá esta muy por encima de la después de Urrá en el

rango de 0 a 60% (Q entre 150 m<sup>3</sup>/s y 350 m<sup>3</sup>/s) y se encuentra por debajo entre 70% y 100% (Q entre 80 m<sup>3</sup>/s y 130 m<sup>3</sup>/s). Esto implica que hay en general una regulación de caudales bajos después de Urrá.

**Figura No. 6 Histograma de frecuencia Q diario estación Angostura de Urrá**



**Figura No. 7 Curva de duración de caudales diarios estación Angostura de Urrá**



El histograma de frecuencias de caudal diario para rango de caudal alto con la serie “antes de Urrá” y después de Urrá con la serie “aguas abajo” se puede ver en la Figura No. 8.

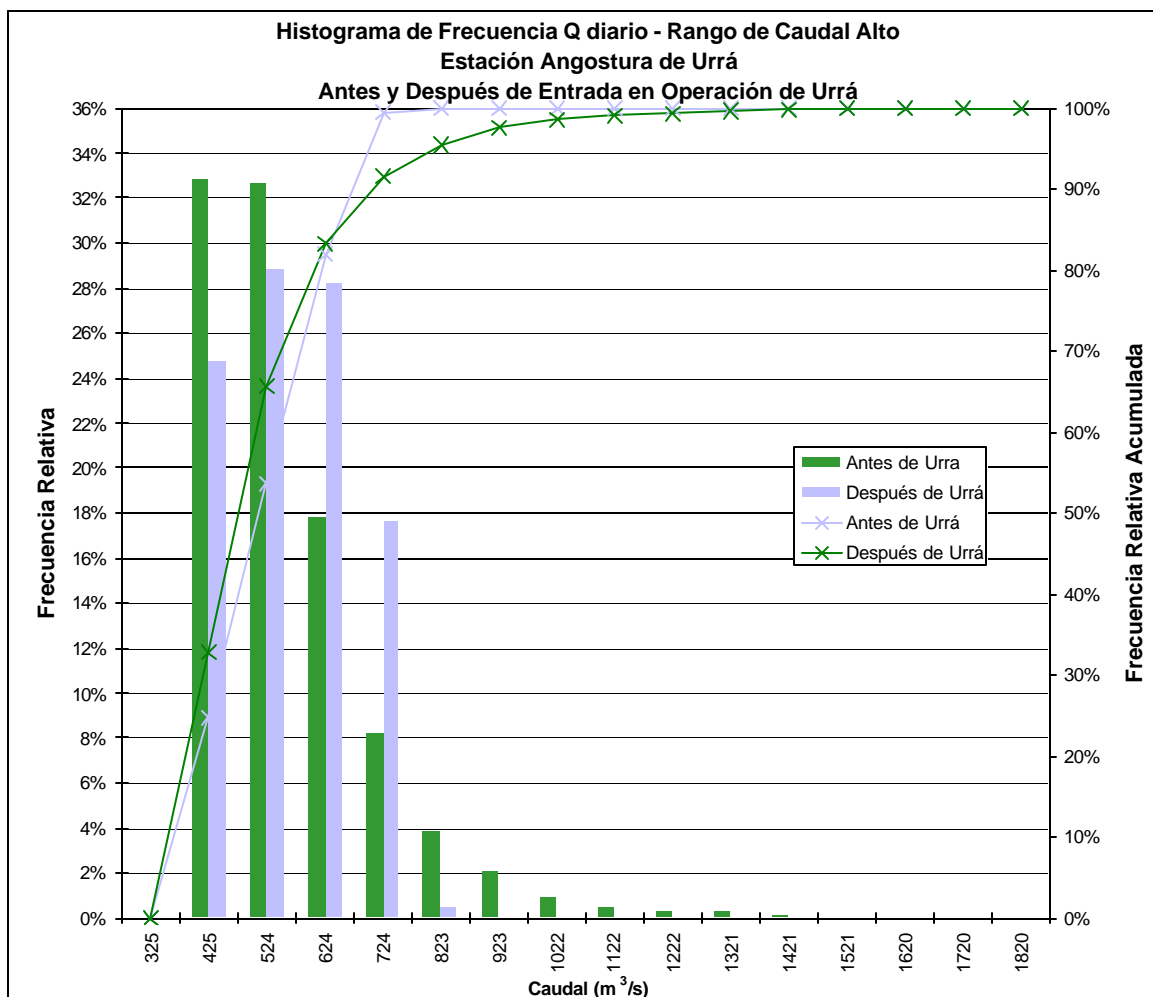
La distribución de caudales medios diarios (rango  $Q_{alto}$ ) varía antes y después de Urrá, aunque sorprendentemente la media tiene el mismo valor para ambas series,  $512 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lo que sí varía marcadamente es la desviación estándar, antes de Urrá era de 155 con un coeficiente de asimetría de 2.27 indicando un desplazamiento muy evidente hacia la derecha, es decir hacia caudales extremadamente altos. Después de Urrá, una desviación estándar de 102 y un coeficiente de asimetría de -0.08, indican un desplazamiento muy ligero hacia caudales medios.

Lo que se aprecia es que antes de Urrá los caudales estaban mal distribuidos en un rango muy amplio entre 400 y  $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ , como es de esperarse en el comportamiento natural de un río. Posterior a la operación de Urrá lo que se tiene es que la media se conserva pero concentrando los caudales en un rango mas limitado entre 400 y  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  con tendencia hacia caudales medios mostrando el efecto regulador que ha tenido el embalse.

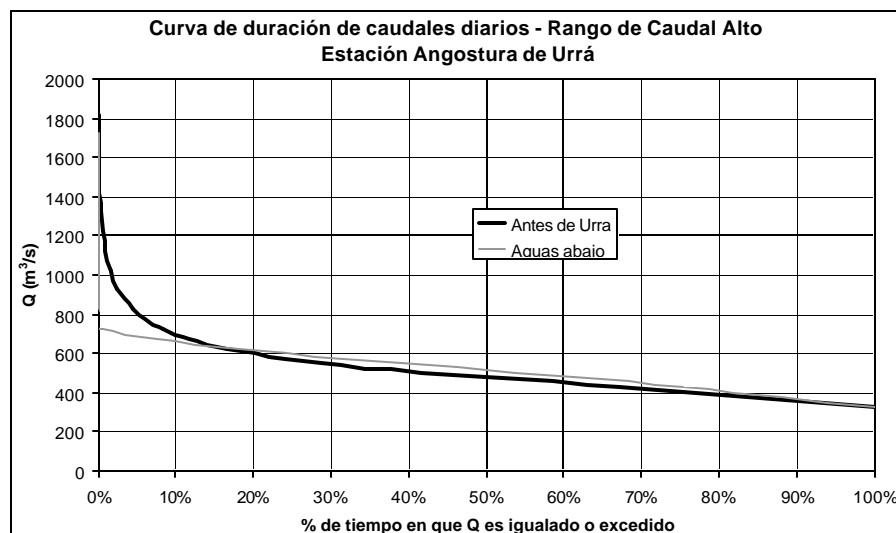
Esto se ve reflejado en la curva de duración de caudal diario (ver Figura No. 9) en la cual la curva después de Urrá claramente tiende a ser mas horizontal que antes

de Urrá. Esto implica que hay en general una regulación de caudales altos después de Urrá ya que para un rango de tiempo relativamente alto (entre 0% 80%) el caudal se mantiene en un rango mas estrecho entre 400 m<sup>3</sup>/s y 700 m<sup>3</sup>/s, cosa que no sucedía antes.

**Figura No. 8 Histograma de frecuencia Q diario estación Angostura de Urrá.**



**Figura No. 9 Curva de duración de caudales diarios estación Angostura de Urrá**



## 6.4.2 Análisis Estadístico

### 6.4.2.1 *Análisis de Frecuencia*

Los sistemas hidrológicos son afectados generalmente por eventos extremos tales como tormentas severas, crecientes y sequías. La magnitud de un evento extremo esta inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia. Es decir, eventos muy severos ocurren con menos frecuencia que eventos mas moderados. El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Se supone que la información hidrológica analizada es independiente y esta idénticamente distribuida, y el sistema que la produce (por ejemplo un sistema de tormenta) se considera estocástico, independiente del espacio y el tiempo.

### ***Periodo de Retorno***

Por definición, un evento extremo ocurre si su magnitud supera o excede un cierto valor determinado (i.e. el valor de la precipitación para una determinada área es mayor a 20 mm en menos de 24 h o el caudal de un río supera los 500 m<sup>3</sup>/s). El

*intervalo de recurrencia*  $\tau$  de dicho evento es el tiempo entre ocurrencias del evento en cuestión (Chow et al., 1994).

El *periodo de retorno*  $T$  de un evento es el promedio de los valores de  $\tau$  sobre un número de ocurrencias lo suficientemente grande.

De esta forma puede definirse el periodo de retorno de un evento hidrológico como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada.

Puede relacionarse directamente el periodo de retorno con la probabilidad de ocurrencia del evento hidrológico. La probabilidad  $p$  de ocurrencia de un evento en cualquier observación es el inverso de su periodo de retorno.

Así,

$$p = \frac{1}{T}$$

Esto es,

La probabilidad de que el evento se produzca en cualquier año es el inverso del periodo de retorno asociado a dicho evento (i.e. si el evento hidrológico es que en un río se superen los 500 m<sup>3</sup>/s y este evento tiene un periodo de retorno de 10 años, la probabilidad de que en cualquier año 500 m<sup>3</sup>/s sean superados o excedidos es de 1/10 = 0.1).

### ***Análisis de Frecuencia utilizando Posiciones de Graficación***

Para este análisis es necesario definir primero en que consisten las series de información hidrológica:

*Serie de duración completa:* esta compuesta por toda la información disponible a nivel mensual.

*Serie de duración parcial:* hace parte de la *serie de duración completa* pero de esta última se extraen los valores que sobrepasan un valor base predefinido. Generalmente este valor base se toma como el mínimo de la serie anual.

*Serie anual*: esta formada por los valores máximos anuales.

*Serie de excedencias*: se forma al tomar los  $n$  primeros valores de la serie de duración parcial ordenada de mayor a menor, donde  $n$  es el número de años en consideración (Chow et al., 1994).

Una vez se tiene la serie de excedencias, se procede a determinar los periodos de retorno.

A cada uno de los valores de la serie de excedencias le corresponde un periodo de retorno  $T$  asociado dependiendo de la posición  $m$  que dicho valor ocupe dentro de la serie de  $n$  datos.

De esta forma existen varias expresiones para determinar  $T$ . Las más conocidas son la de California y Weibull:

$$\text{California} \left\{ \begin{array}{l} p = \frac{m}{n} \\ T = \frac{n}{m} \end{array} \right.$$

$$\text{Weibull} \left\{ \begin{array}{l} p = \frac{m}{n+1} \\ T = \frac{n+1}{m} \end{array} \right.$$

### ***Análisis de Frecuencia utilizando Factores de Frecuencia***

Este método está basado en el hecho de que la magnitud de un evento hidrológico puede expresarse como la media de la serie de observaciones realizadas más un cierto valor el cual está en función de la desviación estándar de la serie, es decir:

$$x_T = \mu + K_T \sigma$$

donde

$x_T$  = magnitud del evento hidrológico

$\mu$  = media de la serie hidrológica

$\sigma$  = desviación estándar de la serie hidrológica



$K_T$  = factor de frecuencia

De esta forma se puede determinar fácilmente la magnitud  $x_T$  de un evento hidrológico extremo y su periodo de retorno asociado  $T$ .

El factor de frecuencia  $K_T$  depende del periodo de retorno  $T$  y de la distribución que sigue la serie hidrológica. A continuación se describe como se debe calcular dicho parámetro.

### Distribución Normal

El valor de  $K_T$  correspondiente a una probabilidad de excedencia de  $p$  ( $p = \frac{1}{T}$ ) puede calcularse encontrando el valor de una variable intermedia  $w$ :

$$w = \left[ \ln \left( \frac{1}{p^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (0 < p \leq 0.5)$$

y luego calculando  $K_T$  utilizando la aproximación

$$K_T = w - \frac{2.515517 + 0.802853w + 0.010328w^2}{1 + 1.432788w + 0.189269w^2 + 0.001308w^3}$$

Cuando  $p > 0.5$ ,  $1-p$  es utilizado en lugar de  $p$  y al valor de  $K_T$  se le asigna un signo negativo.

### Distribución LogNormal

Para la distribución LogNormal, se aplica el mismo procedimiento excepto que este se aplica a los logaritmos de la serie hidrológica.

$$y_T = \mathbf{m}_y + K_T \mathbf{s}_y$$

donde

$$y_T = \log x_T$$

$\mu_y$  = media de la serie hidrológica de logaritmos

$\sigma_y$  = desviación estándar de la serie hidrológica de logaritmos

$K_T$  = factor de frecuencia

El factor de frecuencia se calcula de la misma manera que para la distribución normal.

Una vez se conozca el valor de  $y_T$ , este se transforma en  $x_T$  nuevamente aplicando la función antilogaritmo:

$$x_T = 10^{y_T}$$

### Distribución Log-Pearson Tipo III

En esta distribución también se trabaja con los logaritmos de la serie original.

$$K_T = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + zk^4 + \frac{1}{3}k^5$$

con

$$k = \frac{C_s}{6}$$

$$z = w - \frac{2.515517 + 0.802853w + 0.010328w^2}{1 + 1.432788w + 0.189269w^2 + 0.001308w^3}$$

$$w = \left[ \ln \left( \frac{1}{p^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (0 < p \leq 0.5)$$

$$p = \frac{1}{T}$$

Donde

$C_s$  = coeficiente de asimetría de la serie hidrológica de logaritmos  
 $T$  = Periodo de retorno en consideración (años)

Una vez se conozca el valor de  $y_T$ , este se transforma en  $x_T$  nuevamente aplicando la función antilogaritmo:

$$x_T = 10^{y_T}$$

### Distribución de Valor Extremo o Gumbel

Para este tipo de distribución se tiene lo siguiente:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{p} \left\{ 0.5772 + \ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right] \right\}$$

donde

$T$  = Periodo de retorno en consideración (años)

Ver (Chow et al., 1994)

### ***Análisis de Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 h.***

En este caso la variable denominada como evento hidrológico extremo es la precipitación máxima en 24 horas ( $P_{\max 24 \text{ h}}$ ). Para este análisis se trabajó con las dos expresiones formuladas en el numeral 6.4.2.1.2 Análisis de Frecuencia Utilizando Posiciones de Graficación.

El resultado del análisis puede llevarse a una gráfica de  $P_{\max 24 \text{ h}}$  vs.  $T$  y de ahí formular un modelo de regresión ajustada para interpolar o extrapolar y predecir diferentes periodos de retorno ( $T=2, 5, 10, 25, 50$  y  $100$  años) hallando una ecuación en la cual  $P_{\max 24 \text{ h}} = f(T)$ . Ver Anexo 3.

Esta ecuación también puede ser utilizada para estimar el periodo de retorno de un determinado valor de  $P_{\max 24 \text{ h}}$  o viceversa.

Con las distribuciones mencionadas en el numeral 6.4.2.1.3, Análisis de Frecuencia Utilizando Factores de Frecuencia, se llevo a cabo el análisis de frecuencia de  $P_{\max 24 \text{ h}}$  para las estaciones de la cuenca del río Sinú. (Ver Tabla No. 10) para conocer las estaciones trabajadas (las que tienen como Fuente al IDEAM).

**Tabla No. 10 Estaciones climatológicas y pluviométricas empleadas para la elaboración de las curvas isoyetas**

Municipio	Código IDEAM	Estación	Tipo	Elevación (msnm)	Años de uso	Longitud (m)	Latitud (m)	Precipitación (mm)	Fuente
San Marcos	2502504	Aeropuerto la Florida	CP	30	1932-	878670	1453705	1637	Ingeominas
Montería	1308504	Aeropuerto los garzones	SS	20	1974-	805341	1466892	1268	Ingeominas
San Andres de Sotavento	1307045	Aguas mohosas	PM	75	1988-2003	844047	1514669	1394,6	Ideam
Ayapel	2502515	Ayapel	CO	22	1967-	884059	1411285	2257	Ingeominas
Montería	1306002	Buenos aires	PM	55	1965-2003	814341	1428123	1495,4	Ideam
Caucasia	2625504	Cacaoteras	CP	55	1968-	885800	1374409	2772	Ingeominas
San Carlos	1307012	Callemar	PM	95	1963-	825449	1450205	1585	Ingeominas
Canalete	1204002	Canalete	PM	40	1959-	764968	1465259	1343	Ingeominas
Tierralta	1306003	Caramelo	PM	60	1965-	799550	1406059	1526	Ingeominas
San Carlos	1307011	Carrizal	PM	40	1963-2003	816281	1452088	1470,6	Ideam
Planeta Rica	2501501	Centro Alegre	CO	170	1973-	825225	1394885	1438	Ideam
Cerete	1307005	Cerete	PM	20	1963-2003	810886	1476087	1272,3	Ideam
Lorica	1307024	Cerro Bahia	PM	50	1974-2002	805600,9	1520374,8	1487,8	Sig Pafc
Chima	1307501	Chima	CO	20	1973-2003	831176	1503658	1244,1	Ideam
Ciénaga de Oro	1307006	Ciénaga de oro	PM	25	1958-2003	829218	1474162	1503,7	Ideam
Sahagún	2502517	Colomboy	CO	125	1973-2003	843833	1459352	1460,6	Ideam
San Pelayo	1307020	Corocito	PM	20	1979-2002	810912,5	1481619,8	1355,6	Sig Pafc
Cerete	1307014	coroza N 1	PG	1439	1974-	816355	1468685,7	1439,7	Sig Pafc
San Carlos	1307019	coroza N 2	PM	1385	1974-2002	814512,9	1466849	1385,1	Sig Pafc
Lorica	1307021	Cotorra	PM	20	1979-2002	812789	1490832	1478	Sig Pafc
Puerto Escondido	1204502	Cristo Rey	CO	15	1973-	763305	1494783	1460	Ideam
Lorica	1308501	Doctrina	CP	20	1968-	800104,8	1520402,6	1476,8	Ideam
San Bernardo del Viento	1307001	El Limón	PM	3	1964-2003	796460	1524110	1543,3	Sig Pafc
Ciénaga oro	1307502	El Salado	CO	40	1964-2003	834734	1477827	1327,3	Ideam
Lorica	1307025	El Trapiche	PM	4	1979-2003	801946	1522237	1374,2	Sig Pafc
Montería	1305503	Galan	CO	30	1979-2003	790580	1450365	1256,3	Ideam
Montelibano	2502516	Hda Cuba	CO	50	1970-	852724	1376348	2317	Ingeominas
Caucasia	2502037	Hda la Moneda	PM	30	1970-	906031	1381736	3332	Ingeominas
Montería	1307023	Horizonte	PM	1456	1974-2002	803480	1461368	1456,3	Sig Pafc
Sahagún	2502072	El Tablón Jobo	PM	130	1973-	856636	1448243	1660	Ingeominas
Montería	1307026	Lamas 3	PM	1400	1978-2002	805297	1457671	1400,8	Sig Pafc
San benito abad	2502075	Las Tablitas	PM	60	1973-	880607	1488729	1436	Ingeominas
Montería	1305003	Loma verde	PM	100	1965-2003	770290	1432026	1414,6	Ideam
Lorica	1308502	Lorica	CO	30	1964-	809246,8	1516668,2	1298,2	Ideam
Caceres	2624006	Manizales	PM	75	1970-2003	852664	1357910	2713,4	Ideam
Montería	1306502	Maracayo	CO	25	1979-	801463	1422649	1356	Ideam
Montería	1307015	Mocari	PG	1303	1974-2002	803497	1465056,7	1303,4	Sig Pafc
Momil	1307002	Momil	PM	20	1973-2003	823895	1514755	1422,6	Ideam

Municipio	Código IDEAM	Estación	Tipo	Elevación (msnm)	Años de uso	Longitud (m)	Latitud (m)	Precipitación (mm)	Fuente
Montería	1307027	Montería	PM	1429	1974-	799801	1459541,7	1429,1	Sig Pafc
Montería	1307034	Palma de vino	PM	1442	1978-2002	810801,92	1457645,7	1442,9	Sig Pafc
Planeta Rica	2502155	Planeta Rica	PM	90	1959-1973	836352	1422502	1665	Ingeominas
Turbo	1202001	Pueblo Bello	PM	80	1972-	740753	1406367	1488	Ingeominas
Puerto Libertador	2501001	Puerto Libertador	PM	55	1989-	825111	1365382	2254	Ingeominas
Tierralta	1303501	Puerto Nuevo	CP	145	1965-1991	757101	1371225	2105	Ideam
San Pelayo	1307003	Sabana Nueva	PM	20	1973-2002	807289	1490858	1376,6	Sig Pafc
Montería	1307028	sabanal	PM	1444	1978-	810827	1463178	1444,8	Sig Pafc
Sahagun	2502014	Sahagun	PM	60	1958-2003	849418	1481458	1373,3	Ideam
Montería	1306001	San antero	PM	75	1973-2003	805220	1441073	1433	Ideam
San Pelayo	1308001	San Antonio	PM	50	1965-2003	792564	1479865	1405,6	Sig Pafc
San Bernardo del Viento	1308503	San Bernardo del Viento	CO	22	1964-2003	792815	1527818	1357,1	Ideam
San Carlos	1307009	San Carlos	PM	60	1964-	821842	1464973	1653	Ingeominas
Montelibano	2501010	San Francisco Rayo	PM	160	1973-	810494	1387569	1827	Ingeominas
Montería	1305001	Sta Lucia	PM	120	1965-	785190	1472526	1461	Ingeominas
San Carlos	1307010	Sta Rosa	PM	140	1963-2003	830984	1457558	1602,9	Ideam
Montería	1307029	Tampa	PM	1439	1978-	816249	1444712	1439,1	Sig Pafc
Tierralta	1303001	Tierralta	PM	100	1959-2003	781132	1396525	1656,1	Sig Pafc
Santiago de tolu	1309007	Tolu	PM	2	1958-	835014	1544212	1386	Ingeominas
Cerete	1307503	Turipana	AM	20	1979-2003	809026	1470563	1217,9	Ideam
Montería	1307505	Uni.Cordoba	AM	15	1979-2003	803497	1465056	1342,7	Ideam
Sampues	2502527	Universidad de Sucre	AM	160	1983-	856851	1509089	1201	Ingeominas
Montelibano	2501006	Ure	PM	200	1973-	839781	1354265	2917	Ingeominas
Tierralta	1303003	Urra 1	PG	78	1983-1996	762637	1374884	2187,4	Sig Pafc
San antero	1307044	Villa marcela	PM	40	1988-2003	816610	1524009	1392,3	Ideam

Para conocer con certeza el tipo de distribución que sigue la variable  $P_{\max 24 h}$  se realizó la prueba de ajuste  $\chi^2$  (Chi cuadrado) con la serie histórica de la estación Tierralta para las distribuciones Normal, LogNormal y Valor Extremo o Gumbel.

La prueba se hace de la siguiente manera:

- se grafica en un papel especial de probabilidad para cada distribución la serie de precipitación máxima en 24 h en el eje de las ordenadas y la respectiva probabilidad asociada a esa precipitación en el eje de las abscisas (serie observada)
- se traza una línea recta de modo que se ajuste de la mejor forma posible a los puntos de la serie observada

- para cada punto de la serie observada se asocia un punto de la recta proyectándolo sobre esta por medio de una línea vertical. Los puntos proyectados sobre la recta constituyen la serie calculada
- a cada punto de la serie calculada se le halla el valor de precipitación correspondiente
- se aplica la ecuación:

$$Error = \frac{(P_{mas24h_{obs}} - P_{mas24h_{calc}})^2}{P_{mas24h_{calc}}}$$

- se hace la sumatoria del error para todos los puntos de la serie
- se compara este valor con el que aparece en la tabla tabulada para la prueba  $\chi^2$  con un nivel de confianza de  $x$  y con  $n-1$  grados de libertad siendo  $n$  el número de años de la serie.
- si el valor del error es menor que el de la tabla se puede concluir que la hipótesis nula (la información se ajusta a la distribución) no puede ser rechazada con un nivel de confianza de  $x$ .

La prueba dio como resultado que el tipo de distribución que mas se ajusta a los datos de la serie es la de Valor Extremo o Gumbel. Sin embargo también se ajustan las distribuciones Normal y LogNormal como se puede ver en la Tabla No. 11. Las graficas en papel especial de probabilidad se encuentran en el Anexo 3.

**Tabla No. 11 Resultado de la prueba  $\chi^2$  efectuada sobre la serie de precipitación máxima en 24 h de la estación Tierralta**

Orden	Probabilidad	Precipitación Observada	Precip. Calculada (Gumbel)	Precip. Calculada (Normal)	Precip. Calculada (Log - Normal)	Gumbel (O-C)^2/C	Normal (O-C)^2/C	Log-Normal (O-C)^2/C
1	0.022	88	81.5	85	96	0.518	0.106	0.667
2	0.044	89	85	89	98	0.188	0.000	0.827
3	0.067	90	87	92.5	100	0.103	0.068	1.000
4	0.089	90	89	94.5	101	0.011	0.214	1.198
5	0.111	91	90	96	102	0.011	0.260	1.186
6	0.133	91	91	97.7	103	0.000	0.459	1.398
7	0.156	92	92	99	104	0.000	0.495	1.385
8	0.178	92	93.5	100.5	105	0.024	0.719	1.610
9	0.200	93	95	101.5	106	0.042	0.712	1.594
10	0.222	93	96	102.7	107	0.094	0.916	1.832
11	0.244	93	97	103.7	108	0.165	1.104	2.083
12	0.267	94	97.5	104.7	109	0.126	1.094	2.064
13	0.289	94	98.5	105.6	109	0.206	1.274	2.064
14	0.311	95	99.5	106.5	110	0.204	1.242	2.045

Orden	Probabilidad	Precipitación Observada	Precip. Calculada (Gumbel)	Precip. Calculada (Normal)	Precip. Calculada (Log - Normal)	Gumbel (O-C)^2/C	Normal (O-C)^2/C	Log-Normal (O-C)^2/C
15	0.333	95	100.5	107	110	0.301	1.346	2.045
16	0.356	97	111.3	108	110	1.837	1.120	1.536
17	0.378	97	102.5	108.5	111	0.295	1.219	1.766
18	0.400	98	103.3	109.6	112	0.272	1.228	1.750
19	0.422	99	104.3	110.7	113	0.269	1.237	1.735
20	0.444	99	105.2	111	114	0.365	1.297	1.974
21	0.467	100	106	112	114	0.340	1.286	1.719
22	0.489	100	107	112.7	114	0.458	1.431	1.719
23	0.511	100	108	113.7	115	0.593	1.651	1.957
24	0.533	104	109	114.3	115	0.229	0.928	1.052
25	0.556	106	109.5	115	116	0.112	0.704	0.862
26	0.578	106	111	115.6	116	0.225	0.797	0.862
27	0.600	110	112	116.5	117	0.036	0.363	0.419
28	0.622	110	113	117.6	117	0.080	0.491	0.419
29	0.644	116	114.3	118.2	118	0.025	0.041	0.034
30	0.667	119	115.5	119	119	0.106	0.000	0.000
31	0.689	120	117	120	119.5	0.077	0.000	0.002
32	0.711	125	118	121	120	0.415	0.132	0.208
33	0.733	130	119	121.6	120	1.017	0.580	0.833
34	0.756	130	121	122.6	120.5	0.669	0.447	0.749
35	0.778	130	122.7	123.6	121	0.434	0.331	0.669
36	0.800	132	124.7	124.7	122	0.427	0.427	0.820
37	0.822	132	126	126	122.5	0.286	0.286	0.737
38	0.844	132	128.3	127	123	0.107	0.197	0.659
39	0.867	137	131	128.5	125	0.275	0.562	1.152
40	0.889	139	133.5	130	126	0.227	0.623	1.341
41	0.911	144	136.7	131.5	127	0.390	1.188	2.276
42	0.933	146	141.3	133.5	130	0.156	1.170	1.969
43	0.956	150	147.5	136.5	131	0.042	1.335	2.756
44	0.978	150	157.5	140.6	135	0.357	0.628	1.667
<b>Nivel de confianza de 99.5 % y 43 grados de libertad</b>			<b>66.8</b>			<b>12.120</b>	<b>31.710</b>	<b>56.640</b>
<b>Nivel de confianza de 99 % y 43 grados de libertad</b>			<b>63.7</b>					

Se hizo la suposición de que todas las estaciones siguen esta distribución. Por lo tanto en todas las demás se trabajó con la distribución Gumbel (ver Anexo 3)

Este análisis sirve para conocer cuales son los periodos de retorno de eventos extremos de precipitación en toda la cuenca del río Sinú y sus respectivas magnitudes.

## **Análisis de Frecuencia de Caudal Máximo Mensual**

En este caso la variable denominada como evento hidrológico extremo es el caudal máximo mensual ( $Q_{\max \text{ mens}}$ ). Para este análisis se trabajó con la expresión de Weibull formulada en el Análisis de Frecuencia Utilizando Posiciones de Graficación.

El resultado del análisis puede llevarse a una gráfica de  $Q_{\max \text{ mens}}$  vs.  $T$  y de ahí formular un modelo de regresión ajustada para interpolar o extrapolar y predecir diferentes periodos de retorno ( $T=2, 5, 10, 25, 50$  y  $100$  años) hallando una ecuación en la cual  $Q_{\max \text{ mens}} = f(T)$ . Ver Anexo 4.

Esta ecuación también puede ser utilizada para estimar el periodo de retorno de un determinado valor de  $Q_{\max \text{ mens}}$  o viceversa.

Con las distribuciones mencionadas en el numeral 6.4.2.1.3, Análisis de Frecuencia Utilizando Factores de Frecuencia, se llevo a cabo el análisis de frecuencia de  $Q_{\max \text{ mens}}$  para las estaciones ubicadas en el río Sinú. Ver Tabla No. 12.

**Tabla No. 12 Estaciones hidrométricas utilizadas para el análisis de frecuencia**

Código IDEAM	Longitud (m)	Latitud (m)	Elevación (m.s.n.m)	Nombre	Tipo	Municipio	Años de Registro	Fecha instalación	Fecha suspensión
1303701	765770	1379090	77.0	Angostura de Urrá	LG	Tierralta	44	Ago-59	
1304703	780983	1397664	50.0	Tierralta	LM	Valencia	13	Jun-90	
1306703		1444796	25.0	Santa Helena	LM	Montería	40	Mar-63	
1305701	790582	1432137	20.0	Nueva Colombia	LM	Montería	13	Jun-90	
1306702	800263	1460062	17.0	Montería	LG	Montería	40	Feb-63	
1307710	805332	1465048	14.0	Mocarí	LG	Montería	28	Sep-75	
1307730	805375	1474269	10.0	El Montón	LM	Cereté	13	Jun-90	
1307701	805455	1491098	8.0	Sabana Nueva	LM	San Pelayo	40	Feb-63	
1307703	808661	1509140	6.0	La Palma	LM	Lorica	50	Jun-53	
1307706	806904	1512223	5.0	Cotoca	LG	Lorica	33	Feb-70	
1307704	800559	1519632	4.0	La Doctrina	LM	Lorica	40	Feb-63	

Para conocer con certeza el tipo de distribución que sigue la variable  $Q_{\max \text{ mens}}$  se realizó la prueba de ajuste  $\chi^2$  (Chi cuadrado) con la serie histórica de la estación Montería para las distribuciones Normal, LogNormal y Gumbel.

La prueba se hace de la siguiente manera:



- se grafica en un papel especial de probabilidad para cada distribución la serie de caudal máximo anual en el eje de las ordenadas y la respectiva probabilidad asociada a ese caudal en el eje de las abscisas (serie observada)
- se traza una línea recta de modo que se ajuste de la mejor forma posible a los puntos de la serie observada
- para cada punto de la serie observada se asocia un punto de la recta proyectándolo sobre esta por medio de una línea vertical. Los puntos proyectados sobre la recta constituyen la serie calculada
- a cada punto de la serie calculada se le halla el valor de caudal correspondiente
- se aplica la ecuación:

$$Error = \frac{(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{Q_{calc}}$$

- se hace la sumatoria del error para cada punto de la serie
- se compara este valor con el que aparece en la tabla tabulada para la prueba  $\chi^2$  con un nivel de confianza de  $x$  y con  $n-1$  grados de libertad siendo  $n$  el número de años de la serie.
- si el valor del error es menor que el de la tabla se puede concluir que la hipótesis nula (la información se ajusta a la distribución) no puede ser rechazada con un nivel de confianza de  $x$ .

La prueba realizada sobre los datos de la estación Montería dio como resultado que el tipo de distribución que mas se ajusta a los datos de la serie es la de Valor Extremo o Gumbel como se muestra en la Tabla No. 13.

