

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDROMETEOROLÓGICA**

**INFORME DE PASANTÍA
CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA ALTA CUENCA
DEL RÍO PARAGUA**

**BR: LEONARDO J. MATOS G.
C. I.: V-10.331.631**

MACAGUA, OCTUBRE 1998



C. V. G. ELECTRIFICACION DEL CARONI C.A. EDELCA

**INFORME DE PASANTÍA
(24/08/98 - 02/10/98)**

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA ALTA CUENCA
DEL RÍO PARAGUA**

**BR: LEONARDO J. MATOS G.
C.I.: V- 10.331.631**

**TUTOR INDUSTRIAL : ING. ANTONIO MEDINA
TUTOR ACADÉMICO: ING. ESPERANZA COLÓN**

SUMARIO

El presente informe corresponde a uno de los requisitos del Trabajo de Pasantía estipulado en el p nsu m de estudios de la especialidad de Ingeniería Hidrometeorológica, en la Universidad Central de Venezuela. Entre los objetivos generales de dicho trabajo se busca, entre otras cosas, lograr cierta familiarización con las rutinas propias del campo de trabajo.

El tiempo estipulado para su realización fue de seis semanas, y se desarrolló en las oficinas del Departamento de Hidrometeorología de C.V.G.-EDELCA, ubicadas en Puerto Ordaz, Estado Bolívar, entre las fechas del 24 de agosto y el 02 de octubre de 1998.

Consistió, básicamente, en realizar una revisión de la información básica recopilada por el mismo departamento, para luego implementar varias de las metodologías impartidas en el pregrado y verificar su aplicación y uso.

RESUMEN

El presente consiste en un informe de avance, correspondiente a la Cuenca del Río Paragua hasta Karum, de un macroproyecto que adelanta el Departamento de Hidrometeorología adscrito a la División de Estudios Ambientales e Hidrología de la empresa CVG-EDELCA, denominado "Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Caroní".

El informe fue desarrollado en su mayor parte con la información básica proveniente del monitoreo hidroclimatológico del citado Departamento. Específicamente, con la data recolectada por la estación hidrométrica convencional de Karum y las estaciones del recién instalado Sistema Hidrológico Automático (S.H.A.): Mahigia, Ichum, Guaiguatá, Guaina, Ichum alto y Paragua Alto; cuya particularidad es la transmisión en tiempo real vía satelital de los parámetros hidroclimatológicos medidos.

Luego de un análisis hidrográfico a partir de la información proveniente del Inventario de los Recursos Naturales de Guayana, gentilmente suministrada por la empresa CVG-TECMIN, y de un análisis hidrológico con la referida información del S.H.A., se obtuvieron valores característicos de las áreas de drenaje presentes en la citada región.

Es necesario resaltar que los resultados obtenidos son de carácter preliminar, debido a que la información recopilada de las estaciones corresponde sólo a los años 1997-1998. Lo corto del período común de registro brinda poca aplicabilidad estadística a los datos. Sin embargo, se puede afirmar que constituyen una importante fuente de información primaria vinculada al proyecto de caracterización integral mencionado anteriormente.

Por último, se formulan algunas conclusiones y sugerencias que se juzga deberían seguirse para materializar los objetivos planteados.

AGRADECIMIENTOS

Tanto en la realización del trabajo de pasantía como en la elaboración de este informe fueron de incalculable valor la ayuda y apoyo de varias personas e instituciones, a quienes quiero expresar mi agradecimiento.

A mi tutor empresarial, el Ing. Antonio Medina, por su guiatura y su dedicación a hacer del trabajo una experiencia de la cual aprender y sacar provecho día a día.

A todo el personal del Departamento de Hidrometeorología por su apoyo en cada etapa del trabajo y el agradable ambiente en el que logran desempeñarse; muy especialmente agradezco a Yirda el dedicar tanto tiempo de su apretada agenda a solucionar cualquier problema que se presentara.

A Margarita Núñez en C.V.G.-TECMIN, por suministrar amablemente numerosos datos del Proyecto Inventario de los Recursos de Guayana.

A mi familia en Puerto Ordaz debo agradecer su excepcional hospitalidad y sus atenciones para conmigo: Omaira , Alfredo y todos los demás, gracias por darme su afecto y un hogar lejos de Caracas; Carmita, gracias por el buen ánimo, la buena compañía y la buena mesa.

Finalmente, a mis padres y hermanos, por todo el apoyo que me han brindado en éste y todos los proyectos que he emprendido.

CONTENIDO

Introducción	1
I. Reseña de la empresa C.V.G.-EDELCA	3
II. Antecedentes	7
III. Objetivos	
III. I. Objetivos generales	7
III. II. Objetivos específicos	8
IV. Alcance y limitaciones	8
V. Descripción general de la cuenca estudiada	9
V. I. Delimitación	9
V. II. Hidrografía	10
V. III. Población y actividades	11
V. IV. Climatología	13
V. V. Geología y geomorfología	14
V. VI. Suelos	16
V. VII. Vegetación	18
VI. Metodología	20
VI. I. Determinación de tiempos de viaje	21
VI. II. Determinación de tiempos de concentración	24
VI. III. Estimación de aportes porcentuales	24
VI. IV. Evaluación de la precipitación	26
VI. V. Acarreo de sedimentos	27
VII. Resultados	29
VII. I. Hidrogramas	29
VII. II. Tiempos de viaje	29
VII. III. Tiempos de concentración	30
VII. IV. Precipitación	30
VII. V. Aportes porcentuales	30
VII. VI. Acarreo de sedimentos	37
VIII. Análisis de resultados	38
VIII. I. Tiempos de viaje y de concentración	38
VIII. II. Precipitación	38

VIII. III. Aportes porcentuales	38
VIII. IV. Acarreo de sedimentos	40
Conclusiones	41
Recomendaciones	43
Bibliografía	45
Anexos	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Características Fisiográficas
Tabla 2	Ecuaciones de gastos
Tabla 3	Tiempos de viaje: aguas bajas
Tabla 4	Tiempos de viaje: aguas medias
Tabla 5	Tiempos de viaje: aguas altas
Tabla 6	Tiempos de concentración
Tabla 7	Aportes porcentuales: Mahigia - Ichum
Tabla 8	Aportes porcentuales: Ichum - Karum
Tabla 9	Aportes porcentuales: Guaina - Karum
Tabla 10	Aportes porcentuales: Guaiguatá - Karum
Tabla 11	Muestras de sedimentación
Tabla 12	Acarreo de sedimentos

INTRODUCCIÓN

El Departamento de Hidrometeorología ha tenido dentro de C.V.G.-EDELCA la permanente misión de apoyar las iniciativas de desarrollo sustentable de los ríos Caroní, Paragua y Caura, tendientes a evaluar el potencial hidroeléctrico en los numerosos puntos de interés para la empresa. Parte de su contribución a esos fines se ha hecho concreta a través de un programa de mediciones hidrológicas y climatológicas, el cual se ha desarrollado e implementado por más de 25 años.

El importante volumen de información básica que se ha producido ha servido como fundamento para la toma de decisiones estratégicas en las diferentes etapas de anteproyectos, proyectos y manejo de obras que la empresa ha concebido y llevado a cabo. A la vez, ha conducido a la descripción detallada del comportamiento climatológico, hidrológico y sedimentológico de diversos sectores de las cuencas involucradas.

La determinación del estado, variaciones y tendencias de cada uno de estos aspectos de las cuencas obedece a las necesidades de la planificación y ejecución de acciones que garanticen el mejor aprovechamiento de los recursos de los que depende la producción hidroeléctrica del país. Factores tales como el acarreo y acumulación de sedimentos deben ser estimados con suficiente antelación y exactitud como para posibilitar la aplicación de medidas correctivas y/o preventivas adecuadas; el conocimiento de la susceptibilidad de los lechos y suelos de una cuenca a ser degradados y luego transportados por la red de drenaje está ligado a la comprensión de esos fenómenos.

Asimismo, el correcto manejo de los caudales de alivio de las presas será factible en la medida en que se conozca la cantidad de agua que los cauces pueden aportar en un momento dado; de la misma manera la capacidad de generación de electricidad depende de los caudales de entrada a los embalses. Tal requerimiento de información hidrológica implica el seguimiento de los procesos de la precipitación y demás elementos climatológicos, lo que involucra directamente al campo de trabajo de la meteorología.

El gran potencial hidroeléctrico que posee la cuenca del río Caroní, merced a sus características fisiográficas y climatológicas, y las implicaciones del mismo en el desarrollo energético (y por ende económico) de Venezuela, dan origen a la necesidad de un manejo realmente eficiente de sus recursos hídricos, lo que puede lograrse sólo mediante una comprensión cabal de los mismos, de sus procesos naturales y de los impactos que sobre ellos puedan generarse.

Estas consideraciones brindan gran relevancia a los servicios del Departamento de Hidrometeorología y del Departamento de Predicción y Estudios Hidroclimáticos, lo que obliga a estas dependencias de EDELCA a esforzarse por ampliar cada vez más sus campos de acción. En ese

sentido precisamente están dirigidas las iniciativas tales como el Proyecto de Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Caroní, el cual se ha planteado recientemente en el primero de los Departamentos mencionados. La intención de lograr resultados cada vez mejores en la búsqueda de los objetivos recién expuestos ha encaminado los procesos de desarrollo, ampliación y mejoramiento de la red de estaciones hidrométricas y climatológicas de la empresa y ha promovido la utilización de tecnologías de punta y la dedicación de personal calificado.

Este último aspecto se ha extendido hasta propiciar la incorporación de estudiantes de las disciplinas pertinentes a los numerosos proyectos y actividades de la empresa, contribuyendo a complementar su formación técnica y académica al permitir su participación a través de trabajos de pasantías y tesis de grado. La experiencia, el adiestramiento y logros conseguidos por estos medios le abren posibilidades de futuro ejercicio profesional a quienes encuentren en las actividades de EDELCA el ámbito apropiado para desarrollarse en su campo de trabajo. Esta coyuntura de intereses y objetivos comunes fue lo que dio cabida dentro del referido proyecto de caracterización a nuestros aportes, cuyos resultados quedan plasmados en este informe.

I. RESEÑA DE LA EMPRESA C.V.G.-EDELCA

C.V.G. Electrificación del Caroní, C.A. (EDELCA), es una empresa creada por la Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G.), para que se encargase de los estudios, producción, administración y distribución de los recursos hidroeléctricos del río Caroní.

EDELCA está concebida como una empresa de suministro de grandes bloques de energía eléctrica, tanto para la zona de desarrollo de Guayana a través del Sistema Eléctrico Regional, como para la zona central del país a través del Sistema Interconectado Nacional.

Su sede organizativa está situada en Pto. Ordaz, Estado Bolívar, y sus sedes principales se encuentran situadas en distintas zonas de la región (Macagua, Guri, Carhuachi, Tocoma) a todo lo largo del río Caroní. Cuenta también con sedes en Caracas y sub-estaciones en los estados Guárico, Aragua, Carabobo, Miranda, Yaracuy y Anzoátegui.

Entre los múltiples objetivos de la empresa EDELCA deben citarse los siguientes:

- * Diseño y mantenimiento de centrales hidroeléctricas para abastecer el sector eléctrico del país, acorde con el crecimiento cada vez más acelerado de la demanda energética.
- * Lograr la sustitución de la energía térmica por la hidráulica y a gas, de modo que el país posea para el año 2000 un panorama eléctrico totalmente diferente al actual, en vista de que aproximadamente el 75 % de la energía que se consumirá será generada por centrales hidroeléctricas.
- * Lograr un crecimiento tecnológicamente avanzado y eficiente con las necesidades del país.
- * Lograr el máximo aprovechamiento hidroeléctrico del río Caroní.

El Río Caroní nace en Venezuela cerca de la frontera con el Brasil y avanza de sur a norte unos 640 km antes de desembocar en el río Orinoco. En sus últimos 215 km, correspondientes a la baja cuenca, posee un potencial hidroeléctrico superior a los 13 millones de kilovatios.

En 1949, la firma Consultora Norteamericana Burns & Roe Inc, contratada por la Corporación Venezolana de Fomento para realizar un plan de Electrificación Nacional, presentó un informe donde recomendaba en capítulo aparte el desarrollo hidroeléctrico del río Caroní, puesto que ofrecía excelentes condiciones para su aprovechamiento, especialmente en los sitios correspondientes a los saltos inferiores.

En vista de la importancia que revestía tal proyecto, en 1953 se designó un grupo de ingenieros que conformaron la Comisión de Estudios para la Electrificación del Caroní, dependiente del Ministerio de Fomento.

A principios de 1955, se definió el primer anteproyecto de construcción de la central hidroeléctrica Macagua (Macagua I) en el salto del mismo nombre, con las características deseadas de

simplicidad, economía y flexibilidad: consta de una casa de máquinas en la que operan 6 turbinas tipo Francis, en donde cada unidad genera 61.500 Kilovatios. Esta obra comenzó a construirse en 1956 y fue concluida en 1961. Es del tipo "a filo de agua", es decir, que no requiere almacenamiento para su operación, y tiene una potencia instalada de 360 megavatios.

Entretanto, la mencionada comisión, adscrita desde 1958 a la Corporación Venezolana de Fomento, había autorizado la realización de las tareas preliminares del Proyecto Guri. En 1960, el equipo profesional que adelantaba los proyectos sobre el Caroní, pasó a formar parte de la Corporación Venezolana de Guayana; y en 1963 se constituyó formalmente la empresa C.V.G Electrificación del Caroní C.A., con un capital inicial de 514 millones de bolívares.

El 8 de Agosto de 1963 se firmó el contrato de construcción de la presa Guri. La primera etapa de la Central Hidroeléctrica Raúl Leoni quedó concluida a finales de 1978 con una capacidad instalada de 2065 MW. La etapa final de esta obra, terminada totalmente para el año de 1986, consiste fundamentalmente en una ampliación y elevación de la presa y la incorporación de 10 nuevas unidades generadoras, que elevan la capacidad instalada del conjunto hidroeléctrico a 10.000 MW. La generación de esta planta puede alcanzar los 50.00 GWH al año, capaces de abastecer un consumo equivalente a 300.000 barriles diarios de petróleo y permitiendo así cumplir con la política de sustitución de termoelectricidad por hidroelectricidad, con el fin de ahorrar combustibles líquidos que pueden ser utilizados para su exportación o su conservación con otros fines.

La construcción de la presa Macagua II se inició para el año 1985; fue inaugurada el 23 de Enero de 1997. Esta central hidroeléctrica tiene una casa de máquinas con 16 unidades que genera una potencia de 2.570.000 kilovatios.

EDELCA, como empresa pionera en el desarrollo hidroeléctrico, tiene como objetivo principal desarrollar paulatinamente todo el potencial del río Caroní a medida que las necesidades energéticas del país lo requieran. A estos fines, ya han sido estudiadas los posibles sitios de presa existentes en el Bajo Caroní y en las cuencas del Alto Caroní y el Alto Paragua.

En el bajo Caroní, se tiene como objetivo principal desarrollar todo el potencial existente entre los embalses de Guri y Macagua. La secuencia de construcción de centros de aprovechamiento hidroeléctrico contempla dos proyectos: Carhuachi Y Tocoma.

* Proyecto Carhuachi:

Cercano al paso Carhuachi, a 43 kilómetros de distancia aguas abajo de la central hidroeléctrica Raúl Leoni en Guri, se encuentra el sitio de Carhuachi, donde se construye una presa y una casa de máquinas que constará con 14 unidades para generar una potencia total de 2.424 megavatios. El nivel normal del embalse estará a una cota de 91,25 metros sobre el nivel del mar, teniendo un área de embalse de 238 kilómetros cuadrados.

* Proyecto Tocoma:

Esta área se encuentra ubicada a 18 kilómetros aguas abajo de la central hidroeléctrica Raúl Leoni, en la desembocadura del río Claro con el río Caroní. Esta presa contará con una casa de máquinas en la que serán instaladas 14 unidades para generar una potencia total de 2.424 megavatios. Tocoma será el último proyecto a ejecutar dentro del plan de construcción del aprovechamiento hidroeléctrico del Bajo Caroní.

Según el Inventario Hidroeléctrico del río Caroní fueron considerados 34 sitios de posible aprovechamiento hidroeléctrico, tomando como base una producción de 50 MW. Sobre el propio río se encuentran tres de estos sitios: Tayucay, Aripichí y Eutobarima.

Una consecuencia importante del desarrollo de estos sitios será la regulación del caudal que entra en Guri. Esto implica que, debido a que los futuros embalses estarán situados en el Alto Caroní, los soportes de agua podrían regularse a partir de estas centrales, lo cual aumentaría aproximadamente en un 10 % la energía generada en Guri para ese momento.

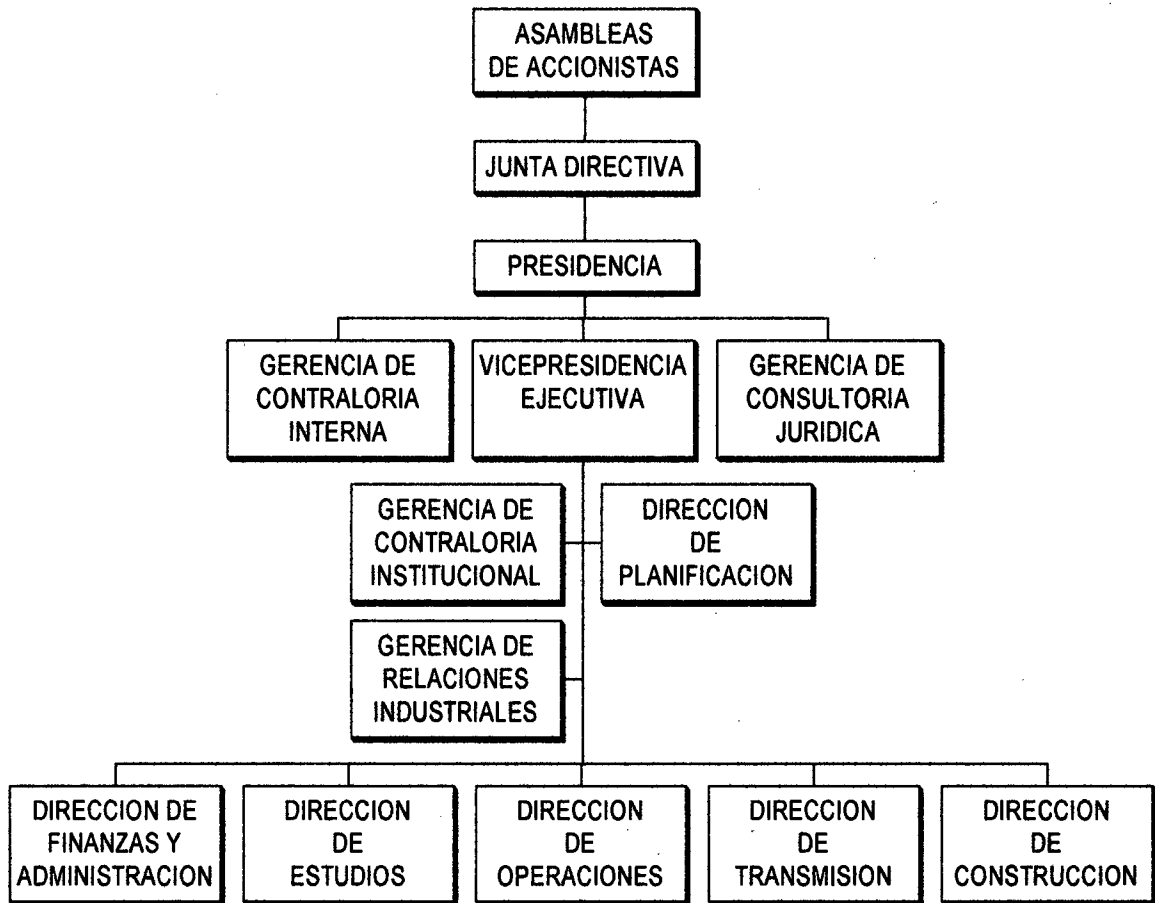
Estos proyectos se encuentran en estudio y son realizables a mediano y largo plazo, pudiendo de esta forma satisfacer las necesidades energéticas para principios del próximo siglo.

La consecución de objetivos de desarrollo de la magnitud de los que EDELCA se plantea sin el sacrificio del equilibrio existente en el ambiente de la región de Guayana se fundamenta en las siguientes premisas:

Ser una empresa líder en la prestación del servicio eléctrico, comprometida con la conservación del medio ambiente, con un mercado diversificado a nivel nacional e internacional; dotada de tecnologías de vanguardia y conformada por un recurso humano competente; orientada a la obtención de adecuados índices de calidad, rentabilidad y eficiencia; que satisfaga los requerimientos de nuestros clientes, empleados, accionistas, comunidades, proveedores y desarrollo integral del país.

El organigrama general de la empresa C.V.G. Electrificación del Caroní C.A. EDELCA, actualmente está conformado de la siguiente manera:

Organigrama estructural de la empresa C.V.G.-EDELCA



II. ANTECEDENTES

El programa de mediciones hidrológicas y climatológicas desarrollado por el Departamento de Hidrometeorología ha logrado recopilar un gran volumen de información básica, misma que ha sido de importante aplicabilidad dentro de las actividades de esta dependencia de la empresa. El Departamento ha realizado diversos trabajos relacionados con la dinámica fluvial de los ríos de interés, fundamentados en los registros de niveles, caudales y de precipitación de las estaciones ubicadas dentro de sus cuencas.

Entre estos trabajos, podemos destacar la implementación de modelos de escorrentía fluvial para el pronóstico de caudales de entrada a Guri, análisis de caudales y tiempos de viaje en el bajo Caroní (aguas abajo del Embalse de Guri), tránsitos de crecientes, elaboración de las curvas de gasto en todas las estaciones hidrométricas que maneja el Departamento, y la caracterización climatológica y sedimentológica de la cuenca del río Caroní.

Queriendo ampliar los alcances de esa labor, el Departamento se ha planteado este año (1998) un objetivo de gran envergadura que lleva como nombre "Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Caroní", donde a partir de información cartográfica 1:25.000 y el registro de la información generada por el Sistema Hidrológico Automático, se elaborará un estudio hidrológico e hidrográfico detallado de cada una de las subcuencas presentes en la referida hoyo hidrográfica. El mismo tendrá la finalidad de resaltar tópicos como aportes volumétricos porcentuales, sedimentos, tiempos de viaje, tiempos de concentración, pendientes por tramo, vegetación, suelos, etc., que permitan una descripción detallada de los 95.000 km² que posee dicha cuenca.

En tal sentido, como un primer paso hacia ese gran objetivo, se nos encomendó la tarea de iniciar el estudio inherente a la cuenca alta del río Paragua, hasta la estación de Karum. Si bien es cierto que se han realizado ya algunos estudios hidrológicos en esta área, es la primera vez que se efectúa con la información transmitida en tiempo real del S.H.A.

III. OBJETIVOS

III. I. Objetivos generales

Como se mencionó anteriormente, el proceso de caracterización de la cuenca del alto Paragua es parte del Proyecto de Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Caroní, trabajo a gran escala que adelanta el Departamento de Hidrometeorología de EDELCA. El mismo contempla la determinación de diversas características hidrológicas de la cuenca; entre ellas pueden citarse los

tiempos de viaje y de concentración por tramos específicos, los aportes porcentuales entre los puntos de mediciones hidrométricas, las áreas de las subcuencas involucradas y las variaciones en la ocurrencia de las precipitaciones sobre la zona. Debidamente analizada, esta información permitirá una visualización del comportamiento de la cuenca del Paragua en diversas condiciones de caudales y precipitaciones.

En consecuencia, persigue la obtención de valores preliminares de los parámetros y características de interés, así como la determinación de la información, análisis y procesamiento que harán falta para cumplir con los subsecuentes objetivos de dicho proyecto.

III. II. Objetivos específicos

- * Realizar un análisis cartográfico para la determinación de las siguientes características de la cuenca alta del Paragua y de sus cauces: área, perímetro y pendiente media de la cuenca y de las subcuencas, órdenes de las redes de drenaje, número de tributarios, pendiente media y longitud de cauces principales.
- * Determinar diversos parámetros hidrológicos de la cuenca, tales como: tiempos de concentración, tiempos de viaje, caudales medios y sus rangos de variación, aportes (caudales) porcentuales de cauces tributarios, influencias de la precipitación y acarreo de sedimentos.
- * Como parte de la caracterización, incluir descripciones de elementos fisiográficos tales como la composición litológica y de suelos, distribución de la vegetación y los aspectos geomorfológicos más resaltantes.

Incluir una descripción de la distribución de la población y actividades humanas y los impactos de ellas sobre la región y una breve caracterización climatológica de la misma, mencionando las tendencias y valores medios de elementos como la temperatura media, humedad relativa, precipitación, radiación e insolación.

El objetivo de tales descripciones es reunir suficiente información acerca de la cuenca que permita relacionar los distintos aspectos de su geografía, buscando una mayor comprensión de los procesos que en ella se desarrollan.

IV. ALCANCE Y LIMITACIONES

La mayor limitación para este estudio lo constituye el tiempo estipulado para el trabajo de pasantía. Según las normativas internas de la Universidad Central de Venezuela en cuanto a un trabajo de pasantía remunerada, el mismo debe completarse en un lapso de seis semanas, por lo que fue ese el

tiempo que la empresa concedió para ello.

Desde un principio se hizo evidente que la adquisición y recopilación del material cartográfico y su posterior análisis consumirían una parte considerable de este tiempo, dado que en el Departamento de Hidrometeorología no se contaba con los mapas topográficos de la zona a estudiar. Además de esto, restaría cubrir todavía numerosos aspectos del plan de trabajo de la pasantía, aparte de los cálculos que derivarían del trabajo planimétrico.

En vista de esto, para la caracterización hidrográfica se decidió trabajar con los datos ya determinados de áreas, cotas y otros parámetros, suministrados cortésmente por C.V.G. TECMIN a través del Proyecto Inventario de los Recursos Naturales de Guayana.

En cuanto a la caracterización hidrológica de la cuenca, cabe destacar que la información disponible fue también insuficiente para la obtención de resultados más significativos que los alcanzados. En el pasado, el mayor esfuerzo de recopilación de datos y mediciones se ha efectuado en la parte baja de la cuenca del Caroní, por las necesidades obvias e inmediatas del desarrollo hidroeléctrico en esa región.

Las estaciones hidrométricas en la alta cuenca son, por ende, de muy reciente instalación. Como consecuencia de ello, en este estudio se dispuso de un corto período de registros común a todas las estaciones, pertenecientes en su totalidad al Sistema Hidrológico Automático que EDELCA ha venido desarrollando en los últimos 2 años (1997 - 1998).

V. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA ESTUDIADA

V. I. Delimitación

La cuenca alta del río Paragua se encuentra ubicada en el sudeste de la República de Venezuela, en la parte sur-occidental del Estado Bolívar. Su divisoria coincide, sobre la Sierra de Pacaraima, con la frontera de Venezuela con el Brasil y colinda con las cuencas de los ríos Caroní y Caura al Este y al Oeste, respectivamente. El límite que la separa de la cuenca baja se ubica en los Raudales de Auraima, donde el río deja de correr sobre la provincia geológica de Roraima y pasa a hacerlo sobre la de Pastora.

Políticamente, está conformada por los Municipios Barceloneta y San Francisco del Distrito Heres del Estado Bolívar, e incluye dos extensas regiones bajo las figuras de Áreas Bajo Régimen de Administración Especial:

- * Zona Protectora Sur del Estado Bolívar (Decreto 542 del 27 de junio de 1974), en toda la cuenca alta y a lo largo de la margen izquierda de la cuenca baja,

* Reserva Forestal La Paragua (Decreto 1046 del 23 de enero de 1965), a lo largo de la margen derecha de la baja cuenca.

A los efectos de este estudio, se abarcará la cuenca del Paragua desde sus cabeceras hasta la estación de Karum, en la confluencia del río de igual nombre y el Paragua. Esta zona queda totalmente comprendida entre los paralelos de 3°31' y 5°40' N y los meridianos de 62°27' y 64°06' W.

V. II. Hidrografía

Las cabeceras del río Paragua se encuentran en la Sierra de Pacaraima a unos 750 m.s.n.m., donde nacen sus primeros tributarios: los ríos Paramichí, Okasiari y Aguapira. Desde allí hasta su desembocadura en el Caroní tiene una longitud total de unos 567 km. Entre los principales de sus afluentes pueden citarse los ríos Ichum, Kurutú, Karum, Karataka, Oris, Aza y Chiguao. Otros tributarios que merecen ser mencionados son el Marik, Kampetoi, Abareima y Tonoro.

Hasta la estación de Karum, el cauce principal tiene una longitud de unos 284 km, y en ese trayecto recibe los aportes de los ríos Ichum, Karum, Kurutú, Marik y Antabará (tributario del Karum). Su dirección general es sudeste - nordeste hasta encontrar el cerro Guaiquinima (*Waikinima tepuy*), al cual rodea por su borde occidental para tomar dirección nordeste hacia la población de La Paragua, desde donde sigue un rumbo oeste - este hasta encontrar al Caroní.

El área de la cuenca hasta Karum es de 14.319 km², un 37,5 % del total de la cuenca del Alto y Bajo Paragua, la cual es de unos 38.204 km² hasta San Pedro de Las Bocas en su confluencia con el Caroní (TECMIN, 1998).

El patrón de drenaje más común es el dendrítico, observándose con menos frecuencia un patrón rectangular, especialmente sobre las rocas sedimentarias que constituyen el lecho de los puntos más altos. En los cauces de estas zonas es común la ocurrencia de saltos.

El cuadro que se presenta a continuación intenta reunir algunas de las características hidrográficas del Alto Paragua y sus tributarios principales, según datos suministrados por C.V.G.-EDELCA y C.V.G.-TECMIN (Proyecto Inventario de los Recursos Naturales de Guayana; Informe de avance: Hidrología):

Tabla 1

Cauce	Longitud (km)	Area de subcuenca (km ²)	Cotas de extremos (m.s.n.m.)	Desnivel (m)
Paragua**	284	14.319	750 ; 295	455
Ichum*	125	2.627	1280 ; 313	967
Kurutú*	87	3.090		
Marik*	89	1.654	700 ; 307	393
Karum*	202	7.932	720 ; 295	425
Antabari [†]	82	1.795		

* Desde cabeceras hasta confluencia con el Paragua.

** Desde cabeceras hasta la estación de Karum.

[†] Desde cabeceras hasta confluencia con el río Karum.

V. III. Población y actividades

La ocupación del territorio de la cuenca alta del Paragua, y en general en la cuenca del Caroní, presenta un patrón bastante disperso, donde los centros habitados se alternan con grandes extensiones despobladas.

En el caso específico de la cuenca del río Paragua, el núcleo poblado de mayor significación es La Paragua, ubicada en la baja cuenca y comunicada con Ciudad Guayana por vía terrestre a través de la troncal 16; una pista de aterrizaje permite también la comunicación por vía aérea. Además de sustentar ciertas actividades agropecuarias y de extracción forestal, sirve como centro de abastecimiento y de actividad comercial para las poblaciones menores de la zona.

Estas últimas, en su mayoría, son comunidades dedicadas a la extracción de oro y diamantes, lo cual les confiere una gran variabilidad demográfica en función del éxito en el aprovechamiento de los yacimientos, disponibilidad de recursos y otros factores propios de la actividad minera artesanal que las hacen demográficamente inestables. A lo anterior se suma la inconveniencia de que los accesos fluvial y terrestre a muchos de los asentamientos de la zona sean intransitables durante ciertas épocas del año.

Tradicionalmente las poblaciones de esta región estaban conformadas por habitantes de las distintas etnias indígenas. La estratégica vía fluvial que el río Orinoco ofrece hasta el Atlántico, permitió la fundación de asentamientos como San Félix y La Paragua y desde allí la comercialización de la madera, cuya explotación era la principal actividad.

Desde principios de este siglo, el proceso de entrada de pobladores foráneos ha obedecido

varias causas e intereses, siendo el más común el de la explotación de las riquezas minerales de la Guayana. El descubrimiento de las grandes reservas de mineral de hierro fue el propulsor de los grandes cambios en la dinámica de ocupación de la cuenca baja del Caroní, al introducir nuevos requerimientos de personal, infraestructura y energía.

Con la fundación de las ciudades de Puerto Ordaz y Ciudad Piar y el subsecuente crecimiento del parque industrial de Ciudad Guayana y del desarrollo hidroeléctrico, terminó de consolidarse la tendencia hacia una rápida concentración de la población en la zona norte de la cuenca del Caroní.

Durante esa evolución, desde los años 50 hasta el presente, también en la alta cuenca surgieron y se consolidaron diversas comunidades, pero dedicadas principalmente a la explotación del oro y del diamante y, en menor proporción, al desarrollo de actividades agropecuarias y comerciales en la región. Entre ellas destacan, aparte de La Paragua (sede de las autoridades municipales), las comunidades de Periquera, El Caruto, El Casabe, Manarito, Salto Auraima, El Gusano, Parupa del Paragua, Karum y Mahigia.

En el rumbo hacia lo que hoy es la delimitación política del alto Caroní, y en particular el Alto Paragua, dos procesos dentro de las actividades económicas de la región fueron cruciales:

- * El constante y desordenado surgir de nuevos asentamientos producto del auge de la explotación minera.
- * La introducción de tecnologías que cambiaron los sistemas artesanales y rudimentarios de explotación por nuevos sistemas que, siendo más eficientes, tenían un impacto mayor sobre los cauces. Entre ellos, destaca el uso de monitores hidráulicos en aluviones y sobre el cauce de los ríos.

Siendo ya evidentes los cambios que dichos procesos causaron en las características naturales de los cauces, el Estado dio celeridad a la creación de figuras legales tendientes al ordenamiento, protección y manejo de las principales porciones de la cuenca del Caroní. La Zona Protectora Sur del Estado Bolívar y el Parque Nacional Canaima son ejemplos de estas iniciativas según las cuales existe el marco legal que regule, al menos formalmente, tanto el desarrollo de centros poblados como las actividades a las que ellos se dediquen.

V. IV. Climatología

V. IV. I. Precipitación

El área en estudio contempla dos regímenes pluviométricos bien definidos: uno, bimodal, correspondiente a la parte comprendida entre el nacimiento del río Paragua hasta el eje Ichum-Guaiguatá; y uno unimodal en la parte del área restante, hasta Karum.

En la primera, la precipitación máxima anual ocurre generalmente a principios de la época de invierno. Sin embargo, existen valores relativamente altos de lluvia en el mes de Noviembre, motivados posiblemente por la influencia de las masas de aire ecuatorial provenientes de las selvas Amazónicas, lo cual trae como consecuencia la temporada de lluvias en el sur del país. Los mínimos ocurren durante el período de posición baja del sol, entre los meses de febrero y marzo. En cuanto al valor medio anual está por los 3300 mm. La amplitud de los registros de lluvia anual entre las estaciones ubicadas en la zona abarca desde los 2900 hasta los 4000 mm.

La otra parte del área considerada, desde el eje Ichum-Guaiguatá hasta Karum, está definida por un comportamiento unimodal de precipitación, lo cual ocurre entre los meses de junio y julio, producto del ascenso al hemisferio norte de la convergencia intertropical (ITC), asociado al flujo de aire húmedo, caliente e inestable de la masa de aire ecuatorial continental.

V. IV. II. Otros parámetros climatológicos

La reciente instalación en la parte alta de la cuenca de dos estaciones climatológicas compactas electrónicas del tipo satelital, pertenecientes al Sistema Hidrológico Automático (Mahigia e Ichum), ha permitido refinar la visión general que desde el punto de vista climatológico se tenía de esta región, a pesar de sus cortos registros.

Por ejemplo, la temperatura media anual en Mahigia está por el orden de los 25,8 grados Celcius, mientras que en Ichum es de 26,1 grados. La humedad relativa media anual en Mahigia es de 81.7 % y en Ichum 70 %. La radiación media mensual en Mahigia es de 30.000 W/m² y en Ichum es de 40.000 W/m², acorde esto último con la insolación media mensual de 238 y 275 horas, respectivamente. Por otra parte, la presión atmosférica media anual en Mahigia es de 972.8 hPa, mientras que en Ichum, por estar a menor altitud, es de 974 hPa.

Si se toman en consideración las ubicaciones relativas de ambas estaciones, es lógico pensar que en la estación de Mahigia la precipitación y humedad relativa sean mayores que las de Ichum, así como su presión atmosférica menor, al estar la estación de Mahigia más al sur y a mayor altitud.

En el sector más al norte de la cuenca alta del Paragua está ubicado el campamento de Karum

administrado por el Departamento de Hidrometeorología. Se encuentra en un sitio de posible aprovechamiento hidroeléctrico, donde aparte de haberse realizado un monitoreo hidrológico por más de 15 años, se instaló en el año 1979 una estación climatológica que ha permitido la caracterización de las zonas adyacentes a la misma.

Bajo estas premisas, se ha determinado que la zona en cuestión posee una evaporación media mensual de 136 mm, una humedad relativa media anual de 83.4 %, una temperatura media anual de 25.4 grados Celcius, presión atmosférica media mensual de 974.7 hPa, radiación media mensual de 12.500 W/ m² y una insolación media mensual de 187 horas.

V. V. Geología y geomorfología

Las cuencas de los ríos Paragua y Caroní están situadas en la provincia fisiográfica del Escudo De Guayana, donde se distinguen cuatro provincias geológicas:

1. Provincia de Imataca: compuesta por rocas metasedimentarias y gneises graníticos complejamente plegados e intrusiones graníticas posteriores. Está limitada al Oeste por el río Caura; al Norte por el Orinoco, hasta el delta del mismo, al Este; y por las fallas de Guri y Santa Bárbara al Sur. La edad de la provincia está comprendida entre los 3500 y 3600 millones de años (MA), haciendo de sus rocas las más antiguas de Venezuela (Montgomery, 1977). Estas rocas fueron afectadas por procesos geológicos más recientes, resultando una variedad litológica que incluye distintos gneises, rocas graníticas, cuarcitas ferruginosas y granulitas metamorfizadas, entre otras.
2. Provincia de Pastora: se ubica al sur de la Provincia de Imataca, extendida como una faja en contacto con sus rocas y también con las de las provincias de Roraima y Cuchivero, en las cuencas bajas del Paragua y Caroní. Está compuesta por una secuencia de rocas volcánicas ácidas y básicas y rocas sedimentarias de bajo metamorfismo; las edades estimadas van desde los 2000 a los 2700 MA (González de Juana, 1980). Varios autores han definido distintas formaciones y grupos, intentando establecer la estratigrafía que mejor corresponda a este variado conjunto de rocas que incluye anfíbolitas, gneises, areniscas, esquistos, cuarcitas, granitos y muchos otros.
3. Provincia de Cuchivero: ubicada en las cuencas altas del Caroní y el Paragua. Comprende grandes extensiones de rocas plutónicas (granitos, dioritas, tonalitas), metavolcánicas (tobas y lavas con riolitas) y metasedimentarias. Se han definido varias estructuras geológicas para describir la presencia de rocas volcánicas ácidas (formación Caicara), rocas metamórficas máficas (metabasitas) y las intrusiones relativamente más recientes de la provincia.

4. Provincia de Roraima: se extiende en el Escudo de Guayana desde Surinam hasta el Estado Amazonas y, posiblemente, llega hasta la Sierra La Macarena en Colombia. Está conformada por estratos predominantemente horizontales de rocas sedimentarias y, en menor proporción, por rocas ígneas intrusivas. Es en la cuenca del alto Caroní donde tiene mejor continuidad, pues hacia la parte occidental de la cuenca alta del Paragua las secuencias estratigráficas comienzan a aparecer dispersas y aisladas sobre las rocas más antiguas de otras provincias geológicas del Escudo. En la región de Santa Elena de Uairén, donde se encuentra su mayor espesor, están presentes cuatro formaciones (Reid, 1974). En orden de mayor a menor profundidad, estas son: Uairén, compuesta por conglomerados y areniscas; Kukenán, de lutitas físciles; Uaimapué, de ftanitas, limolitas, arcosas y jaspes; y Matauí, de ortocuarcita. Las litologías sedimentarias corresponderían a ambientes propios de delta, depositados por antiguas corrientes de diversas direcciones. Las intrusiones ígneas, de edades entre unos 2090 y 1593 MA, se presentan en forma de sills y diques a diversos niveles y lacolitos de diabasa que afloran en grandes superficies.

La región del piedemonte guayanés corresponde a la Provincia de Imataca, sobre la que discurre el bajo Caroní. En esta zona los afloramientos de cuarcitas ferruginosas, siendo más resistentes a los agentes erosivos, conforman los relieves más elevados (Cerro Bolívar, fila de Necuima). Las rocas como los gneises graníticos, por ser más fácilmente erosionadas, forman lomas y superficies de aplanamiento más recientes. Se produce así un paisaje de penillanura con pequeñas altiplanicies de erosión de poca altura.

En el bajo Caroní, cerca de su confluencia con el Orinoco, se presentan llanuras aluviales con remanentes de rocas duras con granitos y cuarcitas ferruginosas; más cerca de la desembocadura aparecen algunas llanuras de inundación.

La confluencia de los ríos Paragua y Caroní se produce sobre la Provincia de Pastora. En esta zona el paisaje está conformado por lomas y colinas suavemente onduladas que alternan con extensas zonas planas, y son frecuentes las filas de rumbo con direcciones este-oeste y nordeste-sudoeste como las que se observan en la Provincia de Imataca. También pueden observarse algunas planicies de inundación, como las que ocurren en las desembocaduras de los ríos Aza y Chiguao.

Los cauces del Paragua y el Caroní alcanzan su máxima anchura sobre la Provincia de Pastora, en la cual han erosionado linealmente hasta la roca fresca. Esto ha llevado a que ocurra una erosión lateral y ha resultado en un patrón de drenaje con numerosas islas.

La región por la que corre el alto Paragua corresponde a la provincia geológica de Cuchivero,

de basamento ígneo-metamórfico. Este basamento se presenta como un material homogéneo que rodea al macizo estructural central (Provincia de Roraima) por su sector occidental, formando un paisaje uniforme de colinas y cerros separados entre sí por numerosos valles pequeños que conforman una red dendrítica de drenaje. Esta secuencia se extiende al Oeste del Paragua hasta las cabeceras del mismo, donde pueden observarse también sectores de areniscas y conglomerados de las Unidades Inferior y Media de la Provincia de Roraima, como en las nacientes de los ríos Paramichí y Aguapira y la cuenca del Okasiari.

Otros afloramientos del Grupo Roraima son los de la Unidad Media en la cuenca del río Ichum, compuesta por areniscas conglomeráticas de grano fino con fragmentos de rocas volcánicas, y los de la Unidad Inferior de las cabeceras del río Kurutú, compuesta por areniscas cuarzosas y conglomeráticas y conglomerados intraformacionales.

La Provincia de Cuchivero, con diversas tobas, brechas y lavas, se presenta ampliamente en la mayor parte de la cuenca alta del Paragua. Existen afloramientos de las rocas graníticas del Grupo Cuchivero, como en las cabeceras del Antabará y del Paure-Murán. Pueden encontrarse afloramientos del llamado Grupo Cuchivero Sin Diferenciar, compuesto por granitos y diversas dioritas, en los tributarios del Karum; y observarse el Granito de Santa Rosalía en los tributarios del Marik.

V. VI. Suelos

Los suelos de una región dada deben entenderse como producto de la interacción de diversos factores como la geología, la hidrología, el clima, la vegetación y el relieve, entre otros. En este sentido, toma validez el conocimiento de la litología asociada a la región en cuestión, pues de la degradación y alteración de las rocas expuestas y de los estratos superiores se origina la materia inorgánica que eventualmente está contenida en los suelos. La importancia de estos estudios, desde el punto de vista hidrológico, puede extrapolarse hacia los proyectos de determinación de acarreo de sedimentos, pues la naturaleza de los suelos es de cierta forma indicativa de la propensión y vulnerabilidad de los mismos a los procesos erosivos.

Otro factor resaltante en estas consideraciones es la cobertura vegetal sobre un suelo determinado, pues guarda una relación directa con la susceptibilidad de éste a la erosión. De manera recíproca, las características de los suelos impondrán las condiciones para la proliferación de las especies vegetales que en ellos se radican. Evaluando el caso de las cuencas del Paragua y del Caroní, debe hacerse notorio el hecho de que suelos poco profundos, como los que suelen hallarse en estas regiones, brindan poca oportunidad de recuperación a la capa vegetal que ha sufrido deforestación; la escasez de nutrientes aprovechables es agravante de esta situación.

En toda la cuenca del Caroní pueden encontrarse seis de los diez órdenes que establece la clasificación "Soil Taxonomy", del Departamento de Agricultura de los EE.UU. Usualmente son suelos muy superficiales (menos de 25 cm de profundidad) en las regiones de sabana, mientras que en las zonas boscosas son desde moderadamente profundos (entre 0,5 y 1 m) a profundos (más de 1 m).

En general son suelos ácidos, fuertemente lixiviados y muy pobres en micronutrientes y minerales primarios. Su composición mineralógica, dada la intensa alteración a que han sido sometidos, contiene principalmente materiales como el cuarzo, los sesquióxidos de hierro y aluminio, arcillas del tipo de la caolinita y otros compuestos como la gibsita.