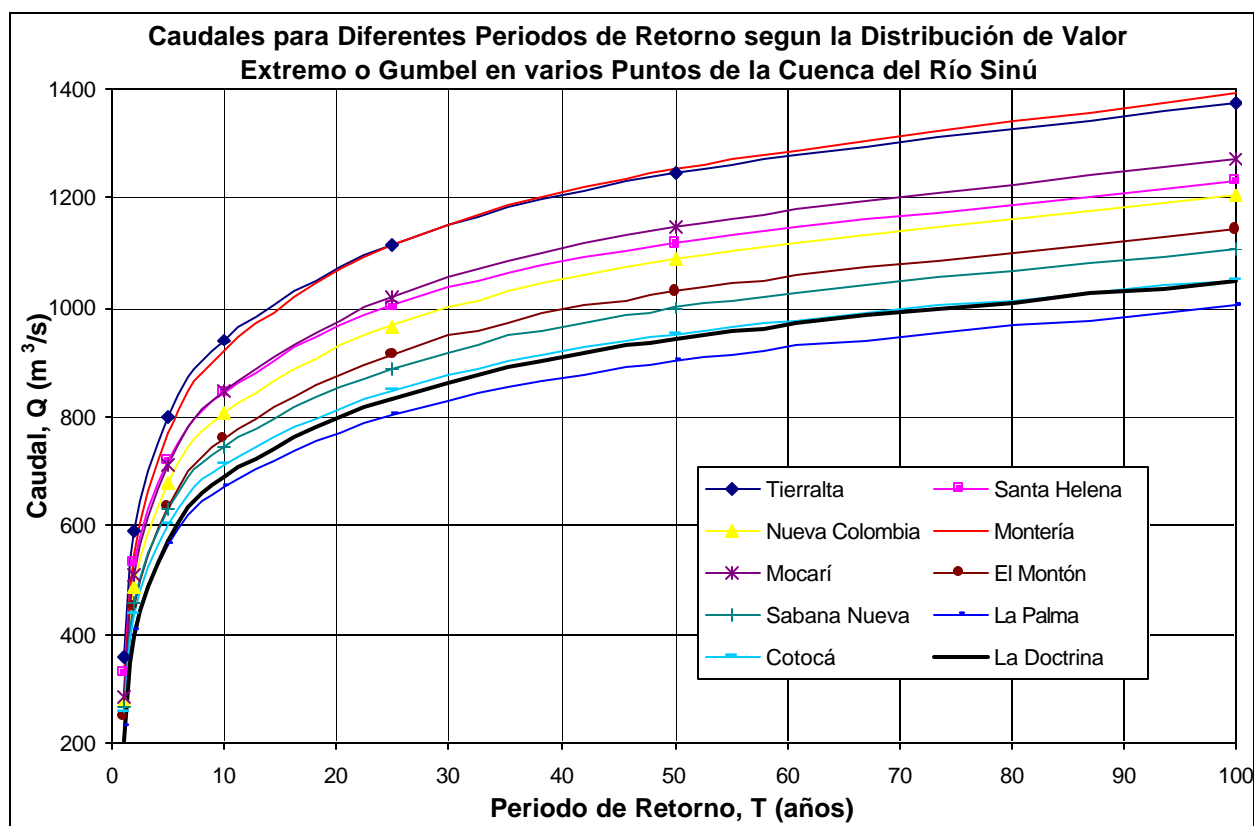
**Tabla No. 13 Resultado de la prueba  $\chi^2$  efectuada sobre la serie de caudal máximo anual de la estación Montería**

Orden	Probabilidad	Caudal Observado	Caudal Calculado (Gumbel)	Caudal Calculado (Normal)	Caudal Calculado (Log - Normal)	Gumbel (O-C)^2/C	Normal (O-C)^2/C	Log-Normal (O-C)^2/C
1	0.030	909.5	930	950	909.5	0.452	1.727	0.000
2	0.061	910	936	959	915	0.722	2.504	0.027
3	0.091	910	940	966	930	0.957	3.246	0.430
4	0.121	913.2	944	970	940	1.005	3.326	0.764
5	0.152	913.2	947	974	950	1.206	3.795	1.426
6	0.182	914.6	950	977	955	1.319	3.985	1.709
7	0.212	919.2	952	983	960	1.130	4.141	1.734
8	0.242	919.2	956	984	965	1.417	4.267	2.174
9	0.273	924.9	958	986	970	1.144	3.786	2.097
10	0.303	925	961	989	975	1.349	4.142	2.564
11	0.333	926.1	963	992	978	1.414	4.378	2.754
12	0.364	927	965	995	980	1.496	4.647	2.866

Orden	Probabilidad	Caudal Observado	Caudal Calculado (Gumbel)	Caudal Calculado (Normal)	Caudal Calculado (Log - Normal)	Gumbel (O-C)^2/C	Normal (O-C)^2/C	Log-Normal (O-C)^2/C
13	0.394	930.7	968	997	983	1.437	4.409	2.783
14	0.424	933	970	998	985	1.411	4.233	2.745
15	0.455	933.4	974	1000	990	1.692	4.436	3.236
16	0.485	936	976	1003	995	1.639	4.476	3.498
17	0.515	938.4	977	1005	998	1.525	4.413	3.559
18	0.545	943.8	980	1007	1000	1.337	3.966	3.158
19	0.576	943.8	983	1009	1000	1.563	4.213	3.158
20	0.606	949.2	985	1011	1010	1.301	3.778	3.660
21	0.636	950	987	1014	1015	1.387	4.039	4.163
22	0.667	950	990	1015	1020	1.616	4.163	4.804
23	0.697	955	994	1016	1025	1.530	3.662	4.780
24	0.727	956.4	998	1020	1030	1.734	3.966	5.259
25	0.758	960	1003	1023	1035	1.843	3.880	5.435
26	0.788	964.8	1006	1026	1040	1.687	3.651	5.438
27	0.818	966	1011	1030	1045	2.003	3.977	5.972
28	0.848	966	1016	1035	1050	2.461	4.600	6.720
29	0.879	975	1023	1038	1060	2.252	3.824	6.816
30	0.909	1010	1028	1042	1070	0.315	0.983	3.364
31	0.939	1020	1043	1047	1080	0.507	0.696	3.333
32	0.970	1100	1064	1060	1100	1.218	1.509	0.000
33	1.000	1240	1161	1115	1240	5.376	14.013	0.000
<b>Nivel de confianza de 99.5 % y 32 grados de libertad</b>			<b>53.7</b>			<b>49.448</b>	130.831	100.428
<b>Nivel de confianza de 99 % y 32 grados de libertad</b>			<b>50.9</b>					

Se hizo la suposición de que todas las estaciones siguen esta distribución. Por lo tanto en todas las demás se trabajó con la distribución Gumbel (ver Figura No.10)

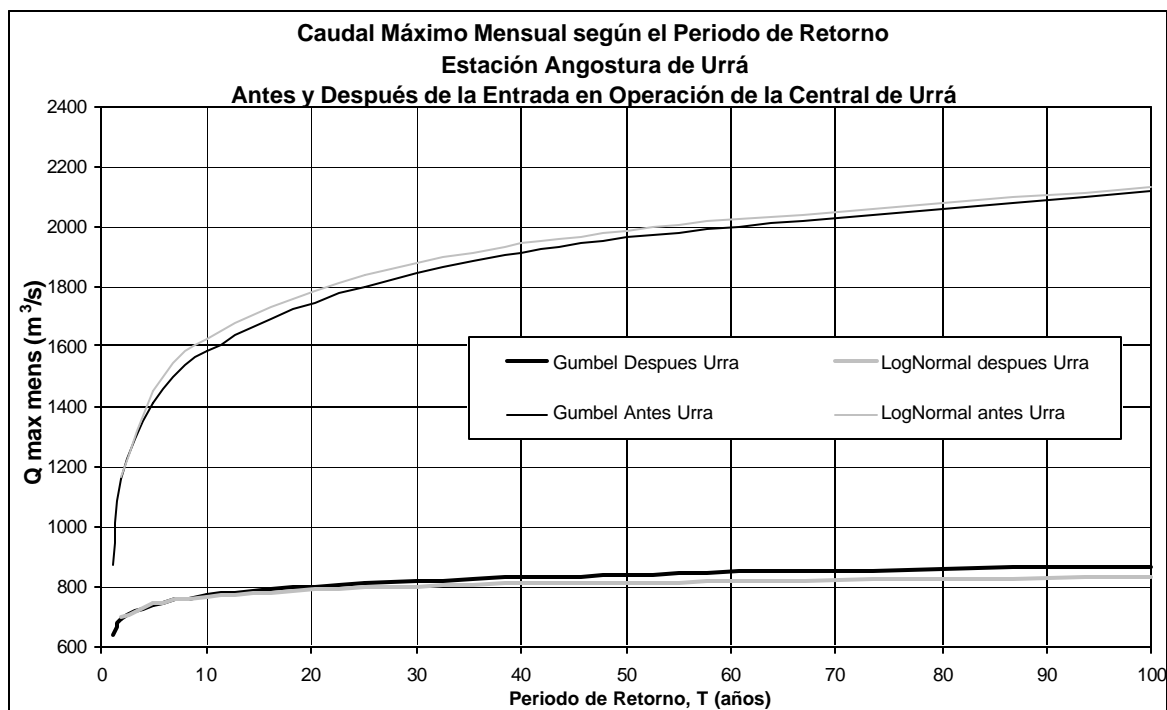
**Figura No. 10 Caudales y periodos de retorno asociados para las estaciones sobre el río Sinú**



Este análisis sirve para conocer cuales son los periodos de retorno de eventos extremos a los largo del recorrido del río Sinú y sus respectivas magnitudes.

La estación Angostura de Urrá amerita un análisis especial debido al cambio de comportamiento que experimentó el río con respecto a la generación de caudales extremos debido a la construcción del embalse de Urrá. En este caso se aplico una metodología similar a la explicada para las demás estaciones. Ver Figura No. 11.

**Figura No. 11 Análisis de frecuencia de caudal máximo mensual para la estación Angostura de Urrá**



Según la gráfica anterior la magnitud de eventos extremos máximos para periodos de retorno dados se redujo considerablemente después de Urrá. Es así como para un mismo periodo de retorno (i.e 50 años) antes se tenía que el caudal máximo estaba cerca a los  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  ahora para el mismo periodo de retorno este disminuyó a tan solo  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por otro lado, un caudal que se presentaba antes con un periodo de retorno bajo, es decir que ocurría con mucha frecuencia, ahora se presenta con menor frecuencia ya que el periodo de retorno aumentó.

### **Análisis de Frecuencia de Caudal Mínimo Mensual**

En este caso la variable denominada como evento hidrológico extremo es el caudal mínimo mensual ( $Q_{\text{min mens}}$ ). Para este análisis se trabajó con las dos expresiones formuladas en el numeral 6.4.2.1.2, Análisis de Frecuencia Utilizando Posiciones de Graficación.

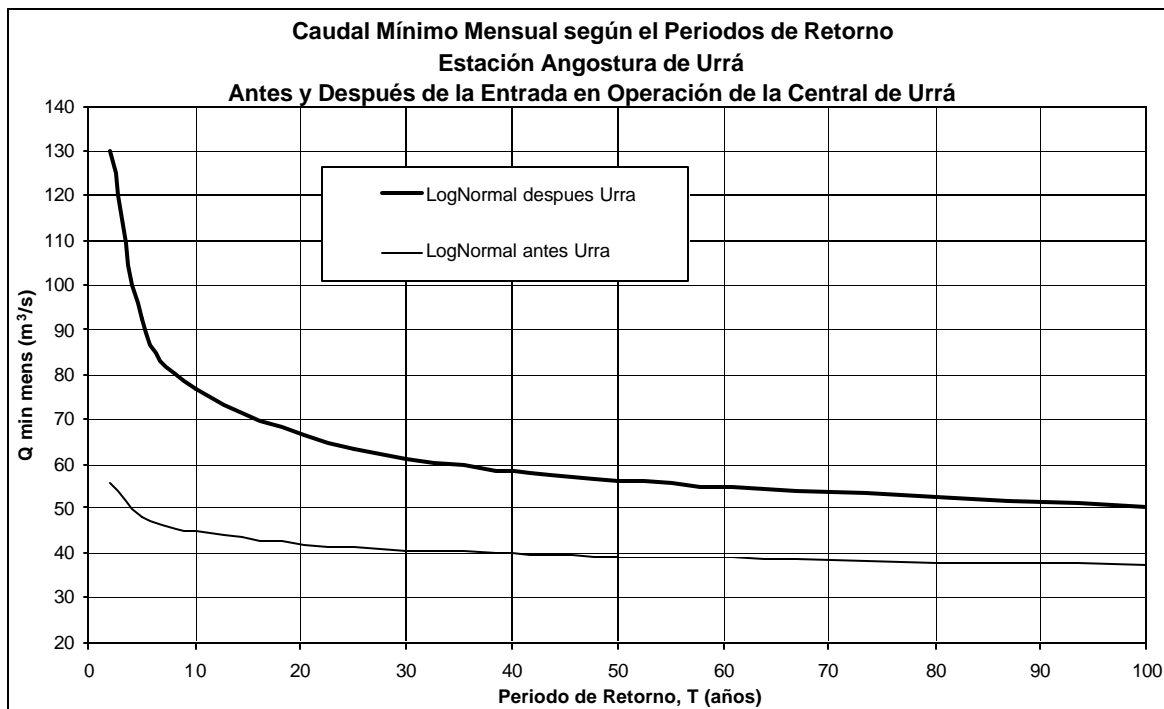
El resultado del análisis puede llevarse a una gráfica de  $Q_{\text{min mens}}$  vs.  $T$  y de ahí formular un modelo de regresión ajustada para interpolar o extrapolar y predecir

diferentes periodos de retorno ( $T=2, 5, 10, 25, 50$  y  $100$  años) hallando una ecuación en la cual  $Q_{\min \text{ mens}} = f(T)$ .

Esta ecuación también puede ser utilizada para estimar el periodo de retorno de un determinado valor de  $Q_{\min \text{ mens}}$  o viceversa.

Con las distribuciones mencionadas en el numeral 6.4.2.1.3, Análisis de Frecuencia Utilizando Factores de Frecuencia, se llevo a cabo el análisis de frecuencia de  $Q_{\min \text{ mens}}$  para la estación Angostura de Urrá.

**Figura No. 12 Análisis de frecuencia de caudal mínimo mensual para la estación Angostura de Urrá**



Según la gráfica anterior la magnitud de eventos extremos mínimos para periodos de retorno dados se incrementó después de Urrá. Es así como para un mismo periodo de retorno (i.e 50 años) antes se tenía que el caudal mínimo estaba cerca a los  $40 m^3/s$  ahora para el mismo periodo de retorno este aumento a  $60 m^3/s$ . Por otro lado, un caudal mínimo que se presentaba antes con un periodo de retorno bajo, es decir que ocurría con mucha frecuencia, ahora se presenta con menor frecuencia ya que el periodo de retorno aumentó.

### 6.4.3 Modelo Hidráulico del Río Sinú

#### *6.4.3.1 Introducción*

Con el fin de estudiar la dinámica y el comportamiento hidráulico general del río Sinú y de los sistemas cenagosos asociados se implementó un modelo de computador utilizando el paquete computacional HEC-RAS versión 3.0. Con este software se configuraron diferentes modelos y se hicieron varias simulaciones para diferentes escenarios tal como río Sinú independiente, río Sinú incluyendo sistemas cenagosos de Betancí (con y sin "Tapa") y Ciénaga Grande del Bajo Sinú, Caño Bugre, etc.

La simulación tiene como objetivo:

- Realizar un análisis de las condiciones actuales del río Sinú y su comportamiento hidráulico considerando la operación de la Central Hidroeléctrica de Urrá.
- Diagnóstico del Caño Betancí para determinar como ha sido afectado por la nueva dinámica hidráulica de la cuenca.
- Diagnóstico del Caño Aguas Prietas para evaluar su estado actual.
- Efectuar una evaluación de eventos extremos históricos

#### *6.4.3.2 Descripción del Software HEC-RAS*

HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center River Analysis System, por sus siglas en inglés) es un sistema de software integrado, diseñado para ser usado en un ambiente multi-tarea y multi-usuario a través de redes. Este fue diseñado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers).

El sistema está compuesto por:

- Una interfaz gráfica para el usuario: facilita el uso del software (manejo de archivos, tabulación y edición de datos de entrada, análisis hidráulicos, despliegue de información de entrada o salida en tablas o gráficas, creación de reportes e informes, ayuda en línea)
- Componentes separados para análisis hidráulicos

- Componentes para almacenamiento y manejo de información y datos (en archivos "planos" ASCII o binarios, archivos con formato HEC-DSS para ser exportados a otros sistemas)
- Componentes para generar graficas y reportes detallados (esquema en planta del sistema hidrográfico, gráficas de secciones transversales, gráficas de perfiles, curvas de calibración, hidrogramas, gráfica del perfil en 3D del sistema, tablas prediseñadas o generadas por el usuario).

HEC-RAS básicamente esta compuesto por dos módulos de cálculo unidimensional independientes: (1) módulo de cómputo de perfiles para flujo permanente y (2) módulo para simulación de flujo no permanente. Sin embargo los dos módulos pueden correr con la misma geometría y están diseñados para funcionar con base en las mismas rutinas de cálculo hidráulico. Adicionalmente, el programa posee componentes de diseño los cuales se pueden integrar con los módulos arriba mencionados (Brunner, 2001b).

Por medio de HEC-RAS se pueden realizar simulaciones hidráulicas en una dimensión para sistemas de redes de canales tanto naturales como artificiales incluyendo estructuras hidráulicas como: coulverts, puentes, vertederos, rebosaderos y cuerpos de retención y almacenamiento como embalses.

El módulo de flujo permanente efectúa el cálculo del perfil de flujo gradualmente variado para regímenes de flujo supercrítico, subcrítico o mixto.

El procedimiento de cálculo está basado en la solución de la ecuación de energía. Las pérdidas de energía son determinadas por fricción (ecuación de Manning) y por coeficientes de expansión y contracción (los cuales se multiplican por el cambio en la cabeza de velocidad) (Brunner, 2001a).

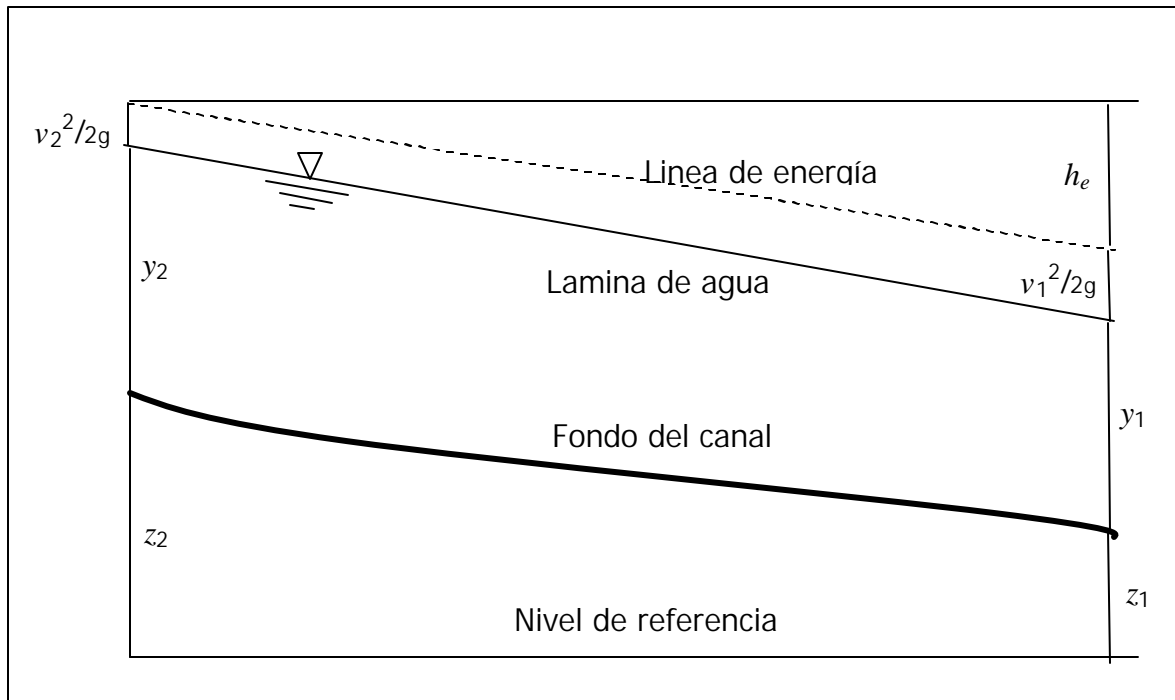
$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_e$$

donde

- $y_1, y_2$  = profundidad del agua en las secciones 1 y 2 respectivamente (m)  
 $z_1, z_2$  = elevación con respecto a un nivel de referencia de la batea de las secciones 1 y 2 respectivamente (m)  
 $v_1, v_2$  = velocidad del agua en las secciones 1 y 2 respectivamente (m/s)  
 $\alpha_1, \alpha_2$  = coeficientes de velocidad en las secciones 1 y 2 respectivamente  
 $g$  = aceleración debido a la gravedad ( $m/s^2$ )

$h_e$  = pérdida de energía de la sección 1 a la 2 (m)

**Figura No. 13 Representación gráfica de los términos de la ecuación de energía**



La pérdida de energía entre dos secciones ( $h_e$ ) se calcula como sigue:

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{a_2 v_2^2}{2g} - \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right|$$

donde

$L$  = distancia entre secciones (m)  
 $S_f$  = pendiente de la línea de energía  
 $C$  = coeficiente de expansión o contracción

En HEC-RAS el caudal es calculado por medio de la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$



$$R = \frac{A}{P}$$

donde

$Q$	=	caudal en la sección transversal ( $m^3/s$ )
$n$	=	coeficiente de rugosidad de Manning
$A$	=	área de la sección transversal ( $m^2$ )
$R$	=	radio hidráulico en la sección transversal (m)
$P$	=	perímetro mojado en la sección transversal (m)

En situaciones en las que se presenta flujo rápidamente variado, la ecuación de momentum es utilizada. Estas situaciones incluyen resalto hidráulico, flujo a través de puentes, confluencias o bifurcaciones de ríos (Brunner, 2001a). La ecuación de momentum es como sigue:

$$\frac{Q_2 b_2}{g A_2} + A_2 y_2 + \left( \frac{A_2 + A_1}{2} \right) L S_0 - \left( \frac{A_2 + A_1}{2} \right) L S_f = \frac{Q_1 b_1}{g A_1} + A_1 y_1$$

donde

$Q_1, Q_2$	=	caudal en las secciones 1 y 2 respectivamente ( $m^3/s$ )
$A_1, A_2$	=	área transversal en las secciones 1 y 2 respectivamente ( $m^2$ )
$y_1, y_2$	=	profundidad del agua en las secciones 1 y 2 respectivamente medida desde la superficie hasta el centroide de la sección (m).
$L$	=	distancia entre secciones (m)
$S_f$	=	pendiente de la línea de energía
$S_0$	=	pendiente del fondo del canal
$\beta_1, \beta_2$	=	coeficientes de momentum en las secciones 1 y 2 respectivamente (se utiliza para considerar el cambio en distribución de velocidad a causa de las irregularidades del canal)

#### 6.4.3.3 Configuración del Modelo Hidráulico del Río Sinú

##### Información de entrada

La información básica de entrada para la configuración del modelo fue la siguiente:

## Secciones transversales

Se utilizaron secciones transversales del río Sinú, Caño Betancí, Caño Aguas Prietas y Caño Bugre suministradas por la Empresa Urrá S.A E.S.P. Estas han sido medidas en diferentes instantes de tiempo a partir de Enero de 2000. Adicionalmente la CVS proporcionó otras secciones en la parte baja de la cuenca. La ubicación de las secciones transversales y sus abscisas se muestra en la Tabla No 14.

**Tabla No. 14 Localización de las secciones transversales utilizadas en el modelo hidráulico del río Sinú en HEC-RAS**

Sección Transversal	Latitud (m)	Longitud (m)	Distancia a la sección de aguas abajo (km)	Abscisa (km)	Corriente	Fuente
Puente Pacheco	1379141.6	765816.1	3.4	281.4	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Santa Ana	1379865.7	768485.8	6.9	278	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Pasacaballos	1383730.3	770221.4	13.2	271.1	Sinú	Urra S.A E.S.P.
El Toro	1388168.8	773981.8	16.0	257.9	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Carrizola	1394852.9	777446.4	6.4	241.9	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Tierralta	1397663.5	780982.8	11.1	235.5	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Río Nuevo	1404333.6	781092.5	13.7	224.4	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Volador	1410633.2	781537.3	11.3	210.7	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Bellavista	1416184.6	784045.0	18.2	199.4	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Las Palomas	1425998.7	788624.0	14.2	181.2	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Nueva Colombia	1432136.9	790582.3	9.5	167	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Gallo Crudo	1439475.4	792240.1	23.8	157.5	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Nápoles	1452463.4	795210.1	16.4	133.7	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Montería	1460062.0	800262.8	8.6	117.3	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Mocarí	1465854.0	803898.9	5.7	108.7	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Isla Blanca	1470990.0	804428.0	13.7	103	Sinú	CVS
San Pelayo	1479561.6	804209.1	7.7	89.3	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Carrillo	1485482.0	806501.0	20.2	81.6	Sinú	CVS
Boca de Guamal	1501327.0	807234.0	10.4	61.4	Sinú	CVS
Playón	1508471.0	808662.0	0.7	51	Sinú	CVS
La Palma	1509140.4	808660.5	5.6	50.3	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Cotocá	1512222.8	806904.2	17.1	44.7	Sinú	Urra S.A E.S.P.
La Doctrina	1519631.8	800558.9	10.3	27.6	Sinú	Urra S.A E.S.P.
Planta San Bernardo	1525157.0	794355.0	17.3	17.3	Sinú	CVS
Caño Aguas Prietas	1512488.7	809104.3			Caño Aguas Prietas	Urra S.A E.S.P.
Caño Bugre	1468243.1	805683.5			Caño Bugre	Urra S.A E.S.P.

### Curvas de capacidad de las ciénagas de Betancí y Grande del Bajo Sinú

Las curvas de cota – área – volumen de las Ciénagas de Betancí y Grande del Bajo Sinú fueron tomadas del informe *"Estudio Preliminar de las Inundaciones Aguas Abajo del Proyecto Urrá I"* (Díaz-Granados, 1997). A continuación se muestran las curvas en la Tabla No. 15 y Tabla No. 16

**Tabla No. 15 Curva de cota – área – volumen para la Ciénaga de Betancí**

Cota (m.s.n.m.)	Área ( $1 \times 10^6 \text{ m}^2$ )	Volumen ( $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ )
20	12	0
21	14.5	15
22	16.2	32
23	17.7	47
24	18.7	66
25	20.2	85

**Tabla No. 16 Curva de cota – área – volumen para la Ciénaga de Grande de Lirica**

Cota (m.s.n.m.)	Área ( $1 \times 10^6 \text{ m}^2$ )	Volumen ( $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ )
1.5	0	0
1.75	6	2
2	12	4
2.5	28	14
3	60	40
3.5	105	80
4	170	150
4.5	265	270
5	360	420
5.5	440	630

### **Hidrogramas de entrada**

Los hidrogramas se constituyen en información de entrada básica para el modelo. Estos deben ser introducidos en puntos estratégicos (secciones) del modelo como en la parte alta donde se inicia un tramo de río o en donde haya un cambio de caudal importante. Este modelo fue alimentado con un hidrograma de entrada a nivel diario aguas abajo del Embalse de Urrá, sitio de la primera sección, y adicionalmente con hidrogramas laterales también a nivel diario en varios puntos del río Sinú en donde se tienen registros históricos de caudal.

### **Condiciones de frontera**

Todo modelo hidráulico necesita condiciones de frontera en los límites externos de los sistemas que está modelando. En este caso el modelo río Sinú se formula con 4 tipos de fronteras naturales:

1. Frontera de aguas arriba: esta conformada por la sección Puente Pacheco solo unos metros aguas abajo del Embalse de Urrá en la abscisa k281+400. La condición de frontera es de hidrograma de entrada.
2. Frontera de aguas abajo: es la sección de la Planta de San Bernardo (abscisa k17+300). La condición de frontera es una curva de calibración ( $y$  vs.  $Q$ ).
3. Frontera en los cuerpos de agua: constituidas por la Ciénaga de Betancí y la Ciénaga Grande del Bajo Sinú. La condición de frontera es un hidrograma de entrada a cada una de ellas.
4. Fronteras internas: Se presenta en varios puntos a lo largo del río. La condición de frontera se da como un hidrograma lateral.

Ver detalles en la Figura No. 18.

### **Calibración del modelo**

La calibración del modelo tiene dos finalidades: 1) calibrar los valores de la rugosidad del lecho y de las bancas ( $n$  de Manning) para todas las secciones consideradas y 2) verificar la validez del modelo hidráulico debido a que el número de secciones es poco considerando la longitud del río Sinú y por esto mismo la distancia entre secciones es alta.

En la calibración (y posteriormente en la etapa de verificación) se consideró el río Sinú como un solo sistema conformado por un canal en el cual la interacción con caños, ciénagas y afluentes se modela por medio de hidrogramas laterales en varios puntos a lo largo de su cauce y no por modelación como tal de dichos canales. Con estos hidrogramas se está considerando si hay aportes al río cuando los hidrogramas son positivos (i.e. Caño Betancí, Caño Aguas Prietas y otros afluentes) o si hay aportes del río si los valores de caudal en el hidrograma son negativos (i.e. Caño Bugre, Caño Aguas Prietas cuando el flujo de aguas sucede del río hacia la Ciénaga Grande del Bajo Sinú).

Para la calibración se consideraron los datos de nivel de lámina de agua diarios registrados en la estación de Las Palomas<sup>1</sup>, ubicada en la cuenca media del río Sinú (abscisa k181+200) en el corregimiento de su mismo nombre. La calibración se llevó a cabo variando los valores de rugosidad tanto del lecho como de las bancas y comparando los valores del nivel de la lámina de agua registrados con los simulados. Así, en cada nueva corrida, se realizaban ajustes sucesivos a los valores del  $n$  de Manning hasta que el error porcentual entre el promedio de los datos registrados y simulados fuera el mínimo posible.

Con el fin de tener calibrado el modelo para diferentes rangos de caudal, la calibración se llevó en forma paralela con tres simulaciones de 30 días cada una de la siguiente forma.

**Tabla No.17 Condiciones para la calibración del modelo hidráulico del río Sinú**

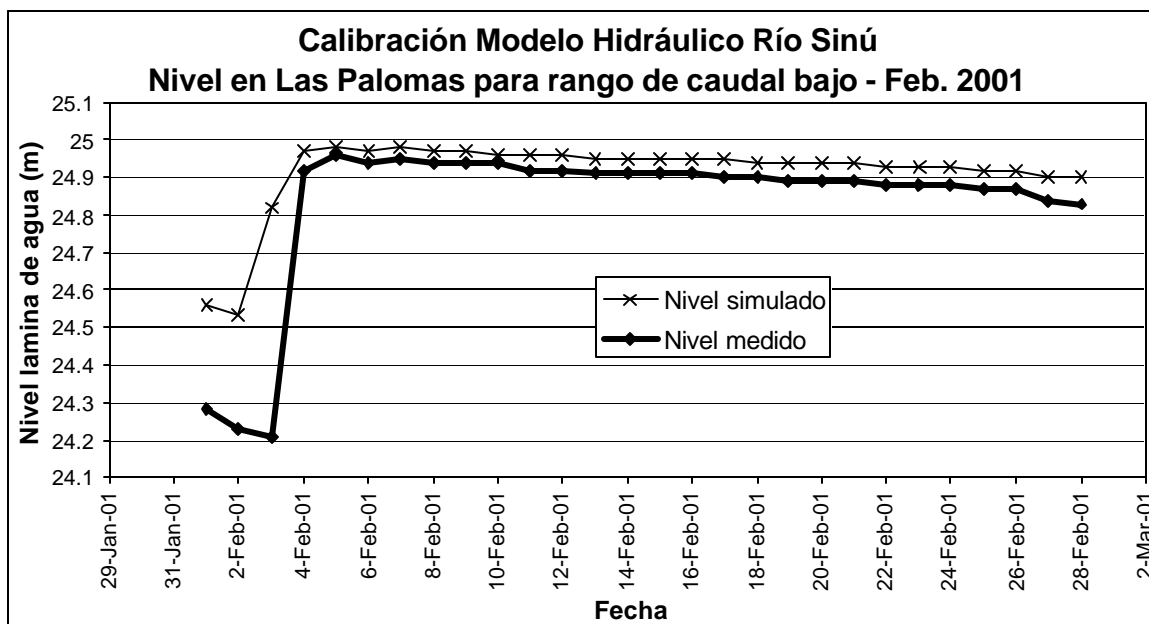
Simulación	Rango de caudal	Q medio (m <sup>3</sup> /s)	Q max (m <sup>3</sup> /s)	Fecha inicio simulación	Fecha final simulación
1	Bajo	231.8	251.0	Feb.-1-2001	Feb.-28-2001
2	Medio	303.3	426.0	Abr.-1-2000	Abr.-30-2000
3	Alto	594.7	675.0	Jul.-1-2002	Jul.-31-2002

La calibración comenzó con un valor de  $n$  de Manning de 0.030 tanto para fondo del lecho como para bancas. Haciendo los ajustes sucesivos se llegó a tener el menor porcentaje de error entre valores registrados y simulados con valores de  $n$  de 0.028 para lecho y 0.050 para bancas.

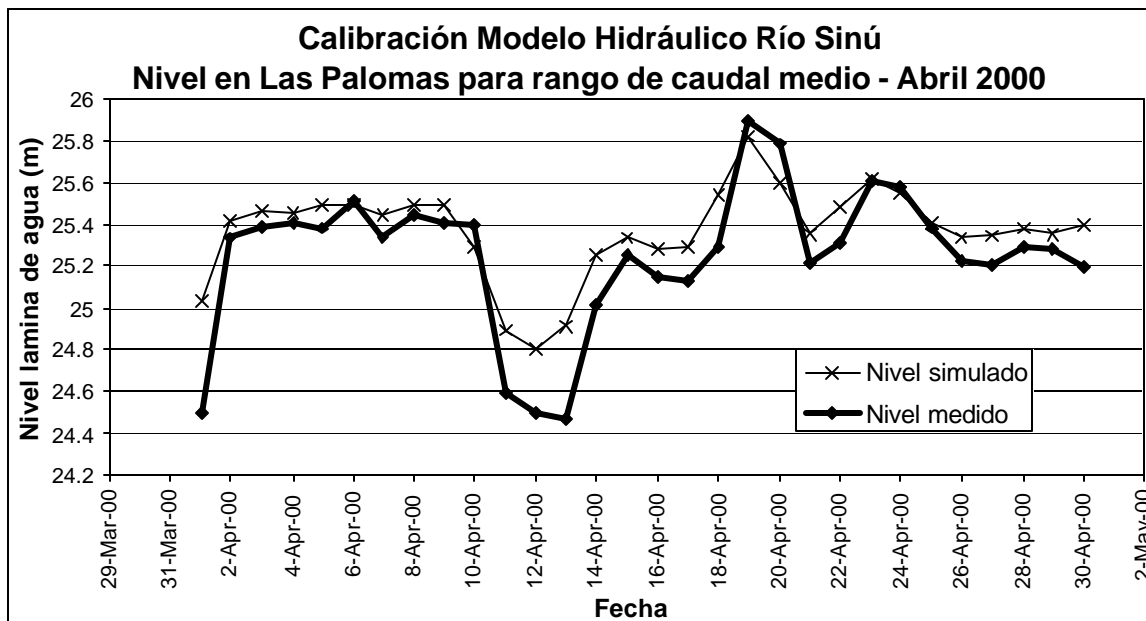
<sup>1</sup> Se escogió este sitio para efectuar la calibración y verificación del modelo ya que para esta estación se tienen registros diarios de nivel reportados por la Empresa Urrá S.A. E.S.P. (Gómez y Cajiao, 2002)

El porcentaje de error para la simulación con rango de caudal bajo fue de 4.57% (ver la Figura No. 14), 5.98% (ver la Figura No. 15) para caudal medio y 11.85% para caudal alto (ver la Figura No. 16).