De acuerdo a la litología de la que derivan, puede hacerse una diferenciación entre los tipos de suelos más extendidos entre los presentes en el Escudo de Guayana:

- * Suelos formados a partir de areniscas de la Provincia de Roraima: se ubican preferentemente sobre relieves de cuevas monoclinales, altiplanicies y al pie de los escarpes. Son poco profundos y de textura arenosa. Se consideran como Entisoles.

- * Suelos formados a partir de rocas ígneas de la Provincia de Roraima: se extienden desde la Sierra de Lema hasta Sta. Elena de Uairén y desde el río Caroní hasta la frontera venezolana en la zona en reclamación. Se derivan de las diabasas que se desarrollaron como intrusiones ígneas en las areniscas. Presentan un profundo manto de alteración con textura arcillosa y arcillosa-arenosa. Se consideran dentro del orden de los Oxisoles y Ultisoles, con vegetación predominante de sabana.

- * Suelos formados a partir de las rocas de la Provincia de Cuchivero: se ubican sobre una topografía ondulada (penillanura) de lomas, colinas, depósitos coluvio-aluviales y pequeños valles entre colinas. Presentan texturas arcillosas y un profundo perfil de meteorización. Están presentes hacia el Sur y sudeste de Santa Elena de Uairén y en el alto Paragua, en afloramientos de las rocas plutónicas y metavolcánicas de la mencionada provincia. Se consideran entre los Oxisoles y Ultisoles.

- * Suelos formados a partir de las rocas de Imataca y Pastora: se ubican en la penillanura de la cuenca baja del Caroní, donde la topografía es poco ondulada, con lomas y colinas de escasa altura. Abarcan la región entre la confluencia de los ríos Paragua y Caroní hasta la desembocadura de este último en el Orinoco. Se consideran predominantemente dentro de los Oxisoles, Ultisoles y Entisoles, con menor proporción de Alfisoles e Inceptisoles.

La distribución de los espesores de los suelos en la región del alto Paragua obedece, aproximadamente, al concepto teórico de que aquellos suelos de zonas boscosas son más profundos que los de zonas de arbustos, herbazales o sabanas. La inclusión en este informe de un aparte acerca de la distribución de la cobertura vegetal tiene la intención de permitir comparaciones de este tipo, aunque con criterios de evaluación preliminar.

Se presenta a continuación una descripción de la zona estudiada en función de la profundidad de los suelos (TECMIN):

- * Suelos muy superficiales (menos de 25 cm): pueden encontrarse suelos de este tipo en las regiones altas de la cuenca del río Ichum y al Oeste del río Kurutú, en el sector de Wanakoko.
- * Suelos superficiales (entre 25 y 50 cm): a esta descripción se acomodan los suelos de la zona de la cuenca media del río Karum y de su desembocadura hacia el Paragua; también una pequeña región en las cabeceras del Marik.
- * Suelos moderadamente profundos (entre 0,5 y 1,0 m): región al Sur del Paure-Murán.
- * Suelos profundos (más de 1,0 m): bajo vegetación boscosa, se extienden por gran parte de la cuenca alta del Paragua, incluyendo las cuencas altas de los ríos Antabará, Karum y Paure-Murán; también la extensa región entre estos dos últimos y las áreas de desembocadura del Marik y el Kurutú hacia el Paragua.

V. VII. Vegetación

En las cuencas de los ríos Paragua y Caroní existe gran variedad de especies vegetales, como consecuencia del número igualmente grande de ambientes físicos que presentan. Los grupos de vegetación se desarrollan en tres niveles de altitud principales, determinados por la topografía de las zonas de la baja cuenca (piso macrotérmico, 50 - 600 m.s.n.m.), la cuenca alta (piso mesotérmico, 800 - 1500 m.s.n.m.) y las cumbres de los tepuyes (piso submicrotérmico, 1800 - 2800 m.s.n.m.).

La vegetación en la zona del alto Paragua es predominantemente boscosa, con la ocurrencia de algunos sectores de arbustos, herbazales y sabanas; pueden encontrarse especies muy especializadas y hasta endémicas, localizadas en las cumbres y simas de los tepuyes. Los distintos bosques presentes son (Huber, 1986):

- * tropófilo macrotérmico (deciduo a semideciduo), en la porción septentrional de la cuenca;
- * ombrófilo macrotérmico (predominantemente siempreverde), en el centro;

- * ombrófilo submesotérmico montano bajo (siempreverde), en las bases de vertientes tepuyanas;
- * ombrófilo mesotérmico montano (siempreverde), en las vertientes tepuyanas altas;
- * ombrófilo submicrotérmico montano (siempreverde), en las cumbres de tepuyes;
- * bosques ribereños (siempreverdes) y
- * bosques ribereños de galería (semidecíduos hasta siempreverdes)

VI. METODOLOGÍA

Una vez delimitada el área de la cuenca en estudio, se ubicó en ella un grupo de estaciones del Sistema Hidrológico Automático (S.H.A.), cuyos registros se encuentran en la base de datos de EDELCA (BDHIDRO). Posteriormente se solicitó la impresión de los valores actualizados de precipitación y nivel (altura de mira) en las estaciones escogidas. Dada la reciente instalación de las mismas, se disponía de un corto período común de registros de nivel, limitado a los meses transcurridos del año 1998. La posterior discriminación de los registros a utilizar vendría dada por el análisis de los datos, previo a lo cual hubo de calcularse la serie de caudales para el período y elaborarse los hidrogramas correspondientes.

Asimismo, para la descripción climatológica, hubo de analizarse los registros de medias mensuales de evaporación, humedad relativa y temperatura.

A efectos de la evaluación de niveles y caudales, se consideraron cuatro tramos de la cuenca en estudio, delimitados por los puntos de los cauces donde se encuentran las estaciones hidrométricas del S.H.A.. Los mismos se definieron como:

- Tramo Mahigia – Ichum, comprendido en el propio río Paragua desde la estación de Mahigia hasta la estación de Ichum, situada aproximadamente aguas abajo de la confluencia del río Ichum con el Paragua.
- Tramo Ichum – Karum, también exclusivamente en el cauce del Paragua, comprendido entre las estaciones de Ichum y Karum, situada esta última aproximadamente aguas abajo en la confluencia del río Karum con el Paragua.
- Tramo Guaina – Karum, comprendido entre la estación Guaina, en el río Marik, y la estación de Karum.
- Tramo Guaiguatá – Karum, desde la estación de Guaiguatá en el río Karum hasta la estación de Karum, en el Paragua.

Las ubicaciones de las estaciones mencionadas son las que siguen:

Estación	Longitud Oeste	Latitud Norte	Cota (m.s.n.m.)
Mahigia	63°00'06"	04°26'36"	360
Ichum	63°21'54"	04°47'10"	350
Guaina	63°41'23"	05°03'42"	320
Guaiguatá	63°03'13"	05°03'08"	330
Karum	63°24'01"	05°19'10"	295

Para cada uno de estos tramos se definieron tres rangos de caudal, estableciéndose así tres condiciones diferenciadas: aguas bajas, aguas medias y aguas altas. Los límites que las separan son valores significativos de gastos, tomados en función tanto de la magnitud del dato como de la amplitud total de la variación de los caudales durante el período de registros.

A continuación se presenta una descripción de la metodología seguida para estimar y calcular los parámetros antes mencionados:

VI. I. Determinación de tiempos de viaje

VI. I. I. Consideraciones teóricas

La metodología que necesita aplicarse para la determinación de tiempos de viaje en una cuenca dada depende de las condiciones hidráulicas e hidrológicas intrínsecas del canal o curso de agua considerado.

Uno de los métodos más utilizados es el tránsito de crecientes, que permite conocer el tiempo y la magnitud de los caudales en un punto de un curso de agua con el uso de hidrogramas (conocidos o supuestos) de uno o más puntos aguas arriba. Cuando el caudal depende exclusivamente del tiempo, se habla de *tránsito de sistemas agregados* y cuando, adicionalmente, es función del espacio, se denomina *tránsito de sistemas distribuidos*. Este último caso es el que se refiere a flujos de agua en canales fluviales y a través de suelos, donde el caudal, la velocidad y la profundidad varían en el espacio.

Para obtener estimaciones de caudales y niveles, pueden aplicarse modelos comerciales de tránsito distribuido de crecientes tales como el HEC-2, HEC-6, y otros. Modelos de este tipo se basan en las ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y momentum de Saint - Venant para flujo unidimensional no permanente en canales abiertos. Dichas ecuaciones tienen como fundamento las siguientes suposiciones:

- * El flujo es unidimensional, lo que es decir que la profundidad y la velocidad varían sólo en la dirección del eje longitudinal del canal. Esto implica que en cualquier sección transversal a dicho eje la velocidad del agua es constante y que la superficie libre es horizontal.
- * El flujo varía gradualmente a lo largo del canal, de tal forma que la presión hidrostática prevalece y las aceleraciones verticales pueden despreciarse.
- * El eje longitudinal del canal es, aproximadamente, una línea recta.
- * La pendiente del fondo del canal es pequeña y el lecho es fijo. Esto es decir que los efectos de socavación y deposición de sedimentos son despreciables.
- * Los coeficientes de resistencia para flujo turbulento uniforme y permanente son aplicables de tal

forma que relaciones tales como la Ecuación de Manning pueden utilizarse para describir los efectos de resistencia.

- * El fluido es incompresible y de densidad constante a todo lo largo del flujo.
- * Las pérdidas por expansión y contracción del canal y los efectos del esfuerzo cortante por viento y por flujo lateral son despreciables.

Una vez aceptada o verificada la validez de todas esas suposiciones, se obtienen las siguientes expresiones, en su forma conservativa:

$$\text{CONTINUIDAD: } \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\text{MOMENTUM: } \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) \right] + g \cdot \left[\frac{\partial y}{\partial x} - (S_0 - S_f) \right]$$

ó en su expresión no conservativa:

$$-\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} + S_0 = S_f$$

En el caso particular del área de la cuenca alta del Paragua (hasta Karum), se observa que la red de drenaje es bastante densa y posee afluentes de gastos considerables, como el río Ichum, el Paure-Murán, etc. Esto introduce una gran cantidad de aportes laterales que no son despreciables.

Otra de las suposiciones teóricas con las que no cumple el cauce estudiado es la magnitud de la pendiente, pues el río en esta zona es aún joven y, por lo tanto, presenta numerosos desniveles. Pierde así toda validez la suposición de que la pendiente es muy suave.

A pesar de que el lecho es en su mayor parte rocoso, se producen en él importantes socavaciones y deposiciones de sedimentos. El cauce tiene, además, numerosas curvas a lo largo de los tramos evaluados, lo que acaba con la condición de que el eje longitudinal sea recto.

En vista de todas estas discordancias entre las condiciones teóricas para el uso de las ecuaciones y las características reales del río, no se consideró recomendable el uso de un modelo de tránsito distribuido.

Se decidió, entonces, efectuar un análisis de manera que la cuenca conforme un sistema cerrado (caja negra) y en el cual se conozcan y manejen solamente las entradas y las salidas. En esos términos, quedan definidas las entradas al sistema por el caudal en la estación aguas arriba, y las salidas como el caudal en la estación aguas abajo.

La determinación de los tiempos de viaje en cada tramo para aguas altas, medias y bajas, se realizó de dos maneras distintas. La primera implicó un análisis netamente gráfico, la segunda, un análisis gráfico - numérico (regresiones de ajuste). Ambas se describen a continuación:

VI. I. II. Análisis gráfico

Con base en los datos horarios de niveles de mira en las estaciones del S.H.A., se construyeron los hidrogramas de las crecientes que resultasen representativas de las condiciones de caudal encontradas a lo largo del período de mediciones. Para el cálculo de los caudales se utilizaron las ecuaciones de gastos deducidas por el Departamento de Hidrometeorología de EDELCA para la elaboración de tablas de nivel y caudal para los cauces de la cuenca en cada estación.

Fue de particular utilidad la superposición de los hidrogramas de todos los tramos, para períodos comunes, en una sola gráfica. En ella pudo estudiarse con mayor claridad la correspondencia de las crecientes y sus magnitudes relativas (ver anexos).

Tomando el inicio de cada creciente coincidente con el punto inicial de la rama ascendente de cada hidrograma de creciente, se definió el tiempo de viaje (de cada tramo) como aquel transcurrido entre el inicio de una creciente en la estación aguas arriba y el inicio de la subsecuente creciente en la estación aguas abajo.

Se evaluó según este criterio cada una de las crecientes escogidas, tomándose al menos una creciente para cada condición de caudal. En aquellos casos en que hubiera diferencia entre los tiempos de viaje de varias crecientes para un mismo tramo y mismas condiciones de caudal, se calculó un promedio aritmético de ellos, para establecer a este último como el tiempo de viaje para esas condiciones.

VI. I. III. Regresiones de ajuste

Con el programa Excel se construyó para cada creciente un gráfico que relacionara los caudales de las dos estaciones terminales del tramo en cuestión, utilizando el eje de las abcisas para los caudales de la estación aguas arriba y el eje de las ordenadas para la de aguas abajo.

A la curva resultante de la dispersión se buscó, con el mismo programa, una línea de tendencia descrita por una ecuación matemática definida como y (ordenadas) en función de x (abcisas). Se halló además el factor de correlación R^2 , indicativo de la validez de la curva de ajuste.

Se repitió el procedimiento con distintos desfases del caudal aguas abajo. Con esto se relacionó dicho caudal con el caudal aguas arriba ocurrido anteriormente un número de horas igual al desfase aplicado. Para definir el tiempo a desplazar los caudales, se seleccionaron valores cercanos a los tiempos de viaje determinados gráficamente (a partir de los hidrogramas). Se escogió como el tiempo de viaje definitivo aquel número de horas con el cual se obtuviese el mejor ajuste del índice R^2 , es decir, que su valor fuera lo más cercano a uno (1).

VI. II. Determinación de tiempos de concentración

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó la fórmula desarrollada por el *Bureau of Reclamation* de los EE.UU., que lo define (en minutos) como $t_c = 0,0195 \cdot (L^3/H)^{0,385}$, donde la longitud del cauce L y la diferencia de cotas H entre sus extremos están dadas en metros. Se escogió esta expresión dado que otras fórmulas requieren el uso de la pendiente media de los cauces. Teniéndose los valores de H para los mayores tributarios del alto Paragua, se calculó el tiempo de concentración de cada uno de ellos, además de hacerlo, obviamente, para el cauce principal.

VI. III. Estimación de aportes porcentuales

Dado que en cada uno de los tramos estudiados se tienen sólo los gastos en las estaciones terminales, se hace necesario determinar a partir de ellos el porcentaje del caudal total en el cauce principal que se debe a los aportes de los afluentes que pueda haber a lo largo del tramo. Con los caudales ocurridos durante las crecientes estudiadas hasta ahora, puede calcularse el volumen escurrido en cada una de ellas, en cada estación, y determinar por diferencia el volumen que corresponde a los aportes intermedios. Por último, se expresa este volumen como un porcentaje del total escurrido en el lapso de tiempo en el que se desarrolló la creciente.

Determinando así cuánto de lo que escurre por el cauce principal y se mide en la estación aguas abajo corresponde a cada fracción del tramo, se puede cuantificar la importancia de los aportes de las distintas zonas de la cuenca, y con ello estimar la magnitud de la creciente a esperar en base a lo ocurrido en los puntos en los que se tienen datos hidrométricos.

En la página siguiente se muestra, como ejemplo, la hoja de cálculo utilizada para calcular los aportes porcentuales para el tramo Guaina - Karum; los resultados de todos los tramos se resumen en el aparte correspondiente de "Resultados":

VI. IV. Evaluación de la precipitación

El almacenamiento (S) en un sistema hidrológico puede relacionarse con las tasas de flujo de entrada (I) y de salida (Q) por medio de la ecuación integral de continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad \textcircled{1}$$

Considerando que la cantidad de agua almacenada aumenta y disminuye en respuesta a las entradas y salidas y sus tasas de cambio con respecto al tiempo (dI/dt , dQ/dt , d^2I/dt^2 , ...), la cantidad de almacenamiento en cualquier instante puede expresarse como:

$$S = f \left(I, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \dots, Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots \right) \quad \textcircled{2}$$

La solución de las ecuaciones $\textcircled{1}$ y $\textcircled{2}$ para el caso de sistemas lineales en tiempo continuo generan la siguiente expresión:

$$S = a_1 Q + a_2 \frac{dQ}{dt} + a_3 \frac{d^2Q}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^{n-1}Q}{dt^{n-1}} + b_1 I + b_2 \frac{dI}{dt} + b_3 \frac{d^2I}{dt^2} + \dots + b_n \frac{d^{n-1}I}{dt^{n-1}}$$

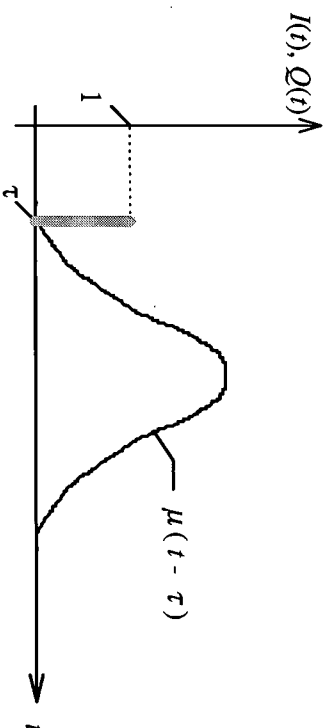
Esta expresión también puede escribirse como: $N(D)Q = M(D)I$ $\textcircled{3}$, donde M(D) y N(D) son los operadores diferenciales

$$\begin{cases} N(D) = a_n \frac{d^n}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d}{dt} + 1 \\ M(D) = -b_n \frac{d^n}{dt^n} - b_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} - \dots - b_1 \frac{d}{dt} + 1 \end{cases}$$

y $D = \frac{d}{dt}$. Al resolver la ecuación $\textcircled{3}$ para Q se llega a que $Q(t) = \frac{M(D)}{N(D)} I(t)$, donde el

término $M(D)/N(D)$ se denomina "Función de transferencia del sistema" y describe la respuesta de la salida a una secuencia de entrada.

El estímulo o *impulso* de entrada se asocia directamente con la precipitación ocurrida aguas arriba de la estación más alta del tramo considerado. En los sistemas hidrológicos, las funciones de transferencia siguen los principios básicos de Proporcionalidad y Superposición, acorde a los cuales puede considerarse la *Función Impulso Respuesta*. Es ésta quien caracteriza los sistemas lineales, que al recibir un estímulo de entrada de tipo instantáneo (impulso unitario) en un tiempo τ , originan una respuesta en un tiempo posterior t descrita por la función $\mu(t - \tau)$. Así, el término $(t - \tau)$ queda definido como el *Tiempo de retardo*. El siguiente diagrama ilustra lo explicado:



La respuesta para la función completa de entrada $I(t)$ se denomina la *Ecuación integral de convolución*, y es como sigue:

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau)\mu(t - \tau)d\tau$$

En el caso de pulsos discretos, como suelen considerarse los que ocurren en la naturaleza, la expresión toma la forma:

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m U_{n-m+1}$$

donde P_m es el pulso de lluvia en el intervalo, y U_m es el caudal resultante en el intervalo.

Los principios de Proporcionalidad y Superposición se traducen en que cada pulso de lluvia tendrá su respuesta individual, con lo que el hidrograma resultante es la composición de los hidrogramas individuales generados por cada pulso.

VI. V. Acarreo de sedimentos

VI. V. I. Consideraciones teóricas

El acarreo de sedimentos en suspensión en las redes de drenaje de las cuencas tiene dos fuentes principales:

- * los procesos naturales de meteorización y erosión de los lechos y otros terrenos drenados
- * la introducción extraordinaria de material sólido hacia los cauces, producto de la intervención humana dentro del área de drenaje.

Los sedimentos en esta parte de la cuenca obedecen en su gran mayoría al aporte *aluvional*, aquel proveniente del transporte en los mismos cauces que conforman la red de drenaje. El aporte *coluvional*, el cual proviene de la degradación de los suelos en las planicies de inundación y en otras zonas fuera de los cauces, es de menor magnitud que el primero. Esto se debe a que las áreas de vegetación arbustiva, de sabana, de bajo follaje o con grandes niveles de intervención, cuyos suelos

son mucho más susceptibles a la degradación, son comparativamente bastante menores que las áreas de vegetación densa (bosques, selva tropical), más protegidas de los agentes erosivos.

Sin embargo, esta tendencia general puede resultar afectada por el hecho de que en ciertos caños (pequeños afluentes) del Paragua y en las propias cabeceras del río (parte sur de la cuenca en estudio, aguas arriba de Mahigia), se han desarrollado numerosos enclaves de explotación minera (balsas), en su mayoría ilegales, que mediante el uso de monitores hidráulicos renuevan el lecho de los cauces, modificando y alterando sus condiciones fluviales e hidráulicas. A la remoción del material de los lechos se suma la degradación de las riberas que son deforestadas, aumentando notablemente el acarreo de sedimentos.

Tal efecto puede evidenciarse en la formación de playas o zonas de deposición de sedimento "grueso" (arenas y gravas) a lo largo del cauce y en la turbidez de las aguas en algunos sectores, producto del aumento en la concentración de material fino en suspensión (limo y arcilla).

Para efectuar un seguimiento a estos fenómenos, el Departamento de Hidrometeorología de EDELCA despliega un programa de monitoreo sedimentológico en las 95 estaciones hidrométricas que actualmente atiende. Esta actividad genera un volumen de información que hoy día llega a unos 3000 archivos o muestreos. Con ellos, se han elaborado las curvas de sedimentación anual por estación, donde a partir del caudal líquido escurrido se puede obtener el acarreo sólido medio en toneladas por día.

VI. V. II. Cálculo de cantidad de sedimentos y su concentración

La ecuación general del acarreo de sedimentos en función del caudal es de la forma $Q_s = a \cdot Q^b$, donde Q_s es lo que se llama el *caudal sólido* (peso de sedimentos arrastrados por unidad de tiempo), con unidades de toneladas/día; Q es el caudal medio del cauce en m^3/s ; a y b son constantes de regresión.

Conocido el caudal del cauce y habiéndose determinado su correspondiente caudal sólido, se puede calcular la concentración media de los sólidos suspendidos mediante la expresión $c = Q_s / (Q \cdot 0,0864)$ donde Q_s y Q se dan en toneladas/día y m^3/s , respectivamente; c es la concentración de sólidos suspendidos en el agua en mg/litro y 0,0864 es una constante de conversión de unidades.

VII. RESULTADOS

VII. I. Hidrogramas

Para la elaboración de los hidrogramas de crecientes, se utilizaron los caudales calculados a partir de los registros de niveles mediante la aplicación de las ecuaciones de gastos que se muestran en la Tabla N° 2 con sus correspondientes estaciones y rangos de validez.

La ecuación general de gastos en función de nivel es del tipo $Q = c \cdot (h+a)^b$, donde Q es el caudal en m^3/s , h es el nivel en metros y a , b , y c son constantes. Los hidrogramas fueron elaborados con el programa Excel en ambiente Windows, y se muestran en el Anexo 2.

TABLA 2

Ecuaciones de gastos en función de nivel

estación	caudal (m^3/s)	nivel (m)
Mahigia	$Q = 28,277 \cdot (h - 1,1560)^{1,9260}$	$1,20 < h > 10,00$
Ichum	$Q = 70,0861 \cdot (h - 1,4349)^{1,7533}$ $Q = 131,2973 \cdot (h - 1,8229)^{1,4083}$	$1,43 < h > 2,59$ $2,59 < h > 12,00$
Guaiguatá	$Q = 38,1037 \cdot (h - 1,6139)^{1,7454}$ $Q = 106,7880 \cdot (h - 2,7179)^{1,3126}$	$1,61 < h > 5,34$ $5,34 < h > 7,00$
Guaina	$Q = 3,1000 \cdot (h - 1,0049)^{2,8262}$ $Q = 1,4383 \cdot (h + 0,5814)^{2,4347}$	$1,00 < h > 3,64$ $3,64 < h > 8,00$
Karum	$Q = 62,5580 \cdot (h - 1,1260)^{1,7890}$ $Q = 82,1920 \cdot (h - 1,2750)^{1,6510}$ $Q = 482,5100 \cdot (h - 5,1600)^{1,1450}$	$1,20 < h > 6,18$ $6,18 < h > 10,00$ $10,00 < h > 13,30$

VII. II. Tiempos de viaje

Los resultados del análisis por regresiones de ajuste se resumen en las Tablas 3 a la 5 en las páginas que siguen, donde se presentan los rangos de nivel y caudal, los tiempos de viaje y las ecuaciones de las curvas de ajuste. En estas últimas, x representa el caudal aguas arriba; y representa el caudal aguas abajo. Véase también los gráficos del Anexo 3, donde se presentan las curvas definitivas.

VII. III. Tiempos de concentración

En la Tabla 6 se presentan los tiempos de concentración del río Paragua (hasta la estación Karum) y de sus principales tributarios.

VII. IV. Precipitación

Bajo el esquema planteado en la metodología, se procedió a relacionar la escorrenría registrada por tramos específicos (crecientes) con las precipitaciones ocurridas, de tal forma de identificar el número de pulsos que originaran cada creciente y los tiempos de respuesta de la cuenca. Para realizar tal evaluación en la parte más alta de la cuenca se utilizaron los registros de dos estaciones adicionales, Ichum Alto y Paragua Alto, cuyas lluvias pueden relacionarse con la escorrenría aguas abajo en las estaciones de Ichum y Mahigia, respectivamente. A continuación se presentan los resultados:

Estaciones extremas del tramo	Fecha de creciente	Lluvias (mm) asociadas Aguas arriba /Aguas abajo	N° de pulsos (de una hora)*	Tiempo de res-puesta (h)**
Paragua Alto - Mahigia	18-23/05/98	27,5	12 / 18	6
Paragua Alto - Mahigia	09-14/05/98	32,5	12 / 10	5
Ichum Alto - Ichum	14-16/05/98	21,5	5 / 12	6

* Aguas arriba / Aguas abajo

** Según precipitación más significativa

VII. V. Aportes porcentuales

Como se explicó en la Metodología, se hizo una evaluación de las crecientes representativas dentro del período de registros disponibles. A partir de los caudales obtenidos en la construcción de los hidrogramas se calcularon los volúmenes escurridos durante las crecientes, para luego expresarlos de forma porcentual. Los porcentajes de aportes calculados para cada tramo, en condiciones de aguas bajas, medias y altas, se pueden ver en las Tablas 7 a la 10.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE VIAJE

TABLA 3 AGUAS BAJAS

Tramo / Estación	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)	Tiempos de viaje (h)*	Ecuación de tendencia de caudales, [factor de correlación R ²]
Mahigia - Ichum	Mahigia	menos de 200	Asc: 12 (14)	$y = 0,001x^3 - 0,1198x^2 + 5,2327x - 19,888$ [0,922]
	Ichum	menos de 500	Desc: 25	$y = 0,1582x^3 - 29,808x^2 + 1874,2x - 39192$ [0,9323]
Ichum - Karum	Ichum	menos de 500	Asc: 13 (14)	$y = -6 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,0005x^3 - 0,1356x^2 + 14,658x - 357,83$ [0,9961]
	Karum	menos de 750	Desc: --	Recesión muy irregular
Guaina - Karum	Guaina	menos de 100	Asc: 13	$y = 7 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,0005x^3 + 0,1432x^2 - 16,11x + 1583,1$ [0,9934]
	Karum	750 - 2200	Desc: 10	$y = 0,0001x^3 - 0,057x^2 + 9,3895x + 373,4$ [0,9997]
Guaiguatá - Karum	Guaiguatá	menos de 300	Asc: 10 (13)	$y = -2 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0171x^2 - 1,9368x + 212,58$ [0,9899]
	Karum	menos de 750	Desc: 27	$y = 6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0655x^2 + 24,525x - 2081,2$ [0,9972]

* Tiempos obtenidos de la mejor correlación; si los estimados a partir de los hidrogramas son diferentes, se muestran entre paréntesis.

Los tiempos para los descensos se obtuvieron únicamente de las correlaciones.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE VIAJE

TABLA 4 **AGUAS MEDIAS**

Tramo/ Estación	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)	Tiempos de viaje (h)*	Ecuación de tendencia de caudales, [factor de correlación R ²]
Mahigia - Ichum			Asc: 12 (14)	$y = 5 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,0001x^3 + 0,0932x^2 - 30,888x + 4283,2$ [0,9967]
	Mahigia	3,92 - 5,11	200 - 400	
	Ichum	4,41 - 5,10	500 - 700	Desc: 13
Ichum - Karum			As: 12 (14,5)	$y = 1 \cdot 10^{-8}x^4 - 3 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0237x^2 - 8,5622x + 3223,1$ [0,9971]
	Ichum	menos de 4,41	menos de 500	
	Karum	5,14 - 9,22	750 - 2200	Desc: 32
Guaina - Karum			Asc: 11 (13)	$y = 0,0002x^3 - 0,1122x^2 + 20,303x + 855,95$ [0,9959]
	Guaina	menos de 5,13	menos de 100	
	Karum	5,14 - 9,22	750 - 2200	Desc: 20
Guaiguatá - Karum			Asc: (10)	
	Guaiguatá	4,88 - 6,44	300 - 600	
	Karum	5,14 - 9,22	750 - 2200	Desc: --

* Tiempos obtenidos de la mejor correlación; si los estimados a partir de los hidrogramas son diferentes, se muestran entre paréntesis.

Los tiempos para los descensos se obtuvieron únicamente de las correlaciones.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE VIAJE

TABLA 5

AGUAS ALTAS

Tramo/ Estación	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)	Tiempos de viaje (h)*	Ecuación de tendencia de caudales, [factor de correlación R ²]	
Mahigia - Ichum			Asc: 16 (15)	$y = 3 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,0001x^3 + 0,1293x^2 - 63,127x + 11684$ [0,9965]	
	Mahigia	más de 5,11	más de 400		
	Ichum	más de 5,10	más de 700	Desc: 16	$y = -7 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,016x^2 - 10,816x + 3726,3$ [0,9969]
Ichum - Karum			Asc: 9 (10)	$y = -7 \cdot 10^{-11}x^4 + 9 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0035x^2 + 6,5959x - 2491,2$ [0,9996]	
	Ichum	más de 5,10	más de 700		
	Karum	más de 9,22	más de 2200	Desc: --	Recesión muy irregular
Guaina - Karum			Asc: 9 (10)	$y = -7 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,001x^3 - 0,4786x^2 + 105,64x - 4824,9$ [0,9955]	
	Guaina	más de 7,74	más de 250		
	Karum	más de 9,22	más de 2200	Desc: --	Recesión muy irregular
Guaiguatá - Karum			Asc: 8 (7)	$y = 5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0738x^2 + 33,532x - 3000,1$ [0,9931]	
	Guaiguatá	4,88 - 6,44	300 - 600		
	Karum	más de 9,22	más de 2200	Desc: 29	$y = 3 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0442x^2 + 25,848x - 2665,2$ [0,999]

* Tiempos obtenidos de la mejor correlación; si los estimados a partir de los hidrogramas son diferentes, se muestran entre paréntesis.

Los tiempos para los descensos se obtuvieron únicamente de las correlaciones.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN POR TRAMOS

TABLA 6

Cauce	Longitud (m)	Límites del tramo		Tiempos de concentración (h)
		Desde / Hasta	Cotas (msnm)	
Paragua	284.000	cabeceras	750	61,25
		Est. Karum	295	
Ichum	125.000	cabeceras	1.280	17,76
		confluencia*	313	
Karum	202.000	cabeceras	720	42,58
		confluencia*	299	
Marik	89.000	cabeceras	700	16,97
		confluencia*	307	

Según fórmula del *Bureau of Reclamation* de los EE.UU.

$$t_c = 0,0195 \cdot (L^3 / H)^{0,385}$$

t_c está dado en minutos

L es la longitud del cauce en metros

H es la diferencia de cotas entre los extremos del cauce

* Con el río Paragua.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

APORTES PORCENTUALES

TABLA 7 Tramo Mahigia-Ichum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m ³)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	08 - 14 / 04 / 1998	Ichum	148.974.299	100,00	"Otros aportes" se refiere al gasto que llega del alto Ichum al Paragua, pues en este último no hay más aportes de importante consideración entre las dos estaciones.
		Mahigia	82.542.712	55,41	
		Otros aportes	66.431.587	44,59	
AGUAS MEDIAS	26 - 29 / 04 / 1998	Ichum	159.041.230	100,00	
		Mahigia	82.549.405	51,90	
		Otros aportes	76.491.825	48,10	
AGUAS ALTAS	19 - 22 / 05 / 1998	Ichum	452.618.822	100,00	
		Mahigia	248.686.303	54,94	
		Otros aportes	203.932.518	45,06	

TABLA 8 Tramo Ichum-Karum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m3)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	11 - 17 / 02 / 1998	Karum	377.852.345	100,00	En "Otros aportes" están incluidos los gastos de los ríos Marik y Karum, para los que hay datos de las estaciones de Guaina y Guaguatá, respectivamente. También se incluyen gastos no medidos, de los cuales son importantes los del río Kurutú.
		Ichum	131.497.508	34,80	
		Otros aportes	246.354.837	65,20	
AGUAS MEDIAS	14 - 16 / 05 / 1998	Karum	471.087.003	100,00	
		Ichum	146.683.004	31,14	
		Otros aportes	324.403.999	68,86	
AGUAS ALTAS	30 / 04 / 1998	Karum	2.392.125.000	100,00	
	-	Ichum	1.192.158.506	49,84	
	09 / 05 / 1998	Otros aportes	1.199.966.494	50,16	

TABLA 9 Tramo Guaina-Karum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m ³)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	11 - 17 / 02 / 1998	Karum	377.852.345	100,00	Aguas abajo de la estación de Guaina, y antes de que el Marik desemboque al Paragua, se reciben aportes de tres cauces menores. Ya en el Paragua, se reciben también varios aportes de ríos pequeños antes de recibir el caudal del Karum. En definitiva, sólo son de importancia los caudales que vienen del Paragua y del Karum.
		Guaina	52.480.083	13,89	
		Otros aportes	325.372.262	86,11	
AGUAS MEDIAS	14 - 16 / 05 / 1998	Karum	471.087.003	100,00	
		Guaina	42.914.051	9,11	
		Otros aportes	428.172.952	90,89	
AGUAS ALTAS	30 / 04 / 1998	Karum	2.392.125.000	100,00	
	-	Guaina	181.248.564	7,58	
	09 / 05 / 1998	Otros aportes	2.210.876.436	92,42	

TABLA 10 Tramo Guaiguatá-Karum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m ³)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	11 - 17 / 02 / 1998	Karum	377.852.345	100,00	En "Otros aportes" se incluyen los gastos del Antabarí y otros ríos que desembocan en el Karum entre la estación Guaiguatá y la confluencia con el Paragua. Justo aguas debajo de la confluencia está la estación Karum.
		Guaiguatá	101.573.176	26,88	
		Otros aportes	276.279.169	73,12	
AGUAS MEDIAS	14 - 16 / 05 / 1998	Karum	471.087.003	100,00	
		Guaiguatá	95.188.071	20,21	
		Otros aportes	375.898.931	79,79	
AGUAS ALTAS	30 / 04 / 1998	Karum	2.392.125.000	100,00	
	-	Guaiguatá	656.922.903	27,46	
	09 / 05 / 1998	Otros aportes	1.735.202.097	72,54	

VII. VI. Acarreo de sedimentos

En base a los registros de caudales medios mensuales entre los años 1987 y 1997, y mediante la curva de sedimentación de la estación Karum, se pudo estimar un acarreo sólido suspendido medio anual de 2.660 ton/día (para un caudal medio anual de 1.612 m³/s). Esta cifra representa una concentración media de 19,10 mg/l y una producción anual de sedimentos unas 970.900 toneladas. La ecuación de la curva utilizada es $Q_s=0,18 \cdot Q^{1,3}$, la cual tiene un índice de correlación $R^2=0,91$.

Por otro lado, en las estaciones utilizadas del S.H.A. se tienen muy pocos muestreos, por lo reciente de su instalación. Para el momento de la realización de este estudio no se tenían las respectivas curvas de sedimentación. En consecuencia, los valores puntuales que se muestran a continuación, correspondientes a una creciente en condiciones de aguas bajas, tienen la intención sólo de ser ilustrativos de la magnitud de los transportes de sedimentos medidos:

Tabla 11

Estación	Fecha	Altura de mira (m)	Caudal* (m ³ /s)	Concentración (mg/l)
Karum	15/02/98	2,62	128,3	24,2
Guaina	11/02/98	3,64	47,9	15,0
Guaguatá	13/02/98	5,34	378,5	52,3
Ichum	14/02/98	3,70	318,7	19,1

* Caudal según curva de gastos

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

VIII. I. Tiempos de viaje y de concentración

Como se puede ver en las Tablas 2, 3 y 4 (en "Resultados"), los tiempos de viaje fueron discriminados por tramos y según las condiciones de caudal durante la ocurrencia de las crecientes: aguas altas, medias o bajas. Todos ellos son de 10 horas o más, hasta un máximo observado de 16 horas, con la única excepción del tramo Guaiguatá - Karum durante aguas bajas (de 7 a 8 horas).

Se puede notar que, en general, los tiempos de viaje se hacen más cortos en la medida en que las crecientes se desarrollan en condiciones de mayor caudal. Esto es decir que en un tramo dado una creciente que se da con bajos caudales tardará más en reflejarse aguas abajo que una que se dé con caudales altos en el mismo tramo. La única excepción la constituye el tramo Mahigia - Ichum, donde el tiempo de viaje observado en aguas bajas es de 12 horas, aumentando hasta ser de 16 horas en aguas altas.

En cuanto a los tiempos de concentración, los mismos oscilan entre unas 17 horas para los cauces más cortos y 61 horas para el Paragua hasta Karum (ver Tabla 6 en "Resultados").

VIII. II. Precipitación

Según lo observado en las precipitaciones evaluadas en la alta cuenca, el tiempo promedio de respuesta de la misma es de unas seis horas, para precipitaciones de una duración de 12 a 18 horas. Cabe señalar que en algunos casos la respuestas obtenidas en forma de escorrentía no presentaban correspondencia evidente con la magnitud de la lluvia registrada. Esto induce a pensar que las crecientes fueron generadas por precipitaciones ocurridas en partes más altas la cuenca que no necesariamente debieron reflejarse en los registros pluviométricos de las estaciones involucradas.

VIII. III. Aportes porcentuales

VIII. III. I. Tramo Mahigia - Ichum

* Se observa que el caudal medido en la estación de Mahigia representa alrededor de un 54 % (valor medio) del caudal que se mide aguas abajo en la estación de Ichum.

* Los aportes adicionales corresponden a todo el caudal que el río Ichum descarga al Paragua, más los aportes de los afluentes menores del Paragua. En este tramo, el número de estos últimos es bastante reducido. Según esto, puede decirse que el caudal del Ichum representa en promedio cerca del 46 % del caudal del Paragua determinado en la estación Ichum.

VIII. III. II. Tramo Ichum - Karum

- * El caudal de la estación Ichum constituye un porcentaje variable del caudal de la estación Karum.
- * Durante el período evaluado, la menor porción que alcanza a representar es de un 31 % , valor alrededor del cual hay poca fluctuación durante condiciones de aguas bajas y medias.
- * El valor máximo que alcanzó fue del 50 %, aproximadamente, el cual ocurrió en condiciones de aguas altas.
- * Los aportes laterales corresponden a todo lo descargado por los ríos Kurutú, Marik y Karum y otros de menor importancia. Considerando que los aportes de los ríos Marik y Karum están dados por los caudales en Guaina y Guaiguatá, respectivamente, puede estimarse el porcentaje que corresponde al río Kurutú más los afluentes menores:

— Aguas bajas: Guaina en 14 % ; Guaiguatá en 27 % ; Ichum en 35 %. Se deduce que al Kurutú (más los aportes menores de todos los tramos) corresponde un 24 % del caudal del Paragua en Karum.

— Aguas medias: Guaina en 10 % ; Guaiguatá en 20 % ; Ichum en 31 %. Se deduce que al Kurutú (más aportes menores) corresponde alrededor de un 39 % del caudal en Karum.

— Aguas altas: Guaina en 8 % ; Guaiguatá en 27 % ; Ichum en 50 %. Se deduce que al Kurutú (más aportes menores) corresponde un 15 %.

VIII. III. III. Tramo Guaina - Karum

- * Los aportes del río Marik, en general, representan una fracción pequeña del caudal medido en Karum.
- * El máximo valor porcentual alcanzado (en el período evaluado) fue de un 14 % , en condiciones de aguas bajas.
- * El mínimo ocurrió en condiciones de aguas altas, siendo un poco menor del 8 %.
- * Los aportes adicionales corresponden a los caudales del Karum y el Paragua (antes de recibir al Marik), más el caudal los afluentes menores de ambos ríos y del Kurutú.

VIII. III. IV. Tramo Guaiguatá - Karum

- * El caudal de Guaiguatá constituye, en promedio (para el período evaluado), un 25 % del caudal que se mide en Karum.
- * El valor máximo, cerca del 27,5 % , ocurrió en condiciones de aguas altas.
- * El mínimo ocurrió en condiciones de aguas bajas, siendo de un 20 %.

En el Anexo I se presenta un mapa con los porcentajes de aportes de cada área drenada. Es importante observar que los aportes porcentuales establecidos aquí para el río Kurutú son sólo tentativos, pues no se tiene instrumentos para discriminar cuánto de ellos le corresponden realmente.

VIII. IV. Acarreo de sedimentos

En el grupo de muestreos evaluados se hace notorio el hecho de que la concentración hallada en Karum el día 15/02/98 no llega a ser la mitad del valor hallado aguas arriba, en Guaiguatá, el día 13 del mismo mes. Al mismo tiempo, las concentraciones halladas en esos días para los otros ríos evaluados se encontraban ligeramente por debajo del valor de Karum.

Basada en los valores de concentración presentados en la Tabla 11, la siguiente es una distribución porcentual tentativa de los aportes de sedimentos en suspensión, expresados como *aportes sólidos*:

Tabla 12

Estación	Fecha	Concentración (mg/l)	Caudal* (m ³ /s)	Caudal sólido (ton/día)	Porcentaje de aporte sólido
Karum	15/02/98	24,2	128,3	268,26	10,45
Guaína	11/02/98	15,0	47,9	62,08	2,42
Guaiguatá	13/02/98	52,3	378,5	1710,34	66,64
Ichum	14/02/98	19,1	318,7	525,93	20,49

* Caudal según curva de gastos

Para una visualización de estos porcentajes en función del área drenada, véase el mapa en el Anexo I.

CONCLUSIONES

Como primer paso del proceso de caracterización, la elaboración de los hidrogramas de crecientes fue de gran utilidad en la determinación de los tiempos de viaje y, en general, como instrumento de visualización del comportamiento de los caudales en el período estudiado. La confrontación de los hidrogramas de varios cauces en un mismo gráfico para un período común permitió determinar en varias ocasiones la correspondencia entre las crecientes observadas aguas arriba y aguas abajo en un tramo dado (ver Anexo 2).

Posteriormente se hallaron resultados de relevante aplicación, también a partir de los hidrogramas, con las regresiones de ajuste. Se determinaron ecuaciones que permiten estimar el caudal en una estación hidrométrica dada en función de los datos de caudal en una estación aguas arriba. El trabajo fue realizado discriminando distintos rangos de caudales y, además, considerando las condiciones de ascendencia o de recesión en las crecientes.

Cabe recordar que los caudales utilizados para la construcción de los hidrogramas no fueron resultado de aforos, sino calculados a partir de las curvas de gastos (en función de alturas) deducidas en trabajos anteriores del Departamento. Esto resalta la importancia de la actualización periódica de dichas curvas, dado el amplio uso que se les da en múltiples estudios hidrológicos.

Para relacionar los tiempos de viaje y de concentración con las características fisiográficas de los cauces habría sido muy ilustrativo contar con las pendientes medias de los mismos, las cuales no pudieron determinarse por las razones ya expuestas en "Alcance y limitaciones". Sin embargo, a partir de los desniveles mencionados en "Hidrografía", y de la descripción geomorfológica de la cuenca, puede decirse que los cauces presentes en la misma son de pendiente moderada. Esto explicaría, en parte, lo prolongado de los tiempos de viaje para estos tramos que no llegan a sobrepasar los 100 km de longitud.

El tramo Mahigia - Ichum, el más alto de los que se estudiaron del río Paragua, presenta una oposición completa a lo que es la tendencia de variación de los tiempos de viaje en los demás tramos; los suyos aumentan con el caudal. Presumiblemente, ello puede deberse al efecto de remanso que el encuentro de los caudales de los ríos Ichum y Paragua pueda originar hacia aguas arriba. En favor de esta teoría se tiene el hecho de que el caudal que aporta el Ichum en el pico de una creciente (hasta más de 1000 m³/s) puede llegar a ser triplicado por el caudal resultante en el Paragua después de la confluencia, en la estación Ichum.

Los tiempos de concentración calculados aparentan ser relativamente largos, considerando las longitudes de los cauces a los que corresponden. Aún cuando la vegetación de toda la zona es lo

bastante densa como para producir un gran retardo en la escorrenría, la densidad de las redes de drenaje podría compensar ese efecto en cierta medida, de existir la cantidad suficiente de cauces intermitentes que se activen en función del aumento de la precipitación.

El estudio sobre la lluvia en este trabajo fue somero, dadas las limitaciones ya planteadas. Por ello, llegar a conclusiones a partir de los resultados sería más bien entrar en especulaciones.

De los datos disponibles de los muestreos de sedimentación se puede deducir que en alguna etapa del tramo Guaiguatá - Karum el sistema de drenaje del río Paragua tiene una gran capacidad de dilución. Recordando la distribución de concentraciones de sólidos en suspensión entre los distintos ríos, las cantidades menores de sedimentos que trajeran el Marik, el Paragua y el Ichum deben haber ayudado al descenso en la concentración final con respecto a la que se encontró en Guaiguatá. A esto debe haber contribuido la desigualdad de volúmenes aportados, ya que entre el río Karum y el resto de la red de drenaje, esta última contribuye con un caudal mayor.

Para el periodo estudiado, los aportes más importantes que recibe el Paragua en la alta cuenca son los del río Ichum, que en la confluencia representan prácticamente la mitad del caudal total. Les sigue en importancia el caudal aportado por el río Karum, que según lo visto en este estudio puede alcanzar, en condiciones de aguas altas, valores cercanos al treinta por ciento del escurrimiento del Paragua en Karum. En el trayecto entre esas dos confluencias, los aportes más importantes corresponden a los ríos Kurutú y Marik. Los de este último son variables, por debajo del quince por ciento de lo estimado en Karum, mientras que el primero debe ser más estudiado a fin de determinar la magnitud de su contribución.

RECOMENDACIONES

Del trabajo realizado en la empresa, y en función de los resultados obtenidos en esta aproximación a la caracterización de la cuenca del alto Paragua, se hacen las siguientes recomendaciones, a fin de contribuir con los sucesivos estudios del proyecto:

El Departamento de Hidrometeorología debe hacer esfuerzos por contar con una suficiente cantidad de material cartográfico, pues la información topográfica e hidrográfica es indispensable en numerosas etapas de los estudios hidrológicos que restan por efectuarse.

Deben seguirse realizando, como se ha hecho hasta ahora, los trabajos de aforos y refinamiento de los modelos (ecuaciones) de gastos, de modo de obtener cada vez cifras más aproximadas a los caudales reales. Esta recomendación surge del hecho de haberse observado en los registros algunos casos en los que los niveles de mira no entraban en los rangos de validez de las curvas de gastos. Además de esto, se hallaron algunas diferencias entre los caudales calculados con las curvas y los aforados hasta del veinte por ciento, incluso algo mayores.

Es conveniente realizar un estudio pluviométrico en el que se utilice el mayor número de estaciones de la red, sean éstas convencionales o automáticas, dentro del mayor período común que pueda darse. Dicho trabajo debe complementarse con los existentes registros hidrométricos, pues la estimación más o menos aproximada de la lluvia efectiva en la zona, en distintos períodos del régimen pluviométrico, sería de gran valor.

Se recomienda mantener la continuidad de los registros hidrométricos en las estaciones de la alta cuenca del Paragua, pues el corto período de mediciones fue una importante limitación a las intenciones de determinar valores más confiables y significativos de parámetros como los tiempos de viaje.

Aunque el ideal actual de una red de estaciones hidroclimatológicas es el conseguir la automatización en toda su extensión, es un hecho real que las limitaciones económicas y operativas son preponderantes. Por ello, se recomienda la no desincorporación de los equipos convencionales, siempre que su mantenimiento sea posible, pues los mismos conforman una estructura de recopilación de información probada ya por muchos años, y contribuyen a la continuidad y control de los registros de las estaciones automáticas de reciente implementación.

En el caso de haber planes para la instalación de nuevas estaciones hidrométricas, se recomienda considerar sitios tales como Ichum Alto, Paragua Alto o Karum Alto, donde se tiene una cantidad de registros pluviométricos. De ser complementados de esta manera serían de gran utilidad en el proyecto de caracterización. Otros lugares aconsejables serían aquellos en los que hay "lagunas" de

información, como en los cauces del Kurutú o el Antabari, por ejemplo, por ser tributarios que acarrean el drenaje de extensiones considerables.

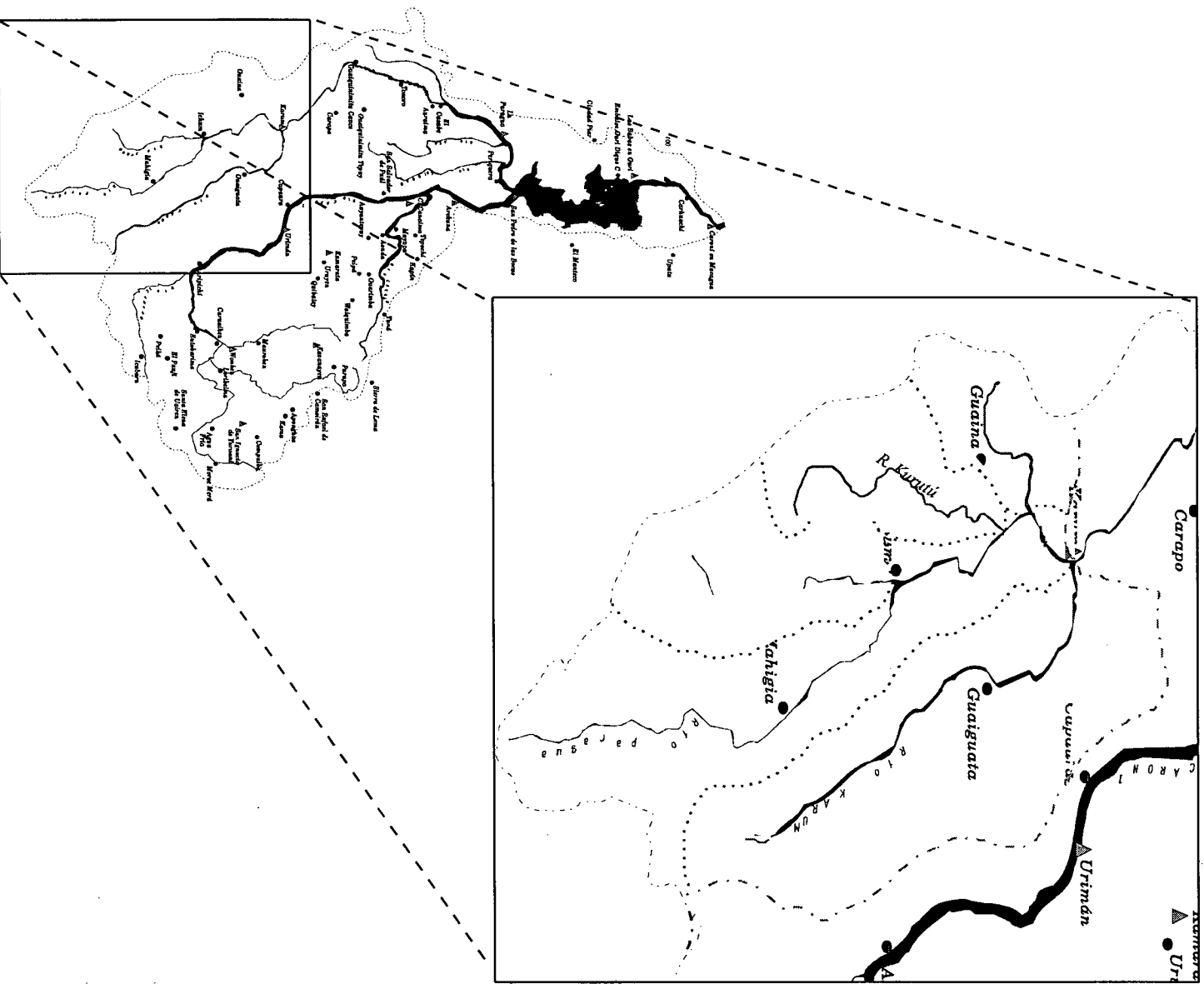
BIBLIOGRAFÍA

- CHOW, MAYS Y MAIDMENT (1994). Hidrología Aplicada. Editorial McGraw-Hill, Bogotá.
- FLORES, Ana Liz (1997). Erodabilidad de la cuenca del río Caroní. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- C.V.G. EDELCA (1994). Caracterización climática de las cuencas de los ríos Caroní y Caura. Departamento de Hidrometeorología, Puerto Ordaz.
- C.V.G. TECMIN (1996). Proyecto inventario de los recursos naturales de Guayana. Ciudad Bolívar.
- C.V.G. EDELCA (1987). Caracterización de la cuenca Caroní - Paragua. División de cuencas e hidrología, Caracas.
- C.V.G. EDELCA (1991). Estudio preliminar del transporte de sedimentos en los ríos Caroní, Paragua y Caura. Departamento de Hidrometeorología, Puerto Ordaz.
- C.V.G. EDELCA (1997). Reporte de muestras de sedimentos a partir de 1994. Departamento de Hidrometeorología (informe interno), Puerto Ordaz.
- C.V.G. EDELCA (1998). Tablas y curvas de gastos. Departamento de Hidrometeorología (informe interno), Puerto Ordaz.

ANEXOS

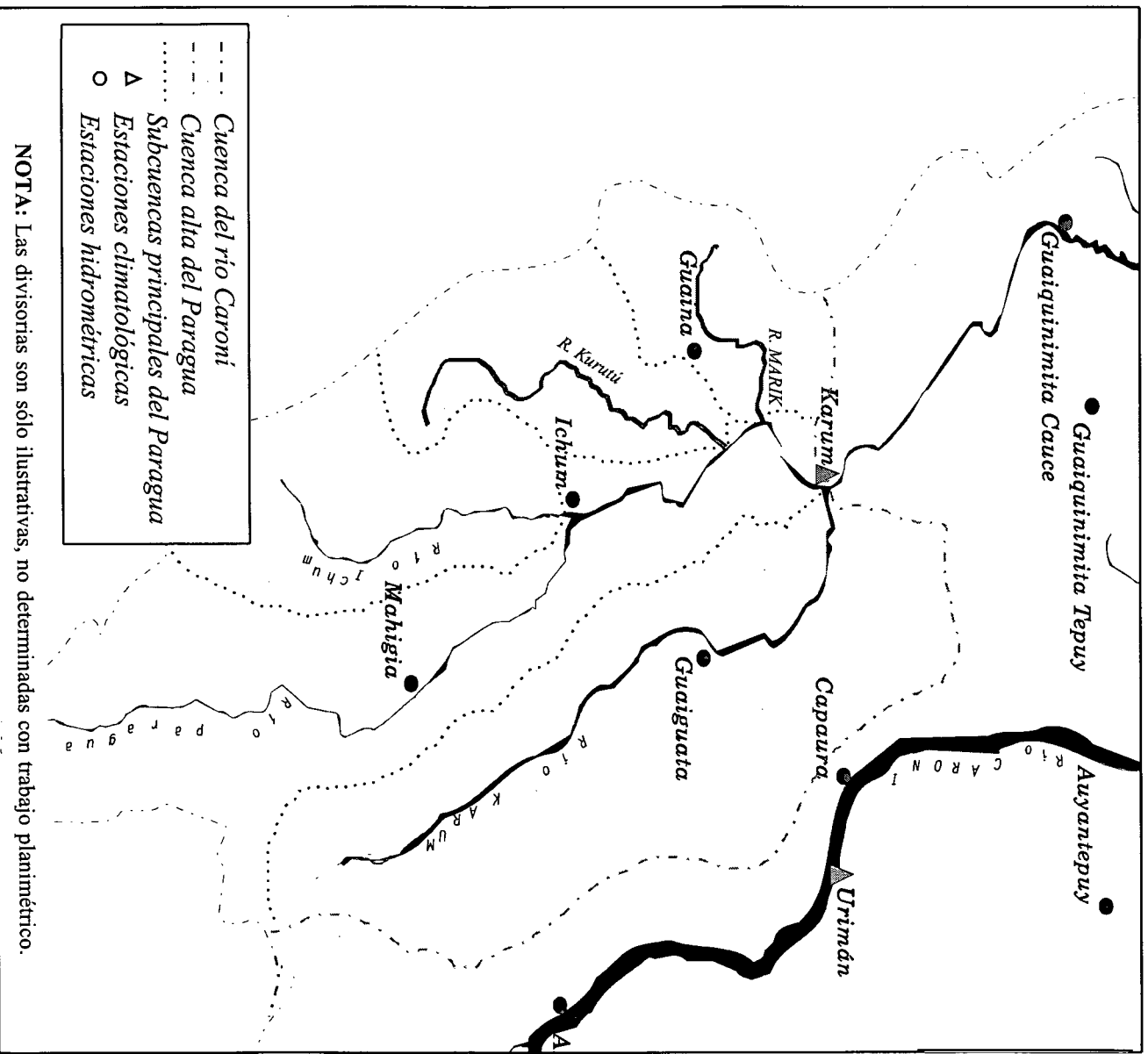
ANEXO I: Mapas de la cuenca estudiada

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUAY UBICACIÓN RELATIVA

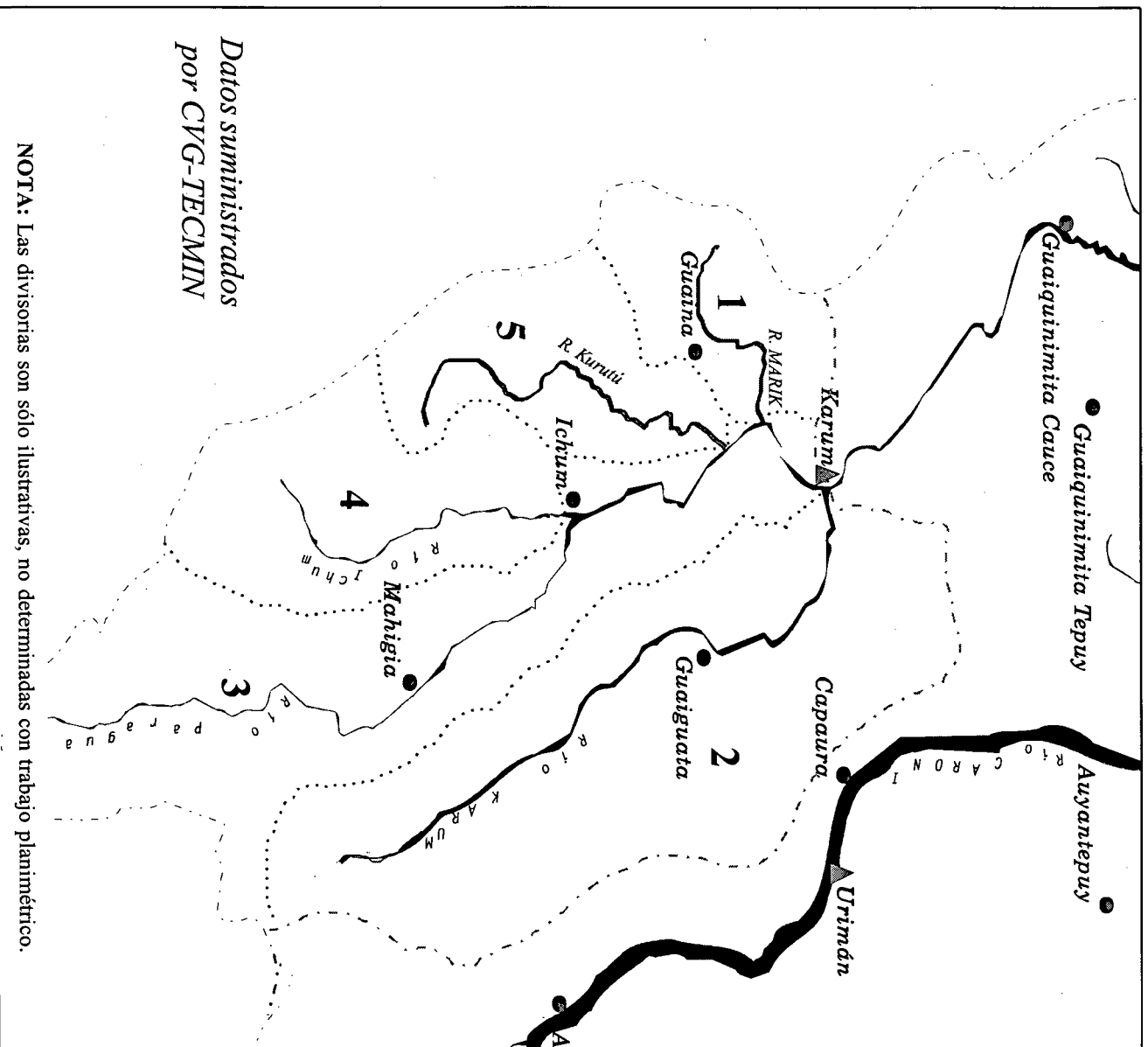


NOTA: Las divisorias son sólo ilustrativas, no determinadas con trabajo planimétrico.

CUENCA DEL ALTO PARAGUA ESTACIONES DE LA RED DE EDEICA



CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA FISIOGRAFÍA DE SUBCUENCAS



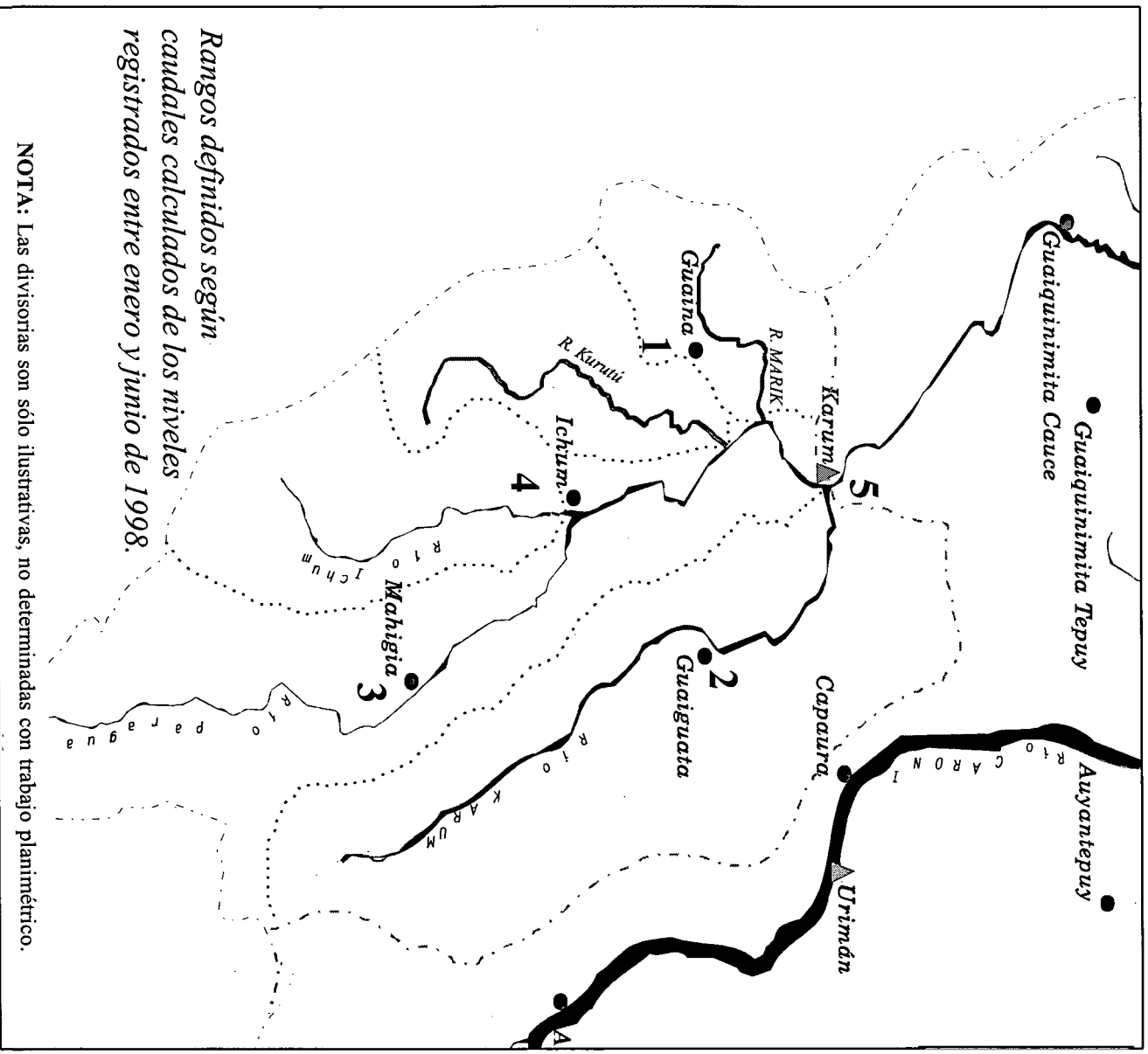
NOTA: Las divisorias son sólo ilustrativas, no determinadas con trabajo planimétrico.

*Datos suministrados
por CVG-TECMIN*

	Cuenca del:	Área (km ²)	Área (%)	Long. cauce	Desnivel
1	Marik	1.654	11,55	89 km	393
2	Karum	7.932	55,39	202 km	425
3	Paragua hasta Mahigia	-	-	-	-
4	Ichum	2.627	18,35	125 km	455
5	Kurutú	-	-	-	-

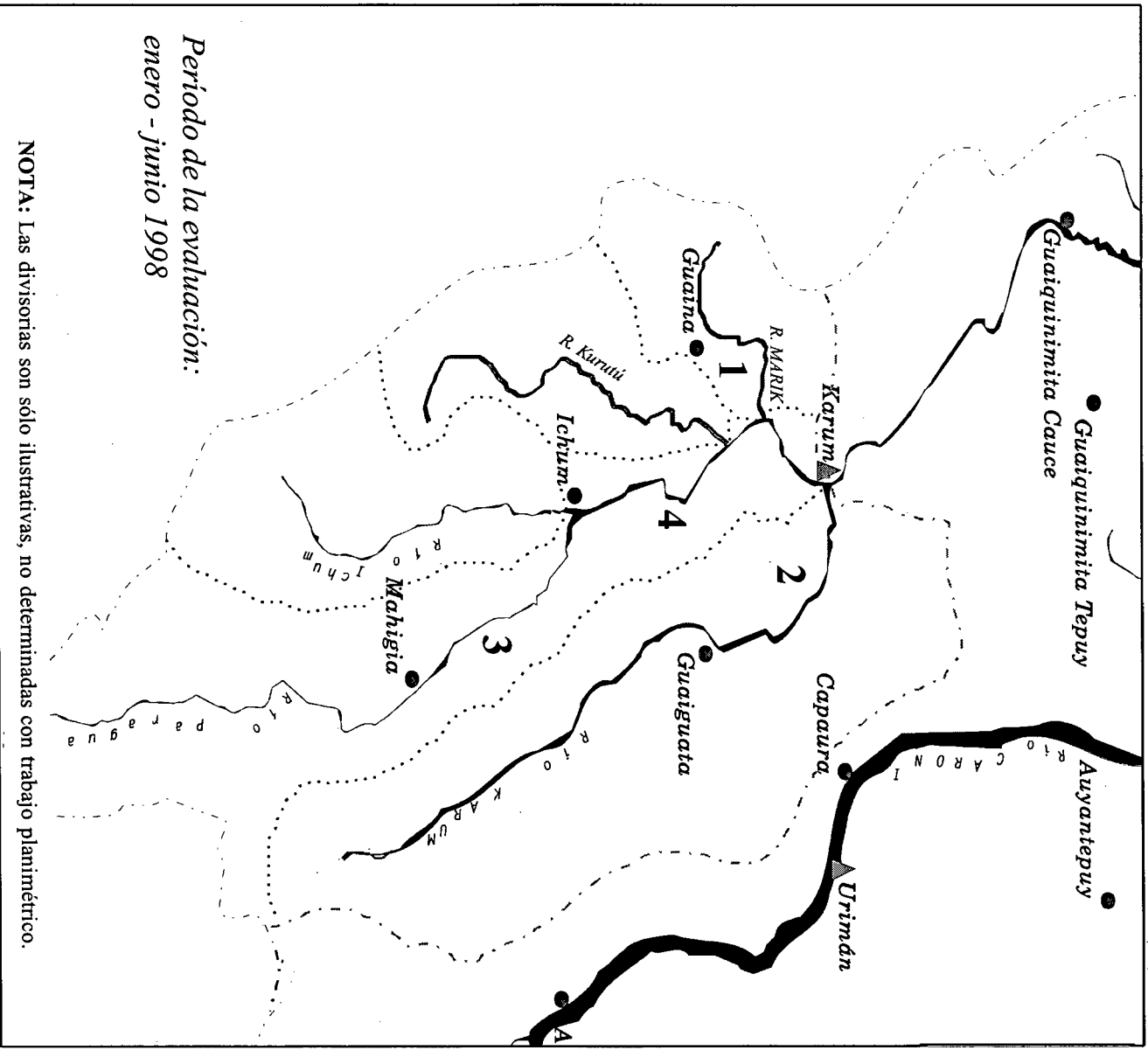
Área total de la cuenca hasta Karum: 14.319 km²

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA CONDICIONES DE CAUDALES



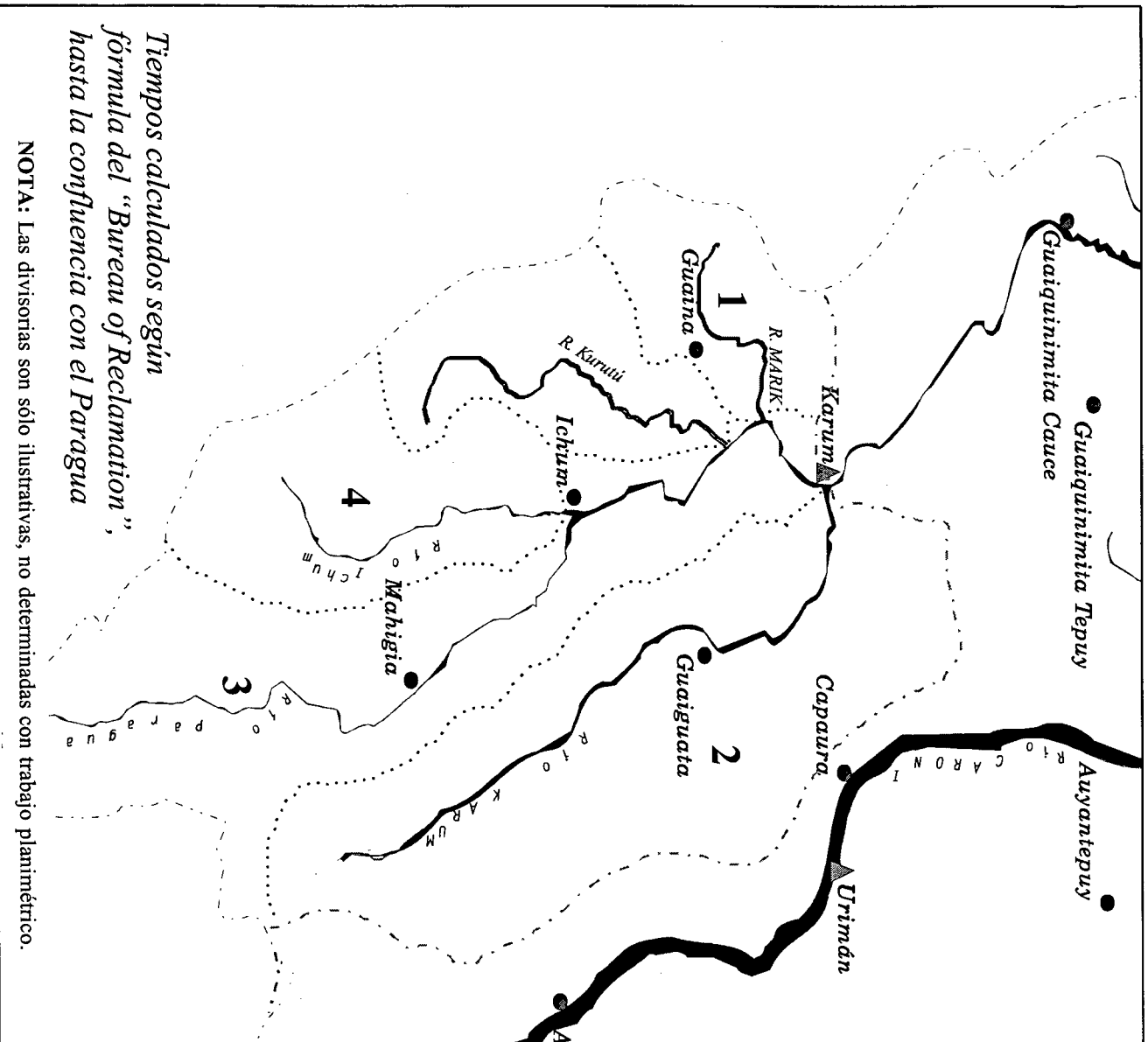
	Cauce / estación	Condiciones de caudal (en m ³ s):		
		aguas bajas	aguas medias	aguas altas
1	Marik en Guaina	menos de 100	de 100 a 250	más de 250
2	Karum en Guaiguatá	menos de 300	de 300 a 600	más de 600
3	Paragua en Mahigia	menos de 200	de 200 a 400	más de 400
4	Paragua en Ichum	menos de 500	de 500 a 700	más de 700
5	Paragua en Karum	menos de 750	de 750 a 2200	más de 2200

**CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA
TIEMPOS DE VIAJE POR TRAMOS**



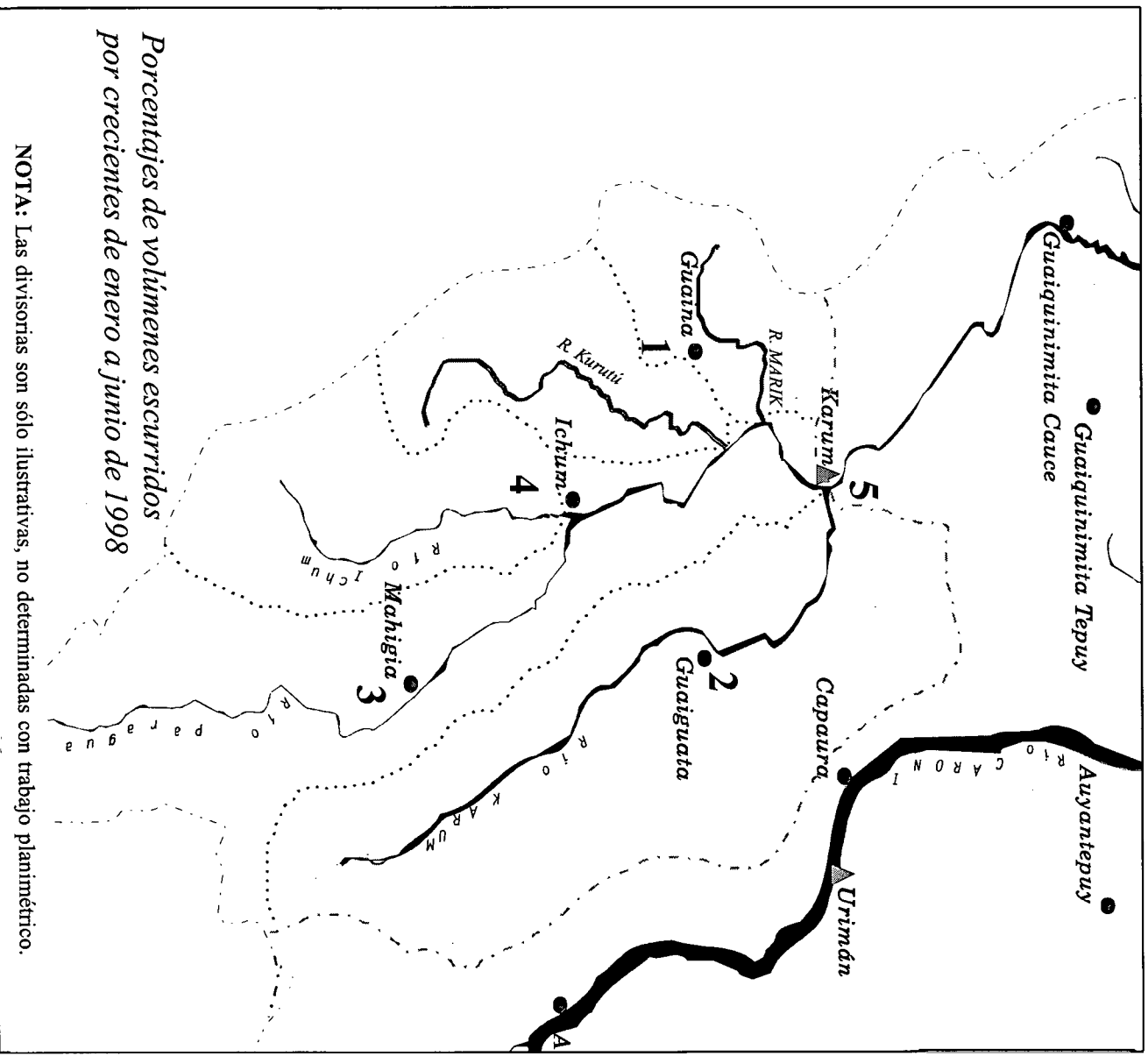
Tramo	Tiempos de viaje (h)		
	aguas bajas	aguas medias	aguas altas
1 Guaina - Karum	13	11	9
2 Guaguatá - Karum	10	10	8
3 Mahigia - Ichum	12	12	16
4 Ichum - Karum	13	12	9

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN DE SUBCUENCAS



Cuenca del:	Tiempos de concentración (h)
1 Marik	16,97
2 Karum	42,58
3 Paragua hasta estación Karum	61,25
4 Ichum	17,76

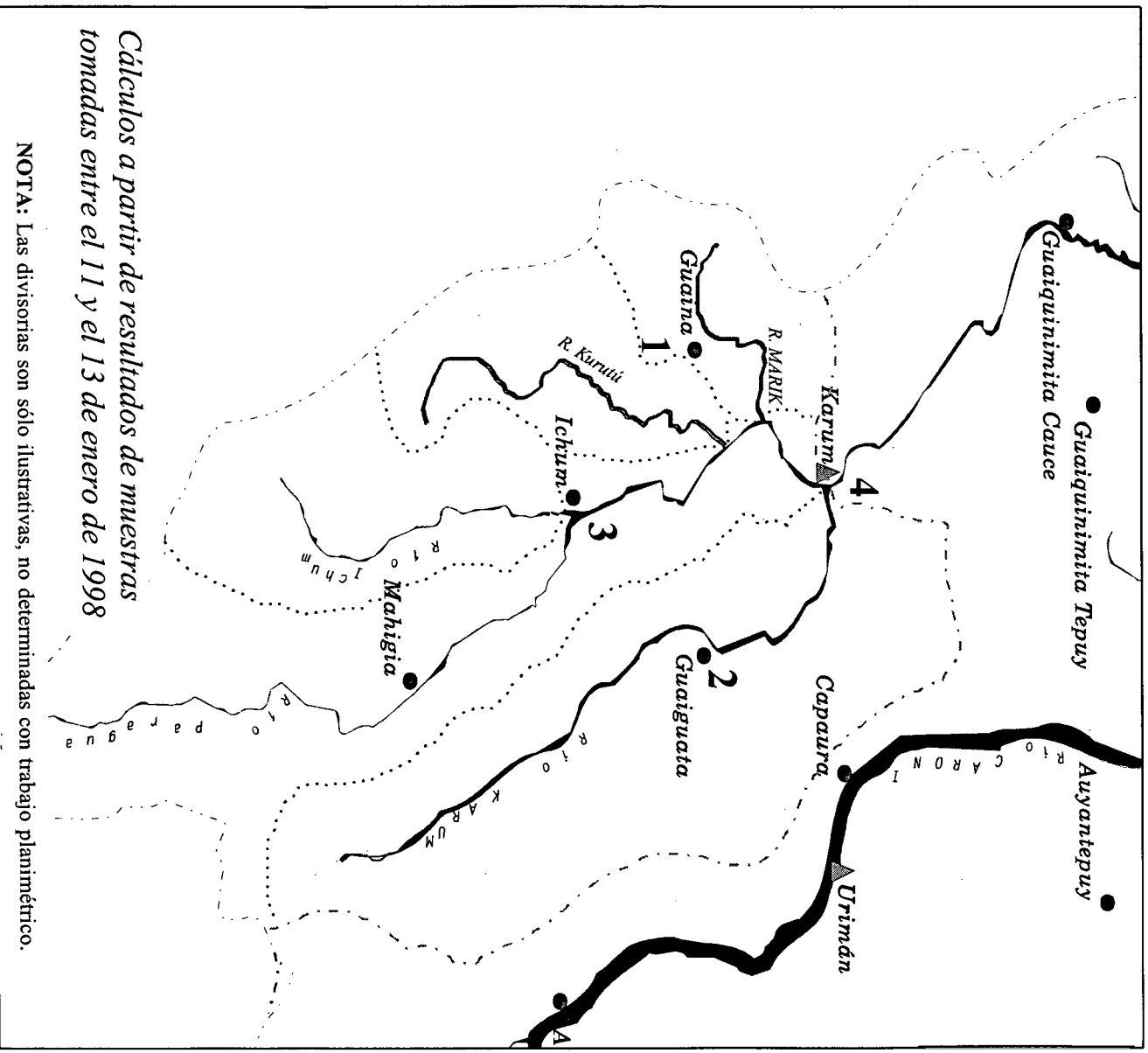
CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA APORTES PORCENTUALES



	Cauce / estación	Aportes porcentuales (%)		
		aguas bajas	aguas medias	aguas altas
1	Marik en Guaina	13,89	9,11	7,58
2	Karum en Guaguatá	26,88	20,21	27,46
3	Paragua en Mahigia	55,41	51,90	54,94
4	Paragua en Ichum	34,80	31,14	49,84

Todos los porcentajes referidos al Paragua en Karum
excepto 3, que está referido al Paragua en Ichum.

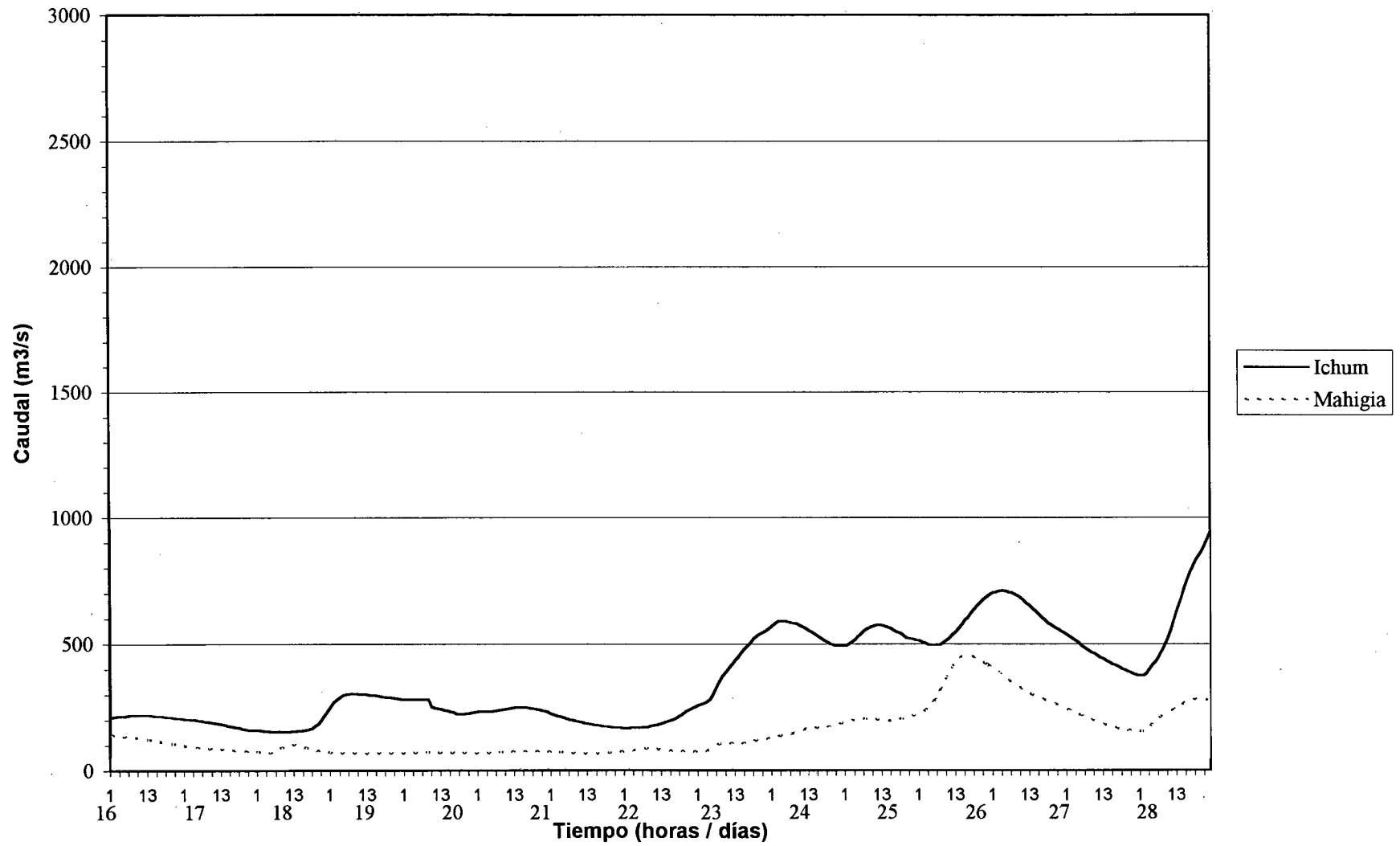
CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA APORTES PORCENTUALES



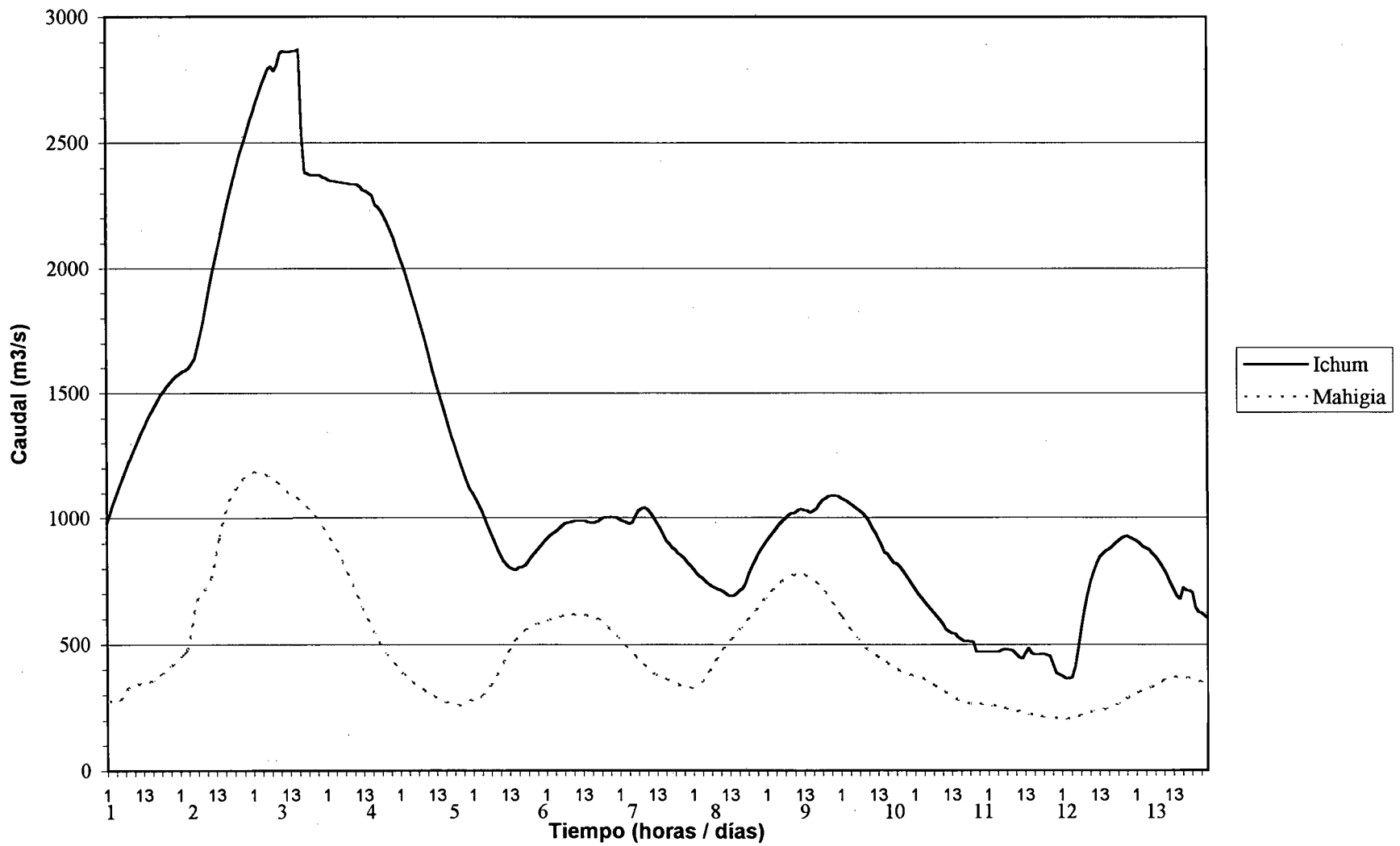
	Cauce / estación	Aportes sólidos		
		concentración (mg/l)	caudal (ton/día)	porcentaje
1	Marik en Guaina	15,0	62,08	2,42
2	Karum en Guaiquata	52,3	1710,34	66,64
3	Paragua en Ichum	19,1	525,93	20,49
4	Paragua en Karum	24,2	268,26	10,45