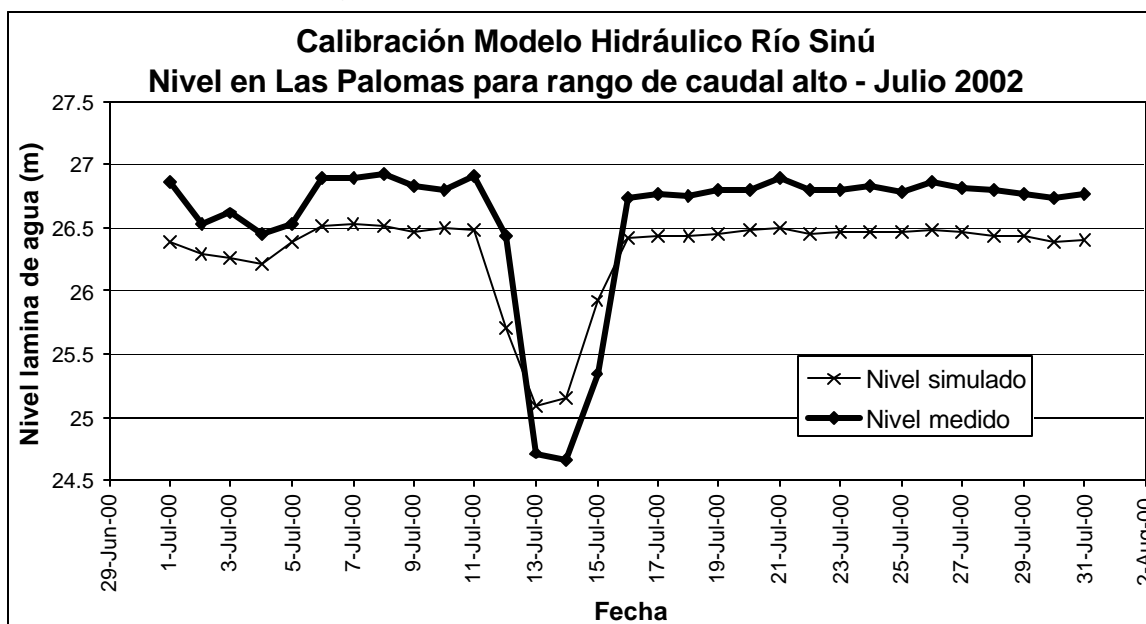
**Figura No. 14 Resultado de la calibración del  $n$  de Manning ( $n = 0.028$  en el fondo del lecho y  $n = 0.050$  en las bancas) para caudal bajo**



**Figura No. 15** Resultado de la calibración del  $n$  de Manning ( $n = 0.028$  en el fondo del lecho y  $n = 0.050$  en las bancas) para caudal medio



**Figura No. 16** Resultado de la calibración del  $n$  de Manning ( $n = 0.028$  en el fondo del lecho y  $n = 0.050$  en las bancas) para caudal alto



Los anteriores resultados muestran un muy buen ajuste entre valores históricos y valores simulados confirmando que el número de secciones transversales es

suficiente. Además dan una confiabilidad muy alta en los resultados de las simulaciones en las cuales se planea utilizar el modelo.

Sin embargo, cabe resaltar que el modelo subestima el nivel de lámina de agua para valores altos de caudal y, por lo contrario, lo sobrestima cuando se trata de valores de caudal bajos o medios.

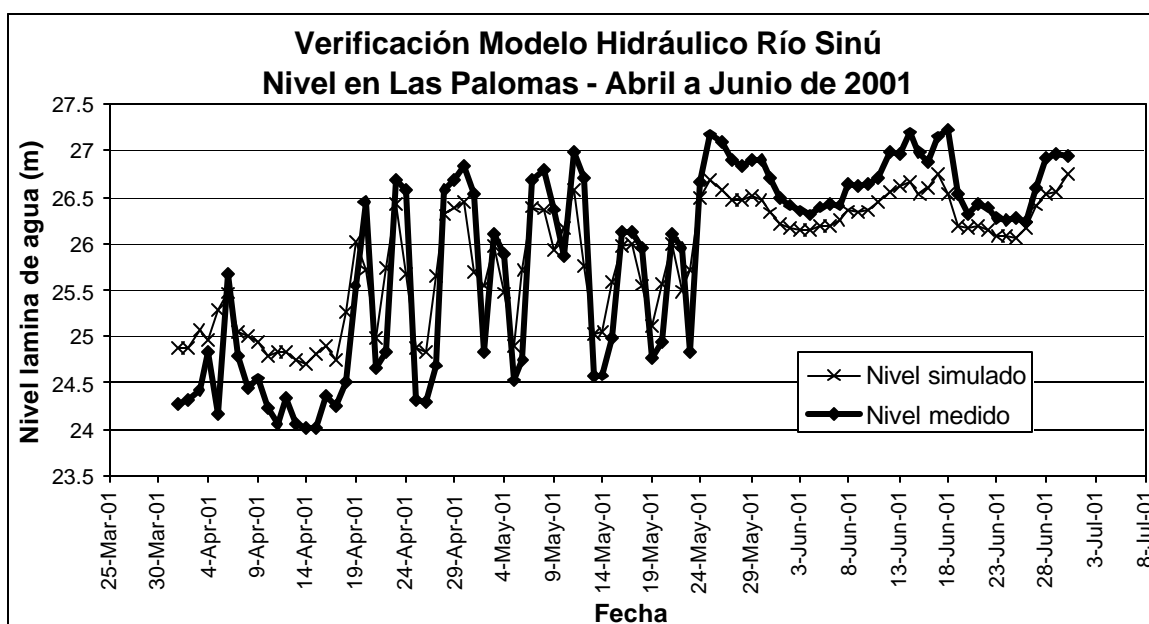
### Verificación del modelo

Posterior a la calibración del modelo se debe llevar a cabo una etapa de verificación del mismo con el fin de darle validez definitiva y determinar si los valores de rugosidad adoptados son verdaderamente adecuados.

La verificación se hizo haciendo la simulación en un periodo diferente a los de la calibración. Se escogió el periodo de Abril a Junio de 2001 de modo que los caudales variaran en todo el rango de caudal. El caudal medio en este periodo es de  $443 \text{ m}^3/\text{s}$  con un valor máximo de  $759 \text{ m}^3/\text{s}$  y un valor mínimo de  $119 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La Figura No. 17 muestra los resultados de la verificación del modelo.

Figura No. 17 Resultado de la verificación del modelo





Las siguientes son las conclusiones de la etapa de verificación:

- En general, el promedio de error es de 23.7%.
- La tendencia general en el cambio de nivel de lámina de agua es mantenida a lo largo de todo el tiempo, es decir el modelo es sensible a pequeños cambios en el nivel de la lámina de agua aunque su magnitud no sea exactamente igual a la registrada.
- Para el rango de caudal bajo el modelo una vez mas sobrestima el nivel de la lámina de agua y se tiene que en promedio el porcentaje de error es de 54%.
- Para caudales altos, el nivel es subestimado con un promedio de error de 8%.
- El día en que se produjo el máximo nivel de este periodo (correspondiente a  $Q = 759 \text{ m}^3/\text{s}$ ) el error fue tan solo de 12.1%.

Como conclusión se puede afirmar que el modelo simula muy adecuadamente valores medios de caudal y de forma aceptable valores altos de caudal. Esto se considera lo suficientemente bueno para realizar simulaciones confiables del río Sinú y poder llegar a plantear soluciones y soportar la toma de decisiones ya que la mayoría de las simulaciones se deberán realizar con caudales medios o altos.

#### *6.4.3.4 Simulaciones Realizadas con el Modelo*

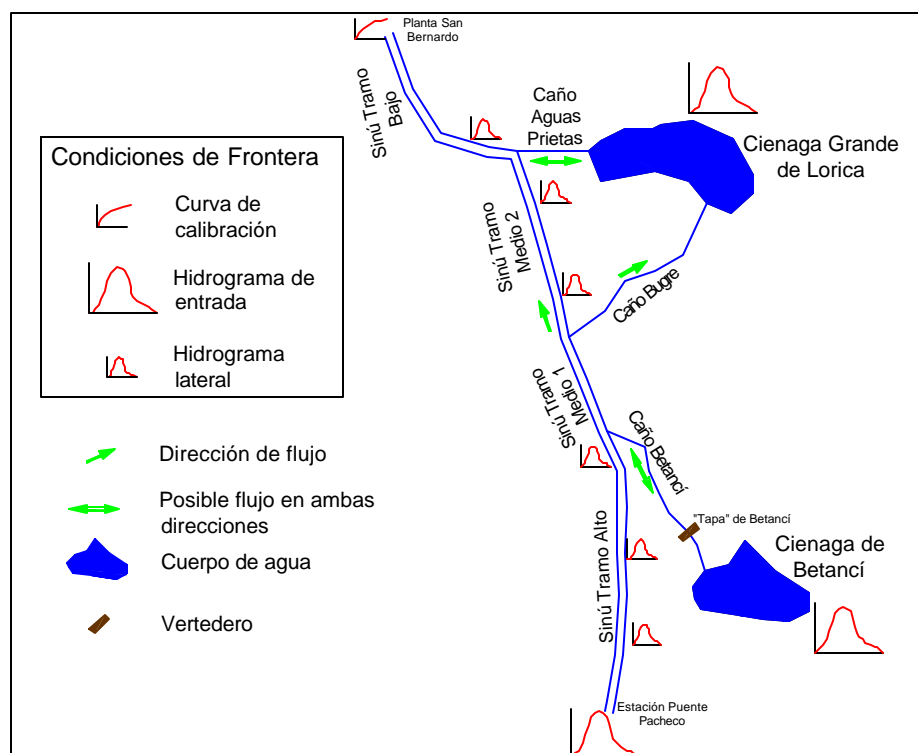
La configuración del modelo final se planteó como un sistema completo de subsistemas interconectados que representa en la cuenca del río Sinú y que en forma global reflejan el comportamiento del río y los principales caños y ciénagas que conforman su hidrografía:

- Río Sinú – Tramo Sinú alto: desde la estación Puente Pacheco (k281+400) hasta la estación Nueva Colombia (k167+000).
- Río Sinú – Tramo Sinú medio 1: desde la estación Gallo Crudo (k157+500) hasta la estación Mocarí (k108+700).
- Río Sinú – Tramo Sinú medio 2: desde la estación Isla Blanca (k103+000) hasta la estación La Palma (k50+300).
- Río Sinú – Tramo Sinú bajo: desde la estación Cotocá (k44+700) hasta la Planta de San Bernardo (k17+300).
- Caño Bugre: desde la confluencia de los tramos Sinú medio 1 y Sinú medio 2 hasta la Ciénaga Grande del Bajo Sinú.
- Ciénaga Grande del Bajo Sinú: modelada como un cuerpo de agua en HEC-RAS con una entrada de caudal de su cuenca propia y una entrada por el Caño

- Bugre. Conectada al río Sinú por el Caño Aguas Prietas el cual puede tener flujo positivo (sentido ciénaga – río) o negativo (sentido río – ciénaga).
- Caño Aguas Prietas: desde la Ciénaga Grande del Bajo Sinú hasta la confluencia de los tramos Sinú medio 2 y Sinú bajo.
- Ciénaga de Betancí: modelada como un cuerpo de agua en HEC-RAS con una entrada de caudal de su cuenca propia. Conectada al río Sinú por el Caño Betancí el cual puede tener flujo positivo (sentido ciénaga – río) o negativo (sentido río – ciénaga).
- Caño Betancí: desde la Ciénaga de Betancí hasta la confluencia de los tramos Sinú alto y Sinú medio 1.

La Figura No. 18 muestra un esquema de los subsistemas modelados.

**Figura No. 18 Esquema del modelo hidráulico configurado en HEC-RAS para el río Sinú**

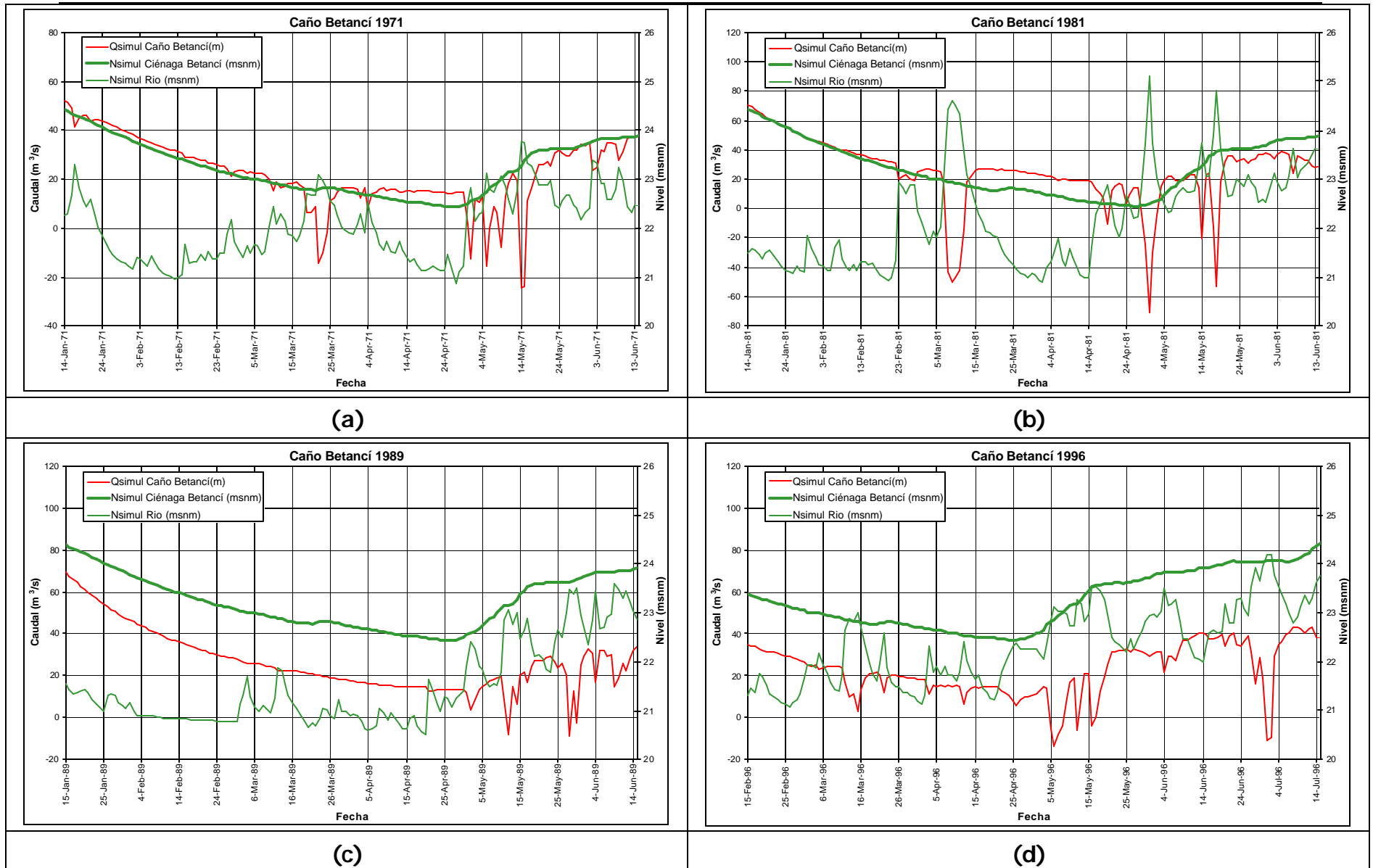


Adicionalmente se incluyó dentro del modelo un vertedero situado en el Caño Betancí que simula el comportamiento de la "Tapa". Esta fue construida a finales del año 2001, afectando notablemente la dinámica hidráulica del caño. El vertedero fue insertado 3700 m aguas abajo de la Ciénaga de Betancí con un ancho de 2.0 m y elevación de su cresta en la cota 24.5 m.s.n.m.

A continuación se describe cuales fueron las simulaciones realizadas con el modelo y cual fue su utilidad en el momento de extraer los resultados para sacar las respectivas conclusiones.

### ***Caño Betancí***

Como punto de partida se realizaron simulaciones históricas con el fin de determinar la dinámica hidráulica del caño y conocer en que momentos y para que condiciones hubo flujo en el sentido ciénaga - río (positivo) y cuando ocurrió flujo en sentido contrario, río – ciénaga (negativo). Estas fueron realizadas durante el año completo para los años 1971, 1981, 1989 y 1996, todos anteriores a la entrada en operación de la Central Hidroeléctrica de Urrá. Los resultados fueron graficados para su posterior análisis. En la Figura No. 19 se muestran tanto los niveles del río y de la ciénaga como el caudal en el caño. En general se aprecia que cuando el nivel de la ciénaga es superior al del río, el flujo en el caño es positivo pero cuando el nivel del río es mayor se tiene flujo negativo y el río ingresa hasta la ciénaga.



**Figura No. 19 Resultados de las simulaciones históricas en el Caño Betancí. Se aprecia que cuando el nivel de la ciénaga es superior al del río, el flujo en el caño es positivo pero cuando el nivel del río es mayor se tiene flujo negativo y este ingresa hasta la ciénaga**

Para todos los años el flujo negativo ocurre en los primeros meses del año principalmente entre Marzo y Mayo, cuando el nivel de la ciénaga está en sus mínimos niveles (22.5 m.s.n.m) y es posible que el río se remonte hasta la ciénaga. Hacia finales de la primera mitad del año, con la llegada de la época húmeda el nivel de la ciénaga se incrementa notablemente (25 m.s.n.m), quedando muy por encima del río y ya no es posible que se presente flujo negativo.

Para el año 1971 (parte (a) de la Figura No. 19) se presentó caudal negativo en 4 oportunidades con duraciones entre 1 y 3 días y valores de pico entre  $-10 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre 800 y 1100  $\text{m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $44 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el año 1981 (parte (b) de la Figura No. 19) se presentó caudal negativo en 5 oportunidades con duraciones entre 2 y 5 días y valores de pico entre  $-20 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-70 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre 1200 y 1400  $\text{m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $47 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el año 1989 (parte (c) de la Figura No. 19) se presentó caudal negativo en 3 oportunidades con duraciones de 1 día y valores de pico entre  $-3 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal de 800  $\text{m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ .

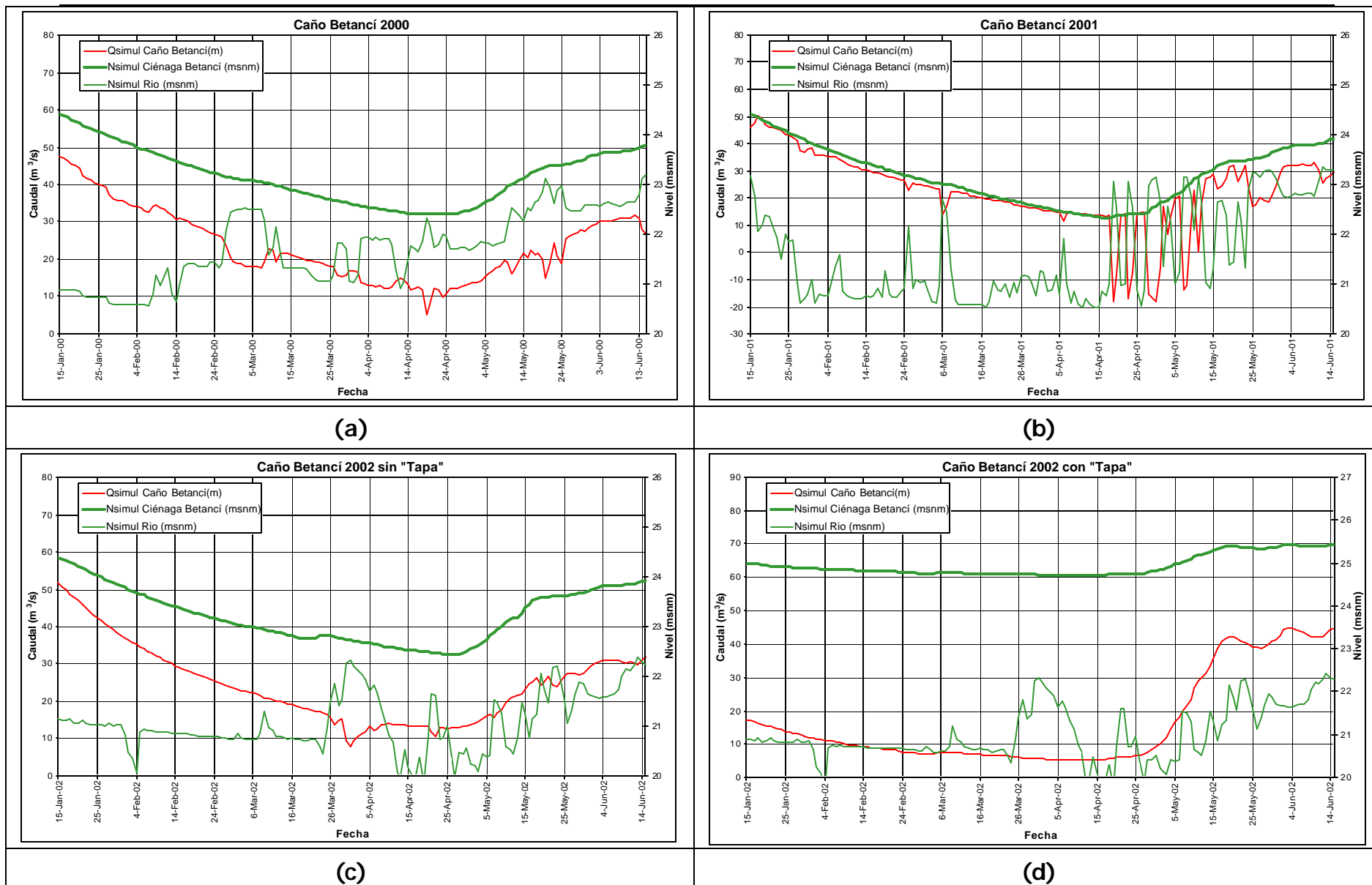
Para el año 1996 (parte (d) de la Figura No. 19) se presentó caudal negativo en 3 oportunidades con duraciones entre 1 y 3 días y valores de pico entre  $-3 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-13 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre 800  $\text{m}^3/\text{s}$  y 1000  $\text{m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De esta manera se puede concluir que se presentaba flujo negativo en el Caño Betancí antes de la entrada en operación de Urrá.

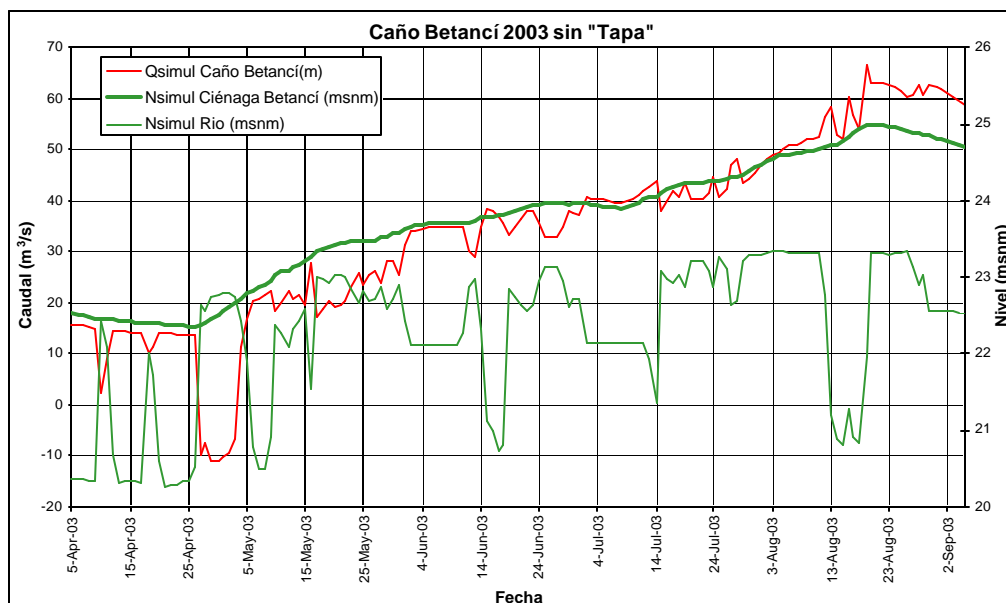
Posteriormente se efectuaron simulaciones en años en los cuales ya se tenía la Central de Urrá operando. Estas fueron hechas para los años 2000, 2001, 2002 y 2003.

Cabe anotar que las simulaciones del 2002 y 2003 se realizaron bajo dos escenarios: 1) suponiendo que aun no se había construido la pequeña presa "Tapa", hecho que ocurrió en Noviembre de 2001 y 2) con la situación real incluyendo la "Tapa".

Los resultados para estas simulaciones se pueden ver en la Figura No. 20 y en la Figura No. 21.



**Figura No. 20 Resultados de las simulaciones en el Caño Betancí en los años en que ha operado la Central Hidroeléctrica de Urrá. Las posibilidades de flujo negativo disminuyen notablemente aunque sin embargo aun se pudo haber presentado (2001)**



**Figura No. 21 Resultado de la simulación en el Caño Betancí para el año 2003 suponiendo que no existía "Tapa"**

Para el año 2000 (parte (a) de la Figura No. 20) no se presenta flujo negativo en ningún momento del año lo que indica que el nivel en el río se mantiene todo el tiempo por debajo del de la ciénaga. Inclusive en los días en que la ciénaga se encontró en el mínimo nivel de 22.4 m.s.n.m (14 de Abril a 24 de Abril) el nivel del río estuvo mas bajo aun. Sin embargo, hacia la mitad de este periodo el nivel del río llego a estar tan solo a 10 cm bajo el de la ciénaga. Debido a esto se aprecia un descenso en el caudal del caño pero no hasta el punto de volverse en sentido contrario. Este coincide con un caudal pico de 400 m<sup>3</sup>/s en Angostura de Urrá. El caudal promedio en el caño fue de 42 m<sup>3</sup>/s.

Para el año 2001 (parte (b) de la Figura No. 20) se presentó caudal negativo en 4 oportunidades con duraciones entre 2 y 3 días y valores de pico entre -12 m<sup>3</sup>/s y -18 m<sup>3</sup>/s. Estos coinciden con picos de caudal de 650 m<sup>3</sup>/s en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de 44 m<sup>3</sup>/s.

Para el año 2002 (situación hipotética sin la pequeña presa "Tapa") no se presenta flujo en el sentido río – ciénaga (parte (c) de la Figura No. 20).

Para el año 2002 (situación real con la presa "Tapa") es aun mas difícil que se presentara flujo en el sentido río – ciénaga (parte (d) de la Figura No. 20). En las épocas del año en que esto ocurría (entre Marzo y Mayo), cuando la ciénaga estaba en su mínimo nivel entre 22 y 23 m.s.n.m, con la "Tapa" se mantiene en

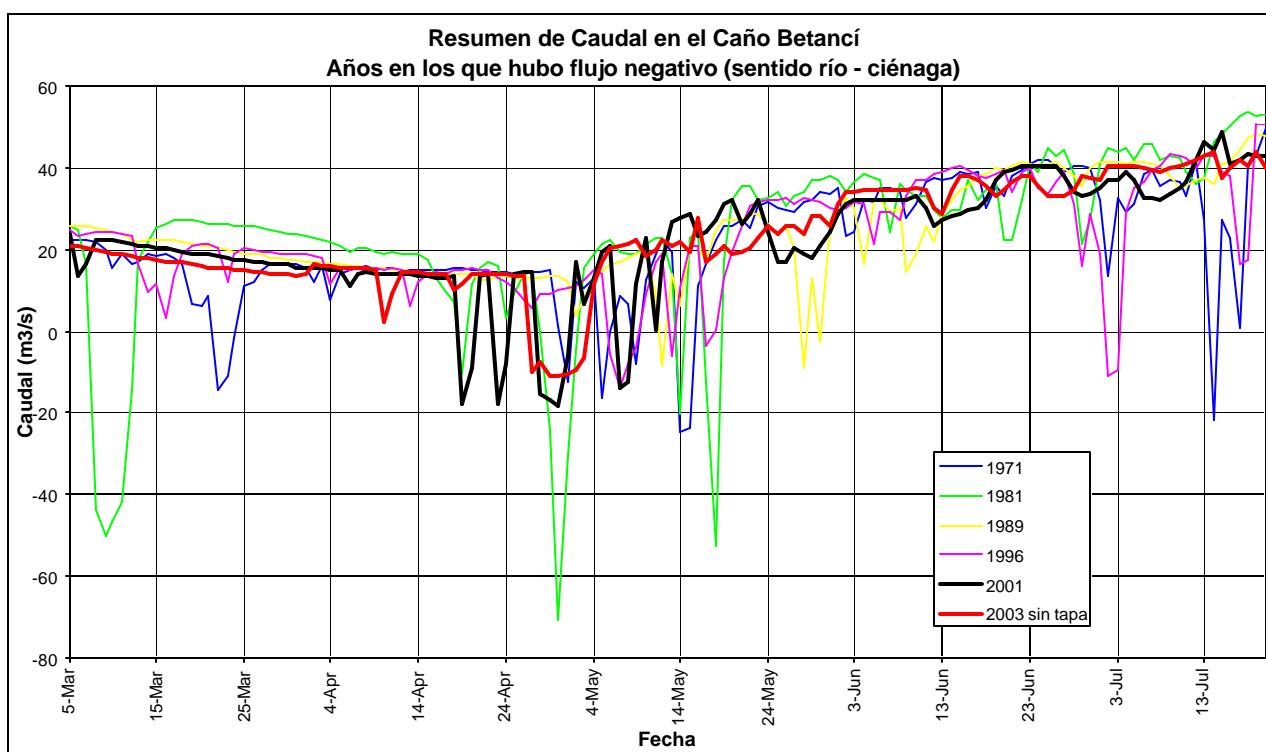


todo momento por encima de 24.5, lo que hace prácticamente imposible que esta elevación sea remontada por el río y se produzca flujo negativo.

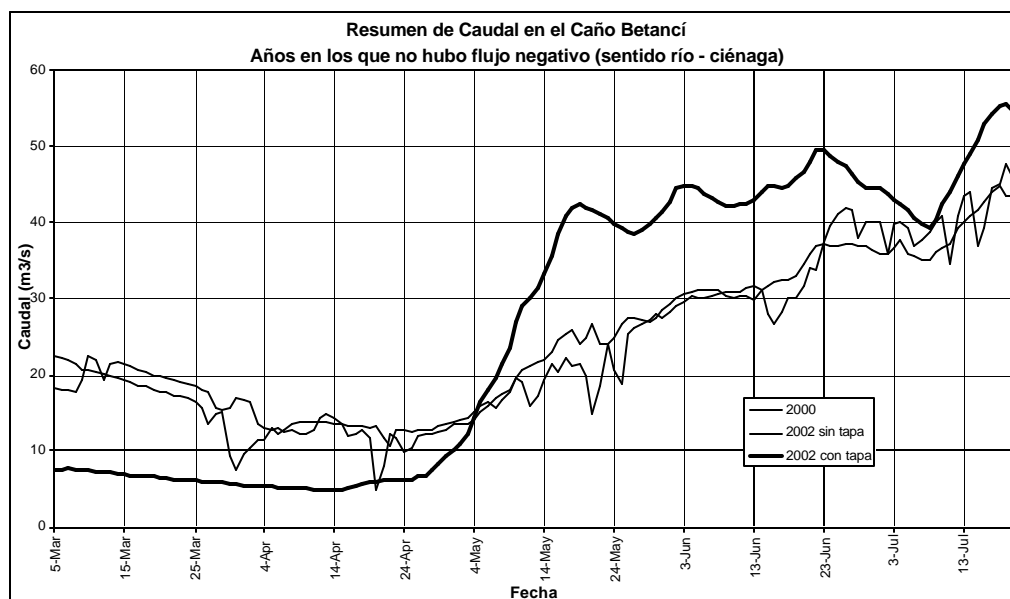
Para el año 2003 (situación hipotética sin "Tapa") se presentó caudal negativo en 1 oportunidad con duración de 7 días y valor de pico de  $-11 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura No. 21). Este coincide con pico de caudal de  $550 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $37 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la Figura No. 22 se muestra un resumen de caudal en el Caño Betancí de todas las simulaciones realizadas con el fin de poder comparar las magnitudes de flujo negativo.

**Figura No. 22 Resumen de caudal en el Caño Betancí para los años en que hubo flujo negativo**



**Figura No. 23 Resumen de caudal en el Caño Betancí para los años en que no hubo flujo negativo**

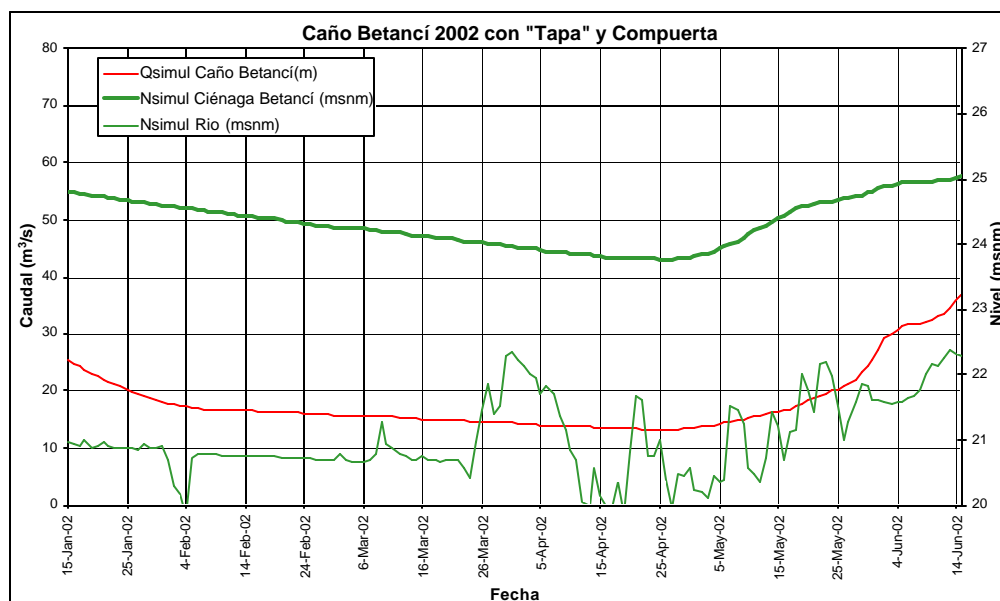


Finalmente se hizo una simulación con la situación del año 2002 en la cual se hace la suposición de una compuerta construida sobre en la pequeña presa "Tapa" para permitir que la Ciénaga de Betancí desagüe.

La compuerta con la que se simuló es de forma cuadrada de 1.5 m x 1.5 m localizada en el centro de la sección transversal de la "Tapa" con una cota batea de 21.5 m.s.n.m.

El resultado de esta simulación se muestra en la Figura No. 24

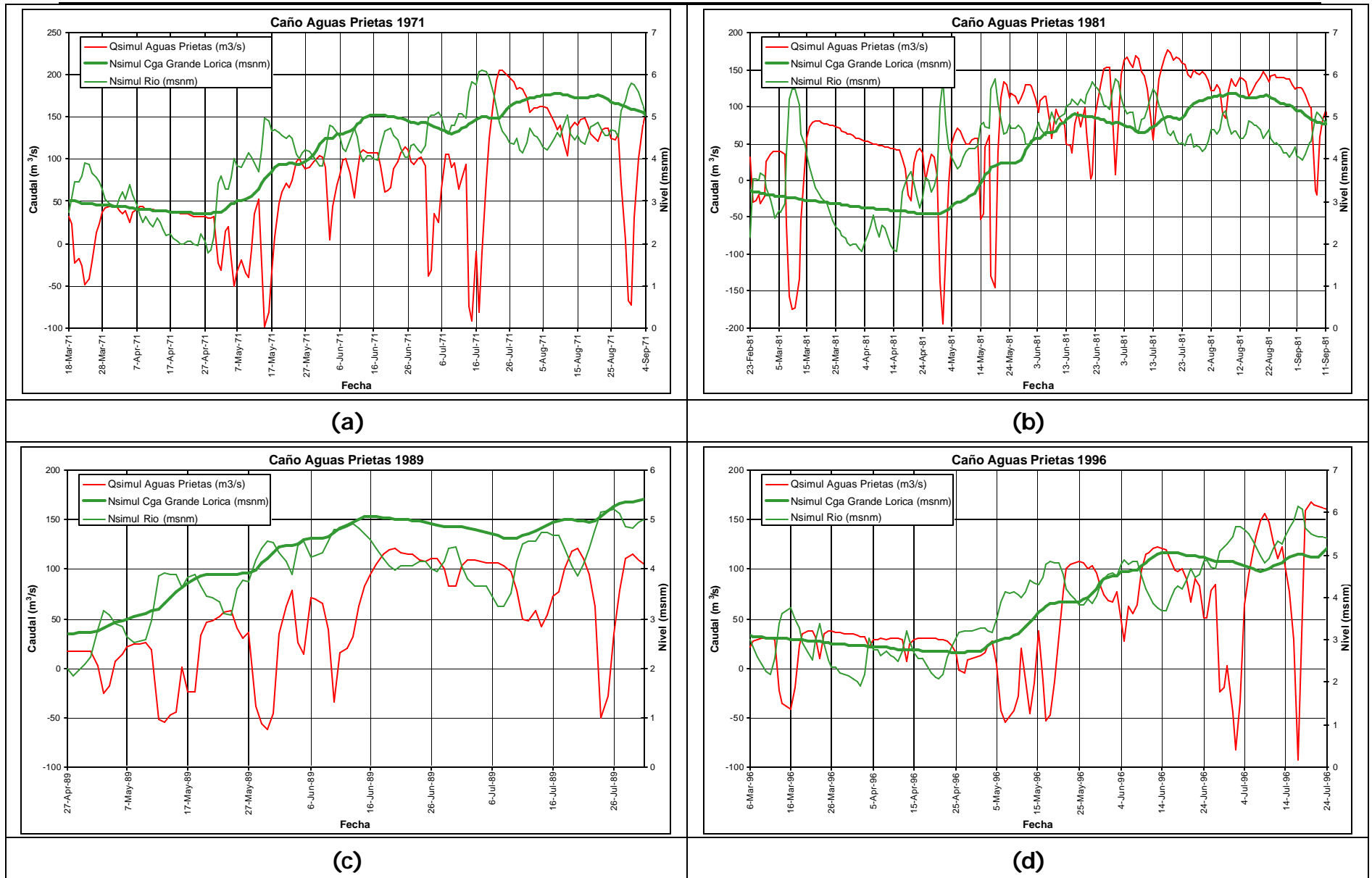
**Figura No. 24 Resultado de la simulación del año 2002 suponiendo que hubiera compuerta en la "Tapa"**



Como se puede ver el nivel de la ciénaga desciende hasta un valor de 23.80 m.s.n.m (0.70 m por debajo del nivel de la cresta del vertedero) debido al flujo que ocurre a través de la compuerta y a los bajos aportes de su cuenca de drenaje. A pesar de este descenso, el nivel del río sigue estando muy bajo como para generar flujo negativo

### ***Caño Aguas Prietas***

Al igual que para la Caño Betancí, en el Caño Aguas Prietas las simulaciones se hicieron con el fin de determinar el efecto de la operación de la Central Hidroeléctrica de Urrá. Se realizaron las mismas simulaciones históricas (1971, 1981, 1989 y 1996) con el fin de conocer en que momentos y para que condiciones del sistema Río Sinú – Ciénaga Grande del Bajo Sinú hubo flujo positivo o negativo. Los resultados fueron graficados para su posterior análisis. En la Figura No. 25 se muestran tanto los niveles del río y de la ciénaga como el caudal en el caño. En general se aprecia que cuando el nivel de la ciénaga es superior al del río, el flujo en el caño es positivo pero cuando el nivel del río es mayor se tiene flujo negativo y el río ingresa hasta la ciénaga.



**Figura No. 25 Resultados de las simulaciones históricas en el Caño Aguas Prietas. Se aprecia que cuando el nivel de la ciénaga es superior al del río, el flujo en el caño es positivo pero cuando el nivel del río es mayor se tiene flujo negativo y este ingresa hasta la ciénaga**

Para todos los años el flujo negativo ocurre entre los meses de Marzo y Septiembre, no necesariamente estando la ciénaga esta en sus mínimos niveles (entre 2.0 y 3.0 m.s.n.m) es posible que el río se remonte hasta la ciénaga. Hacia finales de la primera mitad del año, con la llegada de la época húmeda el nivel de la ciénaga se incrementa notablemente (entre 5.0 y 6.0 m.s.n.m), pero aun es posible que se de flujo negativo.

Para el año 1971 (parte (a) de la Figura No.25) se presentó caudal negativo en 7 oportunidades con duraciones entre 2 y 7 días y valores de pico entre  $-30 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre 600 y  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $95 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el año 1981 (parte (b) de la Figura No. 25) se presentó caudal negativo en 7 oportunidades con duraciones entre 2 y 6 días y valores de pico entre  $-27 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-193 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre 1100 y  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $95 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el año 1989 (parte (c) de la Figura No. 25) se presentó caudal negativo en 5 oportunidades con duraciones entre 2 y 4 días y valores de pico entre  $-30 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre 800  $\text{m}^3/\text{s}$  y 900  $\text{m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $77 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el año 1996 (parte (d) de la Figura No. 25) se presentó caudal negativo en 6 oportunidades con duraciones entre 2 y 5 días y valores de pico entre  $-22 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-93 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre 600  $\text{m}^3/\text{s}$  y  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $89 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De esta manera se puede apreciar cuales eran las magnitudes y las condiciones de los flujos negativos que se presentaban en el Caño Aguas Prietas antes de la entrada en operación de Urrá.

Posteriormente se efectuaron simulaciones en años en los cuales ya se tenía la Central de Urrá operando. Estas fueron hechas para los años 2000, 2001, 2002 y 2003.

Los resultados para estas simulaciones se pueden ver en la Figura No 26.

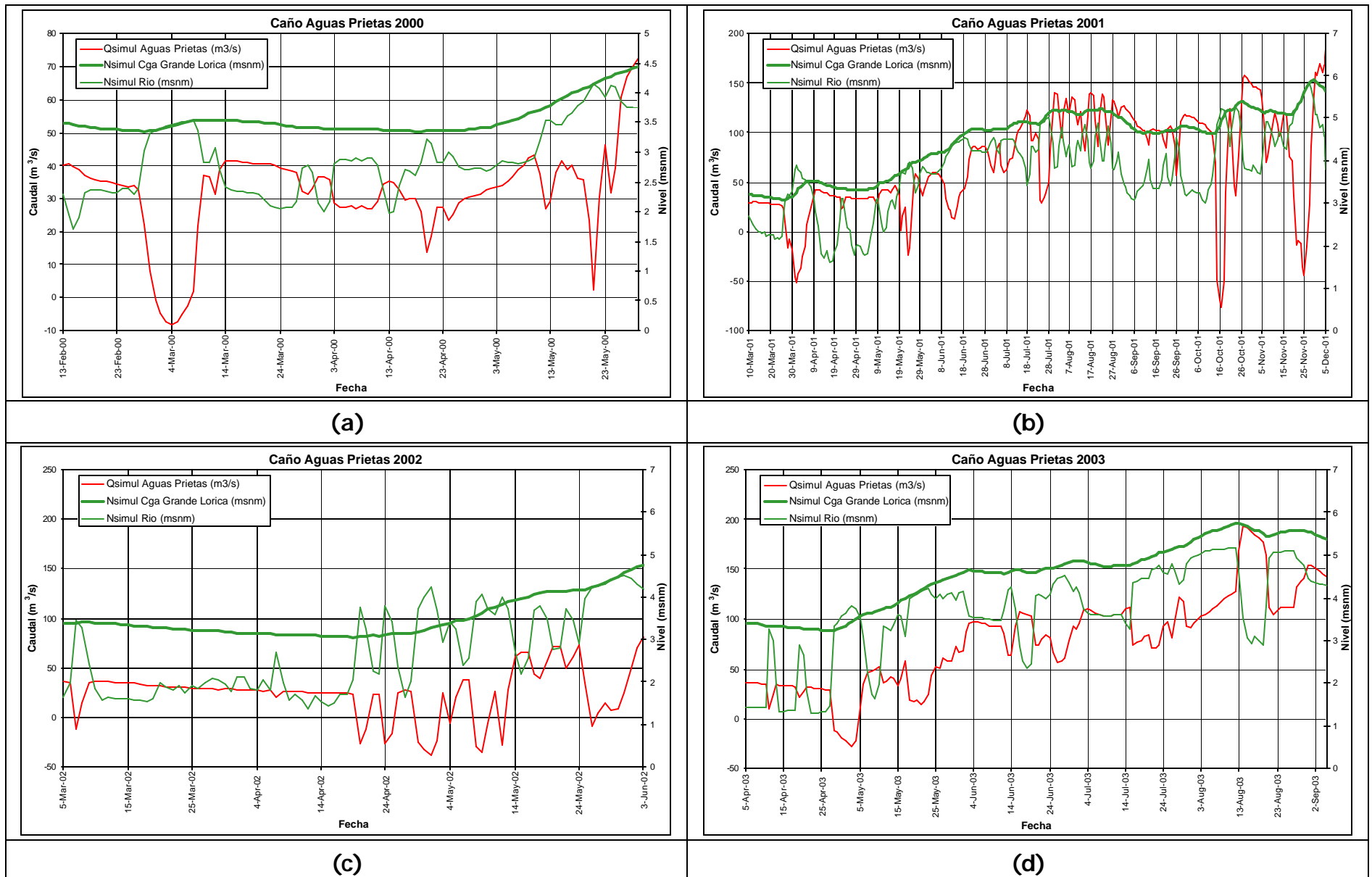


Figura No. 26 Resultados de las simulaciones en el Caño Aguas Prietas en los años en que ha operado la Central Hidroeléctrica de Urrá

Para el año 2000 (parte (a) de la Figura No. 26) se presentó caudal negativo en 1 oportunidad con duración de 7 días y valores de pico de  $-8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este coincide con pico de caudal de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $87 \text{ m}^3/\text{s}$ .

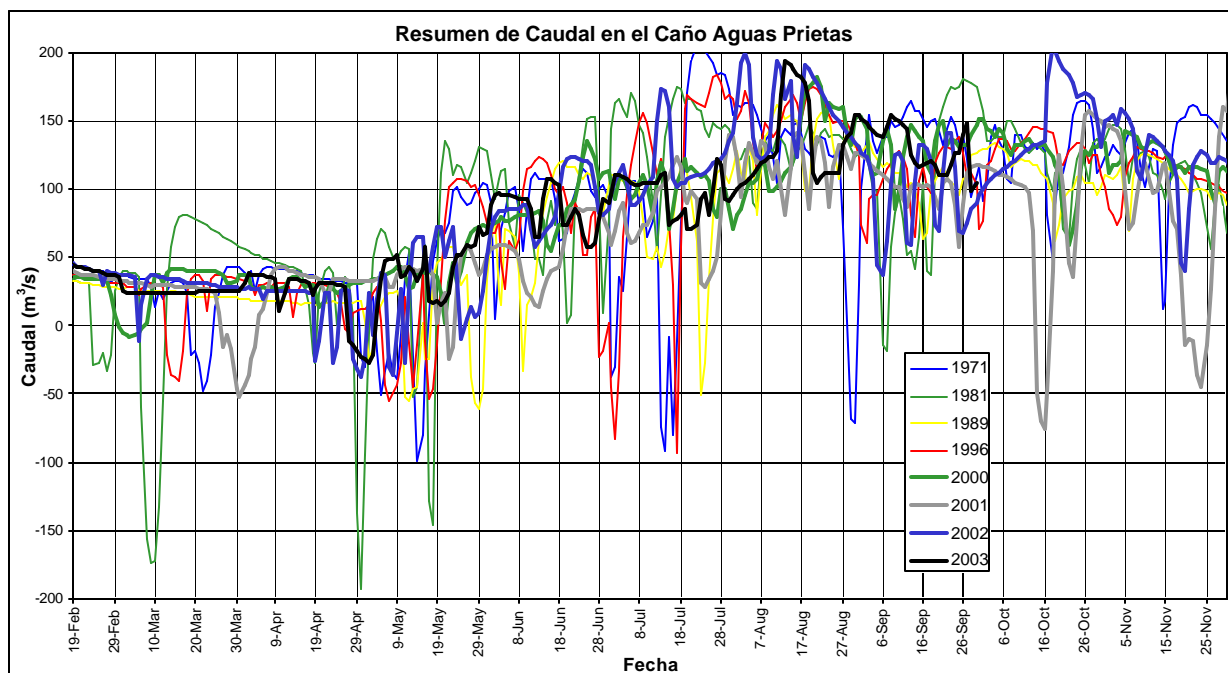
Para el año 2001 (parte (b) de la Figura No. 26) se presentó caudal negativo en 4 oportunidades con duraciones entre 2 y 9 días y valores de pico entre  $-44 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-75 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal entre  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $770 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el año 2002 (parte (c) de la Figura No. 26) se presentó caudal negativo en 5 oportunidades con duraciones entre 2 y 4 días y valores de pico entre  $-25 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $-37 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos coinciden con picos de caudal alrededor de  $650 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $92 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el año 2003 (parte (d) de la Figura No. 26) se presentó caudal negativo en 1 oportunidad con duración de 7 días y valores de pico de  $-27 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este coincide con pico de caudal de  $550 \text{ m}^3/\text{s}$  en Angostura de Urrá. El caudal medio en el caño fue de  $77 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la Figura No. 27 se muestra un resumen de caudal en el Caño Aguas Prietas de todas las simulaciones realizadas con el fin de poder comparar las magnitudes de flujo negativo.

**Figura No. 27 Resumen de caudal en el Caño Aguas Prietas**



## ***Simulación de Eventos Extremos***

### **Evento de Julio de 2003 (3262 m<sup>3</sup>/s en Angostura de Urrá)**

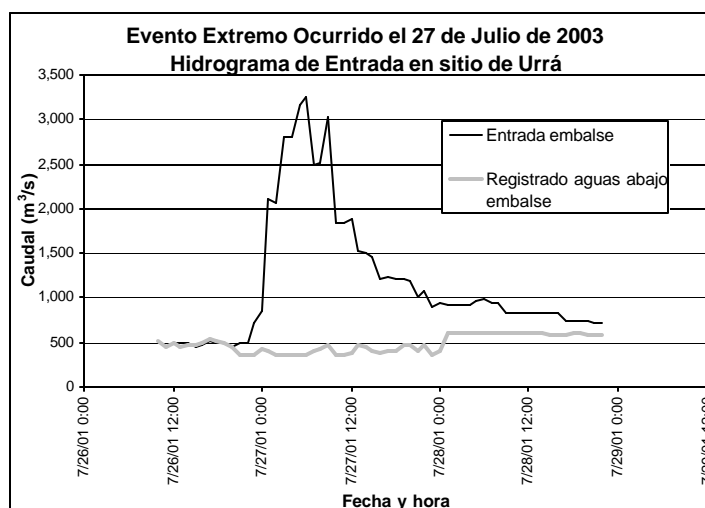
Dentro del diagnóstico del río Sinú después de la entrada en operación de la Central Hidroeléctrica de Urrá, es interesante examinar los resultados de la simulación para un evento extremo reportado por la Empresa Urra S.A. E.S.P. en caso de no existir el embalse de Urrá. Una gran creciente entró al embalse pero fue completamente amortiguada por este en razón al nivel bajo que presentaba por esos días y por consiguiente, su gran capacidad de almacenamiento.

El evento comenzó a la 1:00 AM del 27 de Julio de 2003 con un caudal de 2102 m<sup>3</sup>/s. A las 5:00 AM del mismo día alcanzó un pico de 3262 m<sup>3</sup>/s (Periodo de retorno  $T = 250$  años) y solo 27 horas después logró descender a menos de 800 m<sup>3</sup>/s. Aguas abajo del embalse, el caudal registrado no sobrepasó los 600 m<sup>3</sup>/s. En la Figura No. 28 se muestran tanto el hidrograma de entrada como el caudal registrado aguas abajo.



El objetivo de la simulación es determinar que hubiera sucedido con esta gran creciente en la parte media y baja de la cuenca si el embalse no estuviera para amortiguarla.

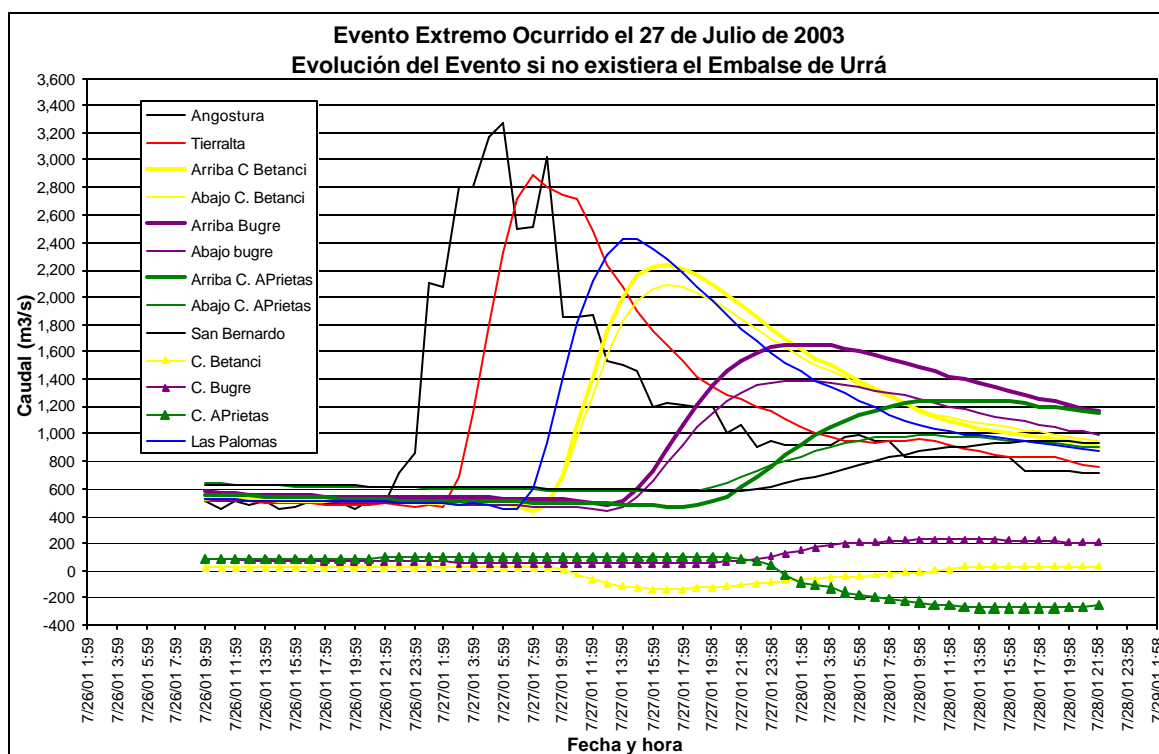
**Figura No. 28 Hidrograma de entrada en Angostura de Urrá del evento extremo ocurrido el 27 de Julio de 2003 cuyo caudal pico registrado fue de 3262 m<sup>3</sup>/s**



La simulación fue realizada con el modelo hidráulico del río Sinú desde Angostura hasta San Bernardo e incluyendo caños como Betancí, Aguas Prietas y Bugre, y las ciénagas de Betancí y Grande del Bajo Sinú.

Los hidrógramas resultantes en varios puntos de la cuenca se muestran en la Figura No. 29.

**Figura No. 29 Hidrogramas resultado de la simulación de la creciente ocurrida el 27 de Julio de 2003 si no existiera el Embalse de Urrá**



A medida que se desciende en la cuenca, el caudal pico del hidrógrama disminuye notablemente. En Tierralta el pico alcanza los 2900 m<sup>3</sup>/s dos horas después y en Las Palomas ha descendido a 2400 m<sup>3</sup>/s 9 horas mas tarde.

Esto se debe al efecto amortiguador del río en si pero adicionalmente este utiliza los caños y las ciénagas como cuerpos receptores en los cual puede almacenar parte de la creciente. Esto se ve muy claramente en el caso del Caño Betancí. En una sección sobre el río Sinú aguas arriba del caño el hidrógrama registra un pico de 2275 m<sup>3</sup>/s (11 h mas tarde) e inmediatamente aguas abajo el pico se disminuye a 2080 m<sup>3</sup>/s, es decir 200 m<sup>3</sup>/s fluyendo hacia la Ciénaga de Betancí, pasando inclusive sobre la "Tapa" (1.70 m de cabeza sobre el nivel del vertedero).

Con el Caño Bugre el caso es similar pasando de 1654 a 1390 m<sup>3</sup>/s (260 m<sup>3</sup>/s por el caño) con un retraso de 20 h. y en el Caño Aguas Prietas de 1247 a 987 m<sup>3</sup>/s (260 m<sup>3</sup>/s a través del caño) 32 h. después del pico en Urrá.

A pesar de la gran amortiguación del río y de los sistemas cenagosos, a lo largo de todo el río Sinú se presentan desbordamientos importantes por ambas márgenes. En la parte alta se tiene, en promedio, que el nivel de la lámina de agua está 2.6 m por encima del nivel de desbordamiento de la sección para la margen izquierda y 3.0 m para la margen derecha. En la cuenca media los valores promedio son 1.6 m y 1.8 m respectivamente y en la parte baja 2.4 m en ambas márgenes. En los caños la situación es similar: en el Caño Betancí por margen izquierda se tiene 1.6 m y 2.6 m por derecha, en el Caño Bugre 1.5 m y 2.0 m respectivamente y en el Caño Aguas Prietas 1.1 m y 0.5 m.

Se puede concluir que esta creciente hubiera desatado una gran catástrofe a lo largo de toda la cuenca del río Sinú.

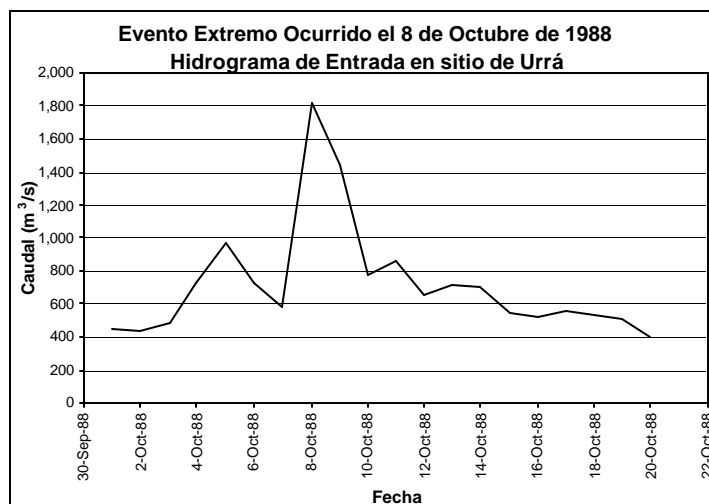
#### **Evento de Octubre de 1988 (1815 m<sup>3</sup>/s en Angostura de Urrá)**

Esta creciente es recordada por las grandes inundaciones que dejó a su paso.

El evento comenzó el 7 de Octubre de 1988 con un caudal de 579 m<sup>3</sup>/s. Al día siguiente alcanzó un pico de 1815 m<sup>3</sup>/s, 2 días después descendió a 772 m<sup>3</sup>/s. En la Figura No. 30 se muestran tanto el hidrógrama de entrada como el caudal registrado aguas abajo.

El objetivo de la simulación es determinar como se comporta el modelo ante esta creciente histórica.

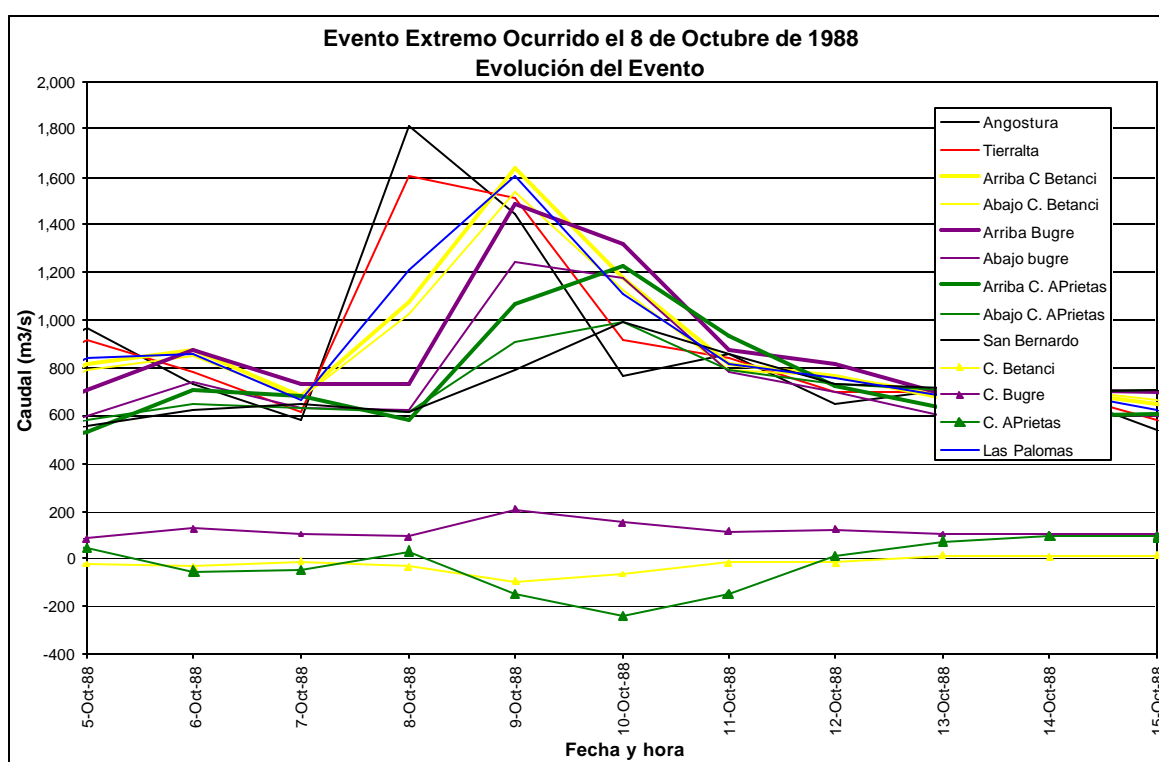
**Figura No. 30 Hidrógrama de entrada en Angostura de Urrá del evento extremo ocurrido el 8 de Octubre de 1988 cuyo caudal pico registrado fue de 1815 m<sup>3</sup>/s**



La simulación fue realizada con el modelo hidráulico del río Sinú desde Angostura hasta San Bernardo e incluyendo caños como Betancí, Aguas Prietas y Bugre, y los sistemas cenagosos de Betancí y Lórica.

Los hidrógramas resultantes en varios puntos de la cuenca se muestran en la Figura No. 31.

**Figura No. 31 Hidrógramas resultado de la simulación de la creciente ocurrida el 8 de Octubre de 1988**



A medida que se desciende en la cuenca, el caudal pico del hidrógrama disminuye notablemente. En Tierralta y en Las Palomas el pico alcanza los 1604 m<sup>3</sup>/s. En la cuenca baja el caudal pico llega a disminuir a 990 m<sup>3</sup>/s dos días después.

Esta amortiguación se debe a dos razones principalmente: 1) el efecto amortiguador del río por su baja pendiente y secciones amplias y 2) almacenamiento en caños y ciénagas. Un ejemplo de esto es el Caño Betancí. En una sección sobre el río Sinú aguas arriba del caño el hidrógrama registra un pico de 1630 m<sup>3</sup>/s retrasada 1 día e inmediatamente aguas abajo el pico se disminuye a 1540 m<sup>3</sup>/s, es decir 90 m<sup>3</sup>/s fluyendo hacia la Ciénaga de Betancí.

Con el Caño Bugre el caso es similar pasando de 1480 a 1240 m<sup>3</sup>/s (240 m<sup>3</sup>/s por el caño 1 día más tarde) y en el Caño Aguas Prietas de 1228 a 993 m<sup>3</sup>/s (235 m<sup>3</sup>/s a través del caño 2) días después.

## **6.5 RECURSO HÍDRICO SUBTERRANEO**

La descripción del recurso hídrico subterráneo existente en la cuenca hidrográfica del río Sinú se tomó del informe de hidrogeología del proyecto de EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE AGUAS SUBTERRANEAS (Mapa Hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000) realizado mediante convenio CVS e INGEOMINAS en febrero de 2004.

### **6.5.1 HIDROGEOLOGÍA**

#### *6.5.1.1 Generalidades*

Uno de los aspectos más importantes relacionados con el desarrollo de las aguas subterráneas es su regionalización. Los factores principales que condicionan la regionalización de este recurso son las características climatológicas, expresadas principalmente a través de la precipitación, la temperatura y la evaporación. Además, tienen importancia la fisiografía, la hidrografía, la vegetación y los suelos.

Aunque existe evidencia de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en la cuenca del río Sinú, a la fecha no se han realizado estudios que permitan obtener una escala de trabajo similar al del diagnóstico del presente capítulo. La identificación del potencial hídrico subterráneo en el área geográfica de la cuenca del río Sinú en el Departamento de Córdoba se determinó a partir del mapa hidrogeológico a escala 1:250.000 desarrollado por el INGEOMINAS. Para ello se siguieron los estándares de la Leyenda Internacional para Mapas Hidrogeológicos (IAH), adaptados por INGEOMINAS para Colombia, utilizados para la elaboración del Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia, a escala 1:500.000.

#### *6.5.1.2 Densidad de la Información Hidrogeológica*

De acuerdo con INGEOMINAS (2004) la elaboración del Mapa Hidrogeológico del Departamento de Córdoba contó con un cubrimiento de información hidrogeológica del 70%, considerando estudios regionales y locales efectuados en las partes oriental y nororiental del departamento y en el valle medio del Río Sinú.

Igualmente el área de la cuenca del río Sinú localizada en el Parque Nacional Natural Paramillo no cuenta con información acerca del recurso hídrico subterráneo.

#### *6.5.1.3 Mapa hidrogeológico*

Para la elaboración del Mapa Hidrogeológico se tuvo en cuenta la información recopilada en campo y oficina, además de memoria institucional relacionada con estudios similares en otras regiones del país.

Las unidades hidrogeológicas han sido agrupadas en tres categorías principales de acuerdo con el tipo de porosidad (primaria o secundaria), la permeabilidad de las rocas y/o los sedimentos y la ocurrencia o no de agua subterránea. Estas categorías se definen como: sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular, rocas con flujos esencialmente a través de fracturas (rocas fracturadas y/o carstificadas) y sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea consideradas estas últimas prácticamente impermeables.

#### ***Sedimentos y Rocas con Flujo Intergranular.***

Dentro de esta categoría se identifican por la cuenca del río Sinú las unidades geológicas, Betulia (Q<sub>1b</sub>), Depósitos aluviales Aterrazados (Q<sub>tg</sub>) y los Depósitos Aluviales (Q<sub>al</sub>).