ANEXO 2: Hidrogramas de crecientes

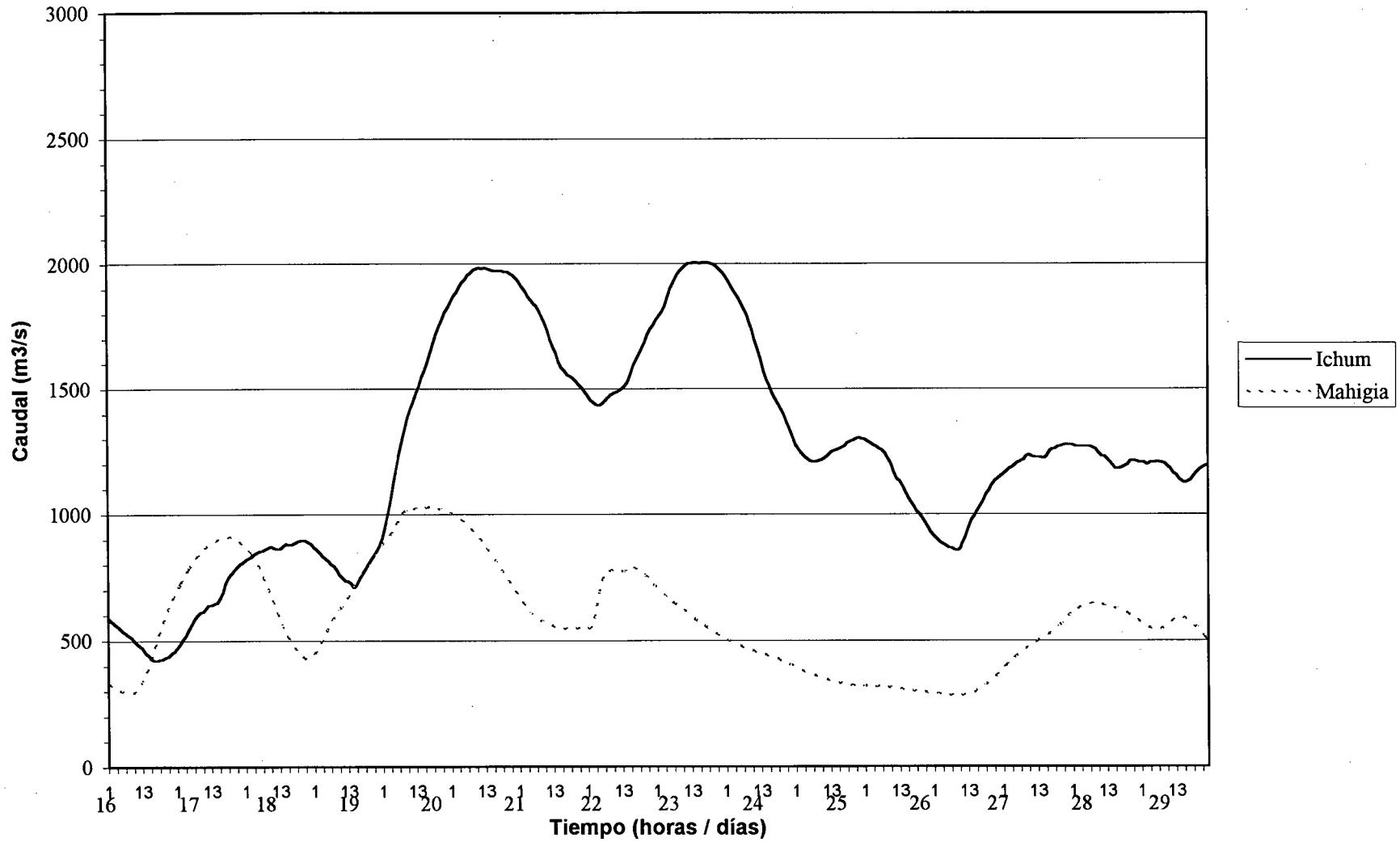
Confrontación de hidrogramas en el eje Mahigia-Ichum, Período del 16 al 30 de abril de 1998



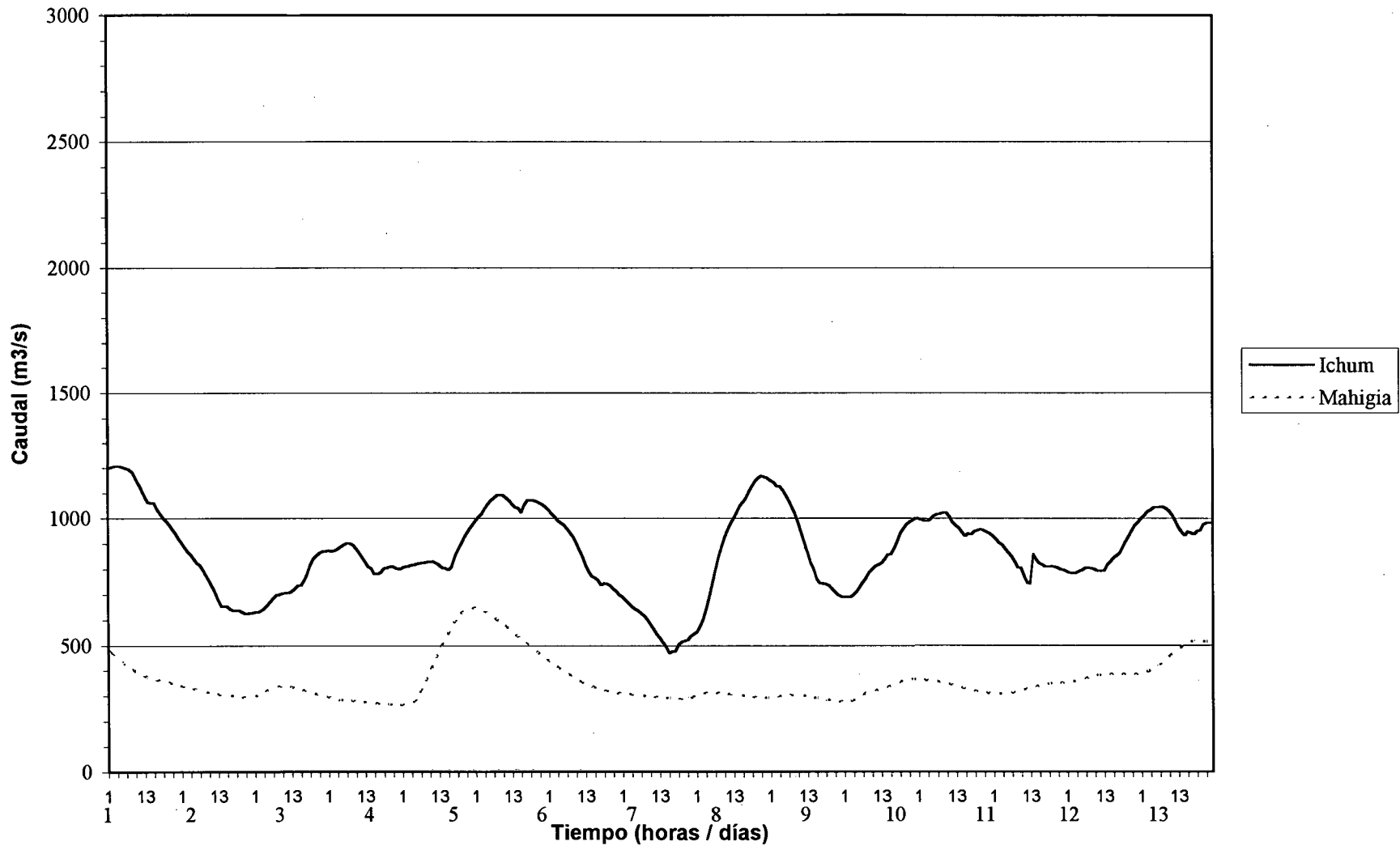
Confrontación de hidrogramas, eje Mahigia-Ichum, Período del 01 al 15 de mayo de 1998



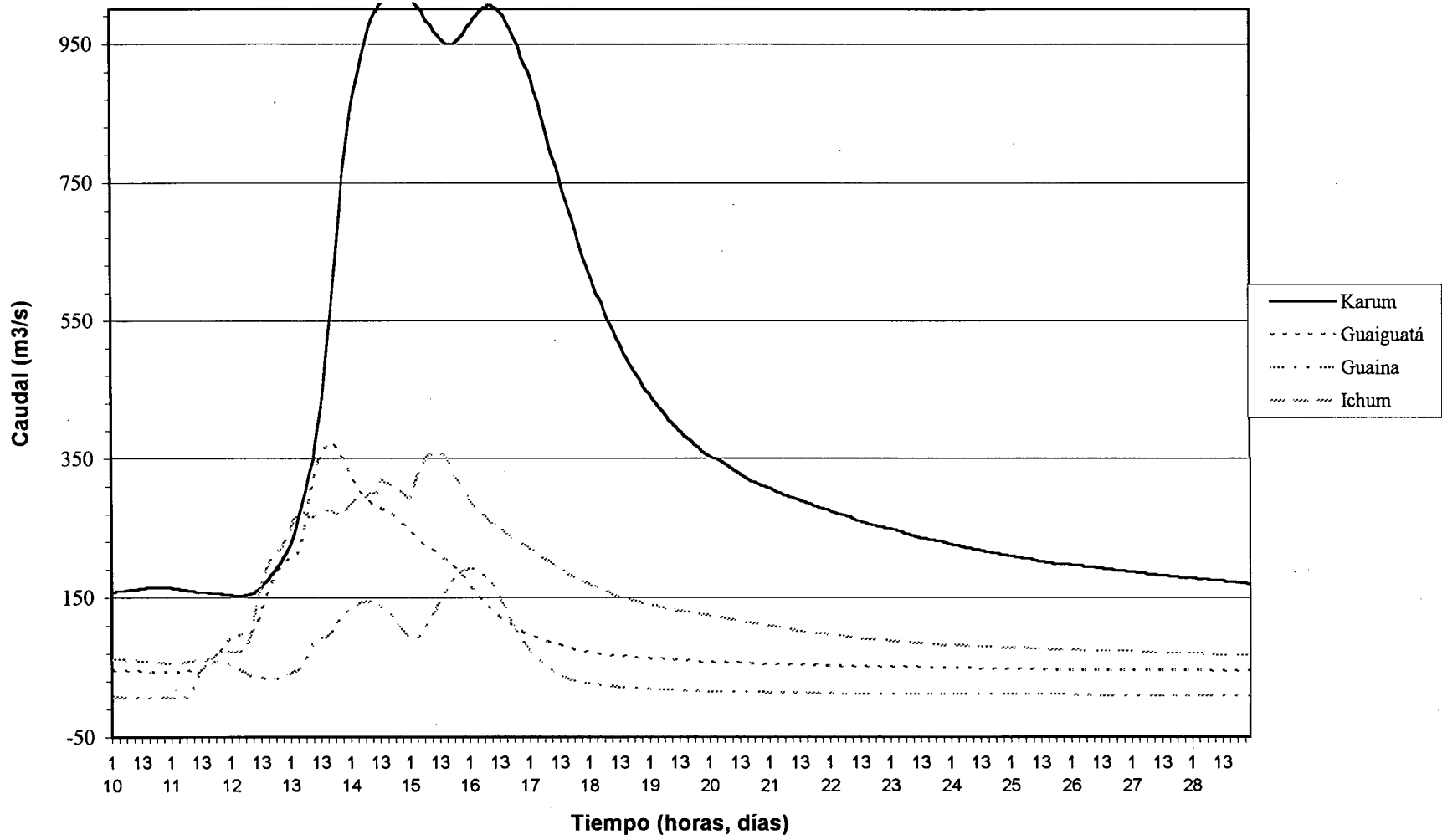
Confrontación de hidrogramas, eje Mahigia-Ichum, Período del 16 al 31 de mayo de 1998



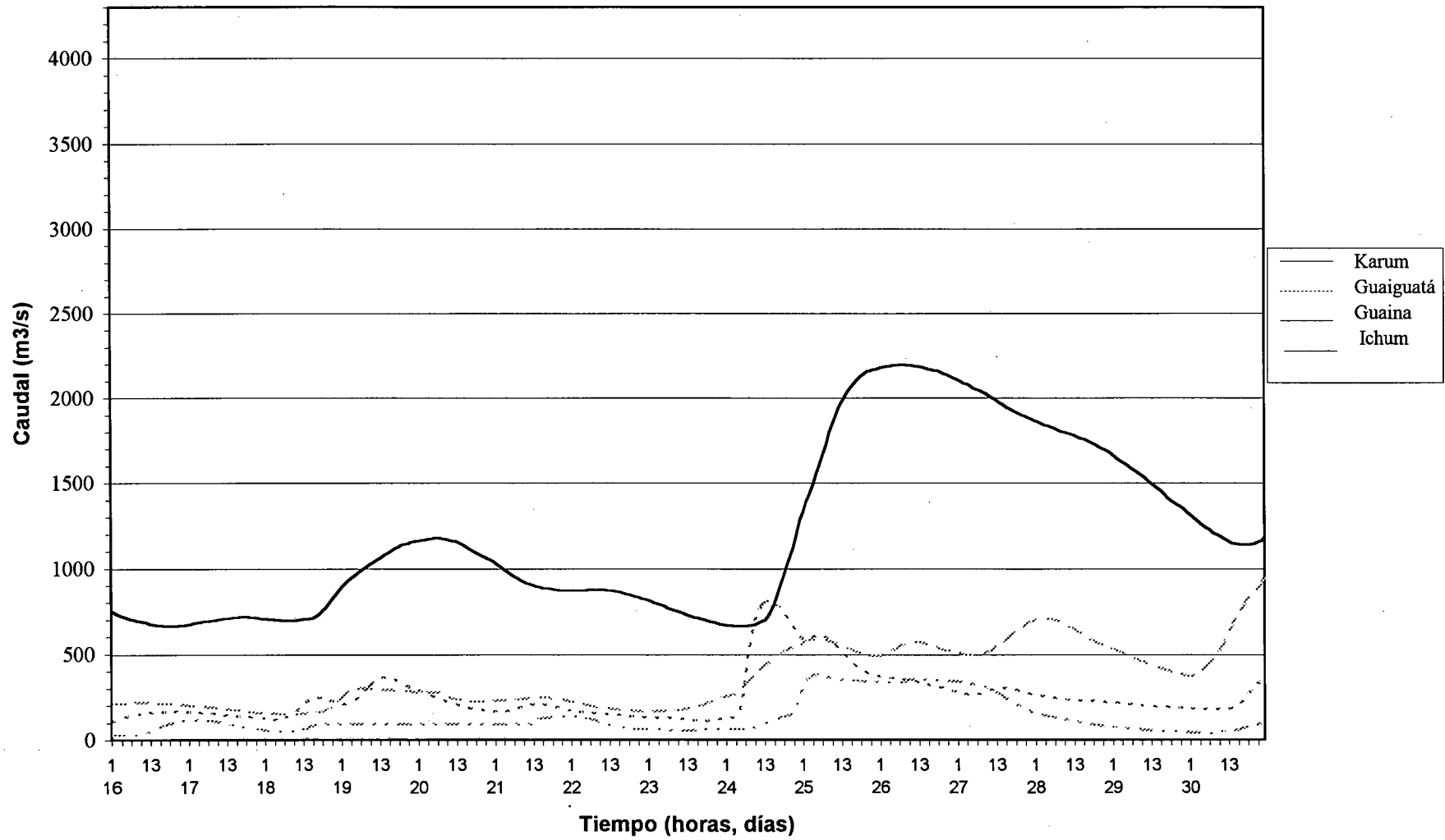
Confrontación de hidrogramas, eje Mahigia-Ichum, Período del 01 al 15 de junio de 1998



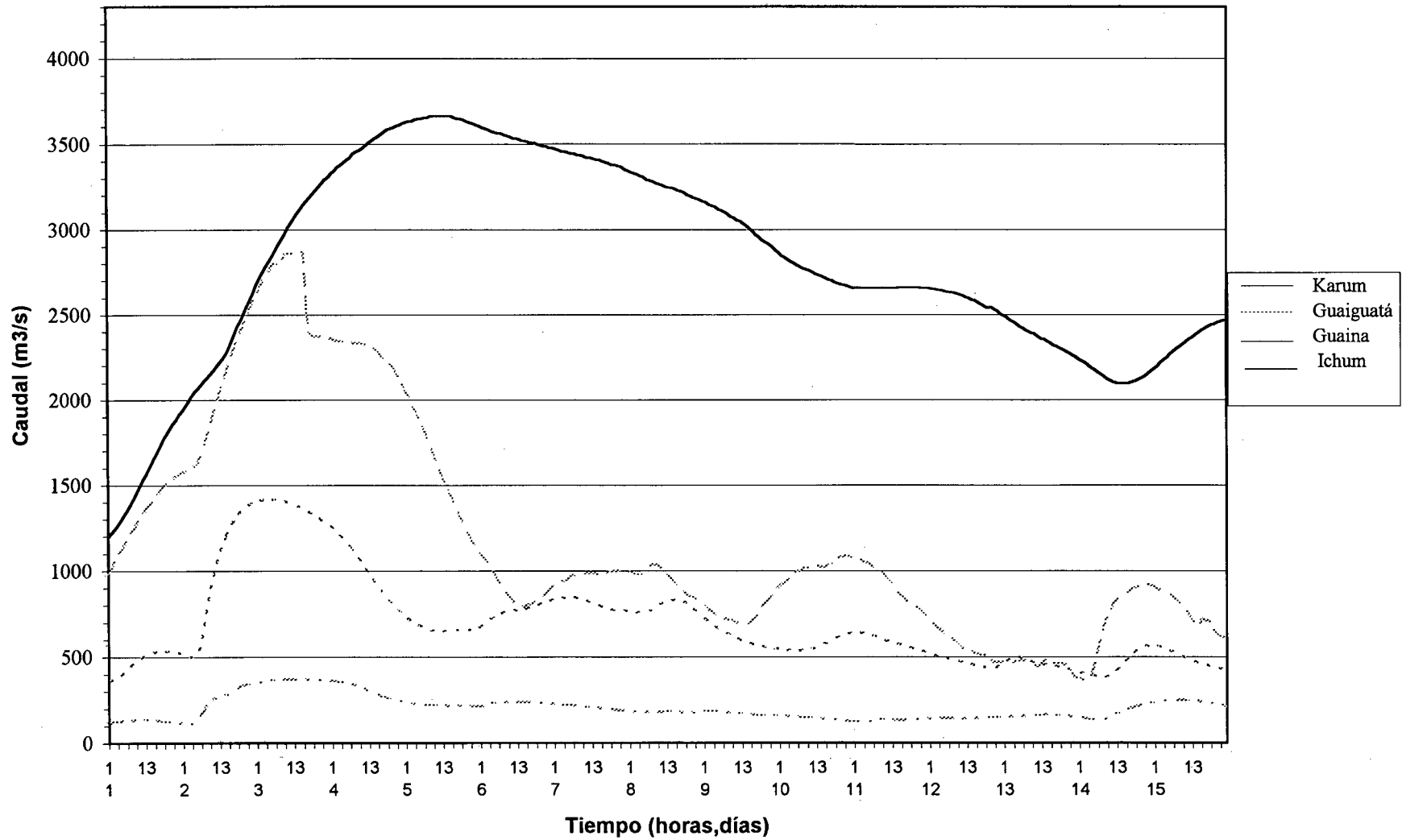
Confrontación de hidrogramas: (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 10 al 28 de febrero de 1998



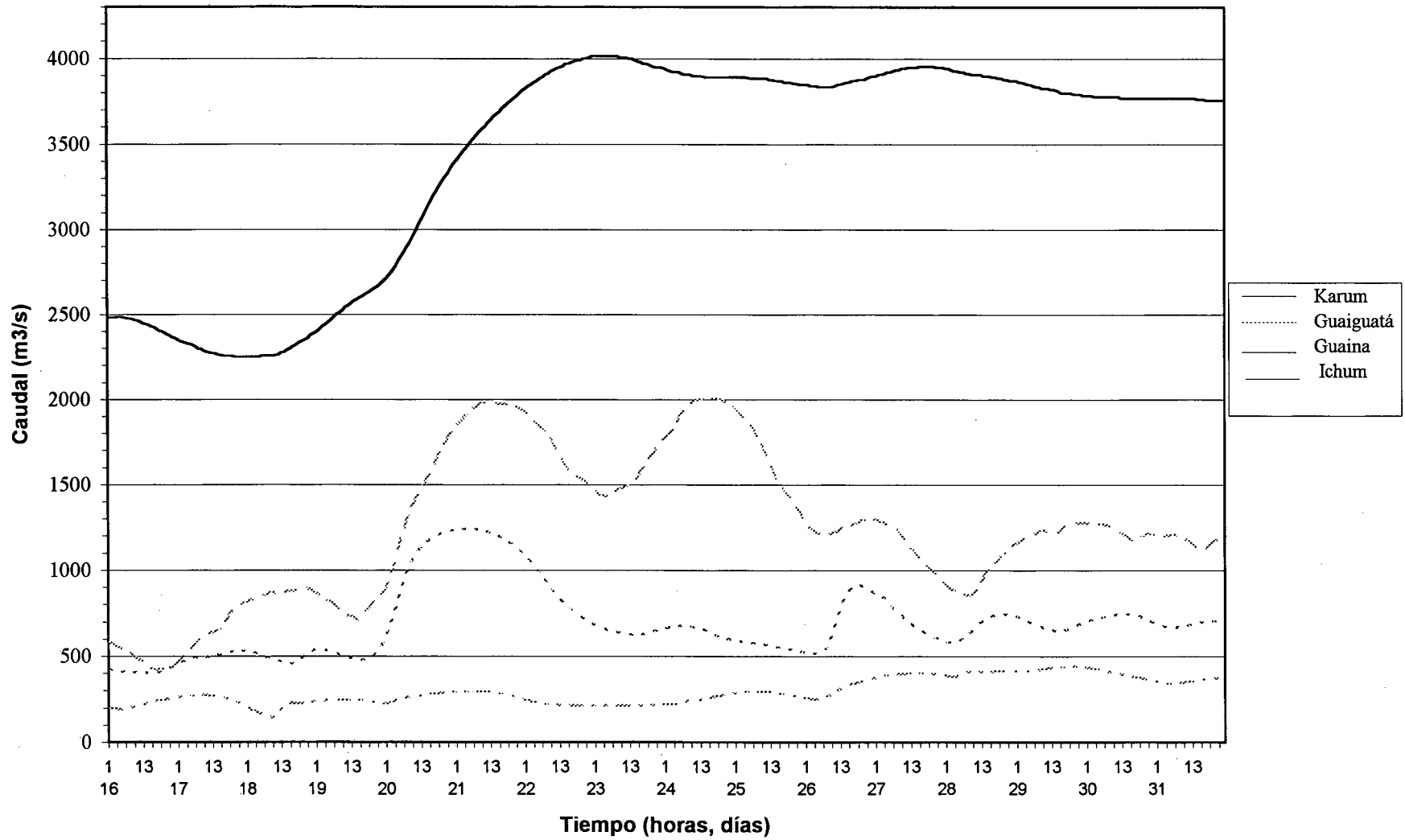
Confrontación de hidrogramas: (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 16 al 30 de abril de 1998



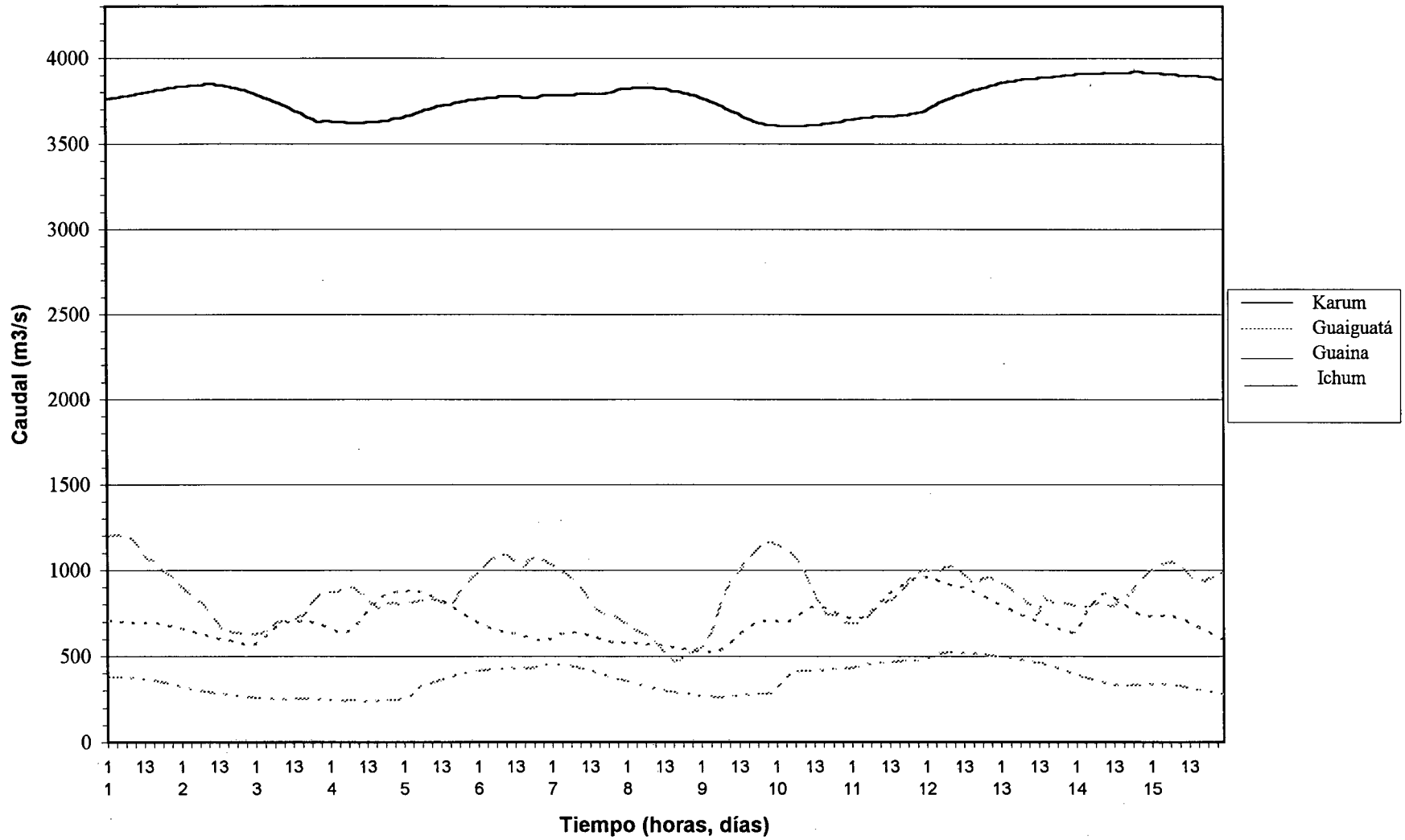
Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 01 al 15 de mayo de 1998



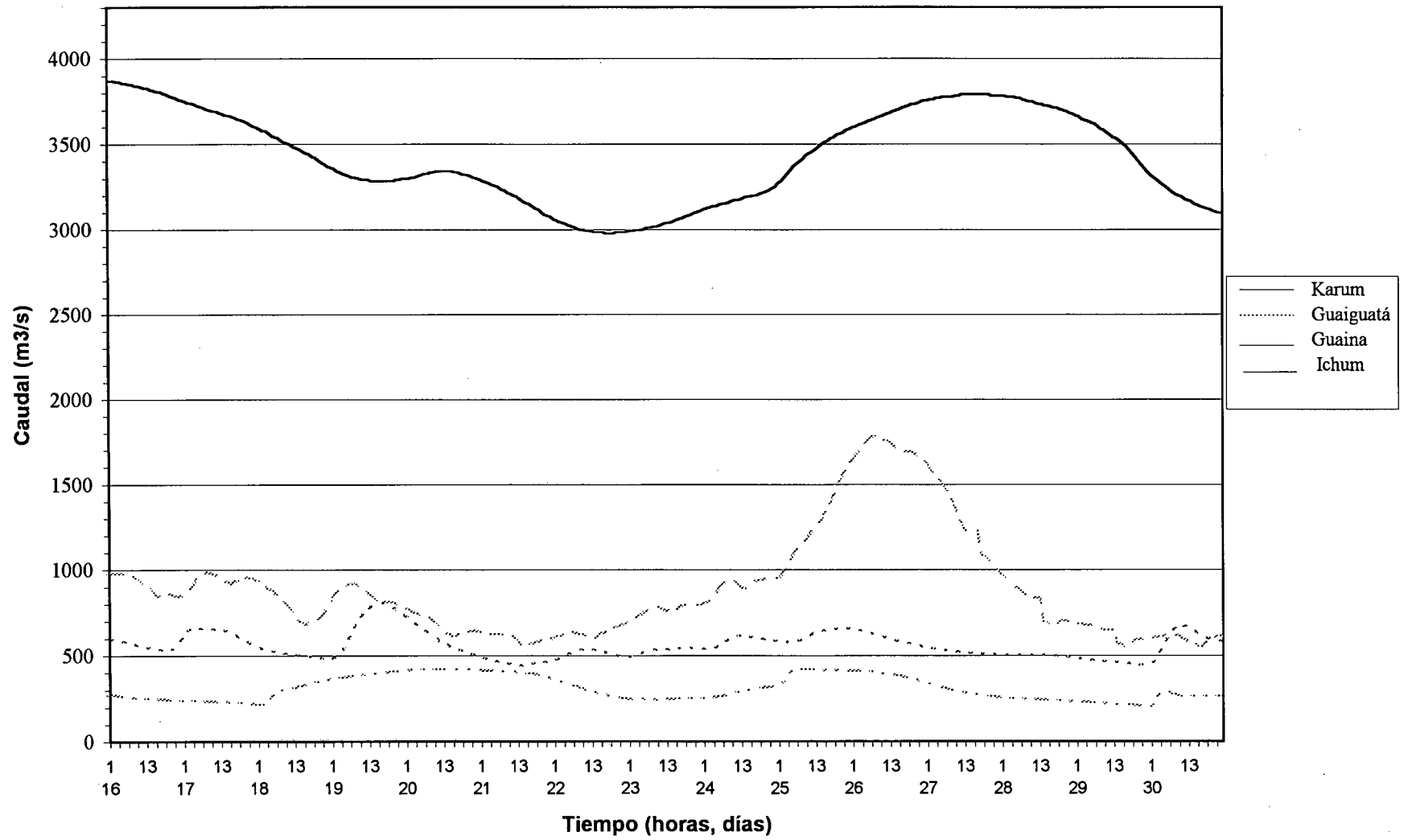
Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 16 al 31 de mayo de 1998



Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 01 al 15 de junio de 1998

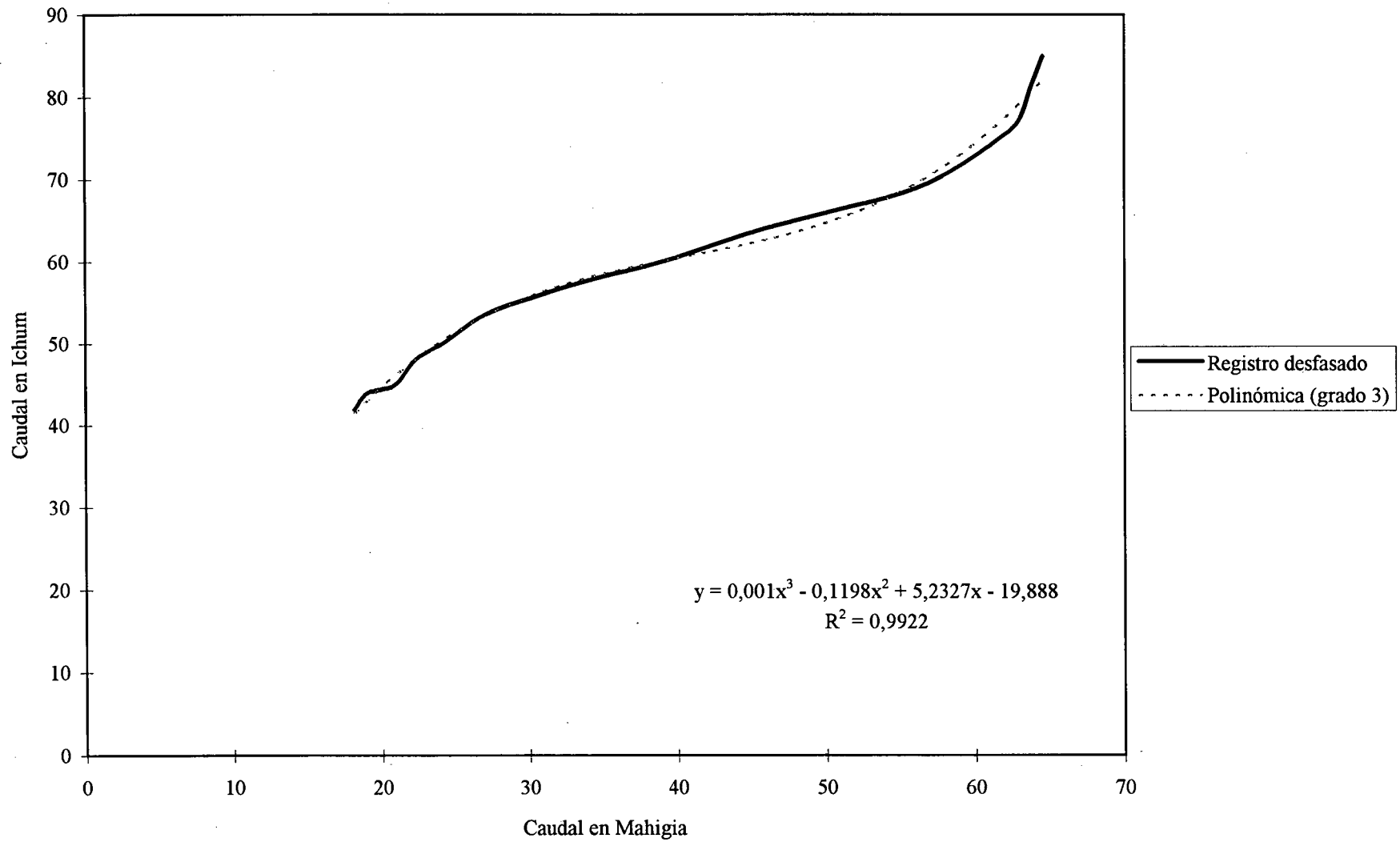


Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 16 al 30 de junio de 1998

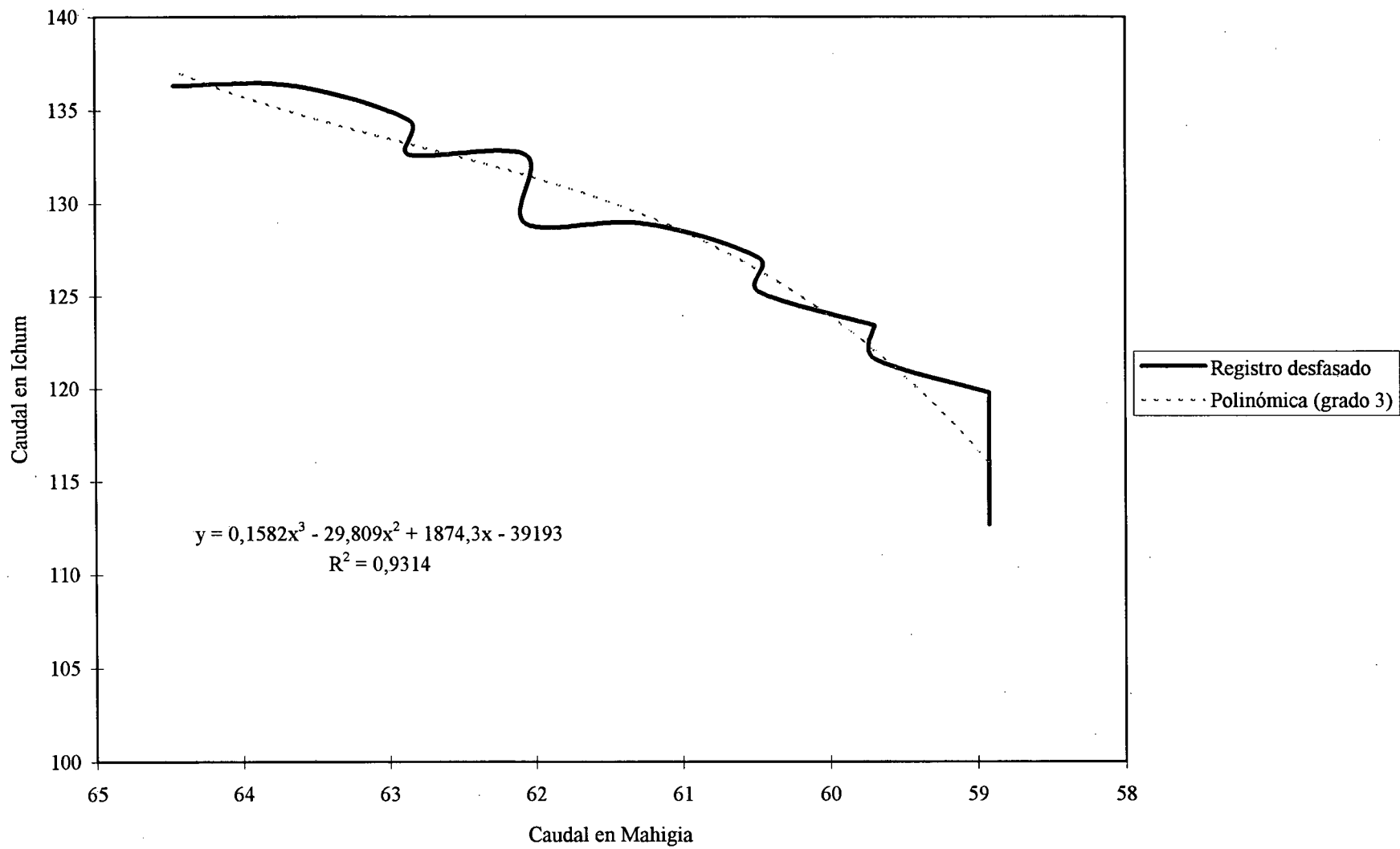


ANEXO 3: Curvas de regresiones de ajuste

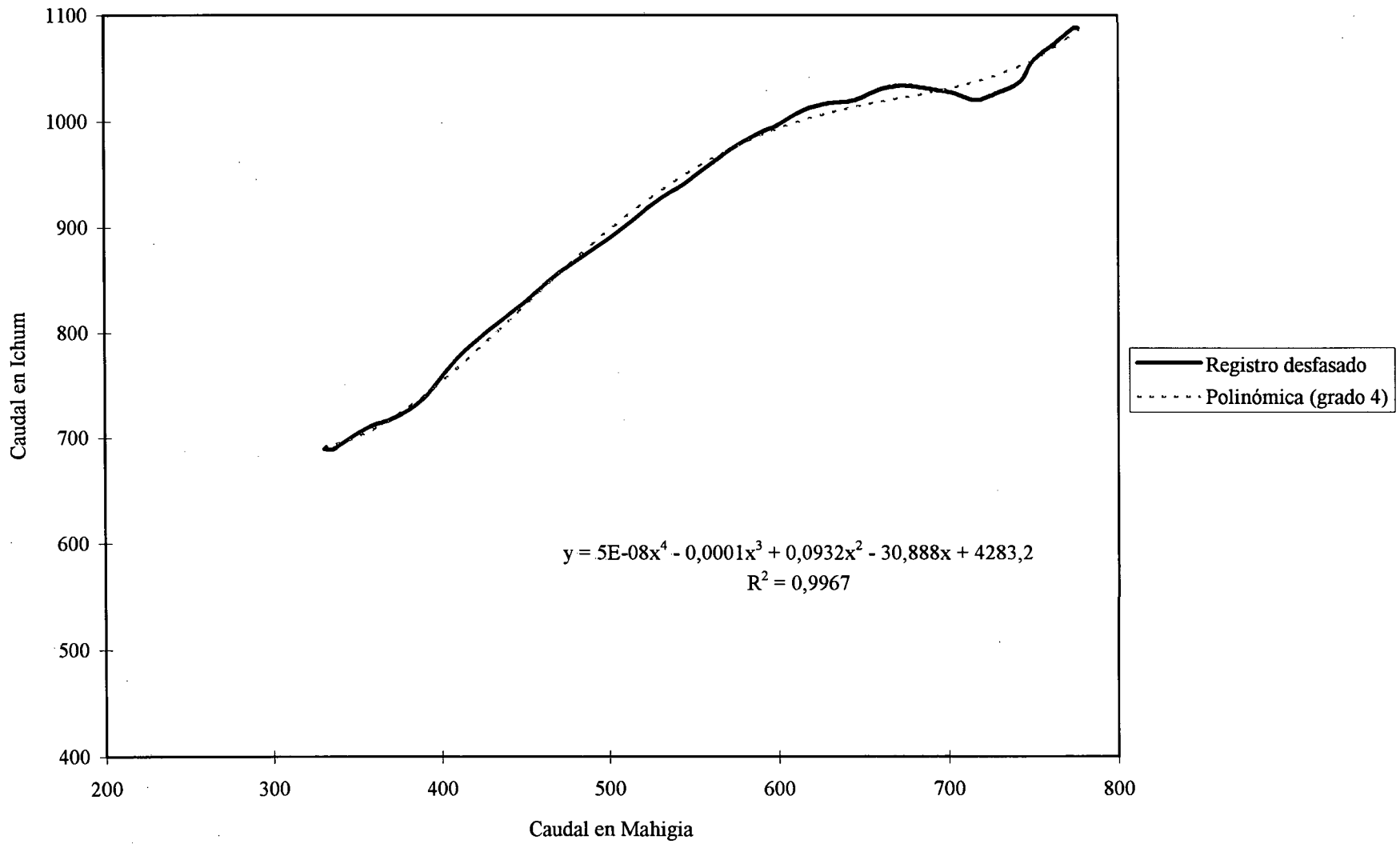
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 04-04-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



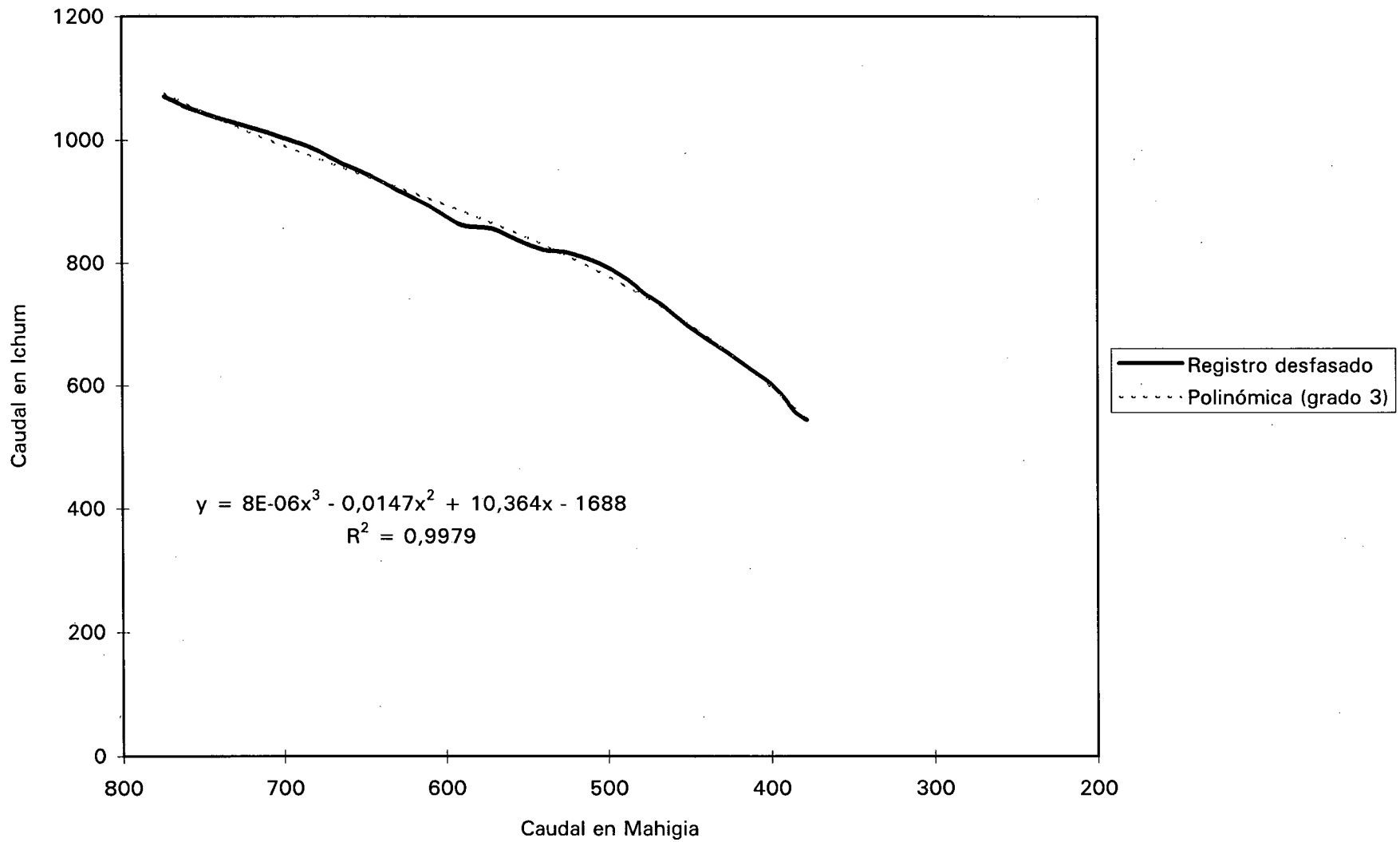
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 04-04-98, rama descendente.
Desfase: 25 h