#### ***Rocas con Flujos Esencialmente a través de fracturas (Rocas Fracturadas y/o Carstificadas).***

A esta categoría pertenece la unidad geológica El Cerrito (N<sub>1ec</sub>)

#### ***Sedimentos y Rocas con limitados recursos de Agua Subterránea.***

Dentro de esta clasificación se encuentran el resto de unidades geológicas cartografiadas en la cuenca del río Sinú, consideradas por sus características litológicas como prácticamente impermeables, agrupadas así:

Complejo de sedimentos constituidos por depósitos no consolidados de ambiente lacustre, deltáico y marino y por rocas sedimentarias Terciarias a Cretácicas, poco consolidadas a muy consolidadas, de origen marino y continental, las cuales conforman acuíferos de muy baja productividad.

Complejo de rocas volcánicas, ígneas y metamórficas, muy compactas y en ocasiones fracturadas, Cretácicas a Paleozoicas, consideradas prácticamente impermeables.

#### *6.5.1.4 Descripción de las Unidades Acuíferas existentes en la cuenca del río Sinú*

##### **Acuífero Betulia (Q1b).**

Está conformado por intercalaciones de arenas, gravas y arcillas en capas no continuas en la horizontal y cuyo espesor total puede llegar a alcanzar los 700 metros.

Se comporta como un acuífero libre a confinado de mediana productividad, con capacidades específicas de 0.3 l/s/m., valores promedio de transmisividad de 20 m<sup>2</sup>/día y coeficiente de almacenamiento promedio de 2.3 E-03. La conductividad hidráulica real de 5 m/día. Presenta buenas posibilidades de explotación a través de pozos con profundidades entre 100 y 250 metros. El área aflorante de la unidad se constituye en zona de recarga de alta capacidad de infiltración y flujo esencialmente intergranular. Algunos pozos profundos son surgentes y se calcula una descarga artificial promedio de 1400 m<sup>3</sup>/d, a través de aljibes y pozos con caudales de explotación entre 0.68 y 16 lps.

El agua del acuífero es bicarbonatada cálcica, con valores de conductividad eléctrica hasta de 200 µS/cm y de tipo blanda.

##### **Acuífero de Depósitos Aluviales. (Qal).**

Es un acuífero discontinuo de extensión local conformado por capas de grava, arena, limo y arcilla, depositadas en un ambiente fluvio-lacustre.

Se define como un acuífero libre a semiconfinado de baja productividad, con capacidades específicas entre 0.02 y 0.8 l/s/m., valores de transmisividad desde 30 hasta 80 m<sup>2</sup>/día y coeficiente de almacenamiento promedio de 1.0 E-03. La conductividad hidráulica real es de 0.5 m/día. y posibilidades de explotación a través de pozos entre 100 y 200 metros de profundidad.



Las áreas aflorantes de esta unidad se consideran zonas de recarga con baja capacidad de infiltración y flujo esencialmente intergranular.

Hidroquímicamente las aguas subterráneas existentes en los depósitos del río Sinú son también de tipo mixto, muy duras y con conductividades hasta de 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### ***Acuífero El Cerrito. (N1ec).***

Este acuífero consta de una alternancia de lodolitas y areniscas calcáreas de grano fino y lentes discontinuos de conglomerados e intercalaciones de limonitas y areniscas arcillosas y arenisca de grano fino hacia la parte media y superior.

Los niveles arenosos del Acuífero El Cerrito, especialmente en su parte superior, pueden desarrollar una alta porosidad secundaria por fracturamiento para almacenar y transmitir agua subterránea, comportándose como área de recarga, con alta capacidad de infiltración.

Se define como un acuífero semiconfinado a confinado de baja productividad, con capacidades específicas entre 0.03 y 0.2 l/s/m., valores de transmisividad entre 2.0 y 20  $\text{m}^2/\text{día}$  y coeficientes de almacenamiento entre 0.8 E-03 y 1E-03. Las posibilidades de explotación se presentan a través de pozos con profundidades entre 100 y 300 metros. La descarga artificial a través de pozos y aljibes es del orden de 2500  $\text{m}^3$  por día.

El agua del acuífero es de tipo bicarbonatada-sódica-cálcica, conductividad eléctrica hasta de 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y moderadamente blandas.

#### ***6.5.1.5 Descripción del Modelo Conceptual (INGEOMINAS 2004)***

La hidrogeología del Departamento de Córdoba esta controlada, de Occidente a Oriente, por tres bloques tectónicos longitudinales de dirección noreste, separados entre si por grandes fallas antiguas cubiertas por sedimentos Cuaternarios. Estos bloques se identifican en el presente informe con los nombres de Sinú, San Jacinto y Zona de Plataforma, truncados al sur por las estribaciones septentrionales de las Cordilleras Occidental y Central.

El Bloque Tectónico del Sinú se encuentra conformado por el Cinturón del Sinú, del cual hace parte la Serranía Abibe-Las Palomas, con alturas entre 1600 y 2200 m.s.n.m, caracterizado por contener amplios y suaves sinclinales y estrechos anticlinales de corta extensión, como también geoformas radiales dominadas por volcanes de lodo y estructuras dómicas, que guardan estrecha relación con un denso fracturamiento longitudinal y transversal, producto del empuje de la placa Caribe. Se extiende por todo el occidente del Departamento en una franja que tiene una amplitud hasta de 40 Km., delimitado en su borde Oriental por el Lineamiento del Sinú.

Las rocas de este bloque tectónico son esencialmente sedimentitas de granulometría fina perteneciente a una facies carbonatada poco profunda del Eoceno, hasta de 1000 m de espesor, representada por las formaciones Chert de la Candelaria, Unidad Calcárea de la Risa y Arenisca del Manantial, esta última considerada potencialmente acuífera. Encima de esta facies se encuentra una secuencia turbidítica con edades que van desde el Eoceno hasta el Plioceno, con un espesor cercano a los 5000 m, representada por las formaciones Maralú, Pavo, Floresanto, Pajuil, Moñitos, Arenas Monas, Broqueles y Corpa, primordialmente de carácter impermeable, con excepción de la Formación Arenas Monas, considerada un acuífero potencial.

En este bloque tectónico se desarrolla la cuenca hidrográfica de la franja costera, constituida por la Serranía Abibe-Las Palomas en su vertiente Occidental. Esta cuenca se caracteriza por desarrollar un drenaje de corta trayectoria, denso pero intermitente, que desemboca directamente al Mar Caribe o al Río Canalete, su corriente fluvial más importante, que en la época seca reduce considerablemente su caudal. Los Depósitos Aluviales del Río Canalete conforman el bajo topográfico a los alrededores del Municipio de Canalete que tienen un espesor promedio de 10 m.

El Bloque Tectónico de San Jacinto equivale al cinturón del mismo nombre, del cual hace parte la Serranía de San Jerónimo con alturas en el extremo Sur superiores a 500 m.s.n.m., mientras que hacia el Norte, a partir del Cerro Murrucucú, se convierte en colinas bajas con alturas entre 100 y 200 m.s.n.m. y en Sabanas. Este bloque tectónico es una franja de dirección Norte - Sur que se extiende por todo el centro del Departamento, con un ancho que varía entre 60 y 100 Km, delimitado al Oriente por el sistema de Fallas de Romeral. Se caracteriza por contener estructuras anticlinales y sinclinales alargadas donde predomina el fracturamiento longitudinal.

En este bloque tectónico se desarrolla la cuenca hidrográfica del Río Sinú, donde la Serranía Abibe-Las Palomas con alturas entre 1600 y 2200 m.s.n.m conforma la vertiente Occidental, mientras que la Oriental está conformada por la Serranía de San Jerónimo con alturas entre 100 y 200 m.s.n.m.

El bloque esta constituido en su parte inferior por varios cuerpos de rocas ultramáficas del Jurásico. En la parte media y superior está conformada por una espesa secuencia sedimentaria de carácter arcillolítico con algunos lentes de carbón y edades que oscilan desde el Cretácico Superior hasta el Terciario. A este bloque pertenecen las formaciones Cansona, San Cayetano, Ciénaga de Oro y Porquera, cubierta por el Depósito Aluvial del Río Sinú, considerado el principal acuífero de este bloque.

En el bloque tectónico de San Jacinto, principal acuífero lo constituye los Depósitos Aluviales del Río Sinú, que tiene un espesor que varía entre 50 y 150 m, recargado posiblemente por el propio río y el agua lluvia, con flujos subterráneos convergentes hacia el centro de la cuenca. Este acuífero descansa sobre un basamento hidrogeológico impermeable constituido por las formaciones San Cayetano, Ciénaga de Oro y Porquera, comportándose como un acuífero aislado.

La recarga proveniente de corrientes tributarias que drenan rocas de origen marino adyacentes al Depósito Aluvial del Río Sinú contribuye a la mineralización que presenta el agua del acuífero, la cual de acuerdo al diagrama Piper, es de tipo mixto. El agua es dulce (valor en el límite dulce-salobre) y muy dura.

Los diferentes mapas de isoconcentraciones (sólidos disueltos, sulfatos y cloruros), muestran que esta zona es donde se encuentran las más altas concentraciones de iones en solución para todo el departamento, principalmente hacia el área de la ciudad de Montería. No es un agua apta para consumo humano, aunque es empleada para abastecimiento doméstico. No debe ser empleada para riego ya que existe alto peligro de salinización del suelo.

El otro sistema hidrogeológico lo conforman los bloques tectónicos de San Jacinto y Zona de Plataforma, donde la secuencia arcillosa impermeable del bloque del Sinú (Formaciones San Cayetano, Ciénaga de Oro y Porquera), constituye el basamento hidrogeológico de las unidades acuíferas que lo suprayacen (Tolúviejo, El Cerrito, Sincelejo, Betulia, La Mojana y los Depósitos Aluviales)

Los acuíferos de este sistema son recargados principalmente por el agua lluvia infiltrada en sus áreas de afloramiento situadas en la vertiente Occidental (Serranía

de San Jerónimo) a partir del trazo de la Falla de Romeral, como también, pero en menor proporción, por las corrientes superficiales que provienen de esta serranía. Por consiguiente la dirección regional del flujo subterráneo es fundamentalmente de Occidente a Oriente, siguiendo la pendiente estructural de toda la secuencia sedimentaria, existiendo además un flujo vertical que se manifiesta en pozos saltantes que captan los acuíferos superiores Betulia y La Mojana.. Como un acuífero aislado se encuentran los Depósitos Aluviales del río Sinú.

## 6.5.2 VULNERABILIDAD

### 6.5.2.1 *Generalidades*

La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación tiene por objeto establecer el grado de defensa natural del sistema ante la alteración potencial de la calidad del agua subterránea, basándose en la determinación de las propiedades físicas del medio no saturado, que lo convierten en una herramienta de protección del recurso.

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación la establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración a través del suelo y de la zona no saturada. Foster (1987), sugiere que la definición más confiable de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos es la medida de el grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero y el grado de atenuación a la contaminación que posean los estratos de la zona no saturada, como resultado de retención y/o reacción físico – química.

Teniendo en cuenta que la cartografía de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación se realizó a escala 1:250.000, la evaluación se debe considerar de reconocimiento y el mapa es de tipo orientativo.

### 6.5.2.2 *Metodología GOD*

Existen varias metodologías para la evaluación de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y su aplicación depende principalmente de la escala de presentación y de la información existente. En el ámbito de Latinoamérica las más utilizadas, de la más sencilla a la más compleja, son GOD, DRASTIC Y

SINTACS, la primera es una metodología de puntaje de las variables y las dos últimas son metodologías de puntaje y peso.

En Colombia debido al nivel de información se ha empleado el método GOD (Foster, 1987), recomendado para áreas con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de los mismos. El método GOD considera tres parámetros de evaluación:

- **Groundwater (G):** Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero y establece las siguientes categorías: no confinado, no confinado-cubierto, semiconfinado, confinado y sin presencia de acuífero. La condición de confinamiento de los acuíferos es una función que interviene directamente en la vulnerabilidad natural del agua subterránea ante una contaminación potencial, ya que en general en acuíferos confinados o cautivos con un espesor considerable de capa confinante, el acceso de contaminantes es más restringido.
- **Overall (O):** Este parámetro incluye una caracterización global de la zona que suprayace al acuífero, en cuanto a la naturaleza litológica, al grado de consolidación y el fracturamiento de la roca. La importancia de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad radica en su potencial para la interceptación, sorción y eliminación de bacterias y virus patógenos; para la atenuación de minerales pesados y químicos orgánicos a través de precipitación (carbonatos, sulfatos e hidróxidos); para la sorción e intercambio catiónico y para la sorción y biodegradación de algunos compuestos orgánicos de origen natural o sintético. Sin embargo la zona no saturada puede en ocasiones actuar sólo como un retardante del efecto contaminante, cuando se enfrenta a contaminantes móviles y persistentes.

Las características litológicas de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos, pueden dar indicios de la condición de confinamiento de los acuíferos y de la profundidad a la que se podría encontrar el agua.

- **Depth (D):** Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados.

### *6.5.2.3 Valoración de los Parámetros GOD Para los Principales Acuíferos.*

A continuación se hace una descripción de los criterios de esta valoración.

#### ***Acuíferos Aluviales y de Terrazas Aluviales.***

Asociados principalmente a depósitos aluviales y de terrazas aluviales de los ríos Sinú, San Jorge, Canalete y sus afluentes, son generalmente de extensión local, baja productividad, en capas individuales, discontinuas y con espesores que van desde los 200 metros en el río Sinú hasta los 10 metros en el río Canalete. La mayoría son de carácter libre aunque localmente confinados por niveles arcillosos, en capas no conectados hidráulicamente y se constituyen como áreas de recarga de poca capacidad de infiltración; el valor de indexación corresponde a 1.0 en su condición de acuífero (Parámetro "G").

La zona no saturada de la mayor parte de los acuíferos aluviales y de terrazas aluviales, está compuesta por sedimentos inconsolidados, permeables, constituidos por intercalaciones de limos, gravas, arenas y arcillas, a los cuales se les asigna una valoración de 0.7 en dominio litológico (Parámetro "O"). A los depósitos de playa constituidos por arenas finas, se les asigna una valoración de 0.8 en este parámetro.

Litológicamente la zona no saturada está constituida por intercalaciones de espesor variable de arcillas, arcilla plástica con poco contenido de arena y arena fina a gruesa (ocasionalmente gravas), con matriz arcillosa, con porosidad primaria que conforman una gran llanura aluvial; dado que el parámetro "O" (dominio litológico) son intercalaciones, se le asigna un índice igual a 0.7.

Los niveles estáticos para esta unidad son muy someros principalmente cerca al nivel base de los ríos hasta los 6.0 m de profundidad en zonas puntuales de los Depósitos Aluviales del río Sinú, asignando valores que van desde 1.0 hasta 0.8 en el Parámetro "D".

#### ***Acuífero Betulia.***

El área de afloramiento constituye la zona de recarga principal de este acuífero, aunque de mediana capacidad de infiltración, por lo tanto se considera en general en condiciones de no confinamiento para el acuífero superficial, pero con cubrimientos locales por presencia de capas arcillosas en superficie, que en

promedio alcanzan 5 metros de espesor, al sureste del río San Jorge, con un índice "G" de 1.0 y de 0.5, respectivamente.

En superficie y zona no saturada, predominan las intercalaciones de limos, arcillas, arenas y arenas arcillosas, según los registros litológicos de pozos. Asignándole un valor "O" de 0.7. La profundidad del nivel estático en términos generales es subsuperficial, con valores de menos de 5 metros de profundidad, esporádicamente en algunos sectores alcanza hasta los 9 m de profundidad. Los índices en el parámetro "D" varían desde 1.0 hasta 0.8.

### ***Acuífero El Cerrito.***

Por las características litológicas y la extensión aflorante que se constituye zona de recarga, esta unidad se comporta como un acuífero en condiciones no confinadas, asignándosele para el parámetro "G" el valor de 1.0.

Por el predominio litológico arenoso en la zona no saturada, se asignó a "O" el valor de 0.7. Los niveles estáticos de los aljibes muestran unos valores muy subsuperficiales y puntualmente se reportan dos datos mayores de 10 m de profundidad. Se indexó el parámetro "D" entre 1.0 y 0.7.

#### *6.5.2.4 Cálculo de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación.*

Una vez obtenidos cada uno de los parámetros GOD, para los principales acuíferos, se procedió a realizar la multiplicación de los parámetros utilizando para esto el programa ARC/INFO.

### ***Acuífero Aluviales y de Terrazas Aluviales.***

Después de multiplicar y de procesar en ARC/INFO los índices asignados a los parámetros G, O y D para este acuífero, se obtuvo una vulnerabilidad alta a extrema, con valores de indexación entre 0.5 y 0.9, incluye la ciudad de Montería y algunos municipios como Corozal, San Pelayo, Ciénaga de Oro y alrededores de Puerto Escondido y Canalete.

### ***Acuífero Betulia.***

Al sur del río San Jorge el acuífero se cartografió como de baja a moderada susceptibilidad a la contaminación, debido a la capa de arcilla que lo cubre y que se comporta como barrera de protección. En el resto del acuífero se cartografía una vulnerabilidad alta. En las zonas de flujos surgentes la vulnerabilidad es baja.

### ***Acuífero El Cerrito.***

De acuerdo con la indexación de los valores numéricos asignados, el acuífero se clasifica en términos generales con vulnerabilidad alta a la contaminación. En algunos sectores la susceptibilidad a la contaminación es moderada.

## 6.5.3 POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO

### *6.5.3.1 Estimación de Reservas*

Se entiende por reservas, en sentido amplio, a la totalidad de agua movilizable existente en un acuífero o sistema acuífero, es decir el producto del volumen total del acuífero por su coeficiente de almacenamiento, si el acuífero es confinado, o por el rendimiento específico si se trata de un acuífero libre.

Las reservas estáticas o pasivas son el volumen de agua no renovable contenido dentro del acuífero que en general es deseable no explotar, salvo en casos extremos de déficit. Su aprovechamiento incontrolado, puede ocasionar impactos ambientales irreversibles, tales como desecación de manantiales, quebradas, ríos, bosques y subsidencia del terreno.

Para el cálculo de los parámetros requeridos en este análisis (espesor y coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico), se promediaron los diferentes datos que se compilaron durante el desarrollo del proyecto; el valor de las áreas de cada acuífero fue obtenido con la ayuda de una herramienta SIG. Para las unidades acuíferas con espesor superior a los 500 metros, se tomó este valor como espesor límite para los cálculos, debido a ser éste el espesor económicamente óptimo para aprovechar agua subterránea en la zona. En la tabla No. 18 se muestra el volumen de las reservas calculadas para los diferentes acuíferos evaluados.



### 6.5.3.2 Estimación de Recursos

Se entiende por recurso el caudal de agua (Volumen por unidad de tiempo) que puede obtenerse de un acuífero de forma permanentemente o por lo menos durante un largo tiempo (decenas de años), sin sobrepasar el régimen estacionario o de equilibrio.

**Tabla No. 18 Volúmenes de reservas de aguas subterráneas**

ACUIFERO	AREA (Km <sup>2</sup> )	ESPESOR PROMEDIO	Ne Prom.	Reservas (Mm <sup>3</sup> )
BETULIA	2,4E+09	400	0,14	94393
DEPOSITOS ALUVIALES ATERRAZADOS	8,7E+08	85	0,17	11480
DEPOSITOS ALUVIALES RIO SINU	4,5E+09	110	0,12	55359
EL CERRITO	2,1E+09	550	0,05	26504
<b>RESERVAS TOTALES</b>				<b>187736</b>

*Ne. Prom.: Porosidad efectiva promedio, Valores tomados de Custodio y Llamas (2001), según la litología de cada uno de los acuíferos.*

En otras palabras, los recursos representan la lámina de agua que recarga el sistema, por unidad de tiempo.

Para el cálculo de los recursos de agua subterránea se utilizó un método hidrodinámico, el cual se basa en la ley de Darcy y el valor de los parámetros hidrogeológicos calculados para cada acuífero.

La información con la cual se cuenta hasta la fecha permitió solamente calcular los valores de los recursos de los acuíferos Depósitos Aluviales (en los depósitos de los Ríos Sinú), acuífero El Cerrito. Aunque estos resultados (tabla No. 19), son preliminares, se consideran como una primera aproximación aceptable a nivel regional.

**Tabla No. 19 Recursos de aguas subterráneas**

ACUIFERO	ANCHO DEL ACUIFERO* (m)	TRANSMISIVIDAD* (m <sup>2</sup> /día)	GRADIENTE HIDRAULICO*	RECURSOS (Mm <sup>3</sup> /año)
EL CERRITO	6120	11	0,014	0,35
DEPOSITOS ALUVIALES (RIO SINU)	15875	50	0,012	3,495
<b>RECURSOS TOTAL</b>				<b>3.845</b>

*\* valores promedios.*

*Acuíferos libres a semiconfinad*

## **6.6 CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL**

La calidad natural se relaciona directamente con las características propias del agua; dependiendo del origen y del medio en donde se encuentre, de las sustancias disueltas y en suspensión contenidas en el agua, del tipo de suelo que atraviesa del grado de conservación y el uso de los mismos. Dentro de la cuenca del río Sinú el agua se encuentra en distintos cuerpos hídricos (arroyo, quebradas, ríos, humedales) localizados en diferentes áreas geográficas y condiciones físico-bióticas.

### **6.6.1 Generalidades**

La calidad del agua es parte importante de los niveles de vida en cualquiera de sus manifestaciones. Hoy por hoy, el deterioro creciente del recurso hídrico ha disminuido la biodiversidad de las especies en los principales ecosistemas del país, reduciendo su potencial ictiológico con graves consecuencias sociales y económicas para los habitantes de la región.

Desde el punto de vista de la salud el agua superficial es uno de los medios que facilitan la propagación de enfermedades adquiridas por contacto o por ingestión accidental, se mencionan con mucha frecuencia las enfermedades diarreicas agudas (E.D.A), la tifo y paratifoidea, disentería bacilar y amibiana, infecciones de los ojos, oídos, nariz y garganta, incluyendo afecciones de la piel como la dermatitis por esquistosomas que se contraen en las orillas de los ríos.

Dentro de la cuenca los principales factores que inciden en la ocurrencia de las enfermedades mencionadas son:

Vertimiento directo de aguas servidas a fuentes naturales

Escasa o mala operación de los sistemas de tratamiento para aguas residuales municipales.

Mala calidad del agua para consumo humano.

Falta de manejo en la recolección y disposición de basuras.

Deficiencia en el suministro de agua potable.

Las aguas residuales sin tratamiento contienen virus y bacterias patógenas que se derivan de las heces humanas; éstas en conjunto y con las malas prácticas sanitarias domésticas, están relacionadas con altas tasas de mortalidad infantil.

Independientemente del uso a que se destine el agua superficial, existen cuatro fuentes principales de contaminación del agua: Las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales, las escorrentías por el uso del suelo y los proyectos de generación hidroeléctrica. (Medio Ambiente y Municipio en Colombia, Emilio Latorre Estrada, pag 92).

La cuenca del río Sinú no ha sido ajena a esta problemática y es afectada en distintos lugares por vertimientos de las aguas residuales generadas por centros urbanos y por el sector agrario e industrial ubicados en la cuenca.

Si bien las condiciones naturales han cambiado ostensiblemente producto de la acción antrópica, aun la capacidad de autopurificación del Río Sinú es suficiente para recuperar niveles de calidad aceptables para la biota; más no es así para el recurso hídrico de los humedales, los cuales cada vez son más afectados por la acción del hombre disminuyendo así la dinámica río – ciénaga que de alguna manera garantizaba la presencia de oxígeno en estos cuerpos de agua.

#### 6.6.2 Metodología utilizada para el Análisis de la Calidad del Recurso Hídrico

El diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca del río Sinú se desarrolla a partir del análisis de los parámetros de calidad de agua obtenidos en los monitoreos que han realizado distintas instituciones, considerando información antes y después de la operación del Embalse Urrá.

El desarrollo metodológico parte de la estructuración de varias etapas que se describen a continuación:

- **Recopilación de información Secundaria:** Se inició ésta etapa con la identificación de las firmas consultoras, universidades, empresas y otras entidades de orden público o privado que contaran con información respecto a la toma de muestras y cuantificación de la calidad del agua en el río Sinú. A través de esta actividad se obtuvo información del muestreo realizado por URRÁ S.A.E.S.P. durante los años 2000, 2001 y 2002 también se contó con el muestreo de seguimiento de la C.V.S. durante el año 2002 y enero del 2003, estudios sobre la calidad del agua de firma consultoras y bibliografía sobre el tema.
- **Análisis de la información:** Teniendo en cuenta la localización de los sitios de muestreo, se diferencian las zonas del Embalse de Urrá, el cauce del río y el sector de ciénagas. Los cuales fueron georeferenciados a fin de obtener la localización de las estaciones en las cuales se realizaron los

muestreos. Posteriormente se realiza un análisis de cada uno de los parámetros muestreados se verifica la continuidad, se validan y consolidan los resultados para cada parámetro de interés con el fin de establecer el comportamiento y acentuar las variaciones significativas. Paralelamente se hace la revisión de la bibliografía para la conceptualización y presentación de resultados teniendo en cuenta los diferentes puntos de vista sobre la calidad del agua.

- **Elaboración de cartografía:** La mapificación del comportamiento de los parámetros de interés se elaboró con la base cartográfica del IGAC e imágenes de satélite actuales de la cuenca del río Sinú, en ellas se plasmó la localización de las estaciones de muestreo y con base en el criterio de cuencas aportantes se delimitaron las áreas aferentes a cada estación, asociando el comportamiento de la calidad del agua a los aportes hidrológicos del área, ver capítulo de cartografía
- **Presentación de resultados:** La información fue colectada, complementada, organizada, y almacenada sistemáticamente en tablas, permitiendo la posterior elaboración de una síntesis y la visión general del diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca del Río Sinú.
- **Conclusión y Recomendaciones:** Finalmente se realizó, a partir de la visión global de los enunciados teóricos, resultados consolidados y mapas temáticos, la descripción del diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca del río Sinú.

#### 6.6.3 Parámetros Monitoreados

En lo que respecta a la calidad del agua del río Sinú, la empresa URR A S.A. E.S.P. realiza el monitoreo con frecuencia diaria de parámetros físico-químicos en el embalse y en el cauce del río aguas abajo de la presa desde 1998.

En la escogencia de los sitios de muestreo se tuvo en cuenta:

- a) Facilidad de acceso
- b) Condiciones estables de la corriente
- c) Facilidad para medir caudal
- d) Que entre las estaciones hallan factores suficientes que puedan alterar la calidad del agua
- e) Vías de comunicación que permitan llevar en corto tiempo las muestras al laboratorio

para el estudio se tuvieron en cuenta los monitoreos a partir del año 2000 cuando se inició el llenado de la presa), adicionalmente la C.V.S. realiza el monitoreo desde el año 2002, con una frecuencia de 6 veces al año, por encargo del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial con base en las labores de seguimiento y control de la licencia ambiental otorgada al proyecto hidroeléctrico URRÁ.

Para tal fin los ensayos se realizan acorde con los procedimientos de METODOS NORMALIZADOS para el Análisis de Aguas Potables y Residuales; APHA-AWWA-WPCF, sin embargo es necesario precisar que no se cuenta con registros de caudal asociado en cada estación y en cada muestreo.

La Tabla No.20, muestra los parámetros que son Monitoreados por las dos instituciones de manera periódica URRÁ S.A.E.S.P. y C.V.S.

**Tabla No. 20 Parámetros Monitoreados**

<b>FÍSICOS</b>	<b>QUÍMICOS</b>
Color	PH
Turbidez	Alcalinidad
Sólidos Suspendidos	Acidez
Temperatura	Dureza Total
	Hierro
	Cloruros
	Nitrogeno amoniacal
	DBO <sub>5</sub>
	Sulfatos
	Oxígeno disuelto
	Fosfatos

Fuente: C.V.S. y URRÁ S.A.E.S.P.

Con base en la información contenida en los informes consolidados de los años 2001 y 2002, elaborados por la Universidad Pontificia Bolivariana para la empresa URRÁ S.A. E.S.P., y el seguimiento por parte de la C.V.S., se realizó el análisis físico-químico en el embalse y a lo largo del río Sinú desde la presa hasta la desembocadura.

#### 6.6.4 Datos

Toda la información con los valores obtenidos en los ensayos realizados a los parámetros en estudio se presentan en el anexo N° 7, al final del documento, que contiene además de los informes de seguimientos de la C.V.S., los datos e

informes de los resultados de análisis realizados por la U. Bolivariana para URRRA S.A.E.S.P. y otros.

#### 6.6.5 Análisis de los Parámetros Monitoreados

##### *6.6.5.1 Análisis en la Zona del Alto Sinú - Embalse*

Uno de los principales aspectos a considerar en la interpretación y evaluación de la información sobre la calidad del agua es el comportamiento hidrológico y meteorológico del área de influencia directa que determina el comportamiento de algunos parámetros asociándolos con las tendencias del drenaje natural.

Con respecto al espectro vertical de temperatura a medida que se profundiza, de cero (0) a cinco (5) metros el cambio de temperatura en la mañana es de 5°C y en la tarde de 7°C aproximadamente. Mientras que cinco (5) a treinta y cinco (35) metros de profundidad, el cambio en la temperatura en la mañana y en la tarde es de 2°C aproximadamente. Ver Figura No.32

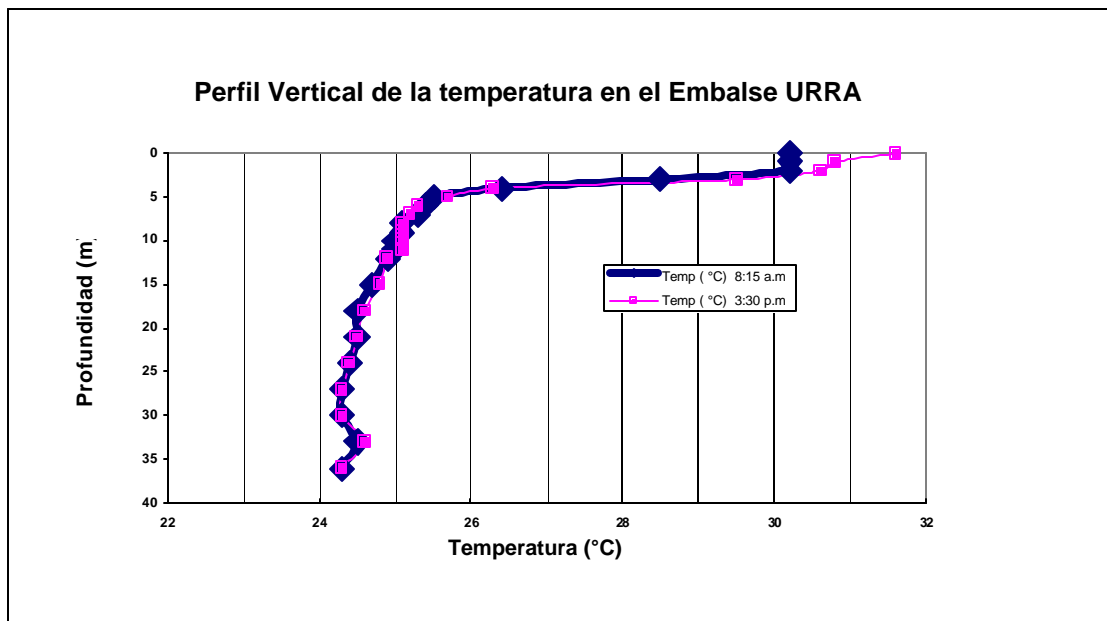
Uno de los elementos de los ecosistemas acuáticos tropicales se refiere, al efecto que la radiación lumínica puede hacer sobre las masas de agua; en especial porque estas franjas geográficas respecto a otras latitudes reciben por más tiempo luz solar durante el año.

La alta radiación solar durante el día eleva la temperatura de la masa acuática y en especial la superficie, y teniendo en cuenta la densidad se presenta la estratificación de tres capas típicas; Epilimnio, Metalimnio y el Hipolimnio.

Con relación a la temperatura, la ubicación geográfica del embalse a 128 m.s.n.m facilita la estratificación térmica, puesto que los altos valores de temperatura superficial mayores de 30°C comparados con temperaturas alrededor de 23°C, acentúan diferencias de densidad del cuerpo de agua que se producen en el eje vertical. Este patrón es común en ecosistemas tropicales de estas latitudes, por tal razón se presentan termoclinas que simplemente representan el cambio brusco de temperaturas relacionadas con la profundidad dependiendo de la hora del día.

Respecto a los embalses el comportamiento térmico que acompaña a los patrones de Oxígeno Disuelto y Ph, permite detectar problemas en los organismos del Planton, fitoplanton y zooplanton, como también sus patrones de mezcla y estratificación dentro del ciclo anual de precipitaciones.

**Figura No. 32 Perfil vertical de la temperatura en el Embalse Urrá**

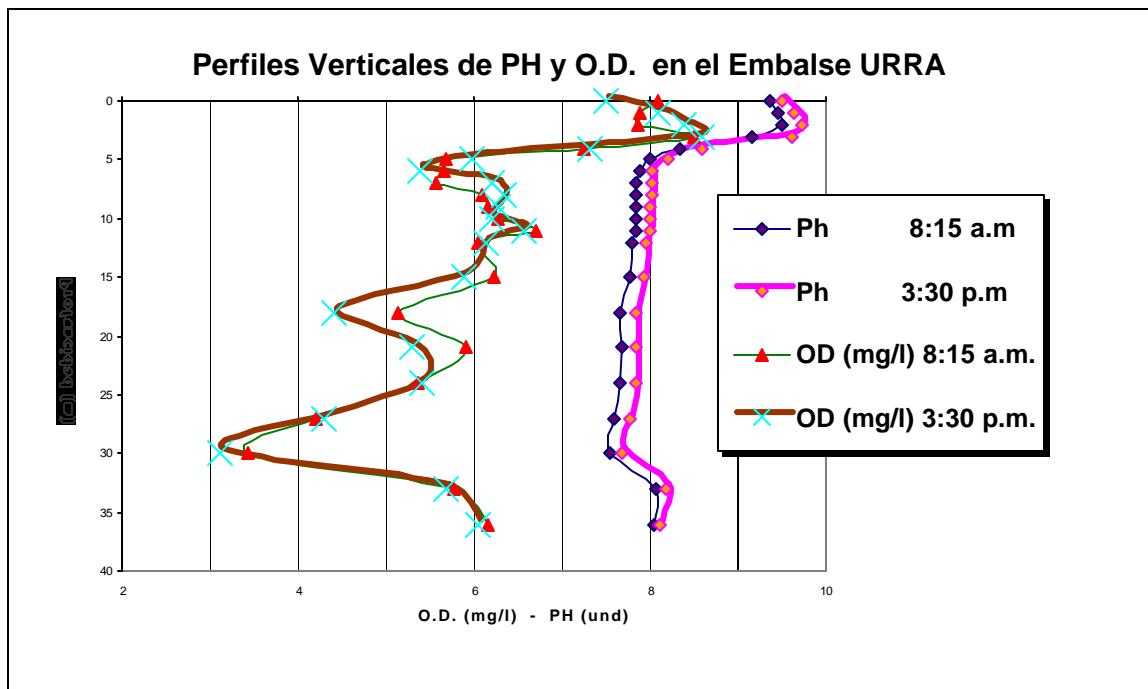


Fuente: Informe consolidado año 2001 - MCA-INF-CON-2001, Universidad Pontificia Bolivariana.

En cuanto al **Oxígeno Disuelto**, los valores sobre el eje vertical entre la superficie y la profundidad son muy parecidos. Las Oxiclinas de referencia representan los cambios o la disminución del gas a profundidades mayores que se originan por la falta del intercambio con la atmósfera, aportes biológicos por fotosíntesis (ocurre en el Epilimnio) y por aportes de tributarios oxigenados. Sin embargo los valores altos de Oxígeno Disuelto muestran clara evidencia de condiciones favorables para la biota. Entre 5.65 y 8.86 mg/l.

El **Ph** en general es alto por encima de la neutralidad presentando niveles mayores en superficie y menores en el Hipolimnio. Los pocos cambios en el eje vertical indican el alto grado tampón (efecto buffer) de las aguas del embalse. Ver Figura No.33

**Figura No. 33 Perfiles verticales de Ph y OD. En el Embalse Urrá**



Fuente: Informe consolidado año 2001 - MCA-INF-CON-2001, Universidad Pontificia Bolivariana

En general, desde el inicio de operación de la presa o embalse año 2000 hasta la fecha año 2003; Lo observado y mostrado en los ensayos realizados determinan que el embalse mantiene un comportamiento esperado y estable con respecto a la calidad del agua, debido a que los aportantes constituyen corrientes naturales de muy poca intervención antrópica y ausencia de vertimientos residuales de grandes poblaciones y/o industriales. Otro aspecto es la coexistencia de diferentes tipos de fitoplancton porque las especies no compiten sino más bien aprovechan la heterogeneidad de las condiciones presentes.

#### 6.6.5.2 Análisis en la Zona del Alto Sinú - Cauce del Río

De los resultados presentados por los parámetros físicos químicos en las estaciones desde la presa hasta la estación Bellavista se concluye que:

**Color.** Puede ser de origen orgánico o inorgánico, ocasionado por la presencia de iones metálicos (hierro y manganeso), humus, lodo, arcilla, plancton, vegetales en descomposición o por descarga de efluentes industriales coloreadas.

Por materia suspendida se denomina Color Aparente, por partículas coloidales y pseudocoloidales se conoce como Color Verdadero.



Se estudió el color aparente del agua y se identificó que en la subregión del Alto Sinú fluctuaban valores entre 14.9 y 35.8 U.C. inferior a 75 U.C. según el decreto 1594 / 84 para uso doméstico.

**Turbiedad.** La turbiedad se define como la propiedad óptica de una suspensión la cual hace que la luz se disperse o absorba en lugar de transmitirla en línea recta a través de la muestra.

En la subregión del Alto Sinú presenta valores altos de turbiedad que promedian según la época en rango de 45 NTU en verano a 500 NTU en invierno.

En lo que se refiere a los sistemas de abastecimiento, la turbiedad es un parámetro muy importante a tener en cuenta desde el punto de vista estético y de costos (dificulta la filtración, la desinfección)

**PH.** Tiene estabilidad en la neutralidad con valores entre 6.89 y 7.95 con poca variación durante el año, característica aceptable para uso doméstico

**Alcalinidad.** La alcalinidad en aguas naturales se debe principalmente a la dilución de rocas calizas que aportan hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos. Sólo aguas altamente alcalinas son rechazadas para el abastecimiento público, teniendo que someterse a tratamiento previo.

En la subregión del Alto Sinú la alcalinidad tiene valores entre 35.6 y 40.5 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , los máximos valores de alcalinidad se presentan en la estación seca del año, porque en esta época la presencia de ácidos húmicos es menor en el agua. Cuando comienza la estación lluviosa la alcalinidad baja por la presencia de pequeñas cantidades de ácidos húmicos procedentes de la descomposición del material vegetal de la cuenca aportante.

**Dureza.** Químicamente la dureza del agua es una propiedad causada por la presencia de cationes metálicos polivalentes y se manifiesta por su reacción con el jabón para formar precipitados y ciertos aniones que dan lugar a incrustaciones. La dureza de las aguas naturales se debe principalmente a los iones calcio y magnesio.

En cuanto a la **dureza total**, se encontró que en la subregión del Alto Sinú las aguas abajo de la presa son blandas con cambios poco apreciables de dureza, entre 32.5 a 39.6 mg/l de  $\text{CaCO}_3$

En términos de dureza el agua tiene la siguiente clasificación cualitativa (Gerard Kiely, pag 98).

De 0-75 mg/l de $\text{CaCO}_3$	agua suave
75-150 mg/l de $\text{CaCO}_3$	agua poco dura
150-300 mg/l de $\text{CaCO}_3$	agua dura
más de 300 mg/l de $\text{CaCO}_3$	agua muy dura

**Hierro.** Tanto el hierro como el manganeso ocasionan serios problemas en los abastecimientos de agua potable. El contenido de hierro y manganeso en las aguas se puede explicar únicamente desde el punto de vista de la química inorgánica.

El contenido de **hierro** en la subregión del Alto Sinú aguas abajo de la presa se encuentra entre 1.2 y 3.28 mg/l.

**Manganeso.** El manganeso tiene un comportamiento físico-químico similar al hierro. Las concentraciones de manganeso son más pequeñas que las de hierro, variando entre 0.12 y 0.25 mg/l de Mn.

**Cloruro.** El cloruro en forma de ión  $\text{Cl}^-$ , es uno de los aniones inorgánicos encontrados mayormente en aguas y aguas de desechos.

La concentración de cloruros es mayor en las aguas de desechos que en los cuerpos de aguas naturales, porque el cloruro de sodio es un artículo común en la dieta y pasa por el sistema digestivo sin sufrir cambio alguno.

La excreta humana y la orina contiene cloruros en cantidades casi iguales a la consumida en la alimentación. La cantidad promedio es de 6.0 mg/persona/día; incrementándose hasta 15 mg/l en las aguas residuales. Los cloruros son indicadores de contaminación orgánica

Los niveles de cloruros son bajos en la subregión del Alto Sinú aguas abajo de la presa y presentan un comportamiento bastante estable de 10 mg/l.

**Sulfato.** El ión sulfato es uno de los aniones que con mayor frecuencia se encuentra en las aguas naturales, debido al poder de dilución que tiene el agua sobre los minerales contenidos en la corteza terrestre, su concentración puede variar desde cantidades muy pequeñas hasta gramos por litro.

Los sulfatos de calcio y magnesio ejercen una función catártica (laxante), por lo tanto, su presencia en las aguas de consumo debe estar limitada. Actualmente se establece una concentración máxima de 250 mg/l. El concreto, en contacto con aguas de altas concentraciones de sulfatos se deteriora debido a ciertos cambios químicos que inducen a la formación de cristales de sulfoaluminato, los cuales originan una expansión del material que destruyen su textura. Los sulfatos presentes en la Subregión del Alto Sinú aguas abajo de la presa tienen valores de 9.98 a 10.5 mg/l.

**Nitrógeno.** En el agua natural y aguas de desecho las formas de nitrógeno de mayor interés en orden decreciente de estado de oxidación son: nitratos, nitritos, amoníaco y nitrógeno orgánico sintético.

El nitrógeno orgánico incluye materiales como proteínas y péptidos, ácido nucleico y urea y numerosos compuestos orgánicos sintéticos.

Los nitratos se encuentran en pequeñas cantidades en los desechos domésticos, pero en efluentes de las plantas de tratamiento biológico nitrificantes pueden alcanzar concentraciones altas. Este nutriente básico para muchos autótrofos fotosintéticos, en algunos casos ha sido identificado como nutriente limitante del crecimiento.

El amoníaco está presente en forma natural en las aguas superficiales y aguas de desecho. Todas estas formas de nitrógenos, como también el nitrógeno gaseoso, interconvertible bioquímicamente, son compuestos en su mayoría derivados del ciclo de Crebbs, ocasionado por las bacterias que incluyen los siguientes procesos:

- |                              |  |                         |
|------------------------------|--|-------------------------|
| - Nitrógeno atmosférico:     | fijación fotoquímica a través de organismos fijadores de nitrógeno | $N_2 \rightarrow NO_3$  |
| - Bacterias desnitrificantes |  | $NO_3 \rightarrow NH_3$ |
| - Bacterias de nitrato       |  | $NO_3 \rightarrow NH_3$ |
| - Bacterias amonificantes    |  | $NH_2 \rightarrow NH_3$ |

El nitrógeno es como el fósforo, elemento importante para las futuras condiciones tróficas en un cuerpo de agua. Las caracterizaciones efectuadas muestran que la concentración de nitrógenos inorgánicos es baja en las aguas del río. El nitrógeno amoniacal es la forma predominante de nitrógeno que se encuentra en la Subregión del Alto Sinú aguas abajo de la presa y su máxima concentración se produce a partir del mes de junio (estación lluviosa) 0.11 mg/l. Esta forma de

nitrógeno procede de la contaminación por materia orgánica, principalmente de origen vegetal.

Se establece en el decreto 1594 / 84 valor máximo admisible para uso doméstico 1.0 mg/l., lo mismo que para nitritos, se establece 10 mg/l.

Estudios permanentes realizados por URRRA. S.A.E.S.P Y C.V.S. sobre la calidad físico-química del agua del río demuestran que el contenido de nitrógeno y fósforo en ellas es bajo. Pero que las descargas continuas de efluentes contaminados con desechos industriales y domésticos con alta concentración de fósforo como detergentes, abonos y excrementos, elevan el contenido de nutrientes.

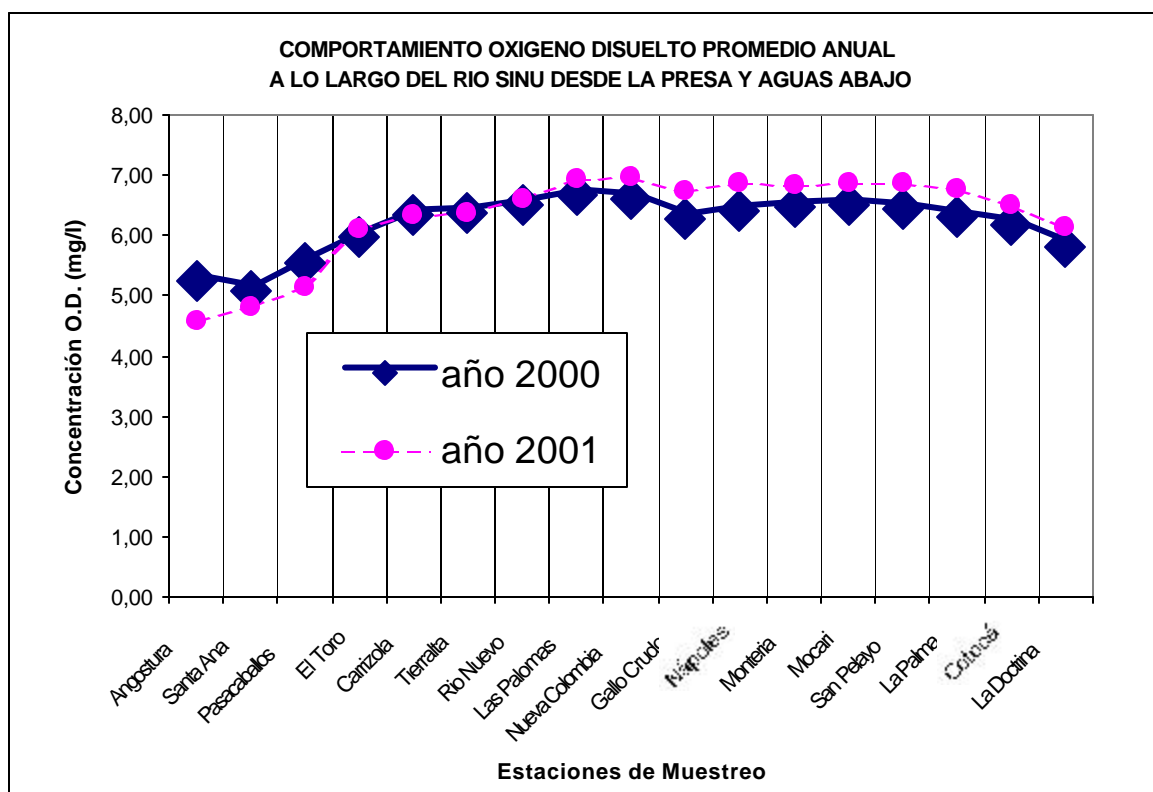
**Oxígeno disuelto.** El oxígeno disuelto es probablemente el mejor indicador del estado de polución de una corriente. El comportamiento observado en la subregión del Alto Sinú es que la concentración de oxígeno disuelto es baja a la salida de la presa (2.9 a 4.2 mg/l) en los meses de febrero, marzo y abril, a medida que se recorre en distancia el río hasta la estación de río nuevo, se muestran valores mayores ( 6.3 a 6.8 mg/l).

El aumento de oxígeno disuelto a los pocos kilómetros de distancia de la presa permite inferir la capacidad de recuperación o transferencia de oxígeno atmosférico hasta los niveles de saturación, cumpliendo con lo establecido para conservación de fauna y flora

**DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno).** La DBO expresa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica Biodegradable en el agua. La DBO<sub>5</sub> es un indicador del estado de polución orgánica en el agua y junto con el oxígeno disuelto pueden definir claramente la calidad del agua desde el punto de vista de polutantes orgánicos.

Relacionado directamente con la concentración de oxígeno disuelto, el comportamiento es similar al presentado por el O.D. tal como lo muestra las mediciones realizadas por la C.V.S. el día 15 de septiembre del 2002, que muestra valores de DBO entre 8.18 y 10.0 mg/l a la salida de la presa y a medida que se recorre en distancia alrededor de los 70 km disminuye a valores de 4.09 y 5.45 mg/l.

**Figura No. 34 Comportamiento del oxígeno disuelto promedio anual a lo largo del río Sinú desde la presa y aguas abajo**



Fuente: Informe consolidado año 2001 - MCA-INF-CON-2001, Universidad Pontificia Bolivariana

#### 6.6.5.3 Análisis de la Zona del Sinú Medio

Corresponde a la Subregión entre las estaciones de las Palomas y San Pelayo, con una longitud del tramo de 100 Km aproximadamente. En esta subregión aguas abajo de la presa, tiene influencia directa la operación del embalse con su correspondiente regulación de caudal. Otra característica general es que se encuentran asentadas la mayor parte de las poblaciones con mayor número de habitantes y algunas de sus aguas residuales se vierten al río. Lo que determina la calidad físico-química y bacteriológica del agua a lo largo del cauce desde la estación Las Palomas hasta la estación de San Pelayo.

Los resultados obtenidos para la zona del Sinú Medio, los parámetros muestran los siguientes comportamientos.

**Color.** En la subregión del Sinú Medio fluctúan valores entre 39.6 y 48.8 inferior a 75 U.C. según el decreto 1594 / 84 para uso doméstico.

**Turbiedad.** En la subregión del Sinú Medio tiene comportamiento similar al presentado en la Subregión del Alto Sinú, y también promedian según la época en rango de 45 NTU en verano a 500 NTU en invierno.

**PH.** Se mantiene muy estable en la neutralidad con valores entre 6.89 y 7.95 con poca variación durante el año y característica aceptable para conservación de fauna y flora acuática

**Alcalinidad.** En la subregión del Sinú Medio presenta un breve aumento entre 36 y 48 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , los máximos valores de alcalinidad se presentan en la estación seca del año, porque en esta época la presencia de ácidos húmicos es menor en el agua. Cuando comienza la estación lluviosa la alcalinidad baja por la presencia de pequeñas cantidades de ácidos húmicos procedentes de la descomposición del material vegetal de la cuenca.

**Dureza.** En la subregión del Sinú Medio se mantienen las características de aguas blandas con respecto a la Subregión del Alto Sinú, mostrando valores de dureza con cambios poco apreciables, entre 34 a 48.2 mg/l de  $\text{CaCO}_3$

**Hierro.** El contenido de hierro en la subregión del Sinú Medio aumenta a lo largo del cauce debido a la formaciones geológicas, y se encuentra entre 3.6 y 4.9 mg/l.

**Manganeso.** El manganeso, varía entre 0.09 y 0.15 mg/l de Mn.

**Cloruro.** Los niveles de cloruros son bajos en la subregión del Sinú Medio y presentan un comportamiento bastante estable de 10.6 mg/l. (según norma para consumo doméstico < 250 mg/l decreto 1594 /84).

**Sulfato.** Los sulfatos en el Sinú Medio presentan valores entre 8.565 a 12.3 mg/l. Estable con respecto a la Subregión alta.

**Nitrógeno.** El nitrógeno amoniacal se encuentra en las aguas del río en concentraciones bajas del orden de 0.06 mg/l. Se establece en el decreto 1594 / 84 valor máximo admisible para uso doméstico 1.0 mg/l.,

**Oxígeno disuelto.** El comportamiento observado en la subregión del Sinú Medio continua presentando las concentraciones cercanas a la de saturación con variaciones muy pequeñas entre 6.89 y 7.07 mg/l Cumpliendo con lo establecido para la biota.

**DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno).** Presenta variaciones puntuales debido a las poblaciones de influencia, es decir en Mocarí y San Pelayo se presenta valores entre 5.9 y 8.7 mg/l ocasionados quizás por vertimientos de las cabeceras urbanas, Cereté y dependiendo de la época verano o lluvia. Sin embargo el comportamiento a estudiar se debe relacionar directamente con la concentración de oxígeno disuelto. En el resto de la Subregión, el comportamiento es bastante estable con indicaciones de no haber cambios bruscos por la distancia o alteraciones de las cualidades organolépticas.

#### *6.6.5.4 Análisis de la Zona del Bajo Sinú.*

En esta subregión, tiene influencia directa la Ciénaga Grande del bajo Sinú que se comunica con el río a través del caño de Aguas Prietas. Se analiza la calidad físico-química y bacteriológica del agua a lo largo del cauce desde la estación Las Palmas hasta la estación caño Sicará.

De los resultados obtenidos para la zona del bajo Sinú, los parámetros muestran los siguientes comportamientos

**Color.** En la subregión del Bajo Sinú fluctúan valores con muy poca variabilidad con respecto al Medio Sinú, medidas entre 28.4 y 35.7 inferior a 75 U.C. según el decreto 1594 / 84 para uso doméstico.

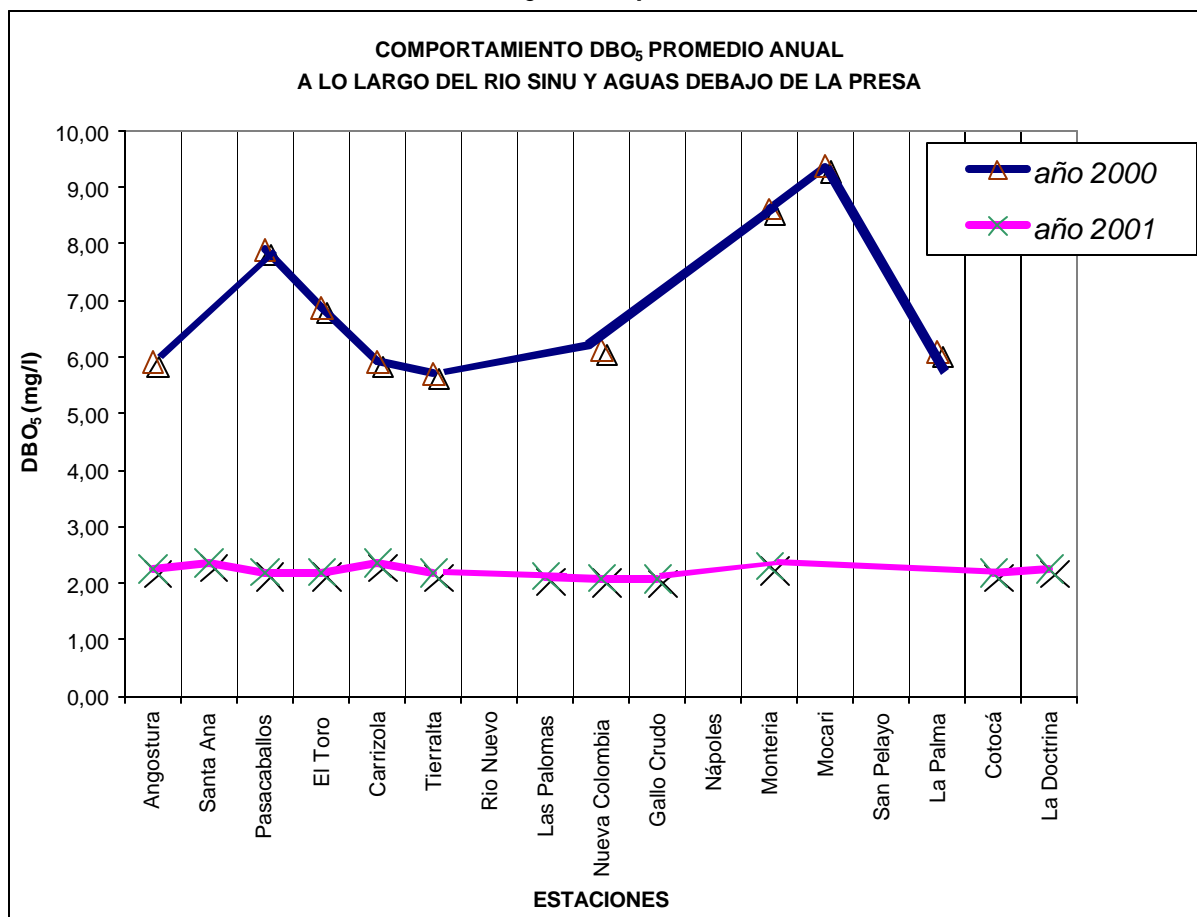
**Turbiedad.** En la subregión del Bajo Sinú tiene comportamiento similar al presentado en la Subregión del Bajo Sinú, y también promedian según la época en rango de 45 NTU en verano a 500 NTU en invierno.

**PH.** Se mantiene muy estable en valores cercanos a neutro (7) entre 6.89 y 7.95 con poca variación durante el año y característica aceptable para uso doméstico

**Alcalinidad.** En la subregión del Bajo Sinú presenta comportamiento estable con respecto al Medio Sinú, entre 30 y 56 mg/l de CaCO<sub>3</sub>,

**Dureza.** En la subregión del Bajo Sinú son aguas blandas con cambios poco apreciables de dureza, entre 23 a 85 mg/l de CaCO<sub>3</sub>

**Figura No. 35 Comportamiento DBO<sub>5</sub> promedio anual a lo largo del río Sinú y aguas debajo de la presa**



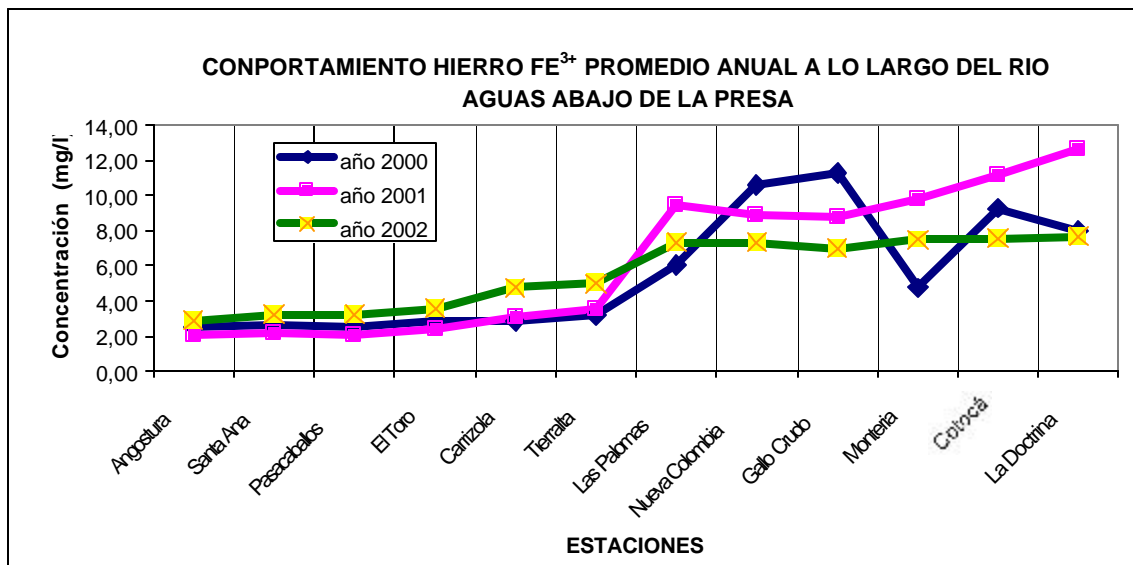
Fuente: Informe consolidado año 2001 - MCA-INF-CON-2001, Universidad Pontificia Bolivariana

**Hierro.** El contenido de hierro en la subregión del Bajo Sinú aumenta a lo largo del cauce debido a la formación geológica, y se encuentra entre 5.6 y 8.5 mg/l. Sin embargo estas concentraciones están por debajo del límite permisible (10 mg/l) para aguas de consumo doméstico.

La figura No.36 muestra para el año 2002 a lo largo del cauce del río el comportamiento establece de Hierro  $Fe^{+3}$ , con respecto a los años anteriores y los cambios bruscos se deben a la puesta en marcha de la presa y descargas de fondo. Pero de todas formas la tendencia es de aumentar la concentración de Hierro  $Fe^{+3}$ , desde la cuenca alta hacia la cuenca baja.



**Figura No. 36 Comportamiento hierro Fe 3+ promedio anual a lo largo del río agua debajo de la presa**



**Manganeso.** El manganeso, varía entre 0.12 y 0.19 mg/l de Mn. sigue presentando concentraciones bajas comparadas con los límites permisibles para uso agrícola.

**Cloruro.** Los niveles de cloruros son bajos en la subregión del Bajo Sinú y presentan un comportamiento bastante estable de 10.6 mg/l.

**Sulfato.** Los sulfatos presentes en el Bajo Sinú con valores de 8.3 a 10.3 mg/l. Estable con respecto al medio Sinú.

**Nitrógeno Amoniacal.** El nitrógeno amoniacal se encuentra en las aguas del río en concentraciones bajas del orden de 0.06 mg/l. Se establece en el decreto 1594 / 84 valor máximo admisible para uso doméstico 1.0 mg/l.,

**Oxígeno disuelto.** El comportamiento observado en la subregión del Bajo Sinú continua presentando las concentraciones cercanas a la de saturación con variaciones muy pequeñas entre 6.89 y 7.07 mg/l Cumpliendo con lo establecido para aguas con uso recreativo y fauna acuática.

**DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno).** En el resto de la Subregión, el comportamiento de DBO es bastante estable valores entre 2.65 y 3.14 mg/l, con indicaciones de no haber cambios bruscos por la distancia o alteraciones de las cualidades organolépticas.

#### 6.6.6 Análisis de la Calidad del agua en las Ciénagas:

En la cuenca del río Sinú se encuentran dos grandes sistemas lagunares, la Ciénaga de Betancí y la Ciénaga Grande del Bajo Sinú que comprende un complejo y gran número de ciénagas pequeñas.

La Ciénaga Grande del Bajo Sinú históricamente ha presentado un grave problema de colmatación, la alta sedimentación y la poca profundidad le han quitado su capacidad de amortiguación de las crecientes del río, pero a su vez presenta en toda su extensión un importante desarrollo de macrófitas que se acompaña con una exuberante comunidad de aves, lo cual denota un copioso recurso de organismos asociados a macrófitas y de peces que representa un valioso medio de subsistencia.

Por su extremo sur recibe las aguas del caño de Aguas Prietas, el cual acumula las aguas servidas de diferentes cabeceras urbanas (Ej. Montería, Ciénaga de Oro). Este caño disminuye su caudal substancialmente durante la época de verano, hecho que le induce a almacenar una elevada contaminación orgánica que deposita en la ciénaga durante el inicio de las lluvias. Por el extremo norte, la ciénaga se comunica con el río Sinú a la altura del Municipio de Lórica, mostrando flujo y reflujo río-ciénaga según las diferentes épocas del año y variaciones de caudal. Esta breve descripción permite ilustrar a grandes rasgos, los procesos dinámicos que en ella se suceden.

Su mayor transparencia no se asocia con un mejor desarrollo fitoplanctónico y por ende un mayor oxígeno, hecho que ocurre por la baja calidad de las aguas y el alto desarrollo de macrófitas, las cuales reducen la penetración de luz sobre la columna de agua y capturan gracias a su enraizamiento, los nutrientes que se van depositando en los sedimentos. Estas propiedades le confieren amplias ventajas en su proceso de competencia con el fitoplancton. (RAMÍREZ et al, 1998).

A diferencia de los registros, mediciones y ensayos realizados a lo largo del río, en las ciénagas Grande y Betancí los registros son escasos de información que permita hacer un análisis riguroso, solo se podría asociar la tendencia natural de conformación geológica, la estabilidad y fluctuación del caudal asociado al cauce del río y las alteraciones de tipo antrópico.

**Tabla No. 21 Algunas variables físico químicas en la Ciénaga Grande del Bajo Sinú**

VARIABLES	ESTACIONES				
	A	B	C	D	E
	MAYO				
Temperatura ° C	26,9	28	29,2	29,3	30,2
PH	7,3	7	7	6,9	7,1
Conductividad (mS/cm)	126	112	132	178	183
Oxígeno (%)	81	81	71	14	34
Sólidos Suspendidos (mg/l)	616	284	76	29	0
DQO (mg/l)	113	10	34	30	36
Fósforo total (mg/l)	1,05	0,32	0,07	0,72	0,71
	AGOSTO				
	A	B	C	D	E
	MAYO				
Temperatura ° C	28,5	28,5	29,1	28,7	
PH	6,8	7	7,1	7,2	
Conductividad (mS/cm)	124	134	145	210	
Oxígeno (%)	43	29	11	0	
Sólidos Suspendidos (mg/l)	0	0	0	0	
DQO (mg/l)	131	26	29	38	
Fósforo total (mg/l)	0,86	0,86	2,04	0,54	
	FEBRERO				
	A	B	C	D	E
	MAYO				
Temperatura ° C	31,1	30,5	29,3	29,3	
PH	8	7,5	7,3	7,3	
Conductividad (mS/cm)	825	627	555	263	
Oxígeno (%)	98	17	2	5	
Sólidos Suspendidos (mg/l)	106	146	148	0	
DQO (mg/l)	19	40	70	48	
Fósforo total (mg/l)	1,33	1,12	1,8	1,51	

Fuente: De Oleoducto de Colombia – ECOPETROL. 1993

Es importante partir de la hipótesis que, la calidad del agua de las ciénagas esta influenciada por el comportamiento hidrológico y meteorológico del área de influencia directa. En el primer caso los drenajes naturales o construidos contribuyen por escorrentía, arrastre y dilución a caracterizar la calidad del agua en invierno. En el segundo caso la temperatura, vientos y radiación solar regulan las condiciones de mezcla, productividad y calidad por concentración de las sustancias disueltas y en suspensión en época de verano.

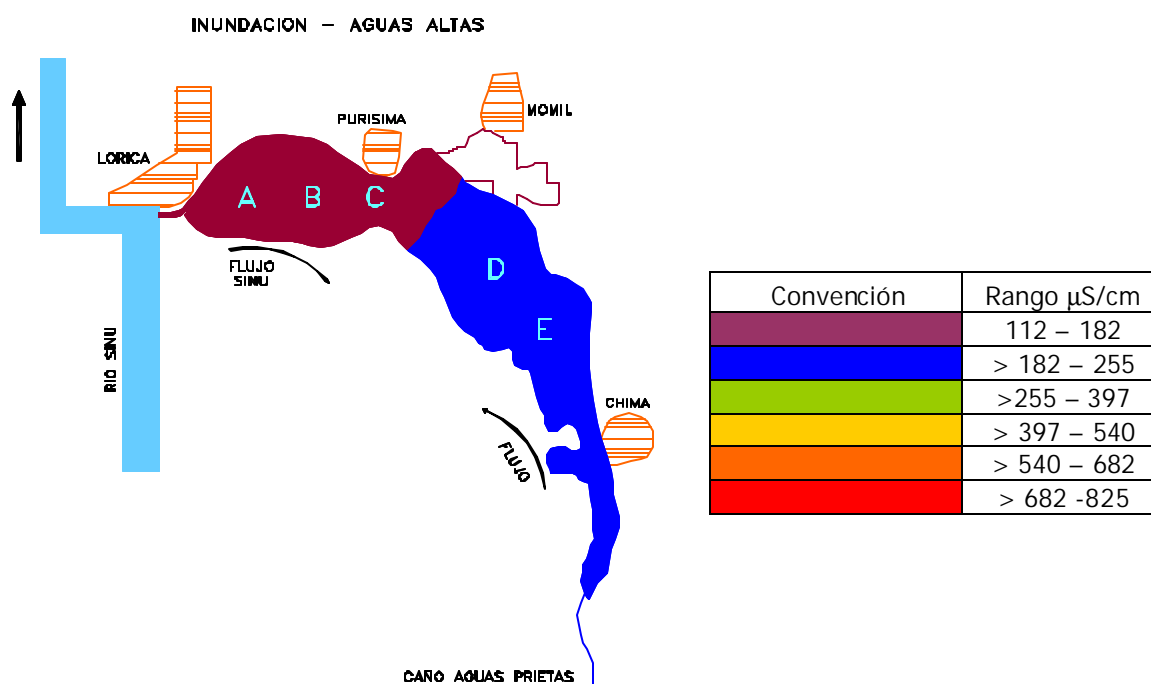
El complejo lagunar se puede caracterizar como de mezcla completa debido a que la temperatura del agua en la superficie y el fondo fluctúa en 2°C, a diferencia de los embalses en donde los cambios son mayores de 5°C. y presenta diferentes capas térmicas.