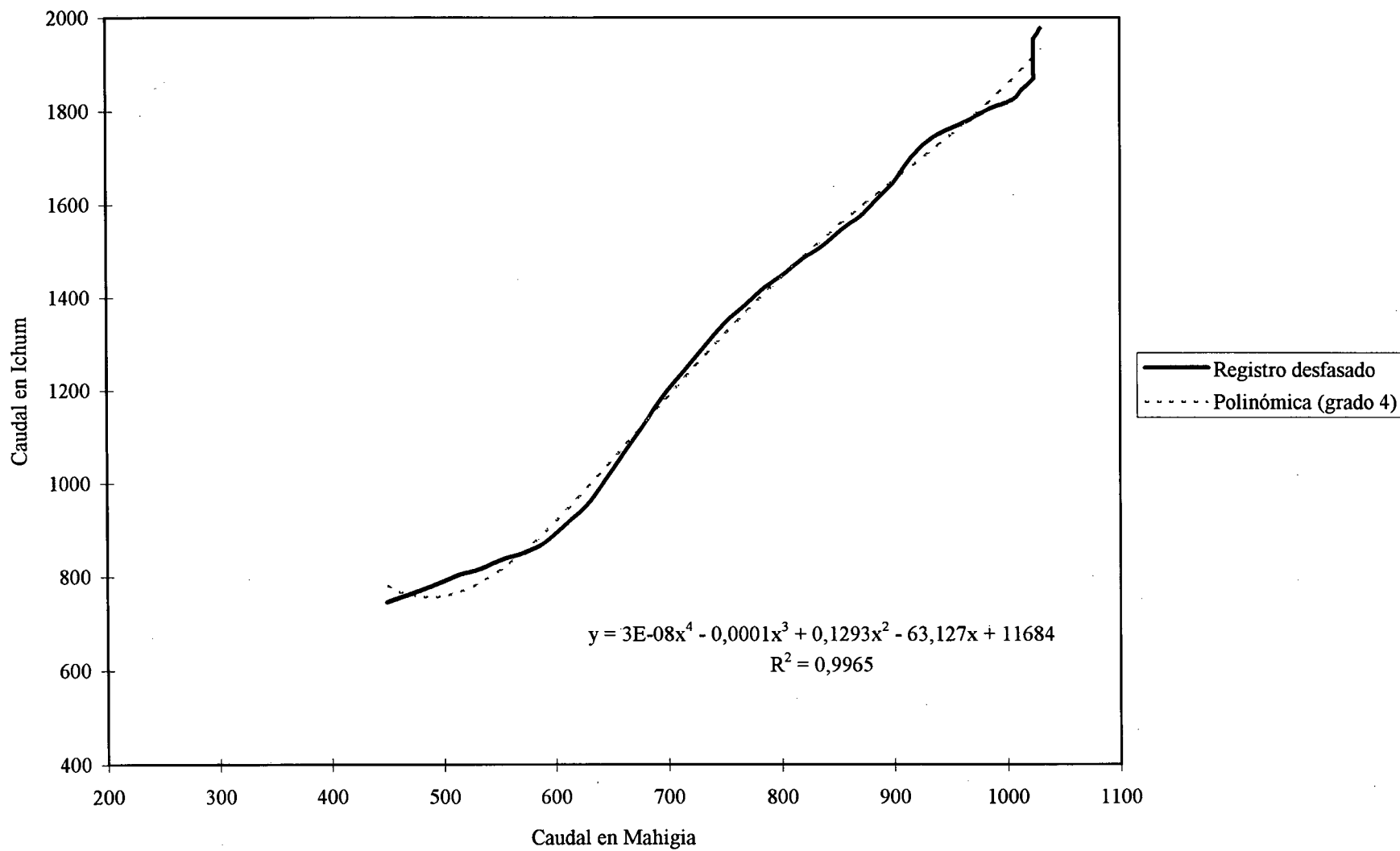
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 09-05-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



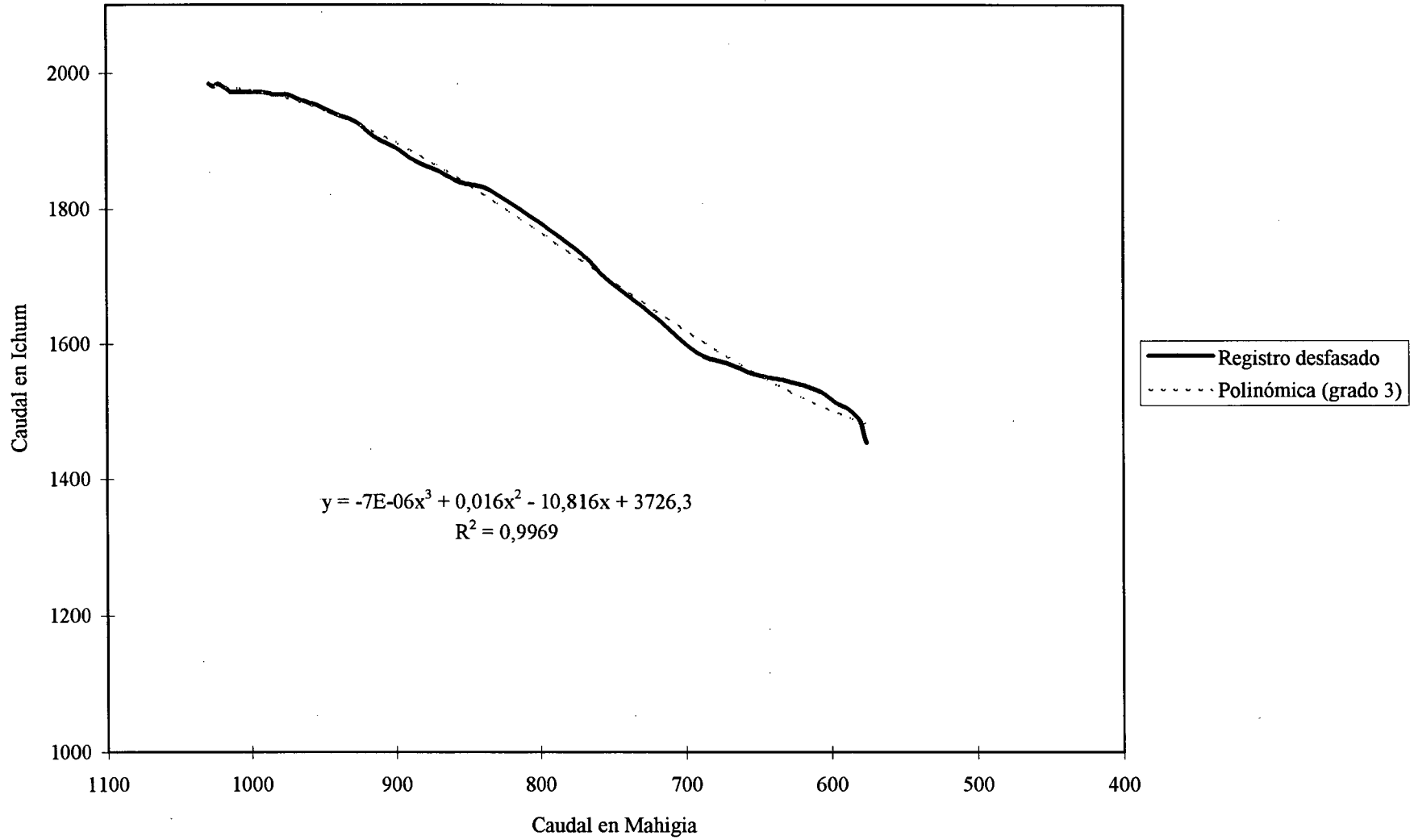
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 09-05-98, rama descendente.
Desfase: 13 h



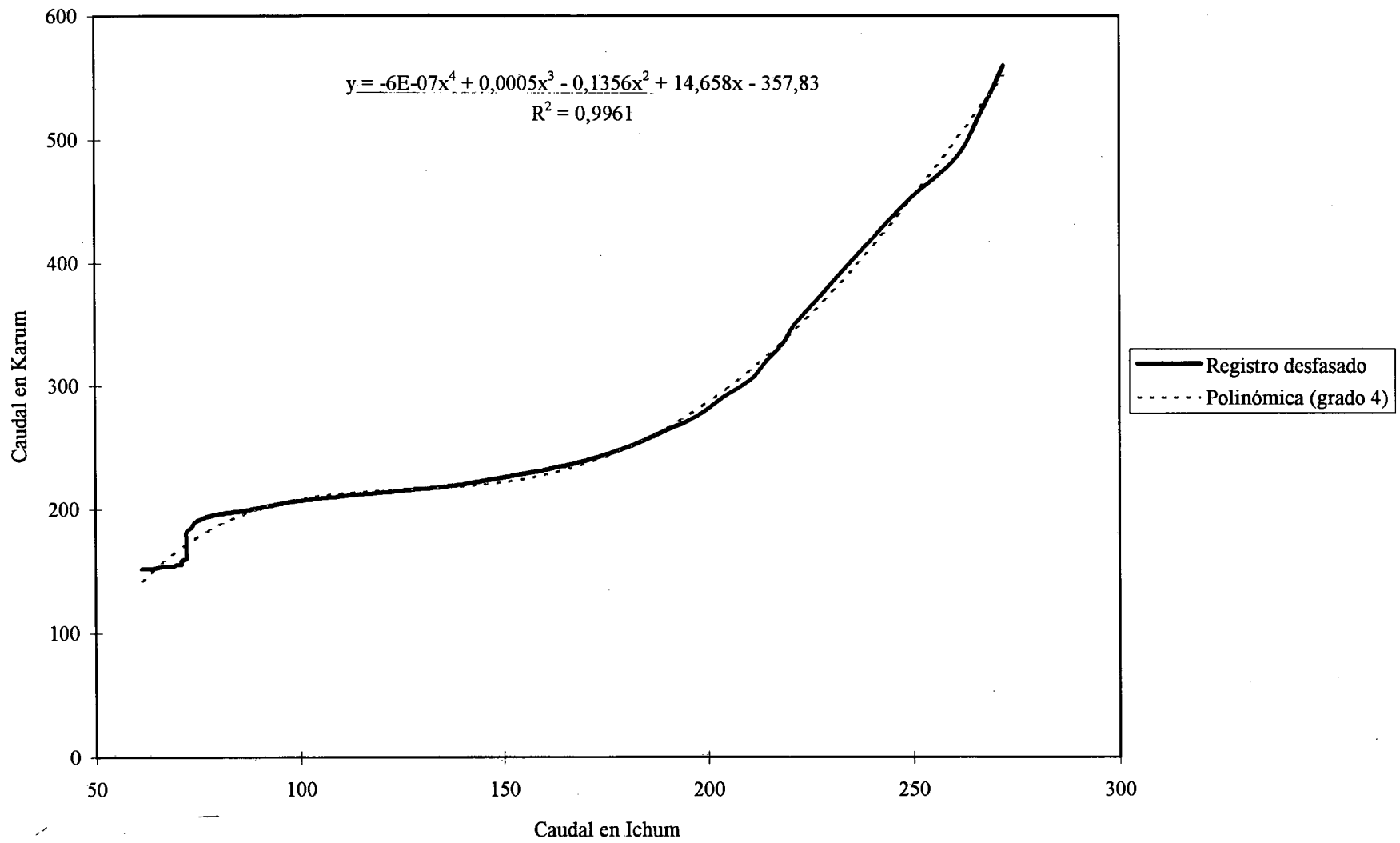
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 19-05-98, rama ascendente.
Desfase: 16 h



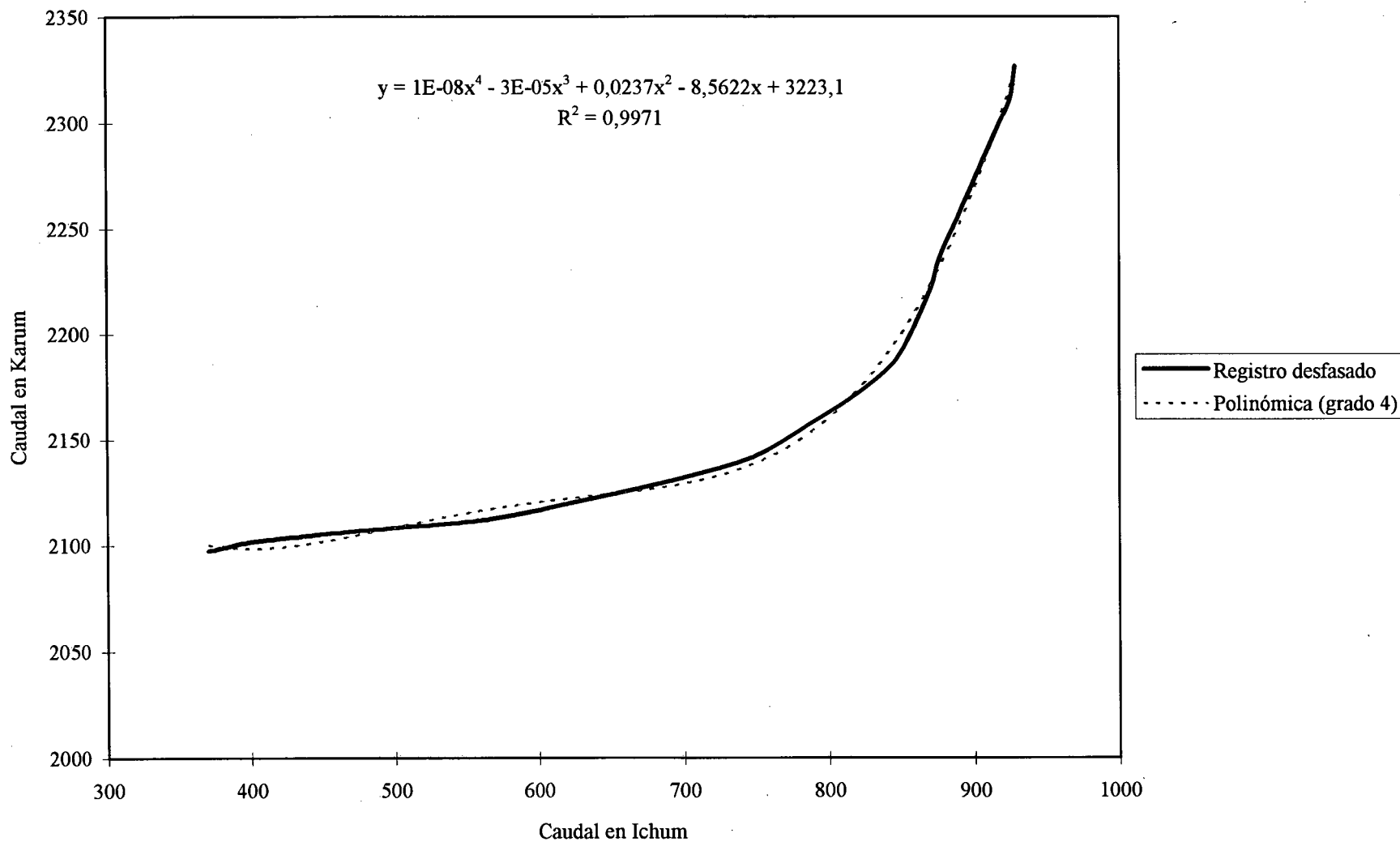
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 19-05-98, rama descendente.
Desfase: 16 h



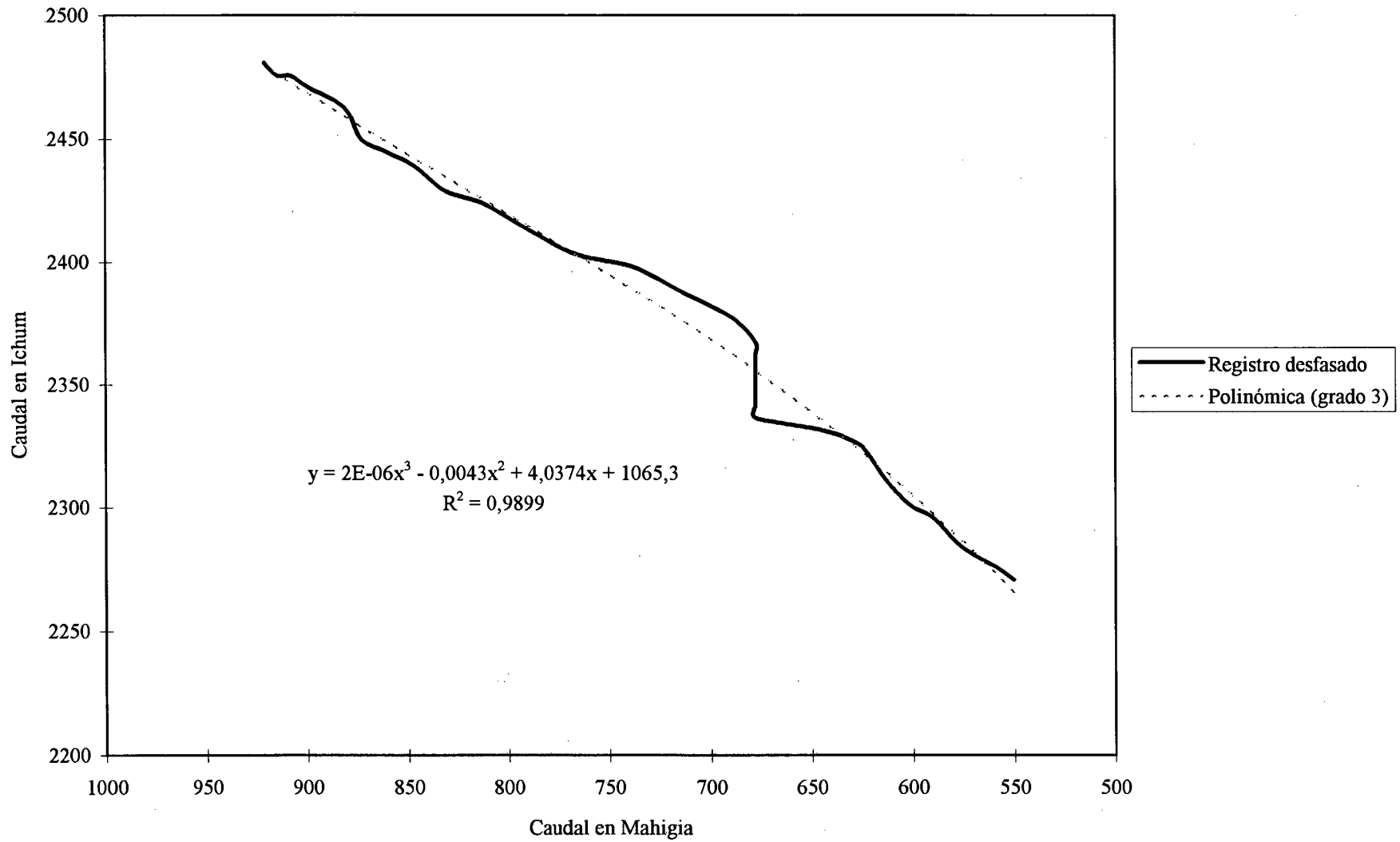
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 11-02-98, rama ascendente.
Desfase: 13 h



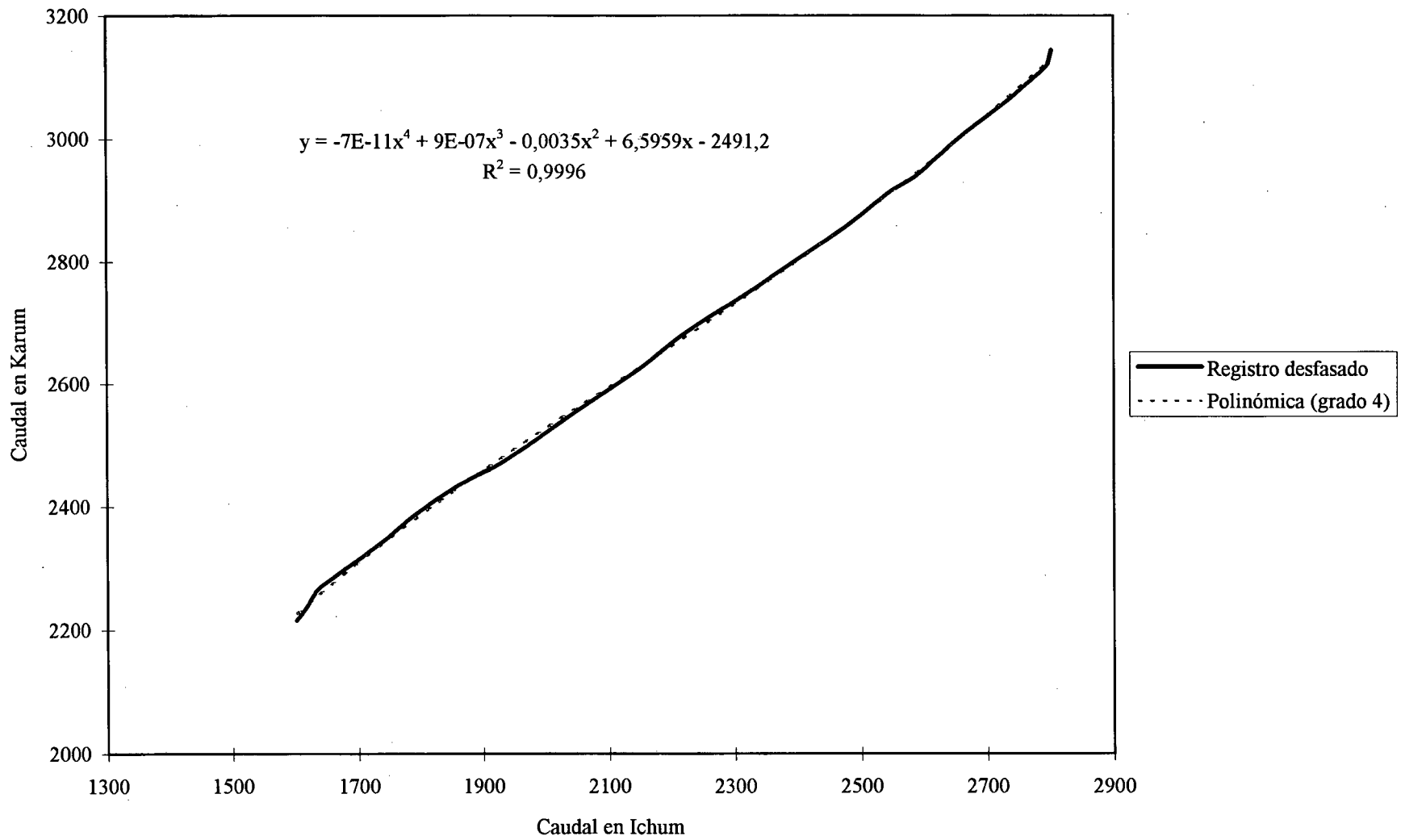
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



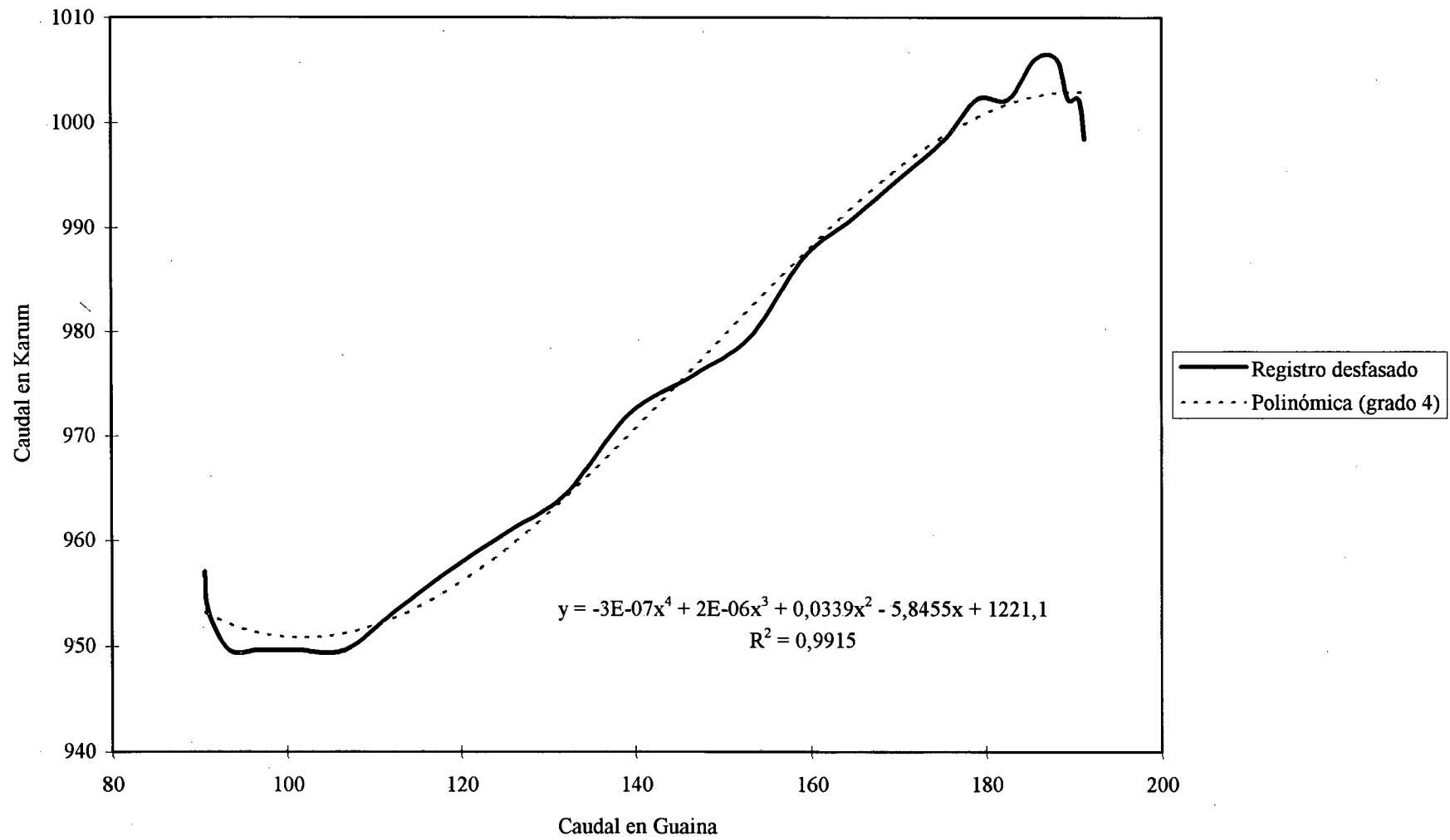
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama descendente.
Desfase: 32 h



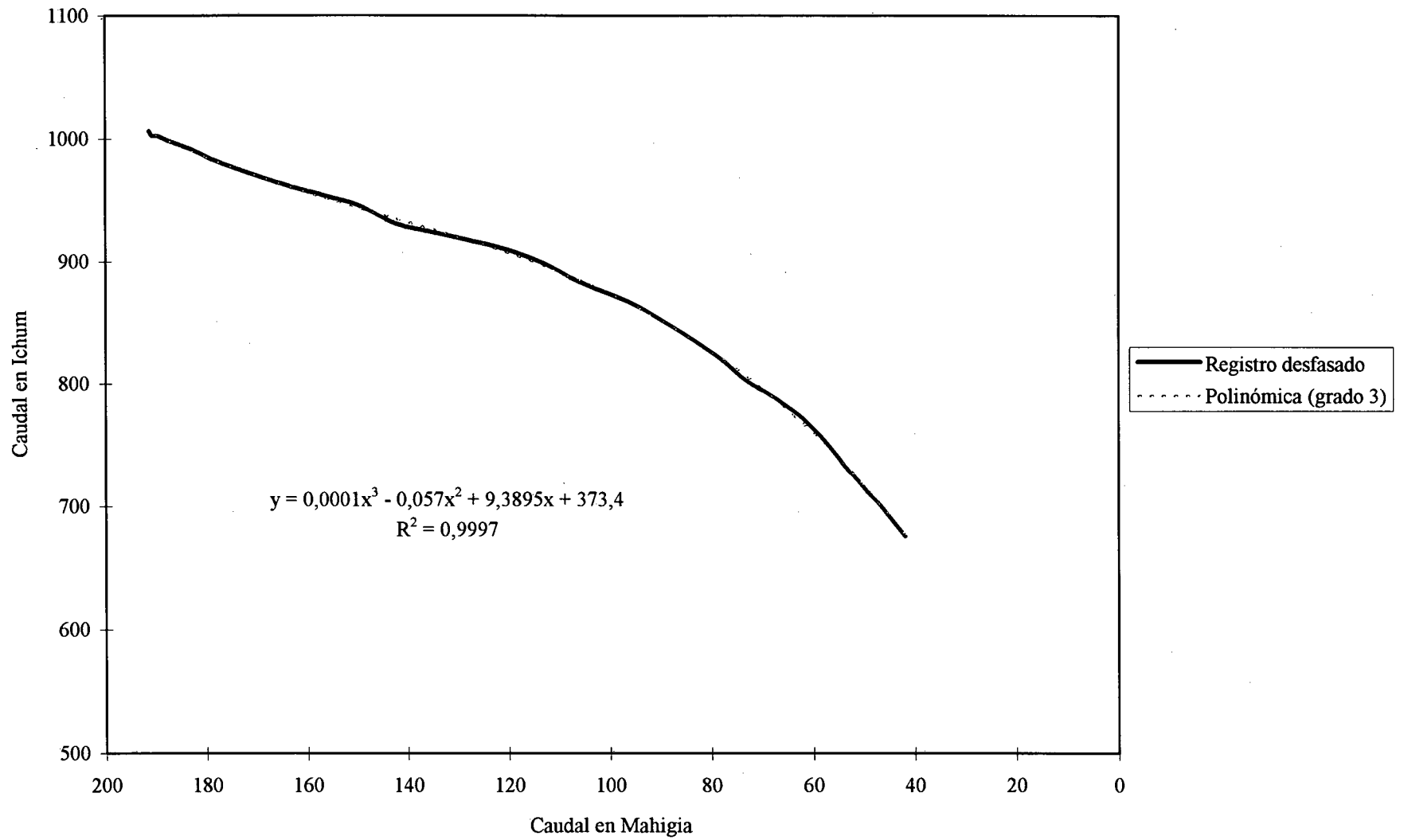
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 02-05-98, rama ascendente.
Desfase: 9 h



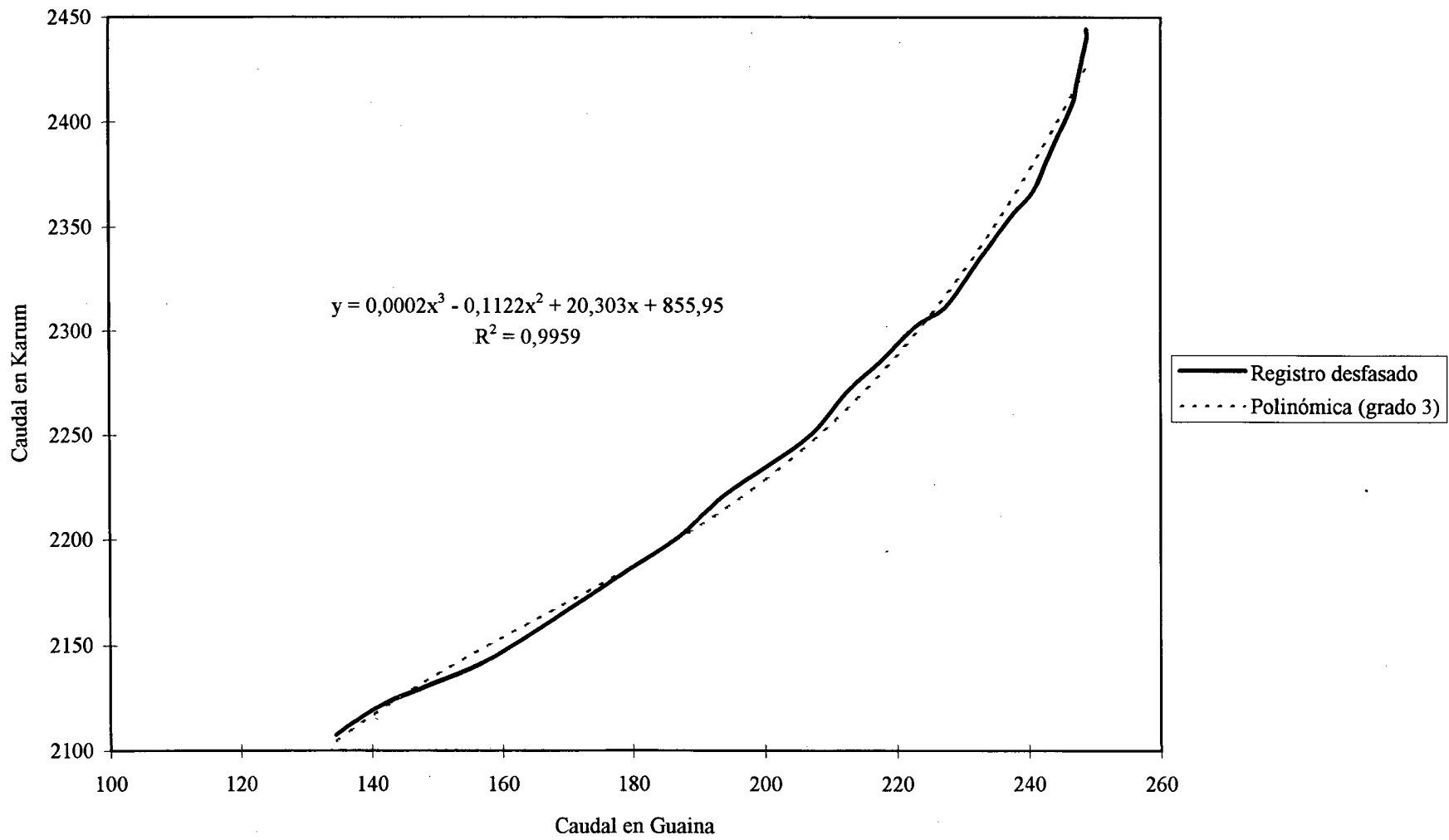
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciete del 15-02-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



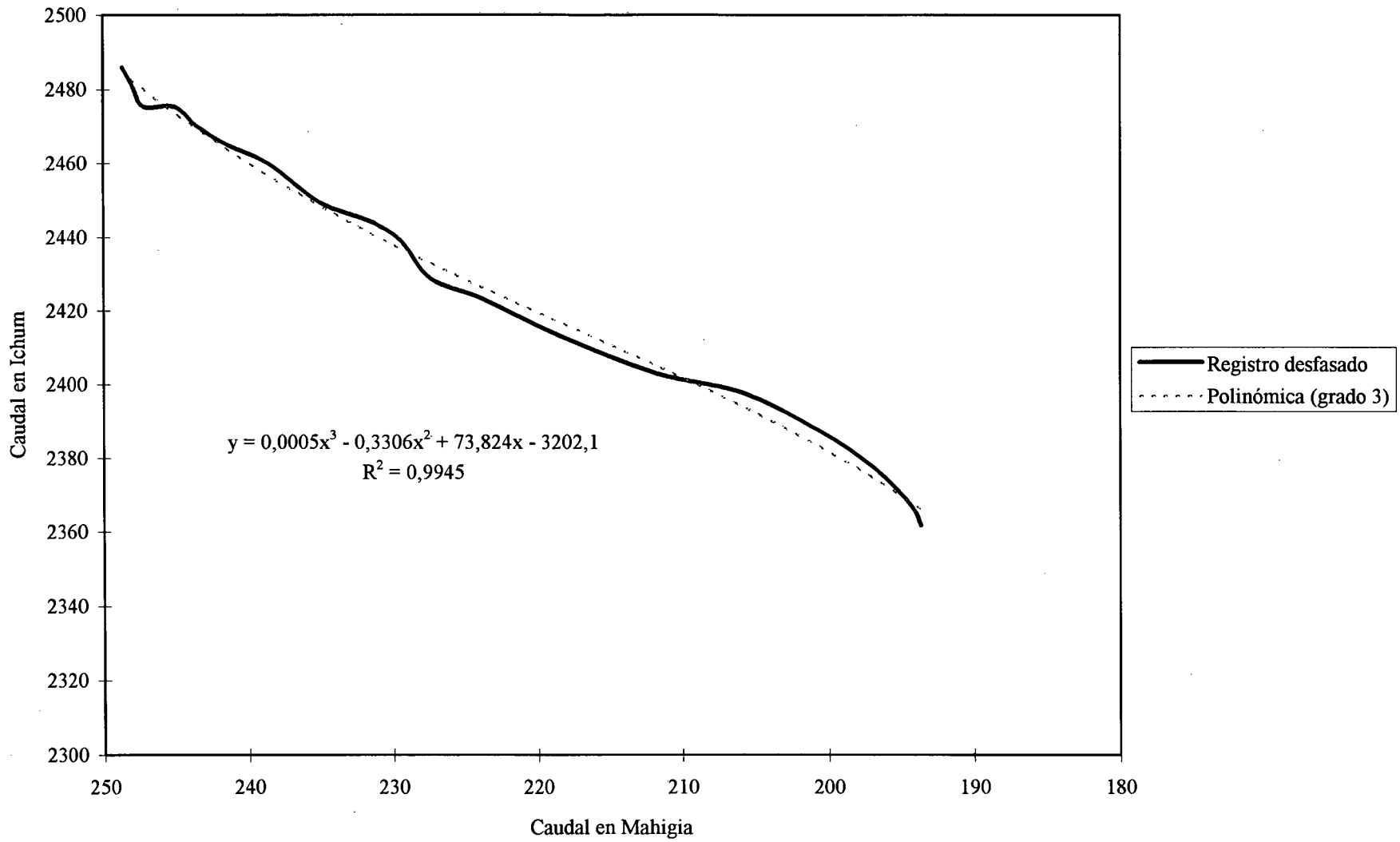
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 15-02-98, rama descendente.
Desfase: 10 h



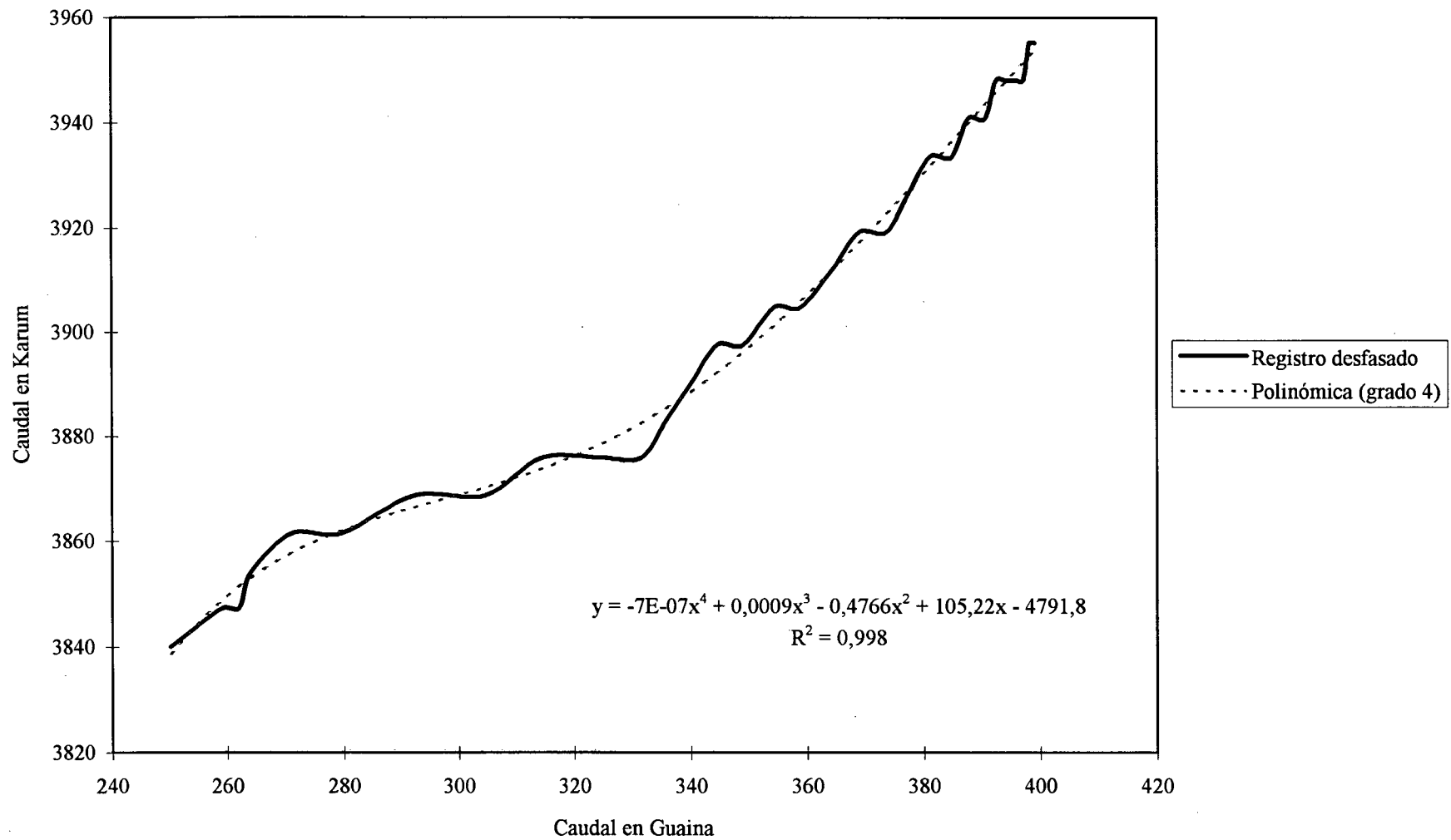
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama ascendente.
Desfase: 11 h



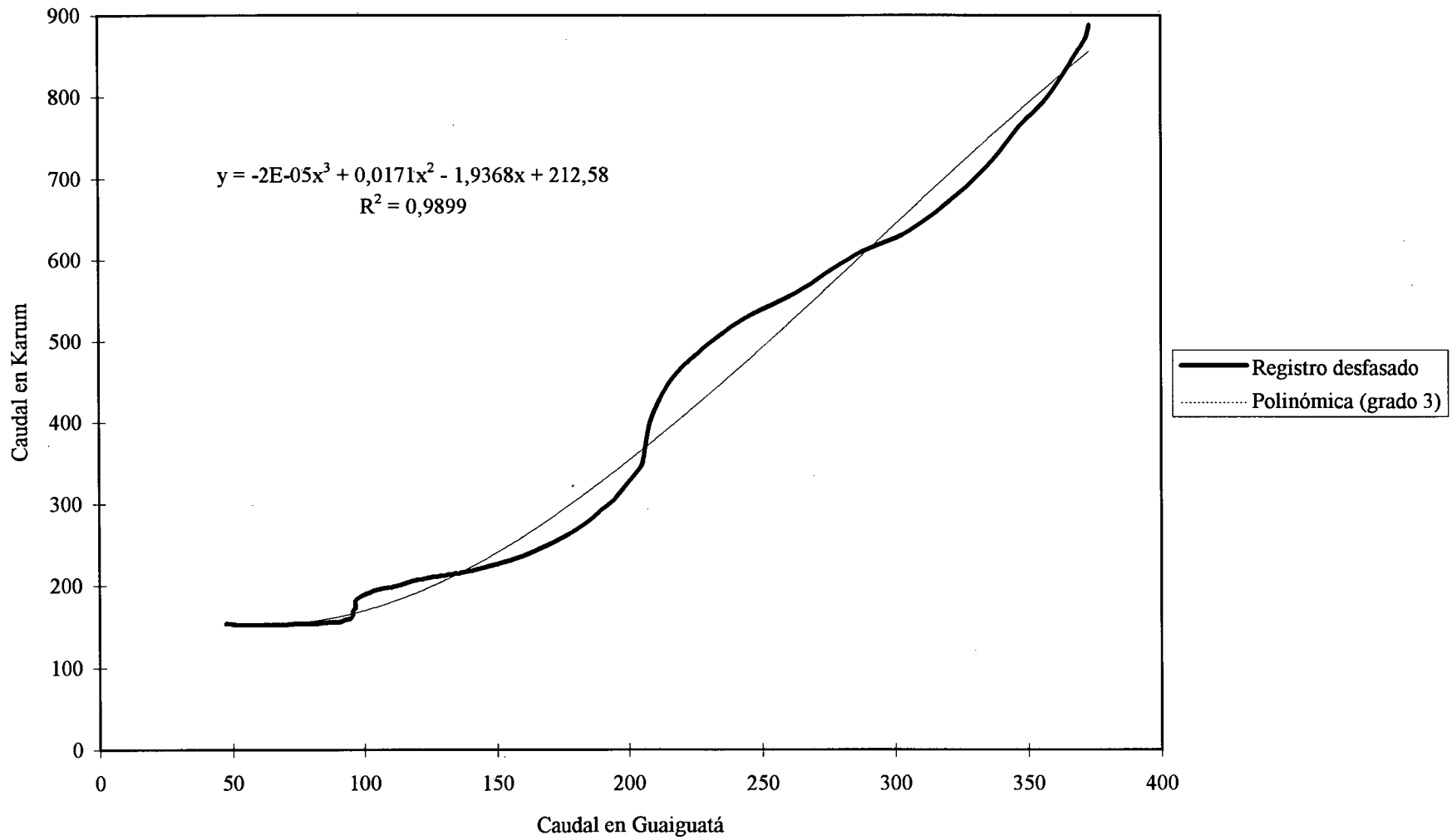
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama descendente.
Desfase: 20 h



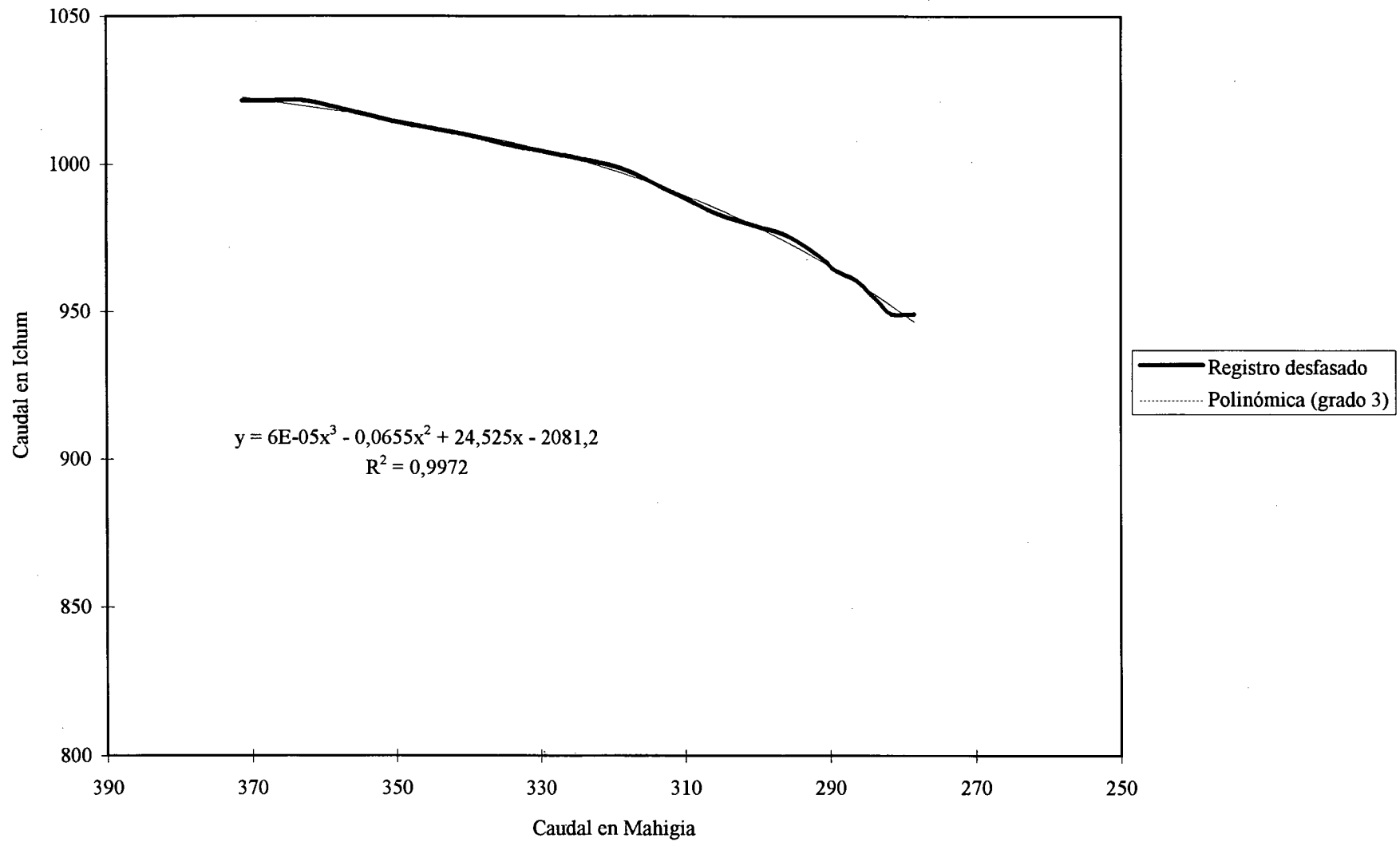
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 26-05-98, rama ascendente
Desfase: 6 h



Tramo Guaiguatá-Karum: Correlación para creciente del 11-02-98, rama ascendente.
Desfase: 10 h

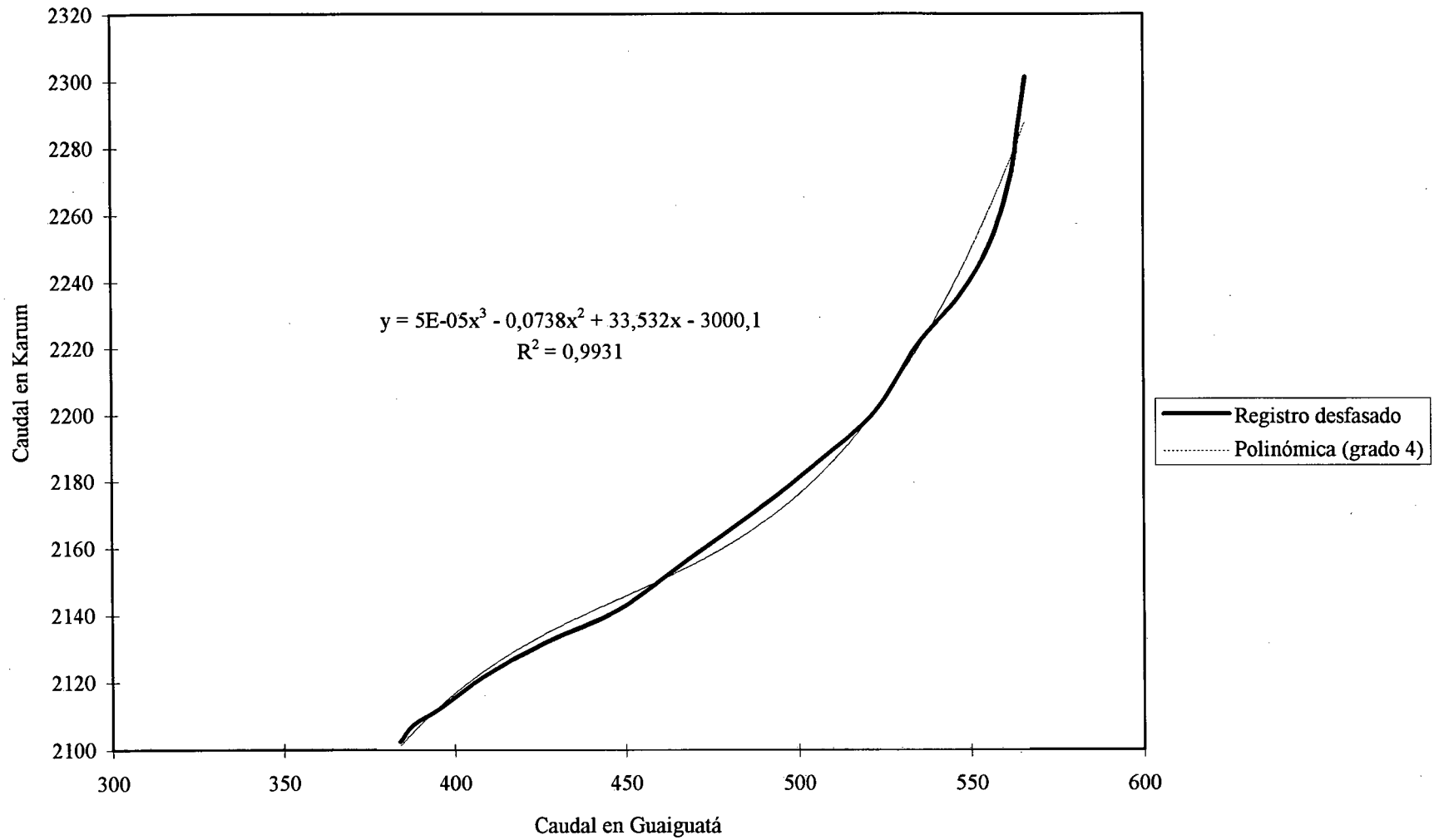


Tramo Guaiguatá-Karum: Correlación para creciente del 11-02-98, rama descendente.
Desfase: 27 h

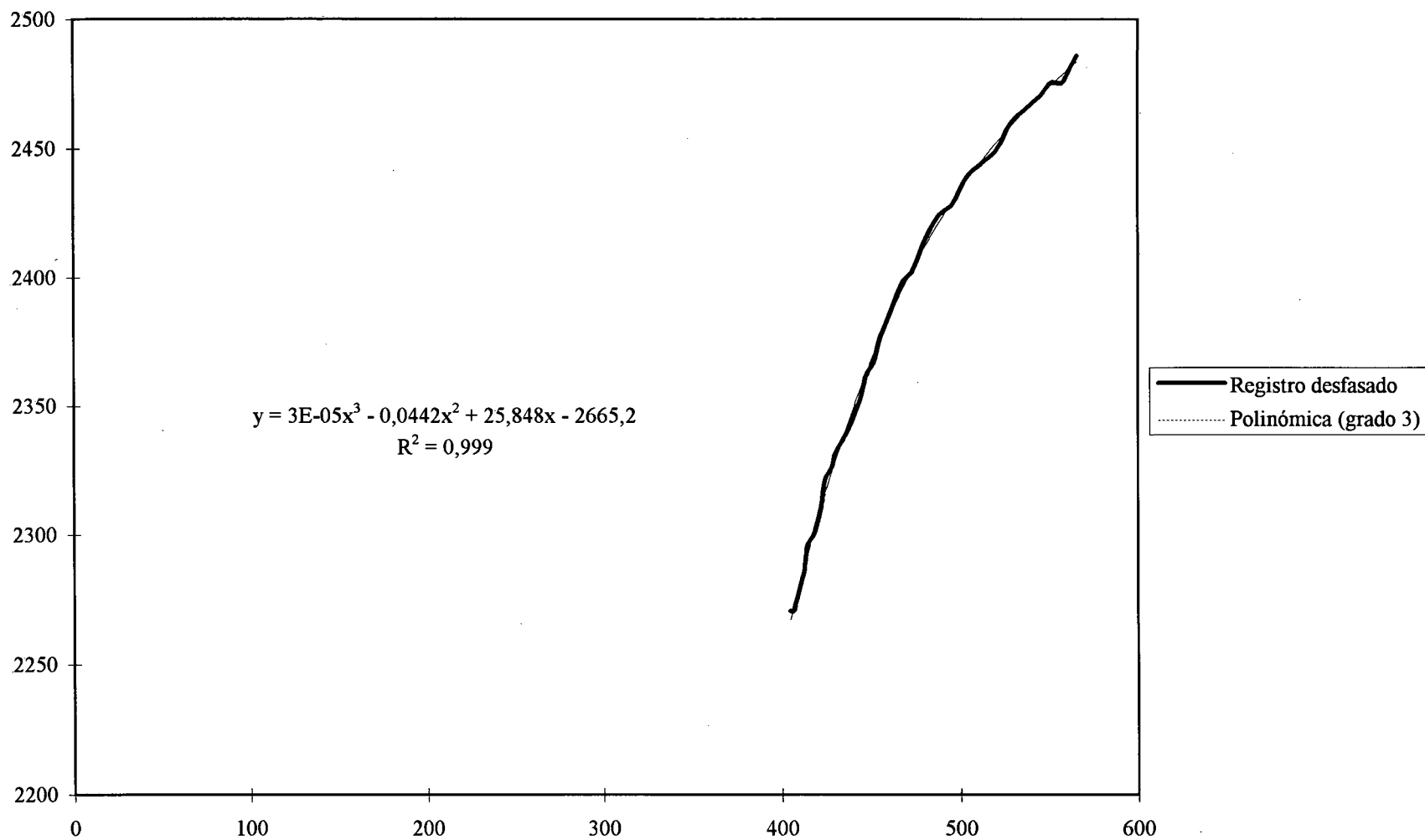


Tramo Guaguatá-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama ascendente.

Desfase: 8 h



Tramo Guaiguatá-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama descendente.
Desfase: 29 h



INTRODUCCIÓN

El Departamento de Hidrometeorología ha tenido dentro de C.V.G.-EDELCA la permanente misión de apoyar las iniciativas de desarrollo sustentable de los ríos Caroní, Paragua y Caura, tendientes a evaluar el potencial hidroeléctrico en los numerosos puntos de interés para la empresa. Parte de su contribución a esos fines se ha hecho concreta a través de un programa de mediciones hidrológicas y climatológicas, el cual se ha desarrollado e implementado por más de 25 años.

El importante volumen de información básica que se ha producido ha servido como fundamento para la toma de decisiones estratégicas en las diferentes etapas de anteproyectos, proyectos y manejo de obras que la empresa ha concebido y llevado a cabo. A la vez, ha conducido a la descripción detallada del comportamiento climatológico, hidrológico y sedimentológico de diversos sectores de las cuencas involucradas.

La determinación del estado, variaciones y tendencias de cada uno de estos aspectos de las cuencas obedece a las necesidades de la planificación y ejecución de acciones que garanticen el mejor aprovechamiento de los recursos de los que depende la producción hidroeléctrica del país. Factores tales como el acarreo y acumulación de sedimentos deben ser estimados con suficiente antelación y exactitud como para posibilitar la aplicación de medidas correctivas y/o preventivas adecuadas; el conocimiento de la susceptibilidad de los lechos y suelos de una cuenca a ser degradados y luego transportados por la red de drenaje está ligado a la comprensión de esos fenómenos.

Asimismo, el correcto manejo de los caudales de alivio de las presas será factible en la medida en que se conozca la cantidad de agua que los cauces pueden aportar en un momento dado; de la misma manera la capacidad de generación de electricidad depende de los caudales de entrada a los embalses. Tal requerimiento de información hidrológica implica el seguimiento de los procesos de la precipitación y demás elementos climatológicos, lo que involucra directamente al campo de trabajo de la meteorología.

El gran potencial hidroeléctrico que posee la cuenca del río Caroní, merced a sus características fisiográficas y climatológicas, y las implicaciones del mismo en el desarrollo energético (y por ende económico) de Venezuela, dan origen a la necesidad de un manejo realmente eficiente de sus recursos hídricos, lo que puede lograrse sólo mediante una comprensión cabal de los mismos, de sus procesos naturales y de los impactos que sobre ellos puedan generarse.

Estas consideraciones brindan gran relevancia a los servicios del Departamento de Hidrometeorología y del Departamento de Predicción y Estudios Hidroclimáticos, lo que obliga a estas dependencias de EDELCA a esforzarse por ampliar cada vez más sus campos de acción. En ese

sentido precisamente están dirigidas las iniciativas tales como el Proyecto de Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Caroní, el cual se ha planteado recientemente en el primero de los Departamentos mencionados. La intención de lograr resultados cada vez mejores en la búsqueda de los objetivos recién expuestos ha encaminado los procesos de desarrollo, ampliación y mejoramiento de la red de estaciones hidrométricas y climatológicas de la empresa y ha promovido la utilización de tecnologías de punta y la dedicación de personal calificado.

Este último aspecto se ha extendido hasta propiciar la incorporación de estudiantes de las disciplinas pertinentes a los numerosos proyectos y actividades de la empresa, contribuyendo a complementar su formación técnica y académica al permitir su participación a través de trabajos de pasantías y tesis de grado. La experiencia, el adiestramiento y logros conseguidos por estos medios le abren posibilidades de futuro ejercicio profesional a quienes encuentren en las actividades de EDELCA el ámbito apropiado para desarrollarse en su campo de trabajo. Esta coyuntura de intereses y objetivos comunes fue lo que dio cabida dentro del referido proyecto de caracterización a nuestros aportes, cuyos resultados quedan plasmados en este informe.

I. RESEÑA DE LA EMPRESA C.V.G.-EDELCA

C.V.G. Electrificación del Caroní, C.A. (EDELCA), es una empresa creada por la Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G.), para que se encargase de los estudios, producción, administración y distribución de los recursos hidroeléctricos del río Caroní.

EDELCA está concebida como una empresa de suministro de grandes bloques de energía eléctrica, tanto para la zona de desarrollo de Guayana a través del Sistema Eléctrico Regional, como para la zona central del país a través del Sistema Interconectado Nacional.

Su sede organizativa está situada en Pto. Ordaz, Estado Bolívar, y sus sedes principales se encuentran situadas en distintas zonas de la región (Macagua, Guri, Carhuachi, Tocoma) a todo lo largo del río Caroní. Cuenta también con sedes en Caracas y sub-estaciones en los estados Guárico, Aragua, Carabobo, Miranda, Yaracuy y Anzoátegui.

Entre los múltiples objetivos de la empresa EDELCA deben citarse los siguientes:

- * Diseño y mantenimiento de centrales hidroeléctricas para abastecer el sector eléctrico del país, acorde con el crecimiento cada vez más acelerado de la demanda energética.
- * Lograr la sustitución de la energía térmica por la hidráulica y a gas, de modo que el país posea para el año 2000 un panorama eléctrico totalmente diferente al actual, en vista de que aproximadamente el 75 % de la energía que se consumirá será generada por centrales hidroeléctricas.
- * Lograr un crecimiento tecnológicamente avanzado y eficiente con las necesidades del país.
- * Lograr el máximo aprovechamiento hidroeléctrico del río Caroní.

El Río Caroní nace en Venezuela cerca de la frontera con el Brasil y avanza de sur a norte unos 640 km antes de desembocar en el río Orinoco. En sus últimos 215 km, correspondientes a la baja cuenca, posee un potencial hidroeléctrico superior a los 13 millones de kilovatios.

En 1949, la firma Consultora Norteamericana Burns & Roe Inc, contratada por la Corporación Venezolana de Fomento para realizar un plan de Electrificación Nacional, presentó un informe donde recomendaba en capítulo aparte el desarrollo hidroeléctrico del río Caroní, puesto que ofrecía excelentes condiciones para su aprovechamiento, especialmente en los sitios correspondientes a los saltos inferiores.

En vista de la importancia que revestía tal proyecto, en 1953 se designó un grupo de ingenieros que conformaron la Comisión de Estudios para la Electrificación del Caroní, dependiente del Ministerio de Fomento.

A principios de 1955, se definió el primer anteproyecto de construcción de la central hidroeléctrica Macagua (Macagua I) en el salto del mismo nombre, con las características deseadas de

simplicidad, economía y flexibilidad: consta de una casa de máquinas en la que operan 6 turbinas tipo Francis, en donde cada unidad genera 61.500 Kilovatios. Esta obra comenzó a construirse en 1956 y fue concluida en 1961. Es del tipo "a filo de agua", es decir, que no requiere almacenamiento para su operación, y tiene una potencia instalada de 360 megavatios.

Entretanto, la mencionada comisión, adscrita desde 1958 a la Corporación Venezolana de Fomento, había autorizado la realización de las tareas preliminares del Proyecto Guri. En 1960, el equipo profesional que adelantaba los proyectos sobre el Caroní, pasó a formar parte de la Corporación Venezolana de Guayana; y en 1963 se constituyó formalmente la empresa C.V.G Electrificación del Caroní C.A., con un capital inicial de 514 millones de bolívares.

El 8 de Agosto de 1963 se firmó el contrato de construcción de la presa Guri. La primera etapa de la Central Hidroeléctrica Raúl Leoni quedó concluida a finales de 1978 con una capacidad instalada de 2065 MW. La etapa final de esta obra, terminada totalmente para el año de 1986, consiste fundamentalmente en una ampliación y elevación de la presa y la incorporación de 10 nuevas unidades generadoras, que elevan la capacidad instalada del conjunto hidroeléctrico a 10.000 MW. La generación de esta planta puede alcanzar los 50.00 GWH al año, capaces de abastecer un consumo equivalente a 300.000 barriles diarios de petróleo y permitiendo así cumplir con la política de sustitución de termoelectricidad por hidroelectricidad, con el fin de ahorrar combustibles líquidos que pueden ser utilizados para su exportación o su conservación con otros fines.

La construcción de la presa Macagua II se inició para el año 1985; fue inaugurada el 23 de Enero de 1997. Esta central hidroeléctrica tiene una casa de máquinas con 16 unidades que genera una potencia de 2.570.000 kilovatios.

EDELCA, como empresa pionera en el desarrollo hidroeléctrico, tiene como objetivo principal desarrollar paulatinamente todo el potencial del río Caroní a medida que las necesidades energéticas del país lo requieran. A estos fines, ya han sido estudiadas los posibles sitios de presa existentes en el Bajo Caroní y en las cuencas del Alto Caroní y el Alto Paragua.

En el bajo Caroní, se tiene como objetivo principal desarrollar todo el potencial existente entre los embalses de Guri y Macagua. La secuencia de construcción de centros de aprovechamiento hidroeléctrico contempla dos proyectos: Carhuachi Y Tocoma.

* Proyecto Carhuachi:

Cercano al paso Carhuachi, a 43 kilómetros de distancia aguas abajo de la central hidroeléctrica Raúl Leoni en Guri, se encuentra el sitio de Carhuachi, donde se construye una presa y una casa de máquinas que constará con 14 unidades para generar una potencia total de 2.424 megavatios. El nivel normal del embalse estará a una cota de 91,25 metros sobre el nivel del mar, teniendo un área de embalse de 238 kilómetros cuadrados.

* Proyecto Tocoma:

Esta área se encuentra ubicada a 18 kilómetros aguas abajo de la central hidroeléctrica Raúl Leoni, en la desembocadura del río Claro con el río Caroní. Esta presa contará con una casa de máquinas en la que serán instaladas 14 unidades para generar una potencia total de 2.424 megavatios. Tocoma será el último proyecto a ejecutar dentro del plan de construcción del aprovechamiento hidroeléctrico del Bajo Caroní.

Según el Inventario Hidroeléctrico del río Caroní fueron considerados 34 sitios de posible aprovechamiento hidroeléctrico, tomando como base una producción de 50 MW. Sobre el propio río se encuentran tres de estos sitios: Tayucay, Aripichí y Eutobarima.

Una consecuencia importante del desarrollo de estos sitios será la regulación del caudal que entra en Guri. Esto implica que, debido a que los futuros embalses estarán situados en el Alto Caroní, los soportes de agua podrían regularse a partir de estas centrales, lo cual aumentaría aproximadamente en un 10 % la energía generada en Guri para ese momento.

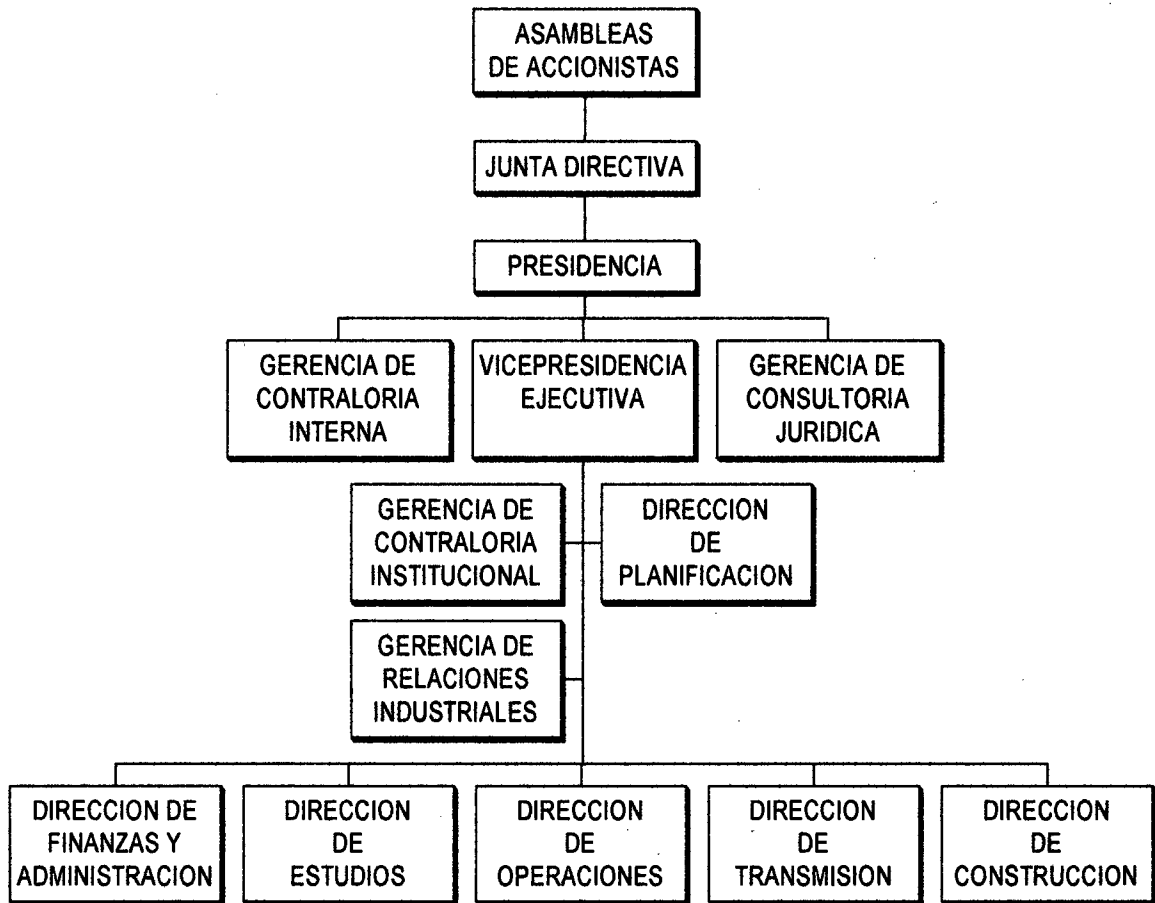
Estos proyectos se encuentran en estudio y son realizables a mediano y largo plazo, pudiendo de esta forma satisfacer las necesidades energéticas para principios del próximo siglo.

La consecución de objetivos de desarrollo de la magnitud de los que EDELCA se plantea sin el sacrificio del equilibrio existente en el ambiente de la región de Guayana se fundamenta en las siguientes premisas:

Ser una empresa líder en la prestación del servicio eléctrico, comprometida con la conservación del medio ambiente, con un mercado diversificado a nivel nacional e internacional; dotada de tecnologías de vanguardia y conformada por un recurso humano competente; orientada a la obtención de adecuados índices de calidad, rentabilidad y eficiencia; que satisfaga los requerimientos de nuestros clientes, empleados, accionistas, comunidades, proveedores y desarrollo integral del país.

El organigrama general de la empresa C.V.G. Electrificación del Caroní C.A. EDELCA, actualmente está conformado de la siguiente manera:

Organigrama estructural de la empresa C.V.G.-EDELCA



II. ANTECEDENTES

El programa de mediciones hidrológicas y climatológicas desarrollado por el Departamento de Hidrometeorología ha logrado recopilar un gran volumen de información básica, misma que ha sido de importante aplicabilidad dentro de las actividades de esta dependencia de la empresa. El Departamento ha realizado diversos trabajos relacionados con la dinámica fluvial de los ríos de interés, fundamentados en los registros de niveles, caudales y de precipitación de las estaciones ubicadas dentro de sus cuencas.

Entre estos trabajos, podemos destacar la implementación de modelos de escorrentía fluvial para el pronóstico de caudales de entrada a Guri, análisis de caudales y tiempos de viaje en el bajo Caroní (aguas abajo del Embalse de Guri), tránsitos de crecientes, elaboración de las curvas de gasto en todas las estaciones hidrométricas que maneja el Departamento, y la caracterización climatológica y sedimentológica de la cuenca del río Caroní.

Queriendo ampliar los alcances de esa labor, el Departamento se ha planteado este año (1998) un objetivo de gran envergadura que lleva como nombre "Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Caroní", donde a partir de información cartográfica 1:25.000 y el registro de la información generada por el Sistema Hidrológico Automático, se elaborará un estudio hidrológico e hidrográfico detallado de cada una de las subcuencas presentes en la referida hoyo hidrográfica. El mismo tendrá la finalidad de resaltar tópicos como aportes volumétricos porcentuales, sedimentos, tiempos de viaje, tiempos de concentración, pendientes por tramo, vegetación, suelos, etc., que permitan una descripción detallada de los 95.000 km² que posee dicha cuenca.

En tal sentido, como un primer paso hacia ese gran objetivo, se nos encomendó la tarea de iniciar el estudio inherente a la cuenca alta del río Paragua, hasta la estación de Karum. Si bien es cierto que se han realizado ya algunos estudios hidrológicos en esta área, es la primera vez que se efectúa con la información transmitida en tiempo real del S.H.A.

III. OBJETIVOS

III. I. Objetivos generales

Como se mencionó anteriormente, el proceso de caracterización de la cuenca del alto Paragua es parte del Proyecto de Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Caroní, trabajo a gran escala que adelanta el Departamento de Hidrometeorología de EDELCA. El mismo contempla la determinación de diversas características hidrológicas de la cuenca; entre ellas pueden citarse los

tiempos de viaje y de concentración por tramos específicos, los aportes porcentuales entre los puntos de mediciones hidrométricas, las áreas de las subcuencas involucradas y las variaciones en la ocurrencia de las precipitaciones sobre la zona. Debidamente analizada, esta información permitirá una visualización del comportamiento de la cuenca del Paragua en diversas condiciones de caudales y precipitaciones.

En consecuencia, persigue la obtención de valores preliminares de los parámetros y características de interés, así como la determinación de la información, análisis y procesamiento que harán falta para cumplir con los subsecuentes objetivos de dicho proyecto.

III. II. Objetivos específicos

- * Realizar un análisis cartográfico para la determinación de las siguientes características de la cuenca alta del Paragua y de sus cauces: área, perímetro y pendiente media de la cuenca y de las subcuencas, órdenes de las redes de drenaje, número de tributarios, pendiente media y longitud de cauces principales.
- * Determinar diversos parámetros hidrológicos de la cuenca, tales como: tiempos de concentración, tiempos de viaje, caudales medios y sus rangos de variación, aportes (caudales) porcentuales de cauces tributarios, influencias de la precipitación y acarreo de sedimentos.
- * Como parte de la caracterización, incluir descripciones de elementos fisiográficos tales como la composición litológica y de suelos, distribución de la vegetación y los aspectos geomorfológicos más resaltantes.

Incluir una descripción de la distribución de la población y actividades humanas y los impactos de ellas sobre la región y una breve caracterización climatológica de la misma, mencionando las tendencias y valores medios de elementos como la temperatura media, humedad relativa, precipitación, radiación e insolación.

El objetivo de tales descripciones es reunir suficiente información acerca de la cuenca que permita relacionar los distintos aspectos de su geografía, buscando una mayor comprensión de los procesos que en ella se desarrollan.

IV. ALCANCE Y LIMITACIONES

La mayor limitación para este estudio lo constituye el tiempo estipulado para el trabajo de pasantía. Según las normativas internas de la Universidad Central de Venezuela en cuanto a un trabajo de pasantía remunerada, el mismo debe completarse en un lapso de seis semanas, por lo que fue ese el

tiempo que la empresa concedió para ello.

Desde un principio se hizo evidente que la adquisición y recopilación del material cartográfico y su posterior análisis consumirían una parte considerable de este tiempo, dado que en el Departamento de Hidrometeorología no se contaba con los mapas topográficos de la zona a estudiar. Además de esto, restaría cubrir todavía numerosos aspectos del plan de trabajo de la pasantía, aparte de los cálculos que derivarían del trabajo planimétrico.

En vista de esto, para la caracterización hidrográfica se decidió trabajar con los datos ya determinados de áreas, cotas y otros parámetros, suministrados cortésmente por C.V.G. TECMIN a través del Proyecto Inventario de los Recursos Naturales de Guayana.

En cuanto a la caracterización hidrológica de la cuenca, cabe destacar que la información disponible fue también insuficiente para la obtención de resultados más significativos que los alcanzados. En el pasado, el mayor esfuerzo de recopilación de datos y mediciones se ha efectuado en la parte baja de la cuenca del Caroní, por las necesidades obvias e inmediatas del desarrollo hidroeléctrico en esa región.

Las estaciones hidrométricas en la alta cuenca son, por ende, de muy reciente instalación. Como consecuencia de ello, en este estudio se dispuso de un corto período de registros común a todas las estaciones, pertenecientes en su totalidad al Sistema Hidrológico Automático que EDELCA ha venido desarrollando en los últimos 2 años (1997 - 1998).

V. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA ESTUDIADA

V. I. Delimitación

La cuenca alta del río Paragua se encuentra ubicada en el sudeste de la República de Venezuela, en la parte sur-occidental del Estado Bolívar. Su divisoria coincide, sobre la Sierra de Pacaraima, con la frontera de Venezuela con el Brasil y colinda con las cuencas de los ríos Caroní y Caura al Este y al Oeste, respectivamente. El límite que la separa de la cuenca baja se ubica en los Raudales de Auraima, donde el río deja de correr sobre la provincia geológica de Roraima y pasa a hacerlo sobre la de Pastora.

Políticamente, está conformada por los Municipios Barceloneta y San Francisco del Distrito Heres del Estado Bolívar, e incluye dos extensas regiones bajo las figuras de Áreas Bajo Régimen de Administración Especial:

- * Zona Protectora Sur del Estado Bolívar (Decreto 542 del 27 de junio de 1974), en toda la cuenca alta y a lo largo de la margen izquierda de la cuenca baja,

* Reserva Forestal La Paragua (Decreto 1046 del 23 de enero de 1965), a lo largo de la margen derecha de la baja cuenca.

A los efectos de este estudio, se abarcará la cuenca del Paragua desde sus cabeceras hasta la estación de Karum, en la confluencia del río de igual nombre y el Paragua. Esta zona queda totalmente comprendida entre los paralelos de 3°31' y 5°40' N y los meridianos de 62°27' y 64°06' W.

V. II. Hidrografía

Las cabeceras del río Paragua se encuentran en la Sierra de Pacaraima a unos 750 m.s.n.m., donde nacen sus primeros tributarios: los ríos Paramichí, Okasiari y Aguapira. Desde allí hasta su desembocadura en el Caroní tiene una longitud total de unos 567 km. Entre los principales de sus afluentes pueden citarse los ríos Ichum, Kurutú, Karum, Karataka, Oris, Aza y Chiguao. Otros tributarios que merecen ser mencionados son el Marik, Kampetoi, Abareima y Tonoro.

Hasta la estación de Karum, el cauce principal tiene una longitud de unos 284 km, y en ese trayecto recibe los aportes de los ríos Ichum, Karum, Kurutú, Marik y Antabará (tributario del Karum). Su dirección general es sudeste - nordeste hasta encontrar el cerro Guaiquinima (*Waikinima tepuy*), al cual rodea por su borde occidental para tomar dirección nordeste hacia la población de La Paragua, desde donde sigue un rumbo oeste - este hasta encontrar al Caroní.

El área de la cuenca hasta Karum es de 14.319 km², un 37,5 % del total de la cuenca del Alto y Bajo Paragua, la cual es de unos 38.204 km² hasta San Pedro de Las Bocas en su confluencia con el Caroní (TECMIN, 1998).

El patrón de drenaje más común es el dendrítico, observándose con menos frecuencia un patrón rectangular, especialmente sobre las rocas sedimentarias que constituyen el lecho de los puntos más altos. En los cauces de estas zonas es común la ocurrencia de saltos.

El cuadro que se presenta a continuación intenta reunir algunas de las características hidrográficas del Alto Paragua y sus tributarios principales, según datos suministrados por C.V.G.-EDELCA y C.V.G.-TECMIN (Proyecto Inventario de los Recursos Naturales de Guayana; Informe de avance: Hidrología):

Tabla 1

Cauce	Longitud (km)	Area de subcuenca (km ²)	Cotas de extremos (m.s.n.m.)	Desnivel (m)
Paragua**	284	14.319	750 ; 295	455
Ichum*	125	2.627	1280 ; 313	967
Kurutú*	87	3.090		
Marik*	89	1.654	700 ; 307	393
Karum*	202	7.932	720 ; 295	425
Antabari [†]	82	1.795		

* Desde cabeceras hasta confluencia con el Paragua.

** Desde cabeceras hasta la estación de Karum.

[†] Desde cabeceras hasta confluencia con el río Karum.

V. III. Población y actividades

La ocupación del territorio de la cuenca alta del Paragua, y en general en la cuenca del Caroní, presenta un patrón bastante disperso, donde los centros habitados se alternan con grandes extensiones despobladas.

En el caso específico de la cuenca del río Paragua, el núcleo poblado de mayor significación es La Paragua, ubicada en la baja cuenca y comunicada con Ciudad Guayana por vía terrestre a través de la troncal 16; una pista de aterrizaje permite también la comunicación por vía aérea. Además de sustentar ciertas actividades agropecuarias y de extracción forestal, sirve como centro de abastecimiento y de actividad comercial para las poblaciones menores de la zona.

Estas últimas, en su mayoría, son comunidades dedicadas a la extracción de oro y diamantes, lo cual les confiere una gran variabilidad demográfica en función del éxito en el aprovechamiento de los yacimientos, disponibilidad de recursos y otros factores propios de la actividad minera artesanal que las hacen demográficamente inestables. A lo anterior se suma la inconveniencia de que los accesos fluvial y terrestre a muchos de los asentamientos de la zona sean intransitables durante ciertas épocas del año.

Tradicionalmente las poblaciones de esta región estaban conformadas por habitantes de las distintas etnias indígenas. La estratégica vía fluvial que el río Orinoco ofrece hasta el Atlántico, permitió la fundación de asentamientos como San Félix y La Paragua y desde allí la comercialización de la madera, cuya explotación era la principal actividad.

Desde principios de este siglo, el proceso de entrada de pobladores foráneos ha obedecido

varias causas e intereses, siendo el más común el de la explotación de las riquezas minerales de la Guayana. El descubrimiento de las grandes reservas de mineral de hierro fue el propulsor de los grandes cambios en la dinámica de ocupación de la cuenca baja del Caroní, al introducir nuevos requerimientos de personal, infraestructura y energía.

Con la fundación de las ciudades de Puerto Ordaz y Ciudad Piar y el subsecuente crecimiento del parque industrial de Ciudad Guayana y del desarrollo hidroeléctrico, terminó de consolidarse la tendencia hacia una rápida concentración de la población en la zona norte de la cuenca del Caroní.

Durante esa evolución, desde los años 50 hasta el presente, también en la alta cuenca surgieron y se consolidaron diversas comunidades, pero dedicadas principalmente a la explotación del oro y del diamante y, en menor proporción, al desarrollo de actividades agropecuarias y comerciales en la región. Entre ellas destacan, aparte de La Paragua (sede de las autoridades municipales), las comunidades de Periquera, El Caruto, El Casabe, Manarito, Salto Auraima, El Gusano, Parupa del Paragua, Karum y Mahigia.

En el rumbo hacia lo que hoy es la delimitación política del alto Caroní, y en particular el Alto Paragua, dos procesos dentro de las actividades económicas de la región fueron cruciales:

- * El constante y desordenado surgir de nuevos asentamientos producto del auge de la explotación minera.
- * La introducción de tecnologías que cambiaron los sistemas artesanales y rudimentarios de explotación por nuevos sistemas que, siendo más eficientes, tenían un impacto mayor sobre los cauces. Entre ellos, destaca el uso de monitores hidráulicos en aluviones y sobre el cauce de los ríos.

Siendo ya evidentes los cambios que dichos procesos causaron en las características naturales de los cauces, el Estado dio celeridad a la creación de figuras legales tendientes al ordenamiento, protección y manejo de las principales porciones de la cuenca del Caroní. La Zona Protectora Sur del Estado Bolívar y el Parque Nacional Canaima son ejemplos de estas iniciativas según las cuales existe el marco legal que regule, al menos formalmente, tanto el desarrollo de centros poblados como las actividades a las que ellos se dediquen.

V. IV. Climatología

V. IV. I. Precipitación

El área en estudio contempla dos regímenes pluviométricos bien definidos: uno, bimodal, correspondiente a la parte comprendida entre el nacimiento del río Paragua hasta el eje Ichum-Guaiguatá; y uno unimodal en la parte del área restante, hasta Karum.

En la primera, la precipitación máxima anual ocurre generalmente a principios de la época de invierno. Sin embargo, existen valores relativamente altos de lluvia en el mes de Noviembre, motivados posiblemente por la influencia de las masas de aire ecuatorial provenientes de las selvas Amazónicas, lo cual trae como consecuencia la temporada de lluvias en el sur del país. Los mínimos ocurren durante el período de posición baja del sol, entre los meses de febrero y marzo. En cuanto al valor medio anual está por los 3300 mm. La amplitud de los registros de lluvia anual entre las estaciones ubicadas en la zona abarca desde los 2900 hasta los 4000 mm.

La otra parte del área considerada, desde el eje Ichum-Guaiguatá hasta Karum, está definida por un comportamiento unimodal de precipitación, lo cual ocurre entre los meses de junio y julio, producto del ascenso al hemisferio norte de la convergencia intertropical (ITC), asociado al flujo de aire húmedo, caliente e inestable de la masa de aire ecuatorial continental.

V. IV. II. Otros parámetros climatológicos

La reciente instalación en la parte alta de la cuenca de dos estaciones climatológicas compactas electrónicas del tipo satelital, pertenecientes al Sistema Hidrológico Automático (Mahigia e Ichum), ha permitido refinar la visión general que desde el punto de vista climatológico se tenía de esta región, a pesar de sus cortos registros.

Por ejemplo, la temperatura media anual en Mahigia está por el orden de los 25,8 grados Celcius, mientras que en Ichum es de 26,1 grados. La humedad relativa media anual en Mahigia es de 81.7 % y en Ichum 70 %. La radiación media mensual en Mahigia es de 30.000 W/m² y en Ichum es de 40.000 W/m², acorde esto último con la insolación media mensual de 238 y 275 horas, respectivamente. Por otra parte, la presión atmosférica media anual en Mahigia es de 972.8 hPa, mientras que en Ichum, por estar a menor altitud, es de 974 hPa.

Si se toman en consideración las ubicaciones relativas de ambas estaciones, es lógico pensar que en la estación de Mahigia la precipitación y humedad relativa sean mayores que las de Ichum, así como su presión atmosférica menor, al estar la estación de Mahigia más al sur y a mayor altitud.

En el sector más al norte de la cuenca alta del Paragua está ubicado el campamento de Karum

administrado por el Departamento de Hidrometeorología. Se encuentra en un sitio de posible aprovechamiento hidroeléctrico, donde aparte de haberse realizado un monitoreo hidrológico por más de 15 años, se instaló en el año 1979 una estación climatológica que ha permitido la caracterización de las zonas adyacentes a la misma.

Bajo estas premisas, se ha determinado que la zona en cuestión posee una evaporación media mensual de 136 mm, una humedad relativa media anual de 83.4 %, una temperatura media anual de 25.4 grados Celcius, presión atmosférica media mensual de 974.7 hPa, radiación media mensual de 12.500 W/ m² y una insolación media mensual de 187 horas.