Otra forma de corroborar la mezcla completa con los bajos niveles de transparencia, altos niveles de color y sólidos suspendidos, indica las limitaciones para la penetración de la luz con lo que se puede a través del disco Secchi estimar

la profundidad fótica, el coeficiente de extinción de la luz, la concentración de la clorofila o su estado trófico. (UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Estudio Ecológico y Ambiental Ciénaga Grande y Massi, Montería 1992).

Los sedimentos se asocian a la época de lluvias, por lo tanto las relaciones de sólidos se modifica en el complejo por dependencia directa de los eventos, ocurrencia y magnitud. Que como se menciona son llevados a las ciénagas por arrastre hidrodinámico y depositados según su densidad, sin embargo se producen al interior por fitoplancton y plantas acuáticas muertas.

**Figura No. 37 Distribución espacial de la conductividad – Ciénaga Grande del Bajo Sinú en época de lluvia**



Fuente: Limnología Colombiana, Alberto Gonzalez Ramírez & Gerardo Viña Vizcaíno. 1998

Los sólidos disueltos y sales inorgánicas presentes en las ciénagas en forma de carbonatos sulfatos y cloruros, magnesio, sodio, hierro y potasio están directamente relacionados con la geología del terreno que conforman el suelo del humedal que aportan sustancias con el nivel freático en época de verano y los terrenos adyacentes que aportan sedimentos por arrastre en época de lluvias. Por lo tanto las mediciones de conductividad son altas en la ciénagas (en promedio

740 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), con respecto a las mediciones en el cauce del río ( 121.9 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). (UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Estudio Ecológico y Ambiental Ciénaga Grande y Massi, Montería 1992)

La conductividad registra el grado de mineralización del cuerpo de agua, lo que incide sobre los organismos acuáticos, pues pocos son capaces de sobrevivir en ambientes de salinidad variables, por lo general los organismos de agua dulce soportan pequeñas variaciones. La conductividad a lo largo del río valora en promedio 121.9 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e indica baja mineralización; por lo tanto no afecta la osmoregulación de los organismos acuáticos.

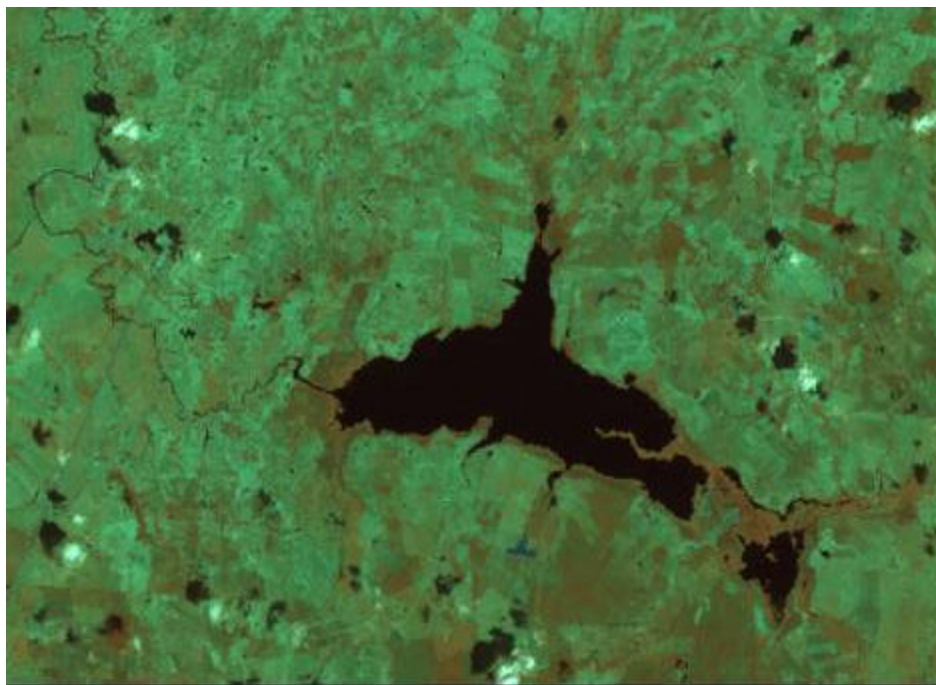
Otra característica que diferencia la calidad del agua de las ciénagas, con la calidad del río es la concentración alta de hierro y manganeso asociados fundamentalmente con el húmus de la materia orgánica vegetal en descomposición, en el período seco los valores son más críticos debidos a los fenómenos de intercambio de aguas superficiales con las freáticas.

Los parámetros de gran importancia con respecto a la calidad del agua en las ciénagas, son el fósforo y nitrógeno, teniendo en cuenta que son nutrientes limitantes del crecimiento del fitoplancton bajo algunas condiciones, de otra parte el fósforo extractable de los sedimentos decrece a medida que aumenta la salinidad de allí que en verano cuando aumenta la salinidad, la disponibilidad de fósforo se vuelve más crítica.

Los residuos de pesticidas Organoclorados y Organofosforados, se valoran en el agua y peces. Los pesticidas pueden migrar de su sitio de aplicación siguiendo varias rutas:

- Dispersión por vientos durante la aplicación, especialmente cuando se aplica con vuelos de aviones.
- Lixiviación por aguas superficiales y por lluvias a aguas subterráneas
- Fijación en plantas destinadas a la nutrición del hombre y los animales, también en otras plantas como el buchón de agua.
- Asimilación por los animales (peces, aves, tortugas, animales domésticos, etc)
- Fijación a suelos y sedimentos.

**Figura No. 38 Imagen Landsadt (Ciénaga de Betancí)**

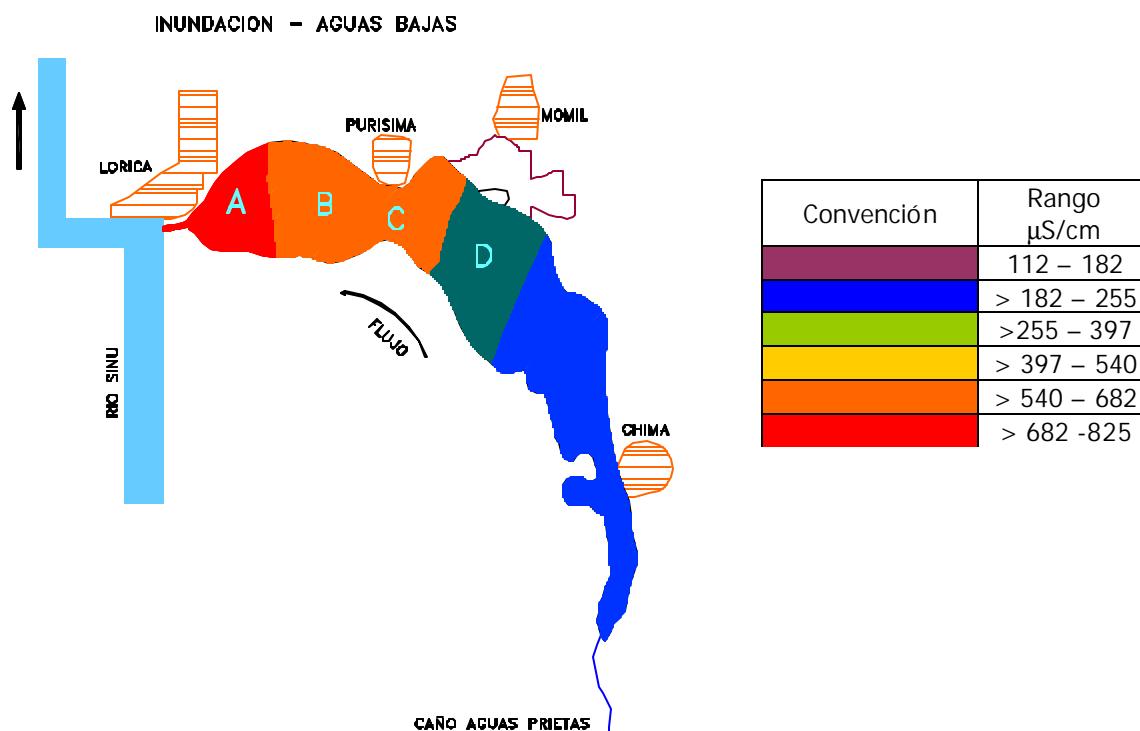


Fuente: Imagen Landsadt 954 de Febrero 3 del 2003 visualizando las bandas 457

Otro parámetro de gran importancia en el cuerpo lagunar corresponde al oxígeno disuelto O.D. En la ciénaga Grande en época de lluvia se puede describir que el porcentaje de saturación aumenta de sur a norte, se alcanza concentraciones entre 6.0 y 6.5 mg/l en la confluencia con el río Sinú,. En época seca el porcentaje de saturación presenta niveles críticos de saturación, concentraciones entre 1.6 y 2.0 mg/l, en la zona sur o confluencia con el caño de Aguas Prietas.

Debido a la influencia directa del oxígeno disuelto sobre la fauna y flora acuática, la calidad de las aguas de la Ciénaga Grande es por lo tanto inferior a la expuesta para el río, y en ello hay una clara incidencia antrópica intensiva que se hace en la zona de influencia que corresponden con el ciclo de desarrollo de los cultivos y época hidrológica. El artículo 45 del decreto 1594 / 84 determina una concentración igual o mayor de 4 mg/l. para su conservación.

**Figura No. 39 Distribución espacial de la conductividad – Cienaga Grande del Bajo Sinú en época seca**



Fuente: Limnología Colombiana, Alberto Gonzalez Ramírez & Gerardo Viña Vizcaíno. 1998

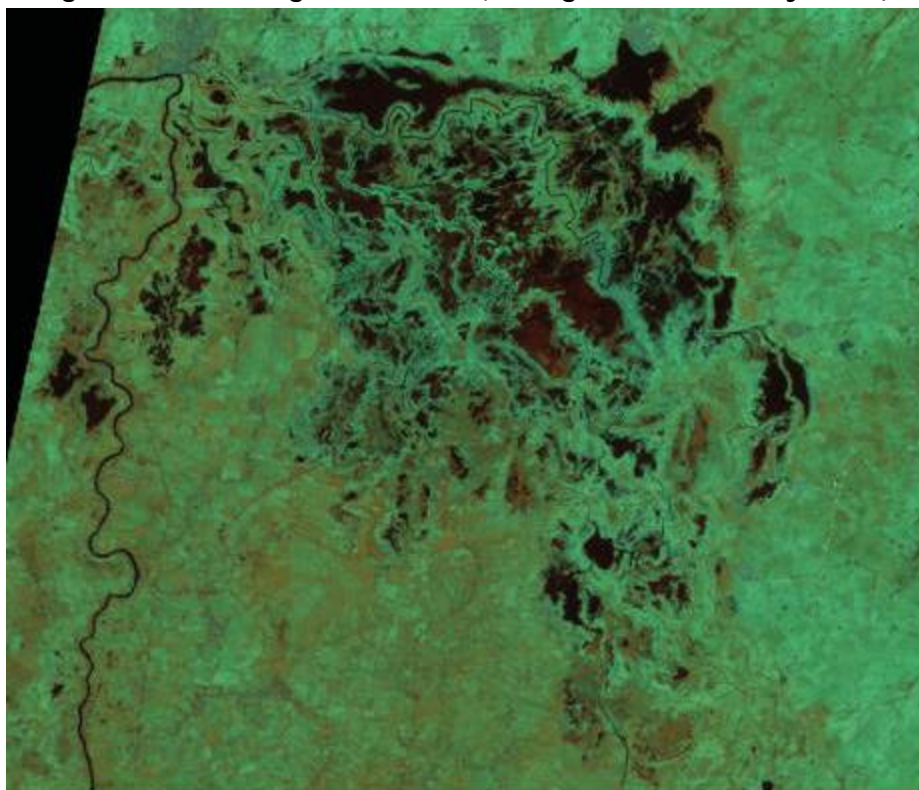
#### 6.6.7 Análisis del agua del Delta en el río Sinú

##### 6.6.7.1 *Caracterización de la calidad del agua del Delta del río Sinú*

La información acerca de la caracterización de la calidad del agua del Delta del río Sinú, se explica en detalle en el PLAN DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE LA ZONA DELTAICO ESTUARINA DEL RIO SINU de Noviembre 2000 a Mayo 2003. Realizado por el INVEMAR (Instituto De Investigaciones Marinas Y Costeras "José Benito Vives De Andreis") y presentado en agosto del 2003 a URRRA S.A.E.S.P.

El informe, inicialmente explica el procedimiento seguido en el monitoreo y las ubicaciones de las estaciones, así como los días en que hubo toma de muestras y por último presenta las conclusiones de los resultados obtenidos durante el muestreo.

**Figura No. 40 Imagen Landsat (Ciénaga Grande del Bajo Sinú)**



Fuente: Imagen Landsat 954 de febrero 3 de 2003 visualizando las bandas 457

De noviembre del 2000 a octubre del 2001 se monitorearon semanalmente 12 estaciones ubicadas en el curso del río Sinú, entre La Doctrina (R01) y las bocas de Tinajones (R09) y Corea (R10). A partir de marzo del 2002, cuando se reanudaron los muestreos, se redujo la red de estaciones a 10; se eliminaron las estaciones de la intersección Corea-Tinajones (R07) y la derivación de Mireya (R08). Para el 2003 se eliminaron algunas estaciones intermedias de la parte alta y se conservaron las estaciones aforadas para caudales y las que revestían importancia por su ubicación como las entradas a los caños y las desembocaduras, quedando una red de 7 estaciones en el río Sinú.

Entre noviembre del 2000 y octubre del 2001 se monitorearon 20 estaciones de ciénagas y caños. Basados en los resultados de los análisis del primer año de monitoreo para la segunda fase del monitoreo (marzo 2002 a enero del 2003) se redujo esta red de estaciones a ocho (7 ciénagas y 1 caño). Para el 2003 se conservó el número de estaciones (siete), pero se sustituyó la estación del caño por la ciénaga de Corozo (C20) la cual viene siendo monitoreada por el componente de íctica.



En desarrollo de la segunda fase del monitoreo se implementó el muestreo de nutrientes en 7 estaciones del río, además de las 7 ciénagas persistentes en el monitoreo mensual y se cambió el monitoreo de caudales a partir del limnómetro de la Doctrina (R01) de semanal a diario. Además se desarrollaron dos monitoreos de organoclorados e hidrocarburos programados para el 2002 y se desarrollaron cinco monitoreos de 24 horas en las ciénagas de Navío (C13) y Soledad (C25).

El monitoreo de caudales mostró para el 2001 una tendencia a estabilización de la curva, de tal forma que se presentaron caudales mayores al histórico en aguas bajas (enero-mayo) y menores al mismo en aguas altas (junio-diciembre). En el periodo de aguas bajas del 2002 se presentaron nuevamente caudales superiores al histórico, esta tendencia permaneció en el periodo de aguas altas a tal punto que para los meses de junio y julio del 2002 se presentaron caudales superiores a los registrados en octubre del 2001, considerado el mes de mayores caudales. Posteriormente el caudal permaneció en valores inferiores al histórico. En el 2003 se han presentado caudales similares a los del 2002 para aguas altas y ligeramente superiores a estos en aguas bajas.

De otra parte, aunque los caudales promedios mensuales del río Sinú en el 2002 y el 2003 mostraron una variación menor que los del 2001 con respecto al histórico, la revisión de los caudales diarios permite observar variaciones que podrían generar estrés en las especies migratorias. Antes de la construcción de la represa sólo se presentaban de uno a seis casos anuales de variaciones de caudal superiores a 100 m<sup>3</sup>/s en 24 horas con la llegada de las lluvias; en el periodo monitoreado se registraron 14 casos en el 2001 y 29 en el 2002. Entre enero y mayo del 2003 sólo se presentaron 2 eventos.

De un total de 7.256 valores de conductividad medidos hasta enero del 2003 en el río Sinú, solamente 37 valores han sobrepasado los 0,500 (µS/cm), que es el valor que Gómez, Cajiao y Asociados (1996) utilizaron como indicador de intrusión salina. Estos no pueden ser considerados como intrusión de la cuña salina porque no muestran una continuidad desde las bocas hacia río arriba.

También se aprecia que los picos registrados en Gómez, Cajiao y Asociados (1998 a), no se presentaron después de la entrada en funcionamiento de la Hidroeléctrica URRRA I, debido a la mayor cantidad de agua que esta corriendo en el río por el aumento de los caudales suministrados por la Hidroeléctrica con relación a los valores históricos de la temporada de aguas bajas.

En cuanto a los contaminantes, las concentraciones promedio de organoclorados para la zona en los dos monitoreos (2,71 ng/l en abril del 2002 y 1,7 ng/l en noviembre del 2002) permiten la clasificación de la misma como no contaminada, aunque se presentaron concentraciones altas en algunas estaciones al parecer relacionadas con eventos locales.

De igual forma las concentraciones promedio de hidrocarburos disueltos y dispersos de la ZDERS no evidencian niveles de contaminación de la misma. En los dos casos los muestreos son puntuales y los resultados de carácter exploratorio.

En las ciénagas directamente influidas por los caños Sicará y Grande se han presentado descensos de la salinidad y la conductividad generados por la permanencia de altos niveles tanto en la época de aguas bajas como de aguas altas.

En julio del 2002 los altos caudales del río ocasionaron un descenso de salinidad de la ciénaga de Soledad (C25) hasta un valor de 3,7mg/l, el más bajo registrado desde 1987 para este mismo periodo. La figura 4.17 muestra la influencia de los caudales del río sobre la salinidad de ésta lo que hace prever el mismo fenómeno en ciénagas como Ostional (C16) y Navío (C13), influidas por caño Grande (R12).

De igual forma los monitoreos de 24 horas han permitido ver como la estratificación de oxígeno se acentúa en horas de la noche. Durante el monitoreo de agosto del 2002 en las ciénagas de Navío (C13) y Soledad (C25) los fondos estuvieron en niveles de hipoxia, especialmente en la Ciénaga de Soledad

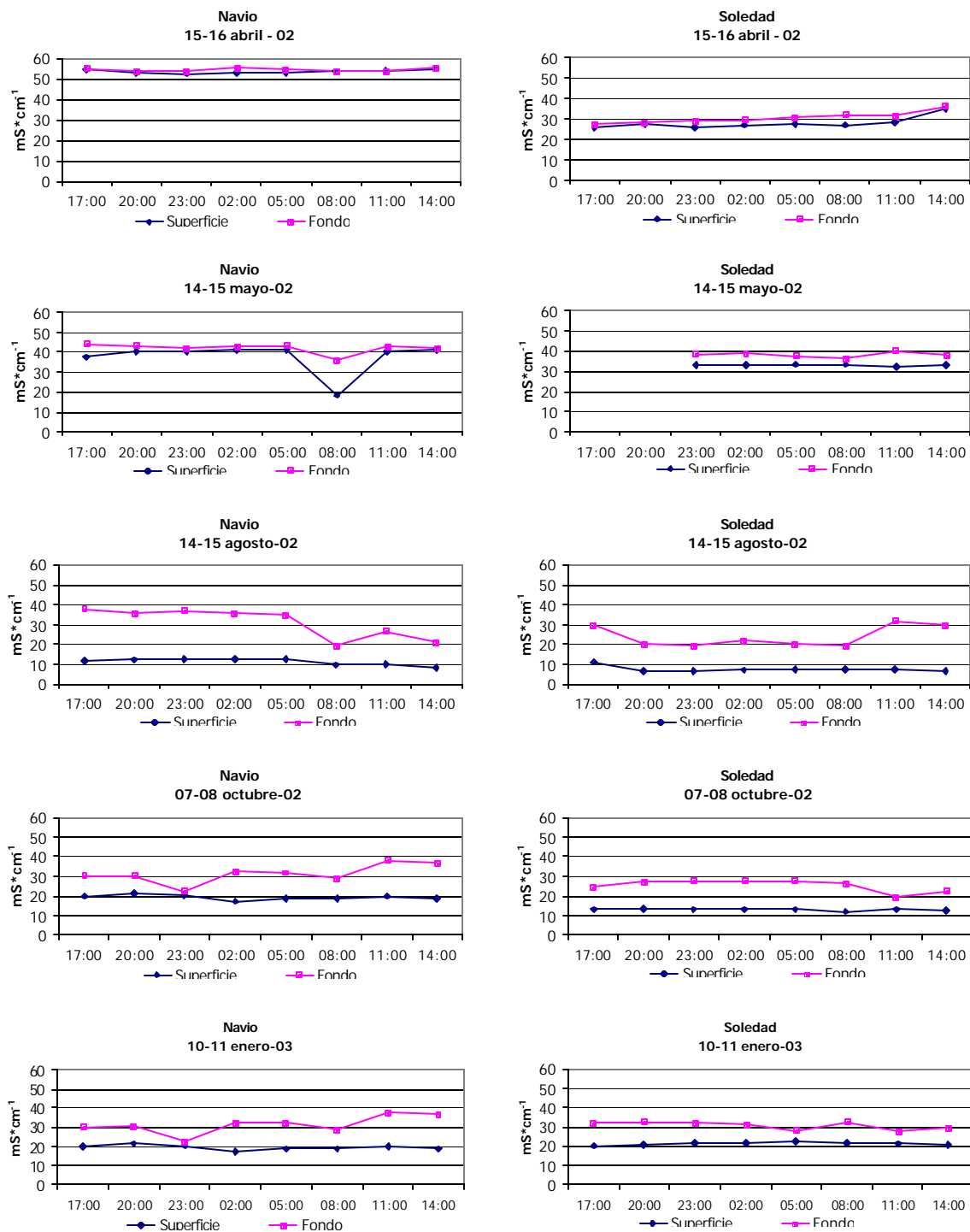
No se ha observado un impacto sobre la carga de nutrientes del sistema de ciénagas, mostrándose estas autosuficientes, tal vez por el aporte orgánico del propio manglar, que puede contribuir al estado de hipoxia de los fondos. Las concentraciones de nitratos, amonio, silicatos y fosfatos en las estaciones de las ciénagas del delta del río Sinú, han mostrado un comportamiento estable, ligeramente superior a los registrados por INVEMAR (1999) para el estudio de 1998, antes de la entrada en operación de la represa. El nitrógeno se presentó principalmente en forma de nitratos con concentraciones entre indetectables ( $<0,05 \mu\text{mol/l}$ ) y  $17,18 \mu\text{mol/l}$ . La concentración de ortofosfatos presentó valores entre no detectables ( $<0,03 \mu\text{mol/l}$ ) y  $38,99 \mu\text{mol/l}$ , presentándose los valores máximos en las estaciones oligohalinas. Los valores de silicatos fluctuaron desde

no detectables ( $<0,1 \mu\text{mol/l}$ ) hasta  $995,31 \mu\text{mol/l}$  aumentando espacialmente a medida que la salinidad disminuye.

Dentro de los impactos podemos anotar que el manejo de caudales realizado por la Hidroeléctrica Urrá I ha ocasionado que los niveles de conductividad y salinidad de las Ciénagas sean hoy día inferiores a los históricos en la época de aguas bajas y superiores a los mismos en la época de aguas altas. Además, se observa una disminución en la carga de sedimentos, evidenciada por los datos registrados por el IDEAM antes y después de llenado del embalse.

Se debe prestar especial atención a los cambios en la salinidad y a los déficit de oxígeno del sistema que podrían derivar en cambios en las comunidades y mortandades de organismos aerobios.

**Figura No. 41 Comportamiento de la conductividad en las estaciones de monitoreo de 24 horas en los meses de abril, mayo, agosto, y octubre de 2002 y enero de 2003**



#### 6.6.7.2 Conclusiones Calidad del agua del Delta del río Sinú

En los dos periodos monitoreados hasta el momento la conductividad en el río Sinú ha permanecido en valores cercanos a 0,100 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), los que se encuentran dentro del rango registrado en los ríos represados de Colombia (Márquez y Guillot, 2001).

De un total de 7.256 valores de conductividad medidos hasta mayo del 2003 en el río Sinú, solamente 37 valores han sobrepasado los 0,500 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), que es el valor que Gómez, Cajiao y Asociados (1996) utilizaron como indicador de intrusión salina. Estos no pueden ser considerados como intrusión de la cuña salina porque no muestran una continuidad desde las bocas hacia río arriba.

Aunque los caudales promedios mensuales actuales del río Sinú se asemejan en algunos casos a los históricos, las variaciones diarias pueden ser un factor de perturbación más importante para el sistema. Antes de la construcción de la represa sólo se presentaban de uno a seis casos anuales de variaciones de caudal superiores a 100  $\text{m}^3/\text{s}$  en 24 horas; en el periodo monitoreado hasta el momento se registraron 14 casos en el 2001 y 29 en el 2002. Para el 2003 se ha presentado 2 eventos.

Se puede considerar el ecosistema conformado por las ciénagas del margen derecho del río Sinú como un estuario normal o positivo, con un exceso de agua dulce, estratificación por diferencias de salinidad, y una elevada producción orgánica, que hace que en algunas zonas en el fondo tenga poco oxígeno o sea anóxico.

Aunque expertos en el tema como Margalef (1983) consideran que la desviación o retención de nutrientes en el embalse conduce a una consecuente disminución río abajo; en el caso específico de la parte baja del río Sinú y las ciénagas del estuario no se ha evidenciado tal disminución. Las concentraciones de nitratos, amonio, silicatos y fosfatos en las estaciones de las ciénagas del delta del río Sinú, han mostrado un comportamiento estable, ligeramente superior a los registrados por INVEMAR (1999) para el estudio de 1998, antes de la entrada en operación de la represa. De existir un impacto relacionado con la retención de nutrientes en la represa, éste no se ha reflejado en las concentraciones de los mismos en las ciénagas aledañas, de tal forma que éstas se muestran autosuficientes con respecto a la carga de nutrientes. Esto podría estar relacionado con la regeneración de la carga en el río entre la represa y la desembocadura.

Hay una alta retención de sedimentos en la represa, evidenciada por los datos de carga de sedimentos de la estación de Cotocá Abajo del IDEAM

El manejo de caudales ejercido por la represa se ha traducido en la permanencia de altos niveles de inundación en las ciénagas del delta. Se debe prestar especial atención a la reducción de los niveles de salinidad de ciénagas como Ostional (C16), y Soledad (C25) y a los niveles de hipoxia de los fondos de esta última y de la ciénaga de Navio (C13), ya que según Margalef (1983) los fondos deficitarios de oxígeno son en ocasiones resultado de una fuerte estratificación por salinidades.

#### 6.6.8 Consideraciones sobre Calidad de Agua

La calidad del agua se identifica con su estado natural y la pérdida de la misma se evidencia en comparación con ese estado. No obstante, es claro que la calidad del agua generada por las actividades humanas afecta al mismo tiempo el desarrollo de otras; el medio acuático está contaminado cuando la composición o el estado natural del agua está modificado, directa o indirectamente por el hombre, de modo que se dificultan todas o algunos de sus usos.

Basado en índices de contaminación como:

**ICOMO:** Índices de Contaminación por Materia Orgánica; incluye variables como Oxígeno, DBO<sub>5</sub>, y Coliformes Totales y Fecales.

**ICOMI:** Índice de contaminación por mineralización; incluye variables como Conductividad, Dureza, Alcalinidad entre otros. Es el valor promedio de los índices de cada una de las 3 variables elegidas las cuales se definen en un rango de 0 – 1; índices próximos a cero (0) indican muy baja contaminación, e índices cercanos a uno (1) lo contrario.

**ICOSUS:** Índice de contaminación por sólidos suspendidos; incluye variables como Sólidos Suspendidos.

**ICOTRO:** Índice de contaminación Trófico; Se fundamenta en la concentración del fósforo total, define por sí mismo una categoría discreta a saber:

-Oligotrofia	< 0.01 mg/l
-Mesotrofia	0.01 a 0.02 mg/l
-Eutrofia	0.02 a 1.00 mg/l
-Hipereutrofia	> 1.00 mg/l

### **WQI) - Índice de Calidad de Agua** – (Water Quality index National Sanitation Foundation, USA – 1970)

El índice consiste en una suma ponderada

$$WQI = \sum_{i=1}^n w_i q_i$$

Donde WQI es un número entre 0 y 100

$q_i$  –Calidad del parámetro

$i$  –número entre 0 y 100

$w$  –peso asignado al parámetro

$n$  –número de parámetros

La selección de parámetros, curvas de calidad y pesos asignados se lleva por el método DELPHI,

Los parámetros seleccionados son :

Oxígeno Disuelto	Fosfatos	Coliformes fecales	Ph	Turbidez
Temperatura	Sólidos totales	DBO <sub>5</sub>	Nitratos	
Elementos tóxicos	Pesticidas			

Los elementos tóxicos y pesticidas cuando exceden límites máximos, automáticamente el índice WQI = 0.

Las gráficas asociadas a los parámetros se muestran en el anexo N° 6

Teniendo en cuenta las anteriores definiciones de índices, es importante mencionar que para el río Sinú incluyendo su embalse actualmente se cuenta con un monitoreo de varios años, (realizado por la empresa URRRA S.A.E.S.P. con el seguimiento y control por parte de la Corporación C.V.S.), el cual aporta una gran cantidad de registros pero solo con determinación de parámetros físico-químicos, lo cual imposibilita en la ejecución del presente trabajo la cuantificación de algún Índice de Calidad debido a la falta total de los parámetros bacteriológicos (Coliformes fecales y totales) parámetro importante y de alto porcentaje de influencia en el cálculo de alguna referencia de calidad de agua superficial.

Dentro de los estudios realizados sobre la calidad del agua en la cuenca del río Sinú se encuentran:

- “Estado Sanitario de la Cuenca del Río Sinú – Gómez Cajiao – año 1984” concluye para esa época que las aguas del río Sinú son limpias; con altos contenidos de sólidos y color en invierno, contenido de hierro y manganeso asociados con el sedimento y presencia de cierta contaminación fecal.
- “Limnología Colombiana – Alberto Ramírez Gonzáles & Gerardo Viña Vizcaino – año 1998 pag 75” concluye con respecto al:
  - Índice de contaminación por mineralización (ICOMI), la cuenca del río Sinú exhibe niveles altos de contaminación
  - Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO), la cuenca del río Sinú exhibe niveles medios de contaminación
  - Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), la cuenca del río Sinú exhibe niveles muy bajos de contaminación
  - Índice de contaminación Trófico (ICOTRO), en la cuenca del río Sinú se observan condiciones eutróficas a hipereutróficas.
- “Tasas Retributiva por contaminación hídrica; C.V.S. – año 2000 pág 38 y 39” concluye Calidad del agua en la zona alta ligeramente contaminada y en la zona media moderadamente contaminada, 19 % desmejorada con respecto a la zona alta.
- “Ejercicio - Cálculo de Índice de Calidad del Agua en el río Sinú” Universidad de Córdoba, año 2002 (ver Anexo N° 8 ) concluye
  - a) La calidad del agua del río Sinú se considera dentro de un nivel BUENO.
  - b) Los puntos Críticos son Angostura, Santana y Cotoca Abajo.



## **6.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.7.1 Recurso Hídrico Superficial**

Como se determinó en el análisis de rendimiento hídrico, el aporte mas importante en la cuenca, tanto antes como después de Urrá, es el aporte hídrico en la cuenca alta. Arriba de Urrá se generan los mayores caudales debido a la alta densidad de corrientes que drenan hacia el río, sus elevadas pendientes y la cobertura vegetal de las serranías de Abibe y San Jerónimo. En cuanto a rendimiento medio se aprecia el valor que tiene la cuenca alta como generadora de caudal con un valor muy representativo de  $70 \text{ l/s/km}^2$  en el sitio de Angostura de Urrá llegando a superar el promedio de la vertiente del Caribe ( $44 \text{ l/s/km}^2$ ). Como se anota en ese mismo capítulo, el rendimiento medio únicamente se incrementa hasta el sitio de Carrizola, alcanzando un máximo de  $80 \text{ l/s/km}^2$  pero desde este punto en adelante el rendimiento desciende en forma gradual hasta el mar Caribe ( $28 \text{ l/s/km}^2$ ). Esta disminución de rendimiento medio no solo se debe al aumento en área a medida que se desciende en la cuenca, sino también a que el caudal medio permanece prácticamente constante (o con oscilaciones muy leves) inmediatamente aguas debajo de Urrá. De esta forma se confirma el hecho de que aguas abajo de Carrizola, el río Sinú no recibe aportes significativos de ningún afluente importante.

Debido a lo anterior cobra mayor relevancia cualquier análisis de caudal medio o de caudales para eventos extremos que se realice con la información hidrométrica de la estación Angostura de Urrá bien sea antes de la entrada en operación de la central o bien sea después. Esto es en razón a la gran influencia que tienen los caudales registrados en Urrá sobre los caudales registrados en el resto de la cuenca. Lo anterior se refuerza con el hecho de que a partir de principios del año 2000, momento en que comenzó la central de Urrá a operar, no se han presentado crecientes como las históricas en primer lugar debido a que el río ha tenido un proceso de regulación marcado y en segundo lugar gracias a que los aportes en la cuenca media y baja no han sido lo suficientemente importantes como para esto, como se muestra en las simulaciones de eventos históricos después de Urrá en el análisis de amenaza por inundaciones.