V. V. Geología y geomorfología

Las cuencas de los ríos Paragua y Caroní están situadas en la provincia fisiográfica del Escudo De Guayana, donde se distinguen cuatro provincias geológicas:

1. Provincia de Imataca: compuesta por rocas metasedimentarias y gneises graníticos complejamente plegados e intrusiones graníticas posteriores. Está limitada al Oeste por el río Caura; al Norte por el Orinoco, hasta el delta del mismo, al Este; y por las fallas de Guri y Santa Bárbara al Sur. La edad de la provincia está comprendida entre los 3500 y 3600 millones de años (MA), haciendo de sus rocas las más antiguas de Venezuela (Montgomery, 1977). Estas rocas fueron afectadas por procesos geológicos más recientes, resultando una variedad litológica que incluye distintos gneises, rocas graníticas, cuarcitas ferruginosas y granulitas metamorfizadas, entre otras.
2. Provincia de Pastora: se ubica al sur de la Provincia de Imataca, extendida como una faja en contacto con sus rocas y también con las de las provincias de Roraima y Cuchivero, en las cuencas bajas del Paragua y Caroní. Está compuesta por una secuencia de rocas volcánicas ácidas y básicas y rocas sedimentarias de bajo metamorfismo; las edades estimadas van desde los 2000 a los 2700 MA (González de Juana, 1980). Varios autores han definido distintas formaciones y grupos, intentando establecer la estratigrafía que mejor corresponda a este variado conjunto de rocas que incluye anfíbolitas, gneises, areniscas, esquistos, cuarcitas, granitos y muchos otros.
3. Provincia de Cuchivero: ubicada en las cuencas altas del Caroní y el Paragua. Comprende grandes extensiones de rocas plutónicas (granitos, dioritas, tonalitas), metavolcánicas (tobas y lavas con riolitas) y metasedimentarias. Se han definido varias estructuras geológicas para describir la presencia de rocas volcánicas ácidas (formación Caicara), rocas metamórficas máficas (metabasitas) y las intrusiones relativamente más recientes de la provincia.

4. Provincia de Roraima: se extiende en el Escudo de Guayana desde Surinam hasta el Estado Amazonas y, posiblemente, llega hasta la Sierra La Macarena en Colombia. Está conformada por estratos predominantemente horizontales de rocas sedimentarias y, en menor proporción, por rocas ígneas intrusivas. Es en la cuenca del alto Caroní donde tiene mejor continuidad, pues hacia la parte occidental de la cuenca alta del Paragua las secuencias estratigráficas comienzan a aparecer dispersas y aisladas sobre las rocas más antiguas de otras provincias geológicas del Escudo. En la región de Santa Elena de Uairén, donde se encuentra su mayor espesor, están presentes cuatro formaciones (Reid, 1974). En orden de mayor a menor profundidad, estas son: Uairén, compuesta por conglomerados y areniscas; Kukenán, de lutitas físciles; Uaimapué, de ftanitas, limolitas, arcosas y jaspes; y Matauí, de ortocuarcita. Las litologías sedimentarias corresponderían a ambientes propios de delta, depositados por antiguas corrientes de diversas direcciones. Las intrusiones ígneas, de edades entre unos 2090 y 1593 MA, se presentan en forma de sills y diques a diversos niveles y lacolitos de diabasa que afloran en grandes superficies.

La región del piedemonte guayanés corresponde a la Provincia de Imataca, sobre la que discurre el bajo Caroní. En esta zona los afloramientos de cuarcitas ferruginosas, siendo más resistentes a los agentes erosivos, conforman los relieves más elevados (Cerro Bolívar, fila de Necuima). Las rocas como los gneises graníticos, por ser más fácilmente erosionadas, forman lomas y superficies de aplanamiento más recientes. Se produce así un paisaje de penillanura con pequeñas altiplanicies de erosión de poca altura.

En el bajo Caroní, cerca de su confluencia con el Orinoco, se presentan llanuras aluviales con remanentes de rocas duras con granitos y cuarcitas ferruginosas; más cerca de la desembocadura aparecen algunas llanuras de inundación.

La confluencia de los ríos Paragua y Caroní se produce sobre la Provincia de Pastora. En esta zona el paisaje está conformado por lomas y colinas suavemente onduladas que alternan con extensas zonas planas, y son frecuentes las filas de rumbo con direcciones este-oeste y nordeste-sudoeste como las que se observan en la Provincia de Imataca. También pueden observarse algunas planicies de inundación, como las que ocurren en las desembocaduras de los ríos Aza y Chiguao.

Los cauces del Paragua y el Caroní alcanzan su máxima anchura sobre la Provincia de Pastora, en la cual han erosionado linealmente hasta la roca fresca. Esto ha llevado a que ocurra una erosión lateral y ha resultado en un patrón de drenaje con numerosas islas.

La región por la que corre el alto Paragua corresponde a la provincia geológica de Cuchivero,

de basamento ígneo-metamórfico. Este basamento se presenta como un material homogéneo que rodea al macizo estructural central (Provincia de Roraima) por su sector occidental, formando un paisaje uniforme de colinas y cerros separados entre sí por numerosos valles pequeños que conforman una red dendrítica de drenaje. Esta secuencia se extiende al Oeste del Paragua hasta las cabeceras del mismo, donde pueden observarse también sectores de areniscas y conglomerados de las Unidades Inferior y Media de la Provincia de Roraima, como en las nacientes de los ríos Paramichí y Aguapira y la cuenca del Okasiari.

Otros afloramientos del Grupo Roraima son los de la Unidad Media en la cuenca del río Ichum, compuesta por areniscas conglomeráticas de grano fino con fragmentos de rocas volcánicas, y los de la Unidad Inferior de las cabeceras del río Kurutú, compuesta por areniscas cuarzosas y conglomeráticas y conglomerados intraformacionales.

La Provincia de Cuchivero, con diversas tobas, brechas y lavas, se presenta ampliamente en la mayor parte de la cuenca alta del Paragua. Existen afloramientos de las rocas graníticas del Grupo Cuchivero, como en las cabeceras del Antabará y del Paure-Murán. Pueden encontrarse afloramientos del llamado Grupo Cuchivero Sin Diferenciar, compuesto por granitos y diversas dioritas, en los tributarios del Karum; y observarse el Granito de Santa Rosalía en los tributarios del Marik.

V. VI. Suelos

Los suelos de una región dada deben entenderse como producto de la interacción de diversos factores como la geología, la hidrología, el clima, la vegetación y el relieve, entre otros. En este sentido, toma validez el conocimiento de la litología asociada a la región en cuestión, pues de la degradación y alteración de las rocas expuestas y de los estratos superiores se origina la materia inorgánica que eventualmente está contenida en los suelos. La importancia de estos estudios, desde el punto de vista hidrológico, puede extrapolarse hacia los proyectos de determinación de acarreo de sedimentos, pues la naturaleza de los suelos es de cierta forma indicativa de la propensión y vulnerabilidad de los mismos a los procesos erosivos.

Otro factor resaltante en estas consideraciones es la cobertura vegetal sobre un suelo determinado, pues guarda una relación directa con la susceptibilidad de éste a la erosión. De manera recíproca, las características de los suelos impondrán las condiciones para la proliferación de las especies vegetales que en ellos se radican. Evaluando el caso de las cuencas del Paragua y del Caroní, debe hacerse notorio el hecho de que suelos poco profundos, como los que suelen hallarse en estas regiones, brindan poca oportunidad de recuperación a la capa vegetal que ha sufrido deforestación; la escasez de nutrientes aprovechables es agravante de esta situación.

En toda la cuenca del Caroní pueden encontrarse seis de los diez órdenes que establece la clasificación "Soil Taxonomy", del Departamento de Agricultura de los EE.UU. Usualmente son suelos muy superficiales (menos de 25 cm de profundidad) en las regiones de sabana, mientras que en las zonas boscosas son desde moderadamente profundos (entre 0,5 y 1 m) a profundos (más de 1 m).

En general son suelos ácidos, fuertemente lixiviados y muy pobres en micronutrientes y minerales primarios. Su composición mineralógica, dada la intensa alteración a que han sido sometidos, contiene principalmente materiales como el cuarzo, los sesquióxidos de hierro y aluminio, arcillas del tipo de la caolinita y otros compuestos como la gibsita.

De acuerdo a la litología de la que derivan, puede hacerse una diferenciación entre los tipos de suelos más extendidos entre los presentes en el Escudo de Guayana:

- * Suelos formados a partir de areniscas de la Provincia de Roraima: se ubican preferentemente sobre relieves de cuevas monoclinales, altiplanicies y al pie de los escarpes. Son poco profundos y de textura arenosa. Se consideran como Entisoles.
- * Suelos formados a partir de rocas ígneas de la Provincia de Roraima: se extienden desde la Sierra de Lema hasta Sta. Elena de Uairén y desde el río Caroní hasta la frontera venezolana en la zona en reclamación. Se derivan de las diabasas que se desarrollaron como intrusiones ígneas en las areniscas. Presentan un profundo manto de alteración con textura arcillosa y arcillosa-arenosa. Se consideran dentro del orden de los Oxisoles y Ultisoles, con vegetación predominante de sabana.
- * Suelos formados a partir de las rocas de la Provincia de Cuchivero: se ubican sobre una topografía ondulada (penillanura) de lomas, colinas, depósitos coluvio-aluviales y pequeños valles entre colinas. Presentan texturas arcillosas y un profundo perfil de meteorización. Están presentes hacia el Sur y sudeste de Santa Elena de Uairén y en el alto Paragua, en afloramientos de las rocas plutónicas y metavolcánicas de la mencionada provincia. Se consideran entre los Oxisoles y Ultisoles.
- * Suelos formados a partir de las rocas de Imataca y Pastora: se ubican en la penillanura de la cuenca baja del Caroní, donde la topografía es poco ondulada, con lomas y colinas de escasa altura. Abarcan la región entre la confluencia de los ríos Paragua y Caroní hasta la desembocadura de este último en el Orinoco. Se consideran predominantemente dentro de los Oxisoles, Ultisoles y Entisoles, con menor proporción de Alfisoles e Inceptisoles.

La distribución de los espesores de los suelos en la región del alto Paragua obedece, aproximadamente, al concepto teórico de que aquellos suelos de zonas boscosas son más profundos que los de zonas de arbustos, herbazales o sabanas. La inclusión en este informe de un aparte acerca de la distribución de la cobertura vegetal tiene la intención de permitir comparaciones de este tipo, aunque con criterios de evaluación preliminar.

Se presenta a continuación una descripción de la zona estudiada en función de la profundidad de los suelos (TECMIN):

- * Suelos muy superficiales (menos de 25 cm): pueden encontrarse suelos de este tipo en las regiones altas de la cuenca del río Ichum y al Oeste del río Kurutú, en el sector de Wanakoko.
- * Suelos superficiales (entre 25 y 50 cm): a esta descripción se acomodan los suelos de la zona de la cuenca media del río Karum y de su desembocadura hacia el Paragua; también una pequeña región en las cabeceras del Marik.
- * Suelos moderadamente profundos (entre 0,5 y 1,0 m): región al Sur del Paure-Murán.
- * Suelos profundos (más de 1,0 m): bajo vegetación boscosa, se extienden por gran parte de la cuenca alta del Paragua, incluyendo las cuencas altas de los ríos Antabará, Karum y Paure-Murán; también la extensa región entre estos dos últimos y las áreas de desembocadura del Marik y el Kurutú hacia el Paragua.

V. VII. Vegetación

En las cuencas de los ríos Paragua y Caroní existe gran variedad de especies vegetales, como consecuencia del número igualmente grande de ambientes físicos que presentan. Los grupos de vegetación se desarrollan en tres niveles de altitud principales, determinados por la topografía de las zonas de la baja cuenca (piso macrotérmico, 50 - 600 m.s.n.m.), la cuenca alta (piso mesotérmico, 800 - 1500 m.s.n.m.) y las cumbres de los tepuyes (piso submicrotérmico, 1800 - 2800 m.s.n.m.).

La vegetación en la zona del alto Paragua es predominantemente boscosa, con la ocurrencia de algunos sectores de arbustos, herbazales y sabanas; pueden encontrarse especies muy especializadas y hasta endémicas, localizadas en las cumbres y simas de los tepuyes. Los distintos bosques presentes son (Huber, 1986):

- * tropófilo macrotérmico (deciduo a semideciduo), en la porción septentrional de la cuenca;
- * ombrófilo macrotérmico (predominantemente siempreverde), en el centro;

- * ombrófilo submesotérmico montano bajo (siempreverde), en las bases de vertientes tepuyanas;
- * ombrófilo mesotérmico montano (siempreverde), en las vertientes tepuyanas altas;
- * ombrófilo submicrotérmico montano (siempreverde), en las cumbres de tepuyes;
- * bosques ribereños (siempreverdes) y
- * bosques ribereños de galería (semidecuidos hasta siempreverdes)

VI. METODOLOGÍA

Una vez delimitada el área de la cuenca en estudio, se ubicó en ella un grupo de estaciones del Sistema Hidrológico Automático (S.H.A.), cuyos registros se encuentran en la base de datos de EDELCA (BDHIDRO). Posteriormente se solicitó la impresión de los valores actualizados de precipitación y nivel (altura de mira) en las estaciones escogidas. Dada la reciente instalación de las mismas, se disponía de un corto período común de registros de nivel, limitado a los meses transcurridos del año 1998. La posterior discriminación de los registros a utilizar vendría dada por el análisis de los datos, previo a lo cual hubo de calcularse la serie de caudales para el período y elaborarse los hidrogramas correspondientes.

Asimismo, para la descripción climatológica, hubo de analizarse los registros de medias mensuales de evaporación, humedad relativa y temperatura.

A efectos de la evaluación de niveles y caudales, se consideraron cuatro tramos de la cuenca en estudio, delimitados por los puntos de los cauces donde se encuentran las estaciones hidrométricas del S.H.A.. Los mismos se definieron como:

- Tramo Mahigia – Ichum, comprendido en el propio río Paragua desde la estación de Mahigia hasta la estación de Ichum, situada aproximadamente aguas abajo de la confluencia del río Ichum con el Paragua.
- Tramo Ichum – Karum, también exclusivamente en el cauce del Paragua, comprendido entre las estaciones de Ichum y Karum, situada esta última aproximadamente aguas abajo en la confluencia del río Karum con el Paragua.
- Tramo Guaina – Karum, comprendido entre la estación Guaina, en el río Marik, y la estación de Karum.
- Tramo Guaiguatá – Karum, desde la estación de Guaiguatá en el río Karum hasta la estación de Karum, en el Paragua.

Las ubicaciones de las estaciones mencionadas son las que siguen:

Estación	Longitud Oeste	Latitud Norte	Cota (m.s.n.m.)
Mahigia	63°00'06"	04°26'36"	360
Ichum	63°21'54"	04°47'10"	350
Guaina	63°41'23"	05°03'42"	320
Guaiguatá	63°03'13"	05°03'08"	330
Karum	63°24'01"	05°19'10"	295

Para cada uno de estos tramos se definieron tres rangos de caudal, estableciéndose así tres condiciones diferenciadas: aguas bajas, aguas medias y aguas altas. Los límites que las separan son valores significativos de gastos, tomados en función tanto de la magnitud del dato como de la amplitud total de la variación de los caudales durante el período de registros.

A continuación se presenta una descripción de la metodología seguida para estimar y calcular los parámetros antes mencionados:

VI. I. Determinación de tiempos de viaje

VI. I. I. Consideraciones teóricas

La metodología que necesita aplicarse para la determinación de tiempos de viaje en una cuenca dada depende de las condiciones hidráulicas e hidrológicas intrínsecas del canal o curso de agua considerado.

Uno de los métodos más utilizados es el tránsito de crecientes, que permite conocer el tiempo y la magnitud de los caudales en un punto de un curso de agua con el uso de hidrogramas (conocidos o supuestos) de uno o más puntos aguas arriba. Cuando el caudal depende exclusivamente del tiempo, se habla de *tránsito de sistemas agregados* y cuando, adicionalmente, es función del espacio, se denomina *tránsito de sistemas distribuidos*. Este último caso es el que se refiere a flujos de agua en canales fluviales y a través de suelos, donde el caudal, la velocidad y la profundidad varían en el espacio.

Para obtener estimaciones de caudales y niveles, pueden aplicarse modelos comerciales de tránsito distribuido de crecientes tales como el HEC-2, HEC-6, y otros. Modelos de este tipo se basan en las ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y momentum de Saint - Venant para flujo unidimensional no permanente en canales abiertos. Dichas ecuaciones tienen como fundamento las siguientes suposiciones:

- * El flujo es unidimensional, lo que es decir que la profundidad y la velocidad varían sólo en la dirección del eje longitudinal del canal. Esto implica que en cualquier sección transversal a dicho eje la velocidad del agua es constante y que la superficie libre es horizontal.
- * El flujo varía gradualmente a lo largo del canal, de tal forma que la presión hidrostática prevalece y las aceleraciones verticales pueden despreciarse.
- * El eje longitudinal del canal es, aproximadamente, una línea recta.
- * La pendiente del fondo del canal es pequeña y el lecho es fijo. Esto es decir que los efectos de socavación y deposición de sedimentos son despreciables.
- * Los coeficientes de resistencia para flujo turbulento uniforme y permanente son aplicables de tal

forma que relaciones tales como la Ecuación de Manning pueden utilizarse para describir los efectos de resistencia.

- * El fluido es incompresible y de densidad constante a todo lo largo del flujo.
- * Las pérdidas por expansión y contracción del canal y los efectos del esfuerzo cortante por viento y por flujo lateral son despreciables.

Una vez aceptada o verificada la validez de todas esas suposiciones, se obtienen las siguientes expresiones, en su forma conservativa:

$$\text{CONTINUIDAD: } \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\text{MOMENTUM: } \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) \right] + g \cdot \left[\frac{\partial y}{\partial x} - (S_0 - S_f) \right]$$

ó en su expresión no conservativa:

$$-\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} + S_0 = S_f$$

En el caso particular del área de la cuenca alta del Paragua (hasta Karum), se observa que la red de drenaje es bastante densa y posee afluentes de gastos considerables, como el río Ichum, el Paure-Murán, etc. Esto introduce una gran cantidad de aportes laterales que no son despreciables.

Otra de las suposiciones teóricas con las que no cumple el cauce estudiado es la magnitud de la pendiente, pues el río en esta zona es aún joven y, por lo tanto, presenta numerosos desniveles. Pierde así toda validez la suposición de que la pendiente es muy suave.

A pesar de que el lecho es en su mayor parte rocoso, se producen en él importantes socavaciones y deposiciones de sedimentos. El cauce tiene, además, numerosas curvas a lo largo de los tramos evaluados, lo que acaba con la condición de que el eje longitudinal sea recto.

En vista de todas estas discordancias entre las condiciones teóricas para el uso de las ecuaciones y las características reales del río, no se consideró recomendable el uso de un modelo de tránsito distribuido.

Se decidió, entonces, efectuar un análisis de manera que la cuenca conforme un sistema cerrado (caja negra) y en el cual se conozcan y manejen solamente las entradas y las salidas. En esos términos, quedan definidas las entradas al sistema por el caudal en la estación aguas arriba, y las salidas como el caudal en la estación aguas abajo.

La determinación de los tiempos de viaje en cada tramo para aguas altas, medias y bajas, se realizó de dos maneras distintas. La primera implicó un análisis netamente gráfico, la segunda, un análisis gráfico - numérico (regresiones de ajuste). Ambas se describen a continuación:

VI. I. II. Análisis gráfico

Con base en los datos horarios de niveles de mira en las estaciones del S.H.A., se construyeron los hidrogramas de las crecientes que resultasen representativas de las condiciones de caudal encontradas a lo largo del período de mediciones. Para el cálculo de los caudales se utilizaron las ecuaciones de gastos deducidas por el Departamento de Hidrometeorología de EDELCA para la elaboración de tablas de nivel y caudal para los cauces de la cuenca en cada estación.

Fue de particular utilidad la superposición de los hidrogramas de todos los tramos, para períodos comunes, en una sola gráfica. En ella pudo estudiarse con mayor claridad la correspondencia de las crecientes y sus magnitudes relativas (ver anexos).

Tomando el inicio de cada creciente coincidente con el punto inicial de la rama ascendente de cada hidrograma de creciente, se definió el tiempo de viaje (de cada tramo) como aquel transcurrido entre el inicio de una creciente en la estación aguas arriba y el inicio de la subsecuente creciente en la estación aguas abajo.

Se evaluó según este criterio cada una de las crecientes escogidas, tomándose al menos una creciente para cada condición de caudal. En aquellos casos en que hubiera diferencia entre los tiempos de viaje de varias crecientes para un mismo tramo y mismas condiciones de caudal, se calculó un promedio aritmético de ellos, para establecer a este último como el tiempo de viaje para esas condiciones.

VI. I. III. Regresiones de ajuste

Con el programa Excel se construyó para cada creciente un gráfico que relacionara los caudales de las dos estaciones terminales del tramo en cuestión, utilizando el eje de las abscisas para los caudales de la estación aguas arriba y el eje de las ordenadas para la de aguas abajo.

A la curva resultante de la dispersión se buscó, con el mismo programa, una línea de tendencia descrita por una ecuación matemática definida como y (ordenadas) en función de x (abscisas). Se halló además el factor de correlación R^2 , indicativo de la validez de la curva de ajuste.

Se repitió el procedimiento con distintos desfases del caudal aguas abajo. Con esto se relacionó dicho caudal con el caudal aguas arriba ocurrido anteriormente un número de horas igual al desfase aplicado. Para definir el tiempo a desplazar los caudales, se seleccionaron valores cercanos a los tiempos de viaje determinados gráficamente (a partir de los hidrogramas). Se escogió como el tiempo de viaje definitivo aquel número de horas con el cual se obtuviese el mejor ajuste del índice R^2 , es decir, que su valor fuera lo más cercano a uno (1).

VI. II. Determinación de tiempos de concentración

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó la fórmula desarrollada por el *Bureau of Reclamation* de los EE.UU., que lo define (en minutos) como $t_c = 0,0195 \cdot (L^3/H)^{0,385}$, donde la longitud del cauce L y la diferencia de cotas H entre sus extremos están dadas en metros. Se escogió esta expresión dado que otras fórmulas requieren el uso de la pendiente media de los cauces. Teniéndose los valores de H para los mayores tributarios del alto Paragua, se calculó el tiempo de concentración de cada uno de ellos, además de hacerlo, obviamente, para el cauce principal.

VI. III. Estimación de aportes porcentuales

Dado que en cada uno de los tramos estudiados se tienen sólo los gastos en las estaciones terminales, se hace necesario determinar a partir de ellos el porcentaje del caudal total en el cauce principal que se debe a los aportes de los afluentes que pueda haber a lo largo del tramo. Con los caudales ocurridos durante las crecientes estudiadas hasta ahora, puede calcularse el volumen escurrido en cada una de ellas, en cada estación, y determinar por diferencia el volumen que corresponde a los aportes intermedios. Por último, se expresa este volumen como un porcentaje del total escurrido en el lapso de tiempo en el que se desarrolló la creciente.

Determinando así cuánto de lo que escurre por el cauce principal y se mide en la estación aguas abajo corresponde a cada fracción del tramo, se puede cuantificar la importancia de los aportes de las distintas zonas de la cuenca, y con ello estimar la magnitud de la creciente a esperar en base a lo ocurrido en los puntos en los que se tienen datos hidrométricos.

En la página siguiente se muestra, como ejemplo, la hoja de cálculo utilizada para calcular los aportes porcentuales para el tramo Guaina - Karum; los resultados de todos los tramos se resumen en el aparte correspondiente de "Resultados":

VI. IV. Evaluación de la precipitación

El almacenamiento (S) en un sistema hidrológico puede relacionarse con las tasas de flujo de entrada (I) y de salida (Q) por medio de la ecuación integral de continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad \textcircled{1}$$

Considerando que la cantidad de agua almacenada aumenta y disminuye en respuesta a las entradas y salidas y sus tasas de cambio con respecto al tiempo (dI/dt , dQ/dt , d^2I/dt^2 , ...), la cantidad de almacenamiento en cualquier instante puede expresarse como:

$$S = f \left(I, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \dots, Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots \right) \quad \textcircled{2}$$

La solución de las ecuaciones $\textcircled{1}$ y $\textcircled{2}$ para el caso de sistemas lineales en tiempo continuo generan la siguiente expresión:

$$S = a_1 Q + a_2 \frac{dQ}{dt} + a_3 \frac{d^2Q}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^{n-1}Q}{dt^{n-1}} + b_1 I + b_2 \frac{dI}{dt} + b_3 \frac{d^2I}{dt^2} + \dots + b_n \frac{d^{n-1}I}{dt^{n-1}}$$

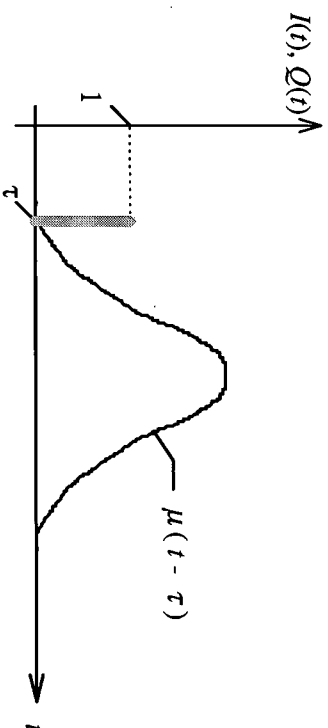
Esta expresión también puede escribirse como: $N(D)Q = M(D)I$ $\textcircled{3}$, donde M(D) y N(D) son los operadores diferenciales

$$\begin{cases} N(D) = a_n \frac{d^n}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d}{dt} + 1 \\ M(D) = -b_n \frac{d^n}{dt^n} - b_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} - \dots - b_1 \frac{d}{dt} + 1 \end{cases}$$

y $D = \frac{d}{dt}$. Al resolver la ecuación $\textcircled{3}$ para Q se llega a que $Q(t) = \frac{M(D)}{N(D)} I(t)$, donde el

término $M(D)/N(D)$ se denomina "Función de transferencia del sistema" y describe la respuesta de la salida a una secuencia de entrada.

El estímulo o *impulso* de entrada se asocia directamente con la precipitación ocurrida aguas arriba de la estación más alta del tramo considerado. En los sistemas hidrológicos, las funciones de transferencia siguen los principios básicos de Proporcionalidad y Superposición, acorde a los cuales puede considerarse la *Función Impulso Respuesta*. Es ésta quien caracteriza los sistemas lineales, que al recibir un estímulo de entrada de tipo instantáneo (impulso unitario) en un tiempo τ , originan una respuesta en un tiempo posterior t descrita por la función $\mu(t - \tau)$. Así, el término $(t - \tau)$ queda definido como el *Tiempo de retardo*. El siguiente diagrama ilustra lo explicado:



La respuesta para la función completa de entrada $I(t)$ se denomina la *Ecuación integral de convolución*, y es como sigue:

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau)\mu(t - \tau)d\tau$$

En el caso de pulsos discretos, como suelen considerarse los que ocurren en la naturaleza, la expresión toma la forma:

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m U_{n-m+1}$$

donde P_m es el pulso de lluvia en el intervalo, y U_m es el caudal resultante en el intervalo.

Los principios de Proporcionalidad y Superposición se traducen en que cada pulso de lluvia tendrá su respuesta individual, con lo que el hidrograma resultante es la composición de los hidrogramas individuales generados por cada pulso.

VI. V. Acarreo de sedimentos

VI. V. I. Consideraciones teóricas

El acarreo de sedimentos en suspensión en las redes de drenaje de las cuencas tiene dos fuentes principales:

- * los procesos naturales de meteorización y erosión de los lechos y otros terrenos drenados
- * la introducción extraordinaria de material sólido hacia los cauces, producto de la intervención humana dentro del área de drenaje.

Los sedimentos en esta parte de la cuenca obedecen en su gran mayoría al aporte *aluvional*, aquel proveniente del transporte en los mismos cauces que conforman la red de drenaje. El aporte *coluvional*, el cual proviene de la degradación de los suelos en las planicies de inundación y en otras zonas fuera de los cauces, es de menor magnitud que el primero. Esto se debe a que las áreas de vegetación arbustiva, de sabana, de bajo follaje o con grandes niveles de intervención, cuyos suelos

son mucho más susceptibles a la degradación, son comparativamente bastante menores que las áreas de vegetación densa (bosques, selva tropical), más protegidas de los agentes erosivos.

Sin embargo, esta tendencia general puede resultar afectada por el hecho de que en ciertos caños (pequeños afluentes) del Paragua y en las propias cabeceras del río (parte sur de la cuenca en estudio, aguas arriba de Mahigia), se han desarrollado numerosos enclaves de explotación minera (balsas), en su mayoría ilegales, que mediante el uso de monitores hidráulicos renuevan el lecho de los cauces, modificando y alterando sus condiciones fluviales e hidráulicas. A la remoción del material de los lechos se suma la degradación de las riberas que son deforestadas, aumentando notablemente el acarreo de sedimentos.

Tal efecto puede evidenciarse en la formación de playas o zonas de deposición de sedimento "grueso" (arenas y gravas) a lo largo del cauce y en la turbidez de las aguas en algunos sectores, producto del aumento en la concentración de material fino en suspensión (limo y arcilla).

Para efectuar un seguimiento a estos fenómenos, el Departamento de Hidrometeorología de EDELCA despliega un programa de monitoreo sedimentológico en las 95 estaciones hidrométricas que actualmente atiende. Esta actividad genera un volumen de información que hoy día llega a unos 3000 archivos o muestreos. Con ellos, se han elaborado las curvas de sedimentación anual por estación, donde a partir del caudal líquido escurrido se puede obtener el acarreo sólido medio en toneladas por día.

VI. V. II. Cálculo de cantidad de sedimentos y su concentración

La ecuación general del acarreo de sedimentos en función del caudal es de la forma $Q_s = a \cdot Q^b$, donde Q_s es lo que se llama el *caudal sólido* (peso de sedimentos arrastrados por unidad de tiempo), con unidades de toneladas/día; Q es el caudal medio del cauce en m^3/s ; a y b son constantes de regresión.

Conocido el caudal del cauce y habiéndose determinado su correspondiente caudal sólido, se puede calcular la concentración media de los sólidos suspendidos mediante la expresión $c = Q_s / (Q \cdot 0,0864)$ donde Q_s y Q se dan en toneladas/día y m^3/s , respectivamente; c es la concentración de sólidos suspendidos en el agua en mg/litro y 0,0864 es una constante de conversión de unidades.

VII. RESULTADOS

VII. I. Hidrogramas

Para la elaboración de los hidrogramas de crecientes, se utilizaron los caudales calculados a partir de los registros de niveles mediante la aplicación de las ecuaciones de gastos que se muestran en la Tabla N° 2 con sus correspondientes estaciones y rangos de validez.

La ecuación general de gastos en función de nivel es del tipo $Q = c \cdot (h+a)^b$, donde Q es el caudal en m³/s, h es el nivel en metros y a, b, y c son constantes. Los hidrogramas fueron elaborados con el programa Excel en ambiente Windows, y se muestran en el Anexo 2.

TABLA 2

Ecuaciones de gastos en función de nivel

estación	caudal (m ³ /s)	nivel (m)
Mahigia	$Q = 28,277 \cdot (h - 1,1560)^{1,9260}$	1,20 < h > 10,00
Ichum	$Q = 70,0861 \cdot (h - 1,4349)^{1,7533}$ $Q = 131,2973 \cdot (h - 1,8229)^{1,4083}$	1,43 < h > 2,59 2,59 < h > 12,00
Guaiguatá	$Q = 38,1037 \cdot (h - 1,6139)^{1,7454}$ $Q = 106,7880 \cdot (h - 2,7179)^{1,3126}$	1,61 < h > 5,34 5,34 < h > 7,00
Guaina	$Q = 3,1000 \cdot (h - 1,0049)^{2,8262}$ $Q = 1,4383 \cdot (h + 0,5814)^{2,4347}$	1,00 < h > 3,64 3,64 < h > 8,00
Karum	$Q = 62,5580 \cdot (h - 1,1260)^{1,7890}$ $Q = 82,1920 \cdot (h - 1,2750)^{1,6510}$ $Q = 482,5100 \cdot (h - 5,1600)^{1,1450}$	1,20 < h > 6,18 6,18 < h > 10,00 10,00 < h > 13,30

VII. II. Tiempos de viaje

Los resultados del análisis por regresiones de ajuste se resumen en las Tablas 3 a la 5 en las páginas que siguen, donde se presentan los rangos de nivel y caudal, los tiempos de viaje y las ecuaciones de las curvas de ajuste. En estas últimas, x representa el caudal aguas arriba; y representa el caudal aguas abajo. Véase también los gráficos del Anexo 3, donde se presentan las curvas definitivas.

VII. III. Tiempos de concentración

En la Tabla 6 se presentan los tiempos de concentración del río Paragua (hasta la estación Karum) y de sus principales tributarios.

VII. IV. Precipitación

Bajo el esquema planteado en la metodología, se procedió a relacionar la escorrenría registrada por tramos específicos (crecientes) con las precipitaciones ocurridas, de tal forma de identificar el número de pulsos que originaran cada creciente y los tiempos de respuesta de la cuenca. Para realizar tal evaluación en la parte más alta de la cuenca se utilizaron los registros de dos estaciones adicionales, Ichum Alto y Paragua Alto, cuyas lluvias pueden relacionarse con la escorrenría aguas abajo en las estaciones de Ichum y Mahigia, respectivamente. A continuación se presentan los resultados:

Estaciones extremas del tramo	Fecha de creciente	Lluvias (mm) asociadas Aguas arriba /Aguas abajo	N° de pulsos (de una hora)*	Tiempo de res-puesta (h)**
Paragua Alto - Mahigia	18-23/05/98	27,5	12 / 18	6
Paragua Alto - Mahigia	09-14/05/98	32,5	12 / 10	5
Ichum Alto - Ichum	14-16/05/98	21,5	5 / 12	6

* Aguas arriba / Aguas abajo

** Según precipitación más significativa

VII. V. Aportes porcentuales

Como se explicó en la Metodología, se hizo una evaluación de las crecientes representativas dentro del período de registros disponibles. A partir de los caudales obtenidos en la construcción de los hidrogramas se calcularon los volúmenes escurridos durante las crecientes, para luego expresarlos de forma porcentual. Los porcentajes de aportes calculados para cada tramo, en condiciones de aguas bajas, medias y altas, se pueden ver en las Tablas 7 a la 10.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE VIAJE

TABLA 3 AGUAS BAJAS

Tramo / Estación	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)	Tiempos de viaje (h)*	Ecuación de tendencia de caudales, [factor de correlación R ²]
Mahigia - Ichum	Mahigia	menos de 200	Asc: 12 (14)	$y = 0,001x^3 - 0,1198x^2 + 5,2327x - 19,888$ [0,922]
	Ichum	menos de 500	Desc: 25	$y = 0,1582x^3 - 29,808x^2 + 1874,2x - 39192$ [0,9323]
Ichum - Karum	Ichum	menos de 500	Asc: 13 (14)	$y = -6 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,0005x^3 - 0,1356x^2 + 14,658x - 357,83$ [0,9961]
	Karum	menos de 750	Desc: --	Recesión muy irregular
Guaina - Karum	Guaina	menos de 100	Asc: 13	$y = 7 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,0005x^3 + 0,1432x^2 - 16,11x + 1583,1$ [0,9934]
	Karum	750 - 2200	Desc: 10	$y = 0,0001x^3 - 0,057x^2 + 9,3895x + 373,4$ [0,9997]
Guaiguatá - Karum	Guaiguatá	menos de 300	Asc: 10 (13)	$y = -2 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0171x^2 - 1,9368x + 212,58$ [0,9899]
	Karum	menos de 750	Desc: 27	$y = 6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0655x^2 + 24,525x - 2081,2$ [0,9972]

* Tiempos obtenidos de la mejor correlación; si los estimados a partir de los hidrogramas son diferentes, se muestran entre paréntesis.

Los tiempos para los descensos se obtuvieron únicamente de las correlaciones.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE VIAJE

TABLA 4 **AGUAS MEDIAS**

Tramo/ Estación	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)	Tiempos de viaje (h)*	Ecuación de tendencia de caudales, [factor de correlación R ²]
Mahigia - Ichum			Asc: 12 (14)	$y = 5 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,0001x^3 + 0,0932x^2 - 30,888x + 4283,2$ [0,9967]
	Mahigia	3,92 - 5,11	200 - 400	
	Ichum	4,41 - 5,10	500 - 700	Desc: 13
Ichum - Karum			As: 12 (14,5)	$y = 1 \cdot 10^{-8}x^4 - 3 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0237x^2 - 8,5622x + 3223,1$ [0,9971]
	Ichum	menos de 4,41	menos de 500	
	Karum	5,14 - 9,22	750 - 2200	Desc: 32
Guaina - Karum			Asc: 11 (13)	$y = 0,0002x^3 - 0,1122x^2 + 20,303x + 855,95$ [0,9959]
	Guaina	menos de 5,13	menos de 100	
	Karum	5,14 - 9,22	750 - 2200	Desc: 20
Guaiguatá - Karum			Asc: (10)	
	Guaiguatá	4,88 - 6,44	300 - 600	
	Karum	5,14 - 9,22	750 - 2200	Desc: --

* Tiempos obtenidos de la mejor correlación; si los estimados a partir de los hidrogramas son diferentes, se muestran entre paréntesis.

Los tiempos para los descensos se obtuvieron únicamente de las correlaciones.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE VIAJE

TABLA 5 AGUAS ALTAS

Tramo/ Estación	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)	Tiempos de viaje (h)*	Ecuación de tendencia de caudales, [factor de correlación R ²]
Mahigia - Ichum			Asc: 16 (15)	$y = 3 \cdot 10^{-8}x^4 - 0,0001x^3 + 0,1293x^2 - 63,127x + 11684$ [0,9965]
	Mahigia Ichum	más de 5,11 más de 700	Desc: 16	$y = -7 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,016x^2 - 10,816x + 3726,3$ [0,9969]
Ichum - Karum			Asc: 9 (10)	$y = -7 \cdot 10^{-11}x^4 + 9 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0035x^2 + 6,5959x - 2491,2$ [0,9996]
	Ichum Karum	más de 5,10 más de 2200	Desc: --	Recesión muy irregular
Guaina - Karum			Asc: 9 (10)	$y = -7 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,001x^3 - 0,4786x^2 + 105,64x - 4824,9$ [0,9955]
	Guaina Karum	más de 7,74 más de 2200	Desc: --	Recesión muy irregular
Guaiguatá - Karum			Asc: 8 (7)	$y = 5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0738x^2 + 33,532x - 3000,1$ [0,9931]
	Guaiguatá Karum	4,88 - 6,44 más de 2200	Desc: 29	$y = 3 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0442x^2 + 25,848x - 2665,2$ [0,999]

* Tiempos obtenidos de la mejor correlación; si los estimados a partir de los hidrogramas son diferentes, se muestran entre paréntesis.

Los tiempos para los descensos se obtuvieron únicamente de las correlaciones.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN POR TRAMOS

TABLA 6

Cauce	Longitud (m)	Límites del tramo		Tiempos de concentración (h)
		Desde / Hasta	Cotas (msnm)	
Paragua	284.000	cabeceras	750	61,25
		Est. Karum	295	
Ichum	125.000	cabeceras	1.280	17,76
		confluencia*	313	
Karum	202.000	cabeceras	720	42,58
		confluencia*	299	
Marik	89.000	cabeceras	700	16,97
		confluencia*	307	

Según fórmula del *Bureau of Reclamation* de los EE.UU.

$$t_c = 0,0195 \cdot (L^3 / H)^{0,385}$$

t_c está dado en minutos

L es la longitud del cauce en metros

H es la diferencia de cotas entre los extremos del cauce

* Con el río Paragua.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA

APORTES PORCENTUALES

TABLA 7 Tramo Mahigia-Ichum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m ³)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	08 - 14 / 04 / 1998	Ichum	148.974.299	100,00	"Otros aportes" se refiere al gasto que llega del alto Ichum al Paragua, pues en este último no hay más aportes de importante consideración entre las dos estaciones.
		Mahigia	82.542.712	55,41	
		Otros aportes	66.431.587	44,59	
AGUAS MEDIAS	26 - 29 / 04 / 1998	Ichum	159.041.230	100,00	
		Mahigia	82.549.405	51,90	
		Otros aportes	76.491.825	48,10	
AGUAS ALTAS	19 - 22 / 05 / 1998	Ichum	452.618.822	100,00	
		Mahigia	248.686.303	54,94	
		Otros aportes	203.932.518	45,06	

TABLA 8 Tramo Ichum-Karum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m3)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	11 - 17 / 02 / 1998	Karum	377.852.345	100,00	En "Otros aportes" están incluidos los gastos de los ríos Marik y Karum, para los que hay datos de las estaciones de Guaina y Guaguatá, respectivamente. También se incluyen gastos no medidos, de los cuales son importantes los del río Kurutú.
		Ichum	131.497.508	34,80	
		Otros aportes	246.354.837	65,20	
AGUAS MEDIAS	14 - 16 / 05 / 1998	Karum	471.087.003	100,00	
		Ichum	146.683.004	31,14	
		Otros aportes	324.403.999	68,86	
AGUAS ALTAS	30 / 04 / 1998	Karum	2.392.125.000	100,00	
	-	Ichum	1.192.158.506	49,84	
	09 / 05 / 1998	Otros aportes	1.199.966.494	50,16	

TABLA 9 Tramo Guaina-Karum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m ³)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	11 - 17 / 02 / 1998	Karum	377.852.345	100,00	Aguas abajo de la estación de Guaina, y antes de que el Marik desemboque al Paragua, se reciben aportes de tres cauces menores. Ya en el Paragua, se reciben también varios aportes de ríos pequeños antes de recibir el caudal del Karum. En definitiva, sólo son de importancia los caudales que vienen del Paragua y del Karum.
		Guaina	52.480.083	13,89	
		Otros aportes	325.372.262	86,11	
AGUAS MEDIAS	14 - 16 / 05 / 1998	Karum	471.087.003	100,00	
		Guaina	42.914.051	9,11	
		Otros aportes	428.172.952	90,89	
AGUAS ALTAS	30 / 04 / 1998	Karum	2.392.125.000	100,00	
	-	Guaina	181.248.564	7,58	
	09 / 05 / 1998	Otros aportes	2.210.876.436	92,42	

TABLA 10 Tramo Guaiguatá-Karum

	Período	Estación	Volumen escurrido (m ³)	Porcentaje	Observaciones
AGUAS BAJAS	11 - 17 / 02 / 1998	Karum	377.852.345	100,00	En "Otros aportes" se incluyen los gastos del Antabarí y otros ríos que desembocan en el Karum entre la estación Guaiguatá y la confluencia con el Paragua. Justo aguas debajo de la confluencia está la estación Karum.
		Guaiguatá	101.573.176	26,88	
		Otros aportes	276.279.169	73,12	
AGUAS MEDIAS	14 - 16 / 05 / 1998	Karum	471.087.003	100,00	
		Guaiguatá	95.188.071	20,21	
		Otros aportes	375.898.931	79,79	
AGUAS ALTAS	30 / 04 / 1998	Karum	2.392.125.000	100,00	
	-	Guaiguatá	656.922.903	27,46	
	09 / 05 / 1998	Otros aportes	1.735.202.097	72,54	

VII. VI. Acarreo de sedimentos

En base a los registros de caudales medios mensuales entre los años 1987 y 1997, y mediante la curva de sedimentación de la estación Karum, se pudo estimar un acarreo sólido suspendido medio anual de 2.660 ton/día (para un caudal medio anual de 1.612 m³/s). Esta cifra representa una concentración media de 19,10 mg/l y una producción anual de sedimentos unas 970.900 toneladas. La ecuación de la curva utilizada es $Q_s=0,18 \cdot Q^{1,3}$, la cual tiene un índice de correlación $R^2=0,91$.

Por otro lado, en las estaciones utilizadas del S.H.A. se tienen muy pocos muestreos, por lo reciente de su instalación. Para el momento de la realización de este estudio no se tenían las respectivas curvas de sedimentación. En consecuencia, los valores puntuales que se muestran a continuación, correspondientes a una creciente en condiciones de aguas bajas, tienen la intención sólo de ser ilustrativos de la magnitud de los transportes de sedimentos medidos:

Tabla 11

Estación	Fecha	Altura de mira (m)	Caudal* (m ³ /s)	Concentración (mg/l)
Karum	15/02/98	2,62	128,3	24,2
Guaina	11/02/98	3,64	47,9	15,0
Guaguatá	13/02/98	5,34	378,5	52,3
Ichum	14/02/98	3,70	318,7	19,1

* Caudal según curva de gastos

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

VIII. I. Tiempos de viaje y de concentración

Como se puede ver en las Tablas 2, 3 y 4 (en "Resultados"), los tiempos de viaje fueron discriminados por tramos y según las condiciones de caudal durante la ocurrencia de las crecientes: aguas altas, medias o bajas. Todos ellos son de 10 horas o más, hasta un máximo observado de 16 horas, con la única excepción del tramo Guaiguatá - Karum durante aguas bajas (de 7 a 8 horas).

Se puede notar que, en general, los tiempos de viaje se hacen más cortos en la medida en que las crecientes se desarrollan en condiciones de mayor caudal. Esto es decir que en un tramo dado una creciente que se da con bajos caudales tardará más en reflejarse aguas abajo que una que se dé con caudales altos en el mismo tramo. La única excepción la constituye el tramo Mahigia - Ichum, donde el tiempo de viaje observado en aguas bajas es de 12 horas, aumentando hasta ser de 16 horas en aguas altas.

En cuanto a los tiempos de concentración, los mismos oscilan entre unas 17 horas para los cauces más cortos y 61 horas para el Paragua hasta Karum (ver Tabla 6 en "Resultados").