En este punto se debe hacer la salvedad de la quebrada Juy; ésta en épocas de caudales medios no aporta significativamente al Sinú. En el análisis de oferta hídrica realizado sobre las corrientes que drenan directamente al río Sinú en la quebrada Juy se obtuvo un valor de caudal medio cercano a  $11 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por el

contrario, en casos de eventos extremos es un tributario importante del río Sinú y adicionalmente los caudales generados en épocas de creciente de la quebrada ocasionan inundaciones en la población de Tierralta. Es recomendable hacer un análisis mas detallado en donde se delimiten zonas de amenaza y riesgo por inundaciones. Esto se debe hacer con una cartografía mas detallada para la zona con una escala aproximada de 1:25,000 y con curvas de nivel cada 10 m. Además de esto, seria aconsejable instalar una estación limnimétrica ubicada sobre la quebrada en inmediaciones de la casco urbano de Tierralta y de esta forma se podría analizar el régimen de caudales de una forma cuantitativa mas confiable sobretodo en el caso de eventos extremos.

La metodología planteada para determinar la oferta hídrica resulto ser un método apropiado para una cuenca como la del río Sinú, en donde no existe información hidrométrica en corrientes distintas al propio río, salvo algunas excepciones (caño Betancí, caño Aguas Prietas, caño Bugre, entre otros). Esto es explicable si se tiene en cuenta lo que se mencionó mas arriba en cuanto a que no hay corrientes importantes que ameriten la existencia de estaciones hidrométricas. El método demostró ser sencillo, rápido y eficaz, algo que resulta ser de gran utilidad en este caso porque se pudo establecer la oferta de todas las corrientes de agua que son afluentes del río sin un nivel de precisión muy alto. Así, podría ser utilizado en proyectos de evaluación, diagnóstico (como en este caso), prefactibilidad, etc.

Como muestra de la efectividad del método se realizó una verificación en campo de la quebrada Juy y se logro medir un caudal de  $9.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , muy cercano a los  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  estimados con el método.

Del análisis de caudales medios diarios efectuado con los histogramas de frecuencia y las curvas de duración de caudales se logro determinar en realidad cual ha sido el efecto del Embalse de Urrá en este sentido. Es indudable la repercusión que este ha tenido en el comportamiento hidrológico del río. Hay varios hechos que así lo confirman: 1) la disminución de la media de la serie de caudales medios diarios indica que los valores extremos tanto altos como bajos de caudal ya no se presentan, 2) la disminución de la desviación estándar indica que los valores en general están mas cerca del caudal promedio y 3) la disminución del coeficiente de asimetría indica que en general que el número de valores que están por debajo del promedio es aproximadamente igual al numero de valores que están por encima.

En conclusión el caudal medio después de Urrá esta limitado a un rango mucho mas estrecho, sin la existencia de eventos extremos máximos o mínimos

significativos que puedan ocasionar problemas como crecientes, inundaciones, sequías, etc. Este hecho se puede apreciar más claramente al hacer la clasificación en caudales bajos y altos como se explica detalladamente en el Análisis de Duración de Caudales Estación Angostura de Urrá.

Sin embargo esta regulación de caudales medios tiene un inconveniente. Debido a que ya no se presentan eventos extremos máximos se ha perdido la dinámica natural de los caños que comunican al río con las ciénagas. Hablando específicamente de las Ciénagas de Betancí y Grande del Bajo Sinú, antes el flujo del caño invertía su sentido y el río ingresaba hasta la ciénaga. Ahora es más poco probable que el río ingrese y cuando lo hace la duración y magnitud de los picos es menor en ambas ciénagas.

Lo anterior es suponiendo que en el Caño Betancí no existiera la pequeña presa "Tapa", debido a que con esta queda completamente imposibilitado el flujo negativo del río hacia el caño.

Ante esta circunstancia surgen varias alternativas: 1) bajar el nivel de la cresta del vertedero para que la diferencia de niveles entre el río y la ciénaga sea menor 2) adecuar una compuerta que permita un descenso en el nivel aguas arriba de la "Tapa" 3) hacer una combinación de las alternativas 1) y 2) logrando mantener cierto nivel mínimo en la ciénaga

Se recomienda evaluar las alternativas considerando diferentes dimensiones de la compuerta, elevaciones de la cota batea, elevaciones de la cresta del vertedero para saber cual funciona en forma óptima.

A pesar de la regulación lograda con el Embalse de Urrá se presentan oscilaciones considerables en el caudal medio diario. Es así como se pueden presentar cambios instantáneos de caudal de un día para otro dependiendo de las necesidades de generación de la Central Hidroeléctrica de Urrá. Esto ha generado otra serie de inconvenientes como erosión de las bancas del río, fenómeno natural en el río Sinú pero que se intensificó debido a la operación de la central.

La causa más específicamente es el cambio abrupto en el nivel del río y por consiguiente la humedad del suelo del talud de las bancas. Cuando el nivel desciende bruscamente se genera un proceso de tubificación al interior del talud por el lavado de materiales finos ocurrido gracias al flujo de agua hacia abajo. Esta tubificación produce pérdida de la homogeneidad del suelo que soporta el talud y como consecuencia la pérdida de estabilidad de la base, provocando el volcamiento de la banca.

La repetición cíclica de este fenómeno hace que el río avance lateralmente en su proceso erosivo destruyendo las orillas naturales, ocasionando problemas a los pobladores ribereños que se han asentado muy cerca al río o a las vías que existen paralelas a este. Debido a la complejidad del fenómeno, es aconsejable estudiarlo más a fondo teniendo en cuenta casos puntuales con el fin de llegar controlarlo.

Con respecto a los caudales de eventos extremos máximos también Urrá ha tenido un impacto positivo. Eventos como el de Octubre de 1988, o como el de Julio de 2003, el cual de no ser por Urrá, hubiera causado una catástrofe de magnitudes inimaginable en toda la cuenca media y baja del río Sinú, no se han vuelto a presentar y mas aun bajo las políticas de operación de la central de Urrá no se deben volver a presentar. Hay que resaltar que después de Urrá se ha perdido todo comportamiento aleatorio y estocástico del río como es de esperarse en un sistema hídrico natural y hay que hablar de periodos de retorno con precaución y teniendo esto en cuenta. Así los caudales para eventos extremos máximos y sus respectivos periodos de retorno se hayan determinado en este estudio, estos en teoría no se volverán a presentar.

Ahora el río Sinú tiene un carácter más determinístico ya que el caudal es manejado artificialmente. En todo caso el periodo de retorno para un caudal máximo dado aumento extraordinariamente y, análogamente, sucedió lo mismo con el periodo de retorno de un caudal mínimo, haciéndolo más regulado y por lo tanto menos susceptible de ocasionar inundaciones o generar problemas asociados con sequías en épocas de verano.

Finalmente se debe mencionar que en cualquier comparación que se haga de comportamiento estadístico de caudales del río antes y después de Urrá, se debe tener muy en cuenta que únicamente han transcurrido 4 años desde que esta comenzó a operar. El periodo de registro antes de Urrá es de 40 años y el hecho de hacer comparaciones de análisis con registros de caudal con dos series tan diferentes en duración conduce a afirmar que no se pueden concluir nada en forma definitiva. Los resultados presentados aquí y las conclusiones a las que se ha llegado, corresponden a lo sucedido hasta el momento y a la tendencia que hasta ahora ha mostrado el funcionamiento del río después de Urrá. En algunos años cuando se cuente con una serie más extensa, se podrán hacer aseveraciones mas categóricamente.

### 6.7.2 Recurso Hídrico Subterráneo

Las formaciones geológicas que se identifican con potencial acuífero en orden de importancia son: Betulia, Cerrito, Depósitos aluviales del Sinú. Aunque los depósitos aluviales del Sinú presentan aguas de baja calidad, debe explorarse el recurso a mayor profundidad para determinar si la calidad del agua mejora en función a ésta. Las aguas subterráneas de mejor calidad se encuentran en la unidad de Betulia.

En el acuífero El Cerrito se encuentra el mayor porcentaje de pozos profundos concentrados principalmente en las cabeceras de los municipios de Chinú y Sahagún. Se evidencio una explotación intensiva, por lo cual se hace necesario la realización de estudios en detalle para un mejor conocimiento y planeamiento del recurso.

Conceptualmente en el departamento se deducen dos grandes flujos subterráneos, uno hacia el Mar Caribe desde el Lineamiento del Sinú a través de las formaciones que conforman el Cinturón del Sinú y otro hacia el Oriente a través de las formaciones del Cinturón de San Jacinto y la Zona de Plataforma. Para corroborar esta hipótesis es necesario recoger toda la información pertinente para plantear el modelo matemático.

Las unidades acuíferas presentes en la cuenca, son en buen grado vulnerables a la contaminación, razón por la cual las entidades competentes deben tomar medidas a nivel correctivo y preventivo.

Es necesario adelantar una campaña de actualización de inventario de puntos de agua en la cuenca, para un mejor conocimiento y manejo del recurso hídrico subterráneo.

### 6.7.3 Calidad del Recurso Hídrico

Con base en los estudios que se han realizados diferentes firmas Consultoras, Universidades, Monitoreo de calidad de agua realizado por la empresa URRRA S.A.E.S.P. y el seguimiento y control por parte de la Corporación C.V.S. con respecto a la calidad del recurso hídrico en la cuenca del río Sinú, se concluye:

### **Calidad del Agua.**

- Con respecto a la calidad del recurso hídrico en la Zona Alta aguas arriba del embalse URRRA, está se conserva aún favorable para la vida acuática, debido a la poca intervención antrópica existente en dicha zona.
- En la Zona Media y Baja la calidad presenta alteraciones en las condiciones ambientales naturales, ocasionadas por los mayores vertimientos de las actividades poblacionales, como ilustración y con base en el parámetro DBO5, tiene polución de baja a media por materia orgánica.
- El análisis de los resultados obtenidos, ha evidenciado que los parámetros físicos-químicos están mostrando sus comportamientos esperados sin cambios drásticos inclusive en las épocas de lluvias y verano.
- Existe escasez de información para evaluar la incidencia sobre la calidad del agua en la Ciénaga Grande del Bajo Sinú por los aportes de los canales de drenaje Principal y Colector del INCODER (antiguo INAT), que reciben los vertimientos del alcantarillado de montería con caudal promedio de 500 l/s.
- Se hace necesario realizar ensayos a otros parámetros como: Metales, agroquímicos, detergentes, grasas, y bacteriológicos. Lo anterior para condiciones de contaminación distintas a la producida por vertimientos de aguas residuales domésticas y enfatizar acerca del conocimiento de los vertimientos producidos por actividad agrícolas y pecuarias.

### **Fuentes de Contaminación**

- Se han identificado como las principales fuentes de contaminación del recurso hídrico en la cuenca del río Sinú, las aguas residuales domésticas (A.R.D.) generadas en los núcleos poblados. El uso de agroquímicos (sin estudios específicos y concluyentes), la disposición final de forma inadecuada de los desechos sólidos domiciliarios y los procesos erosivos presentes que constituyen una fuente de aporte de sólidos.

### **Conformidad con el Uso al que se Destina**

- Dependiendo del uso al cual se destina el recurso hídrico según lo dispuesto en el decreto 1594/84, el agua del río Sinú es apta para uso doméstico sólo con tratamiento convencional, todos los municipios captan agua del río para sus acueductos y ninguno capta agua de las ciénagas. Ver anexo N° 5
- Igualmente el agua del río es apta para uso agrícola y pecuario (los distritos de riego Mocarí y La Doctrina captan agua del río).
- Su uso es limitado para recreación por contacto directo. En el uso para preservación de flora y fauna acuática, existen restricciones en la calidad del agua de las ciénagas sobre todo en época de estiaje en donde se pueden presentar niveles bajos de oxígeno disuelto., eutroficación y otros eventos.

### **Operación del Embalse URRÁ**

- Es evidente su importancia en la morfodinámica del río.
- Por relación directa, la regulación del caudal por parte del embalse, origina el amortiguamiento de los picos de turbidez con valores superiores a 1000 N.T.U en períodos de lluvias, época esta de gran aporte de sólidos suspendidos. Mostrándose en los menores valores de turbidez y sólidos suspendidos con respecto a los valores mostrados sin el embalse. En períodos secos los valores de turbidez bajan notablemente con valores mínimos de 45 N.T.U., de acuerdo con los datos obtenidos del monitoreo de URRÁ S.A.E.S.P.

### **Monitoreo**

- El monitoreo de calidad, realizado por URRÁ S.A.E.S.P. desde la puesta en marcha del proyecto hidroeléctrico, ha sido de gran utilidad y bien orientado a las condiciones que se presentaron en el inicio de la operación del embalse. Sin embargo, la forma y periodicidad en que se hacen las mediciones, debido a las grandes fluctuaciones de caudal imposibilitan el análisis estadístico e impiden correlacionar el comportamiento de parámetros en diferentes épocas, de tal forma que los resultados obtenidos no permiten el control de la calidad y el cálculo de Índices de calidad bajo el ciclo hidrológico natural.

Con respecto al proyecto POMCA – este plantea la necesidad de implementar el Programa **MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS**.

#### **❖ Nombre “MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS”**

#### **❖ Planteamiento:**

Establecer por parte de la Corporación C.V.S., o en convenio con otras instituciones, acorde con los artículos N° 22, 23 y 24 de decreto 1594/84, el programa “Monitoreo de Calidad de Aguas” con el fin de verificar y evaluar bajo criterios ambientales la calidad del recurso hídrico en la cuenca del río Sinú.

#### **❖ Justificación:**

El “Monitoreo de la Calidad de Aguas” es una herramienta fundamental, si tenemos en cuenta que la información generada servirá para la constante actualización de planes de manejo, análisis ambientales, seguimiento, evaluación y control del recurso hídrico, a la vez que posibilitará un mejor

entendimiento de los impactos naturales y antrópicos, sean directos, indirectos, sinérgicos o acumulativos, sobre el medio natural.

El monitoreo de la calidad del agua es necesario para establecer los usos potenciales de ambientes acuáticos, o para verificar si las condiciones ambientales son apropiadas para los usos establecidos, sean éstos domésticos, agrícolas, industriales, comerciales, recreacionales o de conservación.

#### ❖ Aspectos legales:

La constitución Política Colombiana de 1991 en algunos de sus artículos, el Artículo 80 hace referencia a la planificación, manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, el gobierno nacional dictó leyes, normas y decretos que han permitido el desarrollo de los mandatos constitucionales, entre otros, la ley 99 de 1993 por la cual se creó el ministerio del medio ambiente, la misma ley propicia la formación de institutos descentralizados como las Corporaciones Autónomas Regionales y a su vez como parte de sus tareas se ocupa del diseño de las estrategias de políticas de desarrollo y conservación.

En el decreto 1594 de 1984, ART. 22.—Para destinar las aguas en forma genérica a los diferentes usos de que trata el artículo 29 del presente decreto, se deberá desarrollar un plan de ordenamiento del recurso por parte de las EMAR o del Ministerio de Salud en donde aquellas no existan.

ART. 23.—Para el ordenamiento de que trata el artículo anterior deberá tenerse en cuenta: d) El establecimiento de los modelos de simulación de calidad que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables.

ART. 24.—Para el establecimiento de los modelos de simulación de calidad de que trata el literal d) del artículo anterior la EMAR deberá realizar periódicamente, a partir de la vigencia del presente decreto, los análisis pertinentes para obtener, por lo menos, la siguiente información:

- a) DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno a cinco (5) días.
- b) DQO: Demanda química de oxígeno.
- c) SS: Sólidos suspendidos.
- d) PH: Potencial del ión hidronio, H<sup>+</sup>.
- e) T: Temperatura.
- f) O.D: Oxígeno disuelto.
- g) Q: Caudal.



- h) Datos hidrobiológicos.
- i) Coliformes (NMP).
- j) Dureza

#### ❖ **Marco Teórico Conceptual:**

La conceptualización programa debe estar enmarcado dentro de los esquemas de un monitoreo que incluya los componentes Continuo, Sistemático y Analítico, además caracterizado en la homogenización de las condiciones de toma de muestras en acuerdo con la operación y regulación de la presa URRÁ, bajo la condición de caudal estable, e involucrar los análisis bacteriológicos.

#### ❖ **Objetivos Generales:**

- a) Caracterización de la calidad del agua en la cuenca del río Sinú, con respecto a criterios bióticos, físicos, químicos y bacteriológico.
- b) Generar la información sobre la calidad del agua para su uso en la evaluación y planificación de la cuenca hidrográfica, que facilite el conocimiento, atención y planteamiento de alternativas de control de contaminantes.
- c) Establecer los usos potenciales de ambientes acuáticos, o para verificar si las condiciones ambientales son apropiadas para los usos establecidos, sean éstos domésticos, agrícolas, industriales, comerciales, recreacionales o de conservación.

#### ❖ **Metodología:**

El conocimiento de una variable ambiental se lleva a cabo por su determinación total o, mediante un número de muestras representativas, así que mediante el muestreo se colecta la información necesaria que aporte el conocimiento, para inferir sobre el sistema el cual se evalúa sin necesidad de su evaluación total.

Algunas de las premisas a tener en cuenta durante el muestreo son:

1. El muestreo muy laborioso puede significar sobremuestreo o poca ganancia en precisión, mientras que un muestreo muy ligero puede aportar información poco precisa o distorsionada de la realidad.
2. Los muestreos en el tiempo deben incluir diferentes ciclos ambientales, es decir niveles altos y bajos en las aguas.

De acuerdo con el marco conceptual implementado la metodología se desarrolla en la estructuración de los componentes Continuo, Sistemático y Analítico.

➤ **Muestreo Continuo :**

Contempla el programa en el tiempo (a través de los años) siendo su propósito el de observar periódicamente los cambios (positivos o negativos) por alteraciones de orden natural o antrópico.

En ocasiones se tiende a creer que la ubicación de las estaciones se realiza aleatoriamente, esta premisa sin embargo no es cierta, por cuanto no se deja al azar la inclusión de aspectos fundamentales de la investigación como es el caso de las variables ambientales al interior del cuerpo lagunar en las ciénagas de Betancí y Grande del Bajo Sinú.

La ubicación de las estaciones se debe acordar bajo criterios de interés ambiental. El número de estaciones está supeditado a la infraestructura disponible, debiendo sopesarse conjuntamente con el número de muestras en cada una de ellas y aquellas estaciones no contaminadas podrán ser usadas como control aunque debe guardarse precaución con la interferencia de otras variables.

Con lo anterior se plantea realizar el muestreo:

Con una Periodicidad Inicial los días Martes y Jueves durante dos años, lo que permitiría la homogenización del muestreo articulado con los otros componentes.

En las actuales estaciones hidrométricas a lo largo del cauce del río y establecer cuatro (4) estaciones en la Ciénaga de Betancí y Grande del Bajo Sinú al interior del cuerpo lagunar. Lo que permitirá coleccionar información que hasta el momento es inexistente. De igual manera se requiere del monitoreo del Canal del Drenaje Principal del INCODER, así como del Caño Aguas Prietas, la Ciénaga de Charco Grande en tres sitios de toma, al inicio, en la mitad de su recorrido y en el sitio de entrega a la Ciénaga Grande del bajo Sinú.

Para cuantificar las variables Físico-Químicas y Bacteriológicas contempladas en el artículo 24 del decreto 1594/84.

**Muestreo Sistemático:**

Una vez colectada realizadas las mediciones y tomas de muestras en las estaciones, se deberá acogerse un diseño de almacenamiento de los valores obtenidos en campo y laboratorio, en el cual se define la forma de clasificación y

ordenación . La toma de muestras a lo largo del monitoreo puede requerir modificaciones tales como cambios en el tipo de muestreador, número de muestras por estación, inclusión o exclusión de nuevas variables o estaciones, estas modificaciones pueden ser necesarias para mejorar la interpretación de los cambios, para reducir costos, o tan sólo porque alguna información resulta carente de interés.

Con lo anterior se plantea realizar el muestreo, el cual constituye una herramienta muy usada los programas de hojas de cálculos.

Con los suficientes números de muestras en cada estación que permita conocer el promedio de una variable y su error estándar.

### **Muestreo Analítico:**

Comprende básicamente en la cuantificación de Índices de calidad propuestos, entre otros Índices de Calidad de Agua (ICA), Índices de Contaminación (ICO) e Índices Biológicos y tener como propósito simplificar en una expresión numérica las características positivas y negativas del recurso hídrico:

Con lo anterior se plantea un procedimiento general para el análisis de la calidad del recurso:

Selección de variable Físico-químicas y Bacteriológicas

Selección y números del tipo de Índices a cuantificar

Seguimiento de la metodología acorde con la selección anterior.

## 6.8 REFERENCIAS

### 6.8.1 Recurso Hídrico Superficial

Barreto G.M., Barrera O.R., Benavides Q.J., Cardozo G.E., Hernandez H.H., Marín E.L. Posada P.B., Salvaterra C., Sierra C.P. y A. Villa. 1999. *Diagnóstico Ambiental del Golfo de Morrosquillo (Punta Rada-Tolú). Una aplicación de sensores remotos y SIG como contribución al manejo de zonas costeras*. Curso AGS-6 (noviembre 25 de 1998 –julio 23 de 1999).

Brunner, G., 2001a. *HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual Version 3.0, January 2001*. U.S. Army Corps of Engineers – Institute for Water Resources - Hydrologic Engineering Center. January 2001.

Brunner, G., 2001b. *HEC-RAS River Analysis System – User´s Manual Version 3.0, January 2001*. U.S. Army Corps of Engineers – Institute for Water Resources - Hydrologic Engineering Center. January 2001.

Chow, V.T., 1985. *Hidráulica de los Canales Abiertos*. Tercera Impresión Editorial Diana S.A, México. 1985.

Chow, V. Maidment, D. Mays, L., 1994. *Hidrología Aplicada*. Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A. 1994.

Claro, F., 1991. *Balance Hídrico*. Santafé de Bogotá: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), 1991.

Diaz-Granados, M., 1997. *Estudio Preliminar de las Inundaciones Aguas Abajo del Proyecto Urrá I*. Empresa Multipropósito Urrá S.A. E.S.P. 1997.

Gómez y Cajiao, 2002. *Monitoreo del Río Sinú y Caños de Conexión, y Trabajos de Campo en las Zonas de Explotación de Arenas y Gravas en el Río Sinú – Informe del Mes de Septiembre de 2002*. Gómez, Cajiao y Asociados S.A., Ingenieros Consultores. Octubre 2002.

Gómez y Cajiao, 2003. *Análisis de Movilidad del Cauce del Río Sinú antes y después de la Construcción de la Central Hidroeléctrica Urrá I en el Periodo 1986 – 2002*. Gómez, Cajiao y Asociados, Ingenieros Consultores. Septiembre de 2003.

Guarnizo, E. 1997. *Manejo Integral de Cultivos en Suelos Bajo Riego: Balance Hídrico*. Proyecto CECIL Centro de Estudios para la Conservación Integral de la Ladera. 1997.

IDEAM, 1998. *Morfodinámica, población y amenazas naturales en el litoral Caribe colombiano. (Valle del Sinú-Morrosquillo-Canal del Dique)*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio del Medio Ambiente. 1998

IGAC, 1983. *Estudio General de Suelos de los Municipios que Conforman la Parte Media y Baja de la Cuenca del Río Sinú*. 1983. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC

IGAC, 1988. *Suelos y Bosques de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Subdirección Agrológica.

IGAC, 1996. *Caracterización Climática de la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú, Parte Media y Baja*. Revista Informativa del Proyecto SIG-PAFC (Sistemas de Información Geográfica – Plan de Acción Forestal para Colombia). Año 3, No. 9, Marzo de 1996. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC

INVEMAR, 2001. *Plan de Seguimiento y Monitoreo de la Zona Deltáico Estuariana del Río Sinú*. Informe Final Fase I. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis. Santa Marta, Enero de 2001

Smith R., Velez M.V., 1997. *Hidrología de Antioquia*. Universidad Nacional de Medellín. Secretaría de Obras Públicas Departamento de Antioquia. 1997

Van der Hammen, T. y A.G. Dos Santos, 1995. *La Cordillera Occidental Colombiana, Transectos Tatamá. Estudios de Ecosistemas Tropoandinos*; Vol. 6, Cramer (Borntraeger). Berlín – Sttutgart. 1995.

#### 6.8.2 Recurso Hídrico Subterráneo

ACOSTA J., BARRERA R., & GUZMAN G., 1993, Geología del área de Colomboy (Córdoba), inédito. Ingeominas para Ecopetrol.

AMBIENTEC, 1986., Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca alta y media del río San Jorge.

ANDERSON, F. M. 1926. Original sources of oil, Bulletin American Association Petroleum geologist 45 (5): 645-665 Tulsa.

ANDERSON, F. M. 1929. Marine Miocene and related deposits of north Colombia. Academic Science Proceedings (San Francisco) 28 (4): 73-181. California..

ASESORÍAS GEOFÍSICAS DE COLOMBIA, 2003. Caracterización Geoelectrica de los Principales Acuíferos para el Mapa Hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000,

BARRERA R., 1995, Teledetección y geología de la plancha 62, Colombioy (Córdoba), Informe inédito.

BARRERA R., 1997, Mapa geológico generalizado del departamento de Sucre. Ingeominas.

BARRERA R., 1999, Mapa geológico generalizado del departamento de Córdoba Ingeominas.

BARRERA R. (en preparación), Geología de las planchas 43-43BIS (San Antero - San bernardo del Viento).

BECK, E.,1921. Geology and oil resources of Colombia, the coastal plain. Economy Geology 16 (7): 457-473.

BUTLER, J.W., 1942. Geology of municipio de San Jacinto and parts of the municipios of San Juan Nepomuceno and El Carme, Departament of Bolívar, Texas Petroleum Company, Internal Report PA-18.

CACERES C. & DE PORTA J., 1972. Contribution a la géologie de la Serranía de San Jacinto entre Toluviejo et Chalán , Colombie, S. A., C.R.S. Soc. Géol France.

CHENEVART, CH., 1963. Les dorsales transverses anciennes de Colombie et leurs homologues d'Amérique Latine. Eclogae Geol. Helvetiae, v. 52, n.2.

CLAVIJO Y OTROS (en preparación), Geología de las planchas 44 y 52, Sincelejo-Sahagún. INGEOMINAS, Informe interno.

CUSTODIO Y LLAMAS. 2001 Hidrología Subterránea, segunda edición. Ediciones Omega. Barcelona.

C.V.S. 1979. Plan maestro de desarrollo integral de la cuenca hidrográfica del río Sinú. Montería.

DE PORTA , J., 1962. El Terciario Superior en los alrededores de Sincelejo. Serv Geol. Nal., informe No. 1407. (inédito), pp. 1-31, Santafé de Bogotá.

DUEÑAS H. & DUQUE-CARO, H. 1981. Geología del cuadrángulo F-8. Boletín Geol. Ingeominas, v.24(1), p. 1-35.

DUQUE-CARO, H., 1967. Informe Bioestratigráfico preliminar de los cuadrángulos D-8 y E-8. Informe 1522. Servicio Geológico Nacional. Bogotá

-----1968. Observaciones generales a la bioestratigrafía y geología regional en os departamentos de Bolívar y Córdoba. Boletín de Geología, Universidad Industrial, Santander, No. 24, p. 71-87. Bucaramanga, Colombia.

-----1972. Ciclos Tectónicos y Sedimentarios en el norte de Colombia y sus relaciones con la Paleoecología. Boletín Geológico. Ingeominas, Volumen 19, No.1. Bogotá.

-----1973. Foraminíferos plantónicos y el terciario de Colombia. informe 1651. Ingeominas. Bogotá.

-----1978. Geotectónica y Evolución de la Región Noroccidental Colombiana. Boletín geológico. Ingeominas, Volumen 23, No.3. Bogotá.

-----1979. Major structural elements and evolution of northwestern Colombia. In Watkins, J.S., Montadert, L., and P.W. Dickerson (editors), Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.29:329-351.

----- and Others, 1983. General geology, geomorphology and neotectonics of northwestern Colombia (southwestern Caribbean borderland). Tenth Caribbean Geol. Conf., Field Trip C, Cartagena, Colombia, 81 pp.

-----1984. Estilo Estructural, Diapirismo y Episodios de Acrecimiento del Terreno, Sinú-San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. Bol. Geol. Ingeominas, Volumen 27 No.2, Bogotá.

DUQUE-CARO, H., & OTROS, 1996. Geología de la plancha 38. Ingeominas, Bogotá.

ETAYO, F. & OTROS, 1983. Mapa de terrenos geológicos de Colombia, publicación especial No.14-I, INGEOMINAS, Bogotá.

FOSTER, S e HIRATA, R. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una Metodología basada en datos existentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, CEPIS. 2da edición, Lima, Perú.

FRANCO V. & OTROS, 1992. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe Colombiano, Sector Bahía de Barbacoas-Delta de Tinajones, (Inédito), INGEOMINAS, Cartagena de Indias.

GOBERNACIÓN DE CÓRDOBA, 1998. Plan de desarrollo de Córdoba 1998 – 2000. Montería

GONZÁLEZ, H 1996. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia, Memoria Explicativa

GEOMINAS 1986. Prefactibilidad minera del alto San Jorge. Informe inédito. Medellín.

GEOTEC. 1997, Cartografía geológica de la Región del Sinú.

HAFFER, J., 1960. Some aspects of the regional geology of Northwestern Colombia, COLPET, GR-275.

HAFFER, J., 1960. On the stratigraphy of the upper Sinú-upper San Jorge region, Northwestern Colombia. Colombian Petroleum Company, COLPET, GR-302.

HAFFER, J., BEATTIE, D., 1959. On the geology of the Urabá (Northwest Colombia) Mobil Oil Company. ER-272.

HOFFSTETTER & DE PORTA, J., (1974). Léxico Estratigráfico Internacional. Volumen V, Fascículo 4b Colombia, Terciario y Cuaternario, Centre National de la Recherche Scientifique. Paris, Francia.

HUGUETT, ALCIDES. 2001. Memoria Técnica Mapa de Aguas Subterráneas del Departamento de Sucre, Escala 1:250000.

IGAC. 1992. Características geográficas del Departamento de Córdoba, Santafe de Bogotá.

INGEOMINAS. 1998. Evaluación Hidrogeológica y Contaminación de Acuíferos de la Zona Bananera de Santa Marta, Departamento del Magdalena.

INGEOMINAS. 2000. Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de los Acuíferos. Plancha 5-03.

INGEOMINAS. 2001 Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de los Acuíferos-Método "GOD". Plancha 5-04.



JOHNSON DIVISION. 1975. El agua subterránea y los pozos, primera edición. Johnson División, UOP Inc.

KASSEM, T., 1964. Geología del cuadrángulo E-8 Sincelejo (Informe preliminar - inédito) Servicio Geológico Nacional, Bogotá.

LONDOÑO C., & GONZALEZ H. (1997). Mapa geológico del departamento de Córdoba, Ingeominas.

LLOYD, J. W. AND HEATHCOTE, J.A. 1985. Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. Clarendon Press, Oxford.

MIALL. A. D., 1977. A review of the braided river depositional environment. Earth sci. Rev., V.13, p.1 62.

NOTESTEIN, F. B., 1929. Report on Tertiary section near Carmen, Department of Bolívar, Colombia. Texas Petroleum Company Internal Geological Report N° 70.

TABARES, L., 2003. Hidrogeoquímica del Departamento de Córdoba, Ingeominas.

WERENFELS (A.), 1926. A stratigraphical section through the Tertiary Toluviejo, Colombia, Ecl. Geol. Helv., Vol. 20, No.1, pp. 79-83, 2 fig., Basel.

#### 6.8.3 Calidad del Recurso Hídrico

GOMEZ CAJIAO. Estado Sanitario del Río Sinú, Montería 1984.

UNIVERDSIDAD DE ANTIOQUIA. Estudio Ecológico y Ambiental Ciénaga Grande y Massi, Montería 1992.

ALBERTO GONZALEZ RAMÍREZ & GERARDO VIÑA VIZCAÍNO. LIMNOLOGIA COLOMBIANA 1998.

ANGELA CRISTINA PATERNINA OLIVERA. Trabajo de tesis, Caracterización Físico – Química, Bacteriológica y de Contaminación Orgánica del río Sinú en Montería, Cereté y Lórica, durante la época de lluvia, Universidad Pontificia Javeriana Bogotá 2002.

UNIVERDSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA. Registros del Monitoreo de calidad de aguas en el Embalse y en el río Sinú, año 200, 2001, 2002.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA. Monitoreo de calidad de aguas en el Embalse y en el río Sinú, Informe Consolidado, MCA-INF-CON-2001, MCA-INF-CON-2002

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LOS VALLES DEL SINÚ Y SAN Jorge, C.V.S. Tasas Retributivas por contaminación hídrica, 2000.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LOS VALLES DEL SINÚ Y SAN Jorge, C.V.S. Informe Monitoreo de seguimiento de la Calidad del agua del Embalse y del Río Sinú. Feb, Sep, Oct y Nov del 2002 y Enero 2003.

EMILIO LATORRE ESTRADA, Medio Ambiente y Municipio en Colombia,

SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA - PRIMERA GENERACIÓN DE INDICADORES DE LA LÍNEA BASE DE LA INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA TOMO 2, IDEAM. Bogotá – Julio 2002.

## ANEXOS

ANEXO 1	Caudales Sintéticos Mensuales en Estaciones Hidrométricas a lo largo del Río Sinú
ANEXO 2	Gráficas de Duración de Caudal Mensual y Duración de Rendimiento Mensual
ANEXO 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gráficas de Análisis de Frecuencia de Precipitación Máxima en 24 horas.</li><li>• Gráficas de Prueba <math>\chi^2</math> (Chi cuadrado) en la Estación de Tierralta para Precipitación Máxima en 24 horas.</li></ul>
ANEXO 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gráficas de Análisis de Frecuencia de Caudal Máximo Mensual.</li><li>• Gráficas de Prueba <math>\chi^2</math> (Chi cuadrado) en la Estación de Montería para Caudal Máximo Mensual.</li></ul>