VIII. II. Precipitación

Según lo observado en las precipitaciones evaluadas en la alta cuenca, el tiempo promedio de respuesta de la misma es de unas seis horas, para precipitaciones de una duración de 12 a 18 horas. Cabe señalar que en algunos casos la respuestas obtenidas en forma de escorrentía no presentaban correspondencia evidente con la magnitud de la lluvia registrada. Esto induce a pensar que las crecientes fueron generadas por precipitaciones ocurridas en partes más altas la cuenca que no necesariamente debieron reflejarse en los registros pluviométricos de las estaciones involucradas.

VIII. III. Aportes porcentuales

VIII. III. I. Tramo Mahigia - Ichum

* Se observa que el caudal medido en la estación de Mahigia representa alrededor de un 54 % (valor medio) del caudal que se mide aguas abajo en la estación de Ichum.

* Los aportes adicionales corresponden a todo el caudal que el río Ichum descarga al Paragua, más los aportes de los afluentes menores del Paragua. En este tramo, el número de estos últimos es bastante reducido. Según esto, puede decirse que el caudal del Ichum representa en promedio cerca del 46 % del caudal del Paragua determinado en la estación Ichum.

VIII. III. II. Tramo Ichum - Karum

- * El caudal de la estación Ichum constituye un porcentaje variable del caudal de la estación Karum.
- * Durante el período evaluado, la menor porción que alcanza a representar es de un 31 % , valor alrededor del cual hay poca fluctuación durante condiciones de aguas bajas y medias.
- * El valor máximo que alcanzó fue del 50 %, aproximadamente, el cual ocurrió en condiciones de aguas altas.
- * Los aportes laterales corresponden a todo lo descargado por los ríos Kurutú, Marik y Karum y otros de menor importancia. Considerando que los aportes de los ríos Marik y Karum están dados por los caudales en Guaina y Guaiguatá, respectivamente, puede estimarse el porcentaje que corresponde al río Kurutú más los afluentes menores:

— Aguas bajas: Guaina en 14 % ; Guaiguatá en 27 % ; Ichum en 35 %. Se deduce que al Kurutú (más los aportes menores de todos los tramos) corresponde un 24 % del caudal del Paragua en Karum.

— Aguas medias: Guaina en 10 % ; Guaiguatá en 20 % ; Ichum en 31 %. Se deduce que al Kurutú (más aportes menores) corresponde alrededor de un 39 % del caudal en Karum.

— Aguas altas: Guaina en 8 % ; Guaiguatá en 27 % ; Ichum en 50 %. Se deduce que al Kurutú (más aportes menores) corresponde un 15 %.

VIII. III. III. Tramo Guaina - Karum

- * Los aportes del río Marik, en general, representan una fracción pequeña del caudal medido en Karum.
- * El máximo valor porcentual alcanzado (en el período evaluado) fue de un 14 % , en condiciones de aguas bajas.
- * El mínimo ocurrió en condiciones de aguas altas, siendo un poco menor del 8 %.
- * Los aportes adicionales corresponden a los caudales del Karum y el Paragua (antes de recibir al Marik), más el caudal los afluentes menores de ambos ríos y del Kurutú.

VIII. III. IV. Tramo Guaiguatá - Karum

- * El caudal de Guaiguatá constituye, en promedio (para el período evaluado), un 25 % del caudal que se mide en Karum.
- * El valor máximo, cerca del 27,5 % , ocurrió en condiciones de aguas altas.
- * El mínimo ocurrió en condiciones de aguas bajas, siendo de un 20 %.

En el Anexo I se presenta un mapa con los porcentajes de aportes de cada área drenada. Es importante observar que los aportes porcentuales establecidos aquí para el río Kurutú son sólo tentativos, pues no se tiene instrumentos para discriminar cuánto de ellos le corresponden realmente.

VIII. IV. Acarreo de sedimentos

En el grupo de muestreos evaluados se hace notorio el hecho de que la concentración hallada en Karum el día 15/02/98 no llega a ser la mitad del valor hallado aguas arriba, en Guaiguatá, el día 13 del mismo mes. Al mismo tiempo, las concentraciones halladas en esos días para los otros ríos evaluados se encontraban ligeramente por debajo del valor de Karum.

Basada en los valores de concentración presentados en la Tabla 11, la siguiente es una distribución porcentual tentativa de los aportes de sedimentos en suspensión, expresados como *aportes sólidos*:

Tabla 12

Estación	Fecha	Concentración (mg/l)	Caudal* (m ³ /s)	Caudal sólido (ton/día)	Porcentaje de aporte sólido
Karum	15/02/98	24,2	128,3	268,26	10,45
Guaína	11/02/98	15,0	47,9	62,08	2,42
Guaiguatá	13/02/98	52,3	378,5	1710,34	66,64
Ichum	14/02/98	19,1	318,7	525,93	20,49

* Caudal según curva de gastos

Para una visualización de estos porcentajes en función del área drenada, véase el mapa en el Anexo I.

CONCLUSIONES

Como primer paso del proceso de caracterización, la elaboración de los hidrogramas de crecientes fue de gran utilidad en la determinación de los tiempos de viaje y, en general, como instrumento de visualización del comportamiento de los caudales en el período estudiado. La confrontación de los hidrogramas de varios cauces en un mismo gráfico para un período común permitió determinar en varias ocasiones la correspondencia entre las crecientes observadas aguas arriba y aguas abajo en un tramo dado (ver Anexo 2).

Posteriormente se hallaron resultados de relevante aplicación, también a partir de los hidrogramas, con las regresiones de ajuste. Se determinaron ecuaciones que permiten estimar el caudal en una estación hidrométrica dada en función de los datos de caudal en una estación aguas arriba. El trabajo fue realizado discriminando distintos rangos de caudales y, además, considerando las condiciones de ascendencia o de recesión en las crecientes.

Cabe recordar que los caudales utilizados para la construcción de los hidrogramas no fueron resultado de aforos, sino calculados a partir de las curvas de gastos (en función de alturas) deducidas en trabajos anteriores del Departamento. Esto resalta la importancia de la actualización periódica de dichas curvas, dado el amplio uso que se les da en múltiples estudios hidrológicos.

Para relacionar los tiempos de viaje y de concentración con las características fisiográficas de los cauces habría sido muy ilustrativo contar con las pendientes medias de los mismos, las cuales no pudieron determinarse por las razones ya expuestas en "Alcance y limitaciones". Sin embargo, a partir de los desniveles mencionados en "Hidrografía", y de la descripción geomorfológica de la cuenca, puede decirse que los cauces presentes en la misma son de pendiente moderada. Esto explicaría, en parte, lo prolongado de los tiempos de viaje para estos tramos que no llegan a sobrepasar los 100 km de longitud.

El tramo Mahigia - Ichum, el más alto de los que se estudiaron del río Paragua, presenta una oposición completa a lo que es la tendencia de variación de los tiempos de viaje en los demás tramos; los suyos aumentan con el caudal. Presumiblemente, ello puede deberse al efecto de remanso que el encuentro de los caudales de los ríos Ichum y Paragua pueda originar hacia aguas arriba. En favor de esta teoría se tiene el hecho de que el caudal que aporta el Ichum en el pico de una creciente (hasta más de 1000 m³/s) puede llegar a ser triplicado por el caudal resultante en el Paragua después de la confluencia, en la estación Ichum.

Los tiempos de concentración calculados aparentan ser relativamente largos, considerando las longitudes de los cauces a los que corresponden. Aún cuando la vegetación de toda la zona es lo

bastante densa como para producir un gran retardo en la escorrentía, la densidad de las redes de drenaje podría compensar ese efecto en cierta medida, de existir la cantidad suficiente de cauces intermitentes que se activen en función del aumento de la precipitación.

El estudio sobre la lluvia en este trabajo fue somero, dadas las limitaciones ya planteadas. Por ello, llegar a conclusiones a partir de los resultados sería más bien entrar en especulaciones.

De los datos disponibles de los muestreos de sedimentación se puede deducir que en alguna etapa del tramo Guaiguatá - Karum el sistema de drenaje del río Paragua tiene una gran capacidad de dilución. Recordando la distribución de concentraciones de sólidos en suspensión entre los distintos ríos, las cantidades menores de sedimentos que trajeran el Marik, el Paragua y el Ichum deben haber ayudado al descenso en la concentración final con respecto a la que se encontró en Guaiguatá. A esto debe haber contribuido la desigualdad de volúmenes aportados, ya que entre el río Karum y el resto de la red de drenaje, esta última contribuye con un caudal mayor.

Para el periodo estudiado, los aportes más importantes que recibe el Paragua en la alta cuenca son los del río Ichum, que en la confluencia representan prácticamente la mitad del caudal total. Les sigue en importancia el caudal aportado por el río Karum, que según lo visto en este estudio puede alcanzar, en condiciones de aguas altas, valores cercanos al treinta por ciento del escurrimiento del Paragua en Karum. En el trayecto entre esas dos confluencias, los aportes más importantes corresponden a los ríos Kurutú y Marik. Los de este último son variables, por debajo del quince por ciento de lo estimado en Karum, mientras que el primero debe ser más estudiado a fin de determinar la magnitud de su contribución.

RECOMENDACIONES

Del trabajo realizado en la empresa, y en función de los resultados obtenidos en esta aproximación a la caracterización de la cuenca del alto Paragua, se hacen las siguientes recomendaciones, a fin de contribuir con los sucesivos estudios del proyecto:

El Departamento de Hidrometeorología debe hacer esfuerzos por contar con una suficiente cantidad de material cartográfico, pues la información topográfica e hidrográfica es indispensable en numerosas etapas de los estudios hidrológicos que restan por efectuarse.

Deben seguirse realizando, como se ha hecho hasta ahora, los trabajos de aforos y refinamiento de los modelos (ecuaciones) de gastos, de modo de obtener cada vez cifras más aproximadas a los caudales reales. Esta recomendación surge del hecho de haberse observado en los registros algunos casos en los que los niveles de mira no entraban en los rangos de validez de las curvas de gastos. Además de esto, se hallaron algunas diferencias entre los caudales calculados con las curvas y los aforados hasta del veinte por ciento, incluso algo mayores.

Es conveniente realizar un estudio pluviométrico en el que se utilice el mayor número de estaciones de la red, sean éstas convencionales o automáticas, dentro del mayor período común que pueda darse. Dicho trabajo debe complementarse con los existentes registros hidrométricos, pues la estimación más o menos aproximada de la lluvia efectiva en la zona, en distintos períodos del régimen pluviométrico, sería de gran valor.

Se recomienda mantener la continuidad de los registros hidrométricos en las estaciones de la alta cuenca del Paragua, pues el corto período de mediciones fue una importante limitación a las intenciones de determinar valores más confiables y significativos de parámetros como los tiempos de viaje.

Aunque el ideal actual de una red de estaciones hidroclimatológicas es el conseguir la automatización en toda su extensión, es un hecho real que las limitaciones económicas y operativas son preponderantes. Por ello, se recomienda la no desincorporación de los equipos convencionales, siempre que su mantenimiento sea posible, pues los mismos conforman una estructura de recopilación de información probada ya por muchos años, y contribuyen a la continuidad y control de los registros de las estaciones automáticas de reciente implementación.

En el caso de haber planes para la instalación de nuevas estaciones hidrométricas, se recomienda considerar sitios tales como Ichum Alto, Paragua Alto o Karum Alto, donde se tiene una cantidad de registros pluviométricos. De ser complementados de esta manera serían de gran utilidad en el proyecto de caracterización. Otros lugares aconsejables serían aquellos en los que hay "lagunas" de

información, como en los cauces del Kurutú o el Antabari, por ejemplo, por ser tributarios que acarrean el drenaje de extensiones considerables.

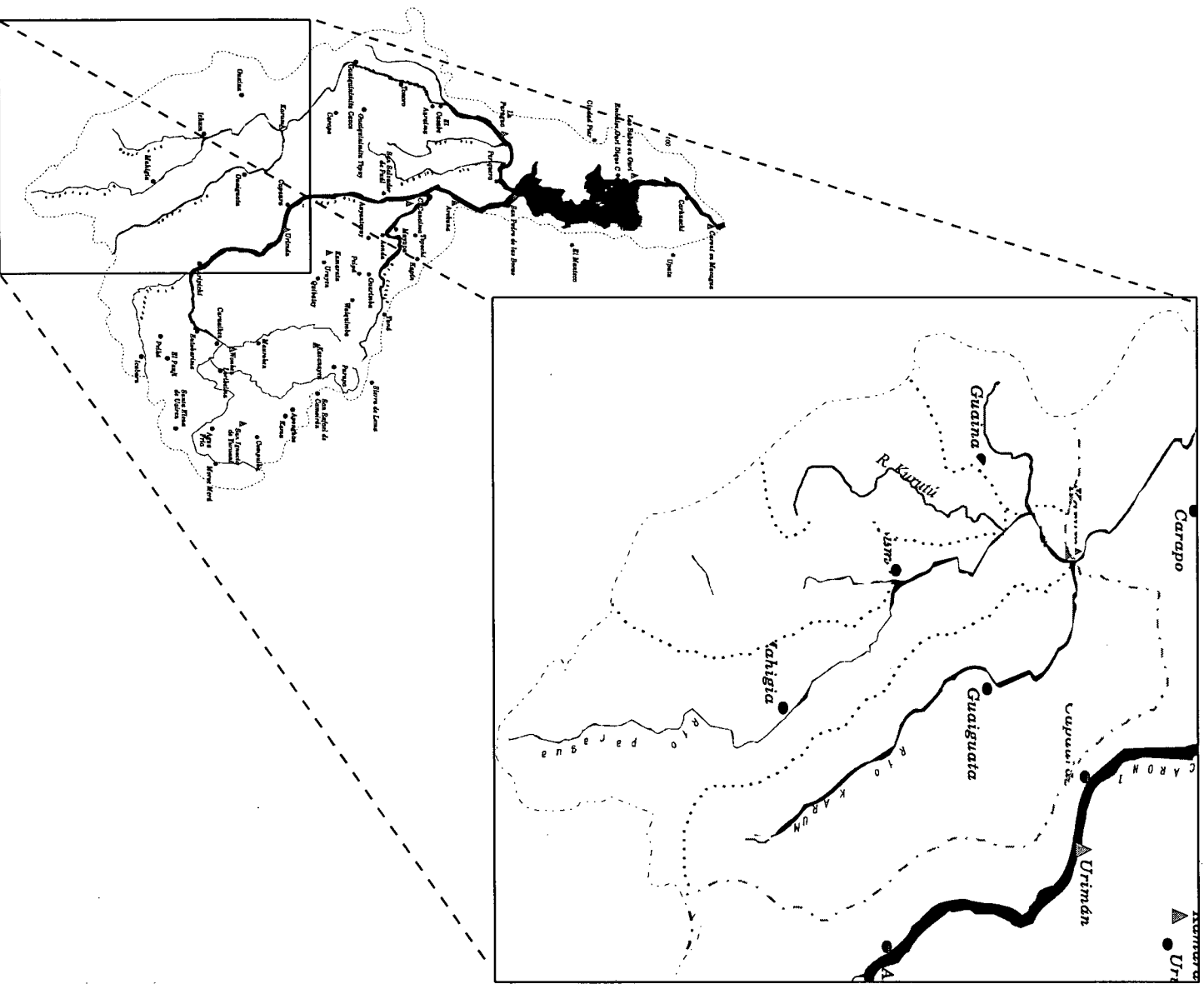
BIBLIOGRAFÍA

- CHOW, MAYS Y MAIDMENT (1994). Hidrología Aplicada. Editorial McGraw-Hill, Bogotá.
- FLORES, Ana Liz (1997). Erodabilidad de la cuenca del río Caroní. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- C.V.G. EDELCA (1994). Caracterización climática de las cuencas de los ríos Caroní y Caura. Departamento de Hidrometeorología, Puerto Ordaz.
- C.V.G. TECMIN (1996). Proyecto inventario de los recursos naturales de Guayana. Ciudad Bolívar.
- C.V.G. EDELCA (1987). Caracterización de la cuenca Caroní - Paragua. División de cuencas e hidrología, Caracas.
- C.V.G. EDELCA (1991). Estudio preliminar del transporte de sedimentos en los ríos Caroní, Paragua y Caura. Departamento de Hidrometeorología, Puerto Ordaz.
- C.V.G. EDELCA (1997). Reporte de muestras de sedimentos a partir de 1994. Departamento de Hidrometeorología (informe interno), Puerto Ordaz.
- C.V.G. EDELCA (1998). Tablas y curvas de gastos. Departamento de Hidrometeorología (informe interno), Puerto Ordaz.

ANEXOS

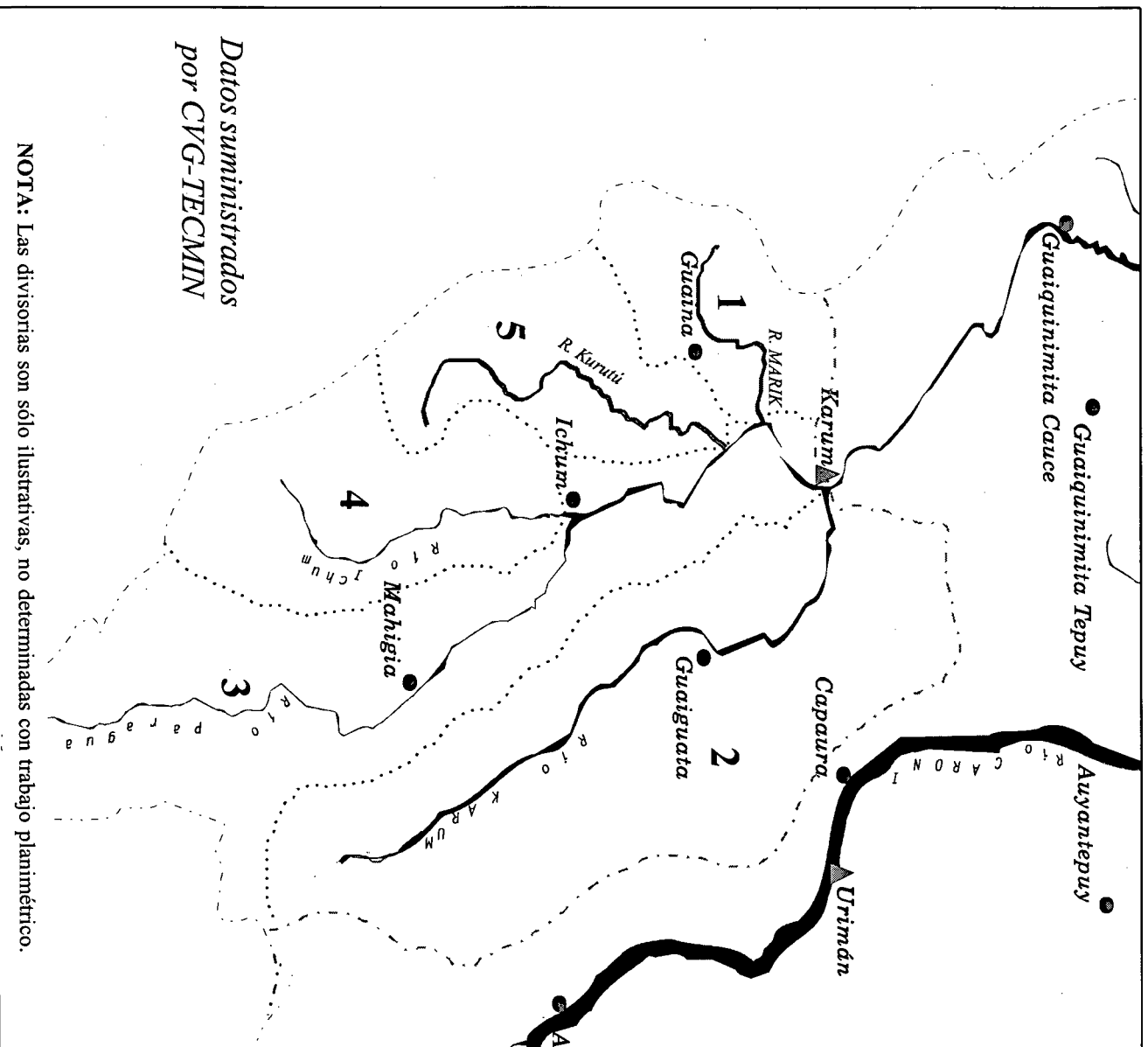
ANEXO I: Mapas de la cuenca estudiada

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUAY UBICACIÓN RELATIVA



NOTA: Las divisorias son sólo ilustrativas, no determinadas con trabajo planimétrico.

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA FISIOGRAFÍA DE SUBCUENCAS



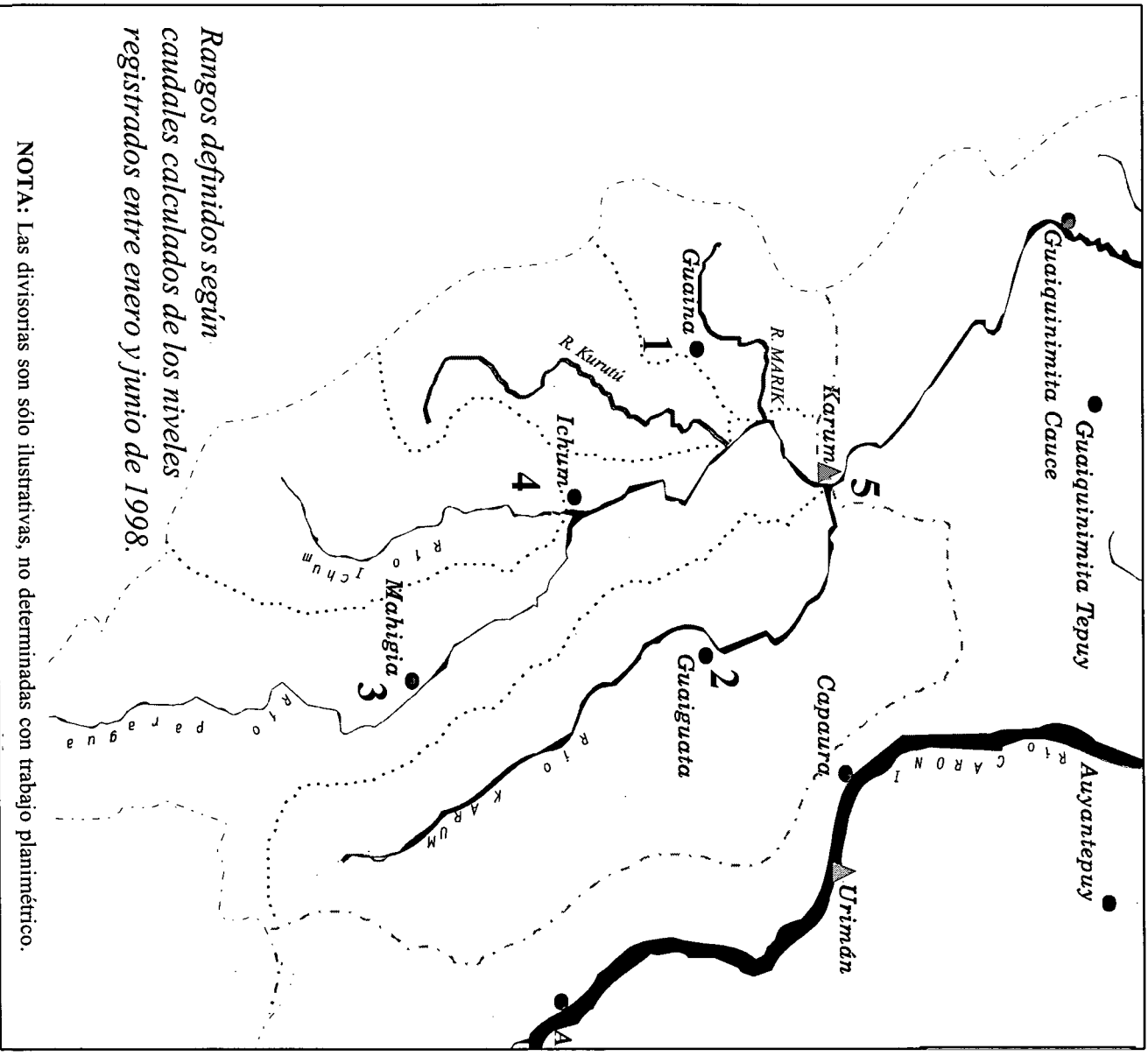
NOTA: Las divisorias son sólo ilustrativas, no determinadas con trabajo planimétrico.

*Datos suministrados
por CVG-TECMIN*

Cuenca del:	Área (km ²)	Área (%)	Long. cauce	Desnivel
1 Marik	1.654	11,55	89 km	393
2 Karum	7.932	55,39	202 km	425
3 Paragua hasta Mahigia	-	-	-	-
4 Ichum	2.627	18,35	125 km	455
5 Kurutú	-	-	-	-

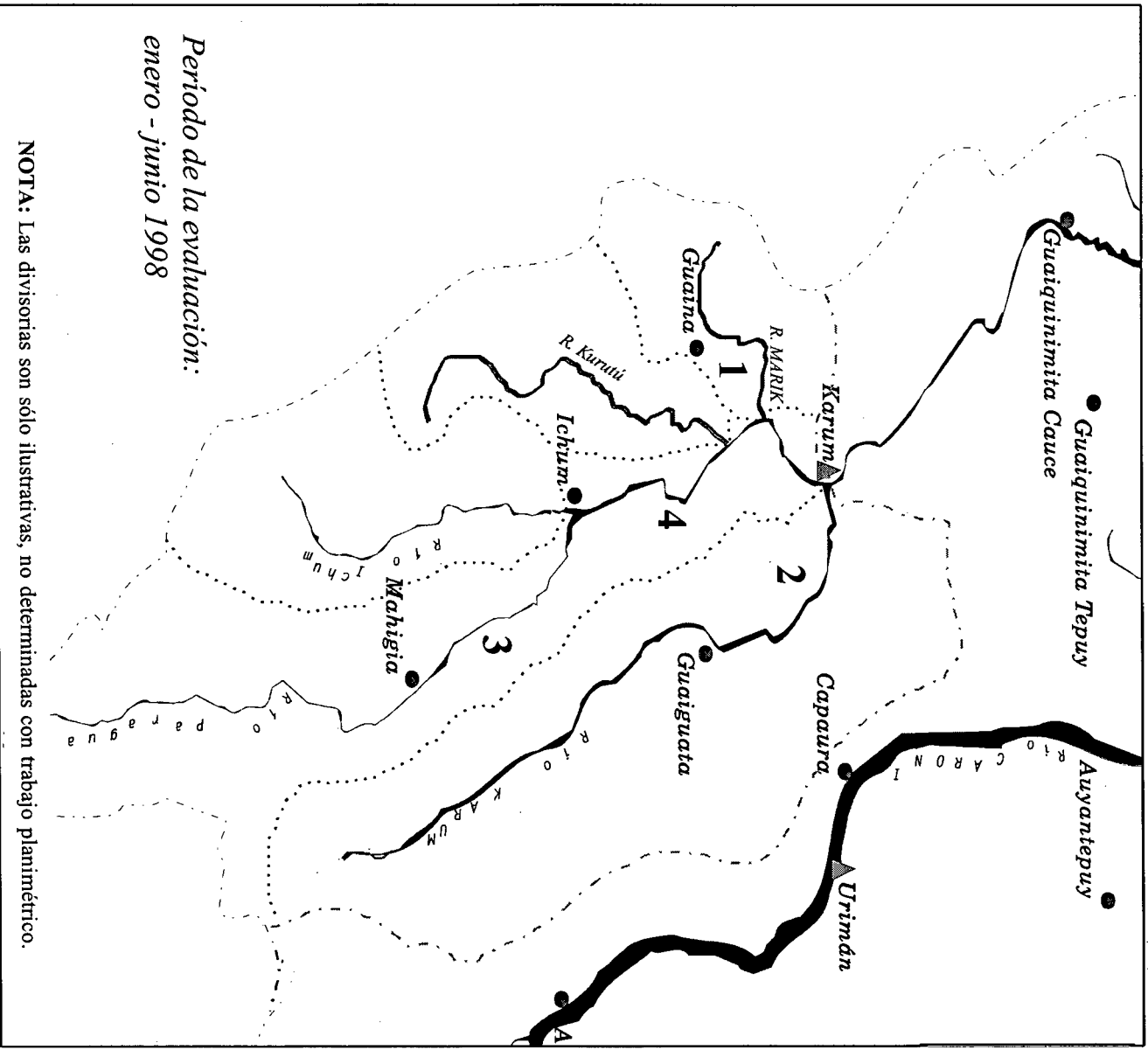
Área total de la cuenca hasta Karum: 14.319 km²

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA CONDICIONES DE CAUDALES



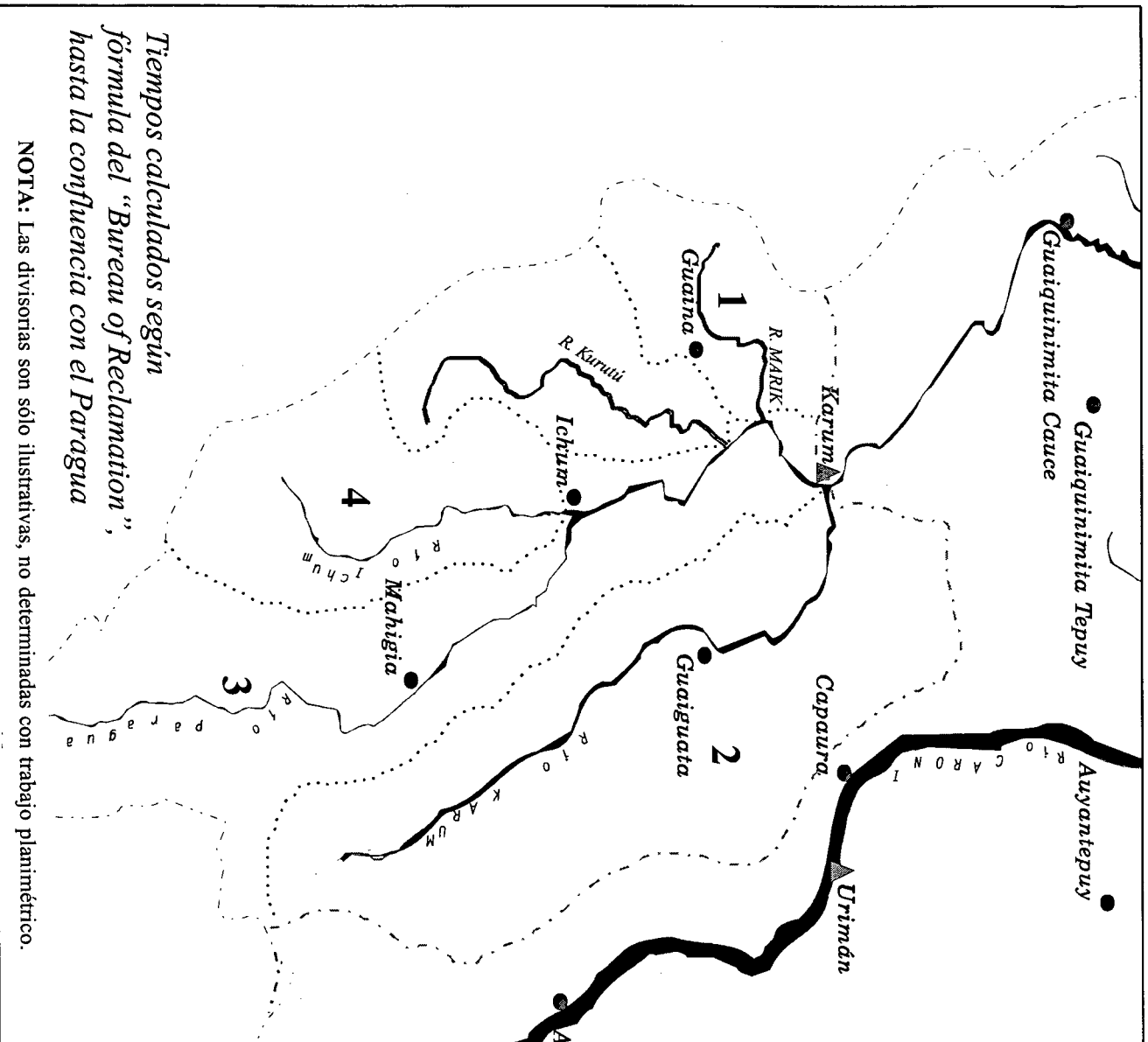
	Cauce / estación	Condiciones de caudal (en m ³ s):		
		aguas bajas	aguas medias	aguas altas
1	Marik en Guaina	menos de 100	de 100 a 250	más de 250
2	Karum en Guaiguatá	menos de 300	de 300 a 600	más de 600
3	Paragua en Mahigia	menos de 200	de 200 a 400	más de 400
4	Paragua en Ichum	menos de 500	de 500 a 700	más de 700
5	Paragua en Karum	menos de 750	de 750 a 2200	más de 2200

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUAY TIEMPOS DE VIAJE POR TRAMOS



Tramo	Tiempos de viaje (h)		
	aguas bajas	aguas medias	aguas altas
1 Guaina - Karum	13	11	9
2 Guaguata - Karum	10	10	8
3 Mahigia - Ichum	12	12	16
4 Ichum - Karum	13	12	9

CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN DE SUBCUENCAS

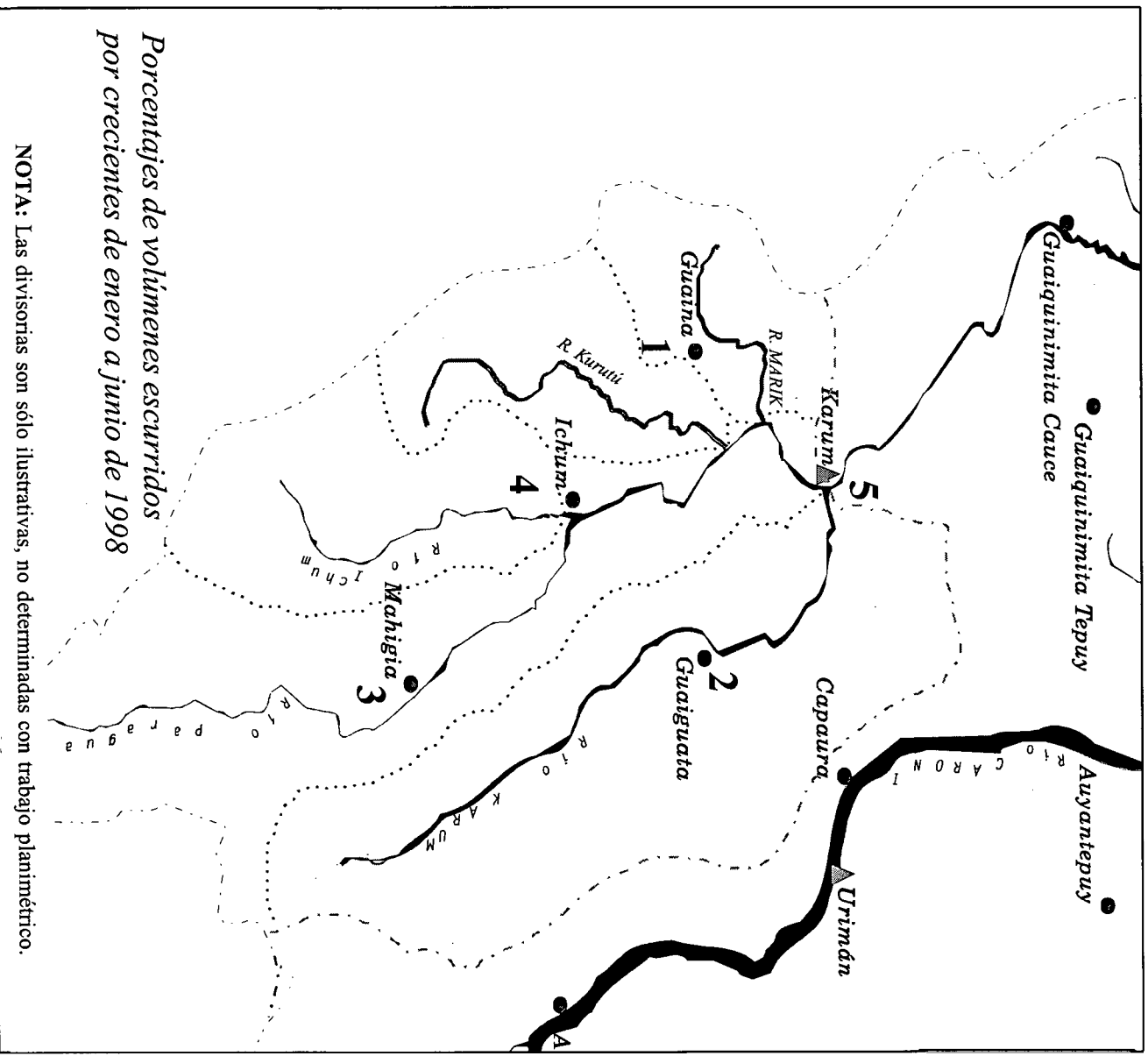


*Tiempos calculados según
fórmula del "Bureau of Reclamation",
hasta la confluencia con el Paragua*

NOTA: Las divisorias son sólo ilustrativas, no determinadas con trabajo planimétrico.

	Cuenca del:	Tiempos de concentración (h)
1	Marik	16,97
2	Karum	42,58
3	Paragua hasta estación Karum	61,25
4	Ichum	17,76

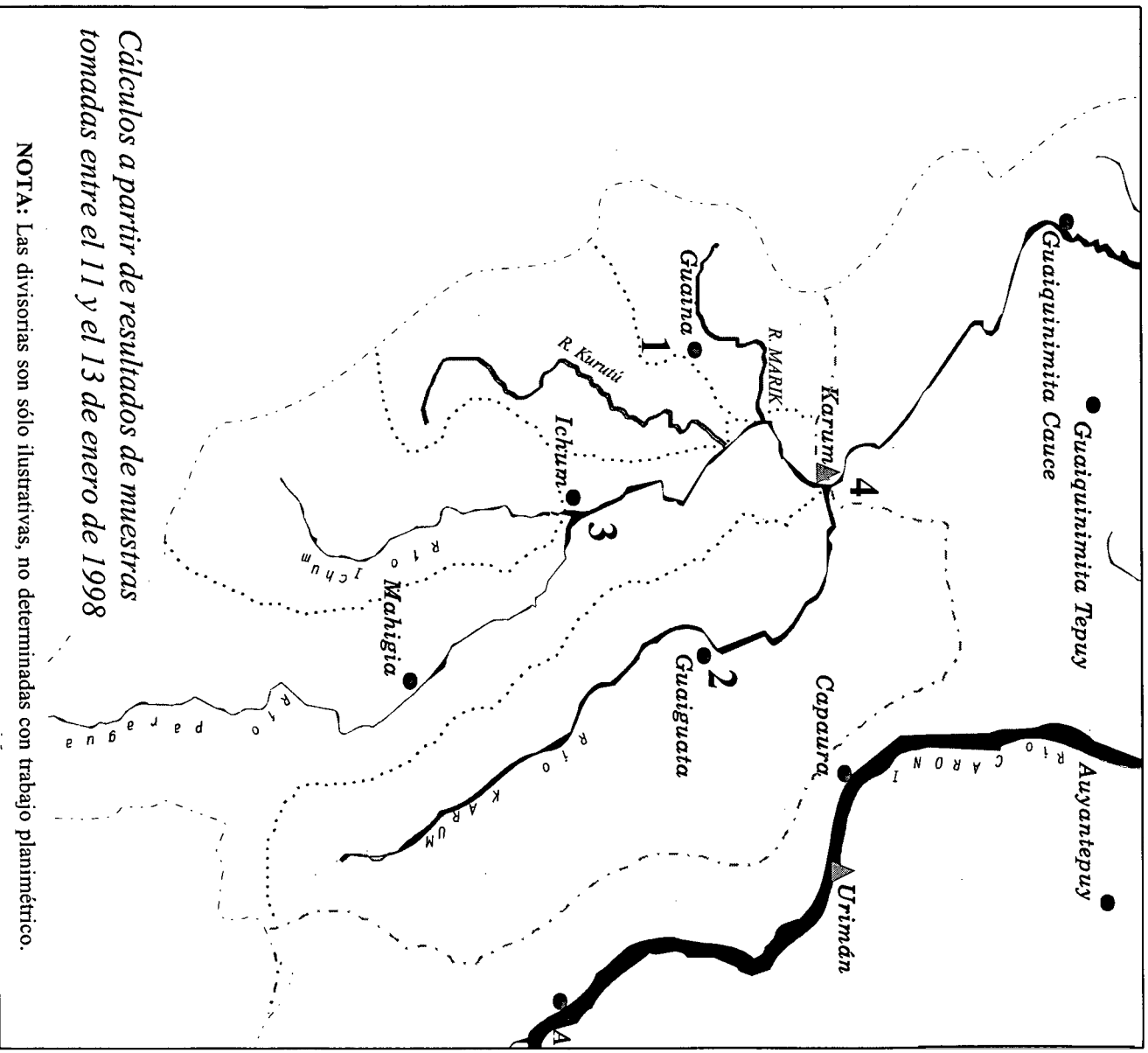
CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA APORTES PORCENTUALES



Cauce / estación	Aportes porcentuales (%)		
	aguas bajas	aguas medias	aguas altas
1 Marik en Guaina	13,89	9,11	7,58
2 Karum en Guaguatá	26,88	20,21	27,46
3 Paragua en Mahigia	55,41	51,90	54,94
4 Paragua en Ichum	34,80	31,14	49,84

Todos los porcentajes referidos al Paragua en Karum
excepto 3, que está referido al Paragua en Ichum.

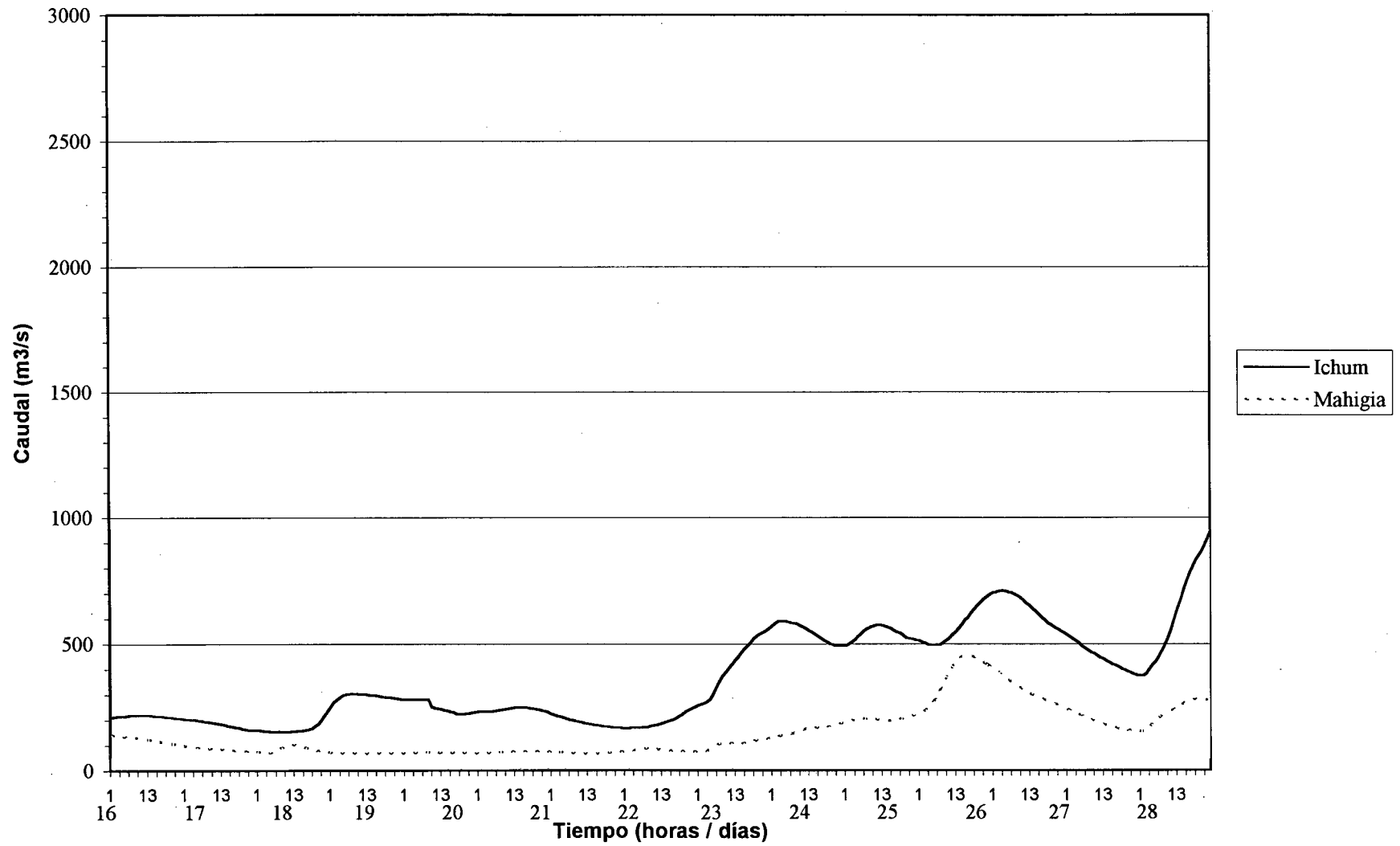
CUENCA ALTA DEL RÍO PARAGUA APORTES PORCENTUALES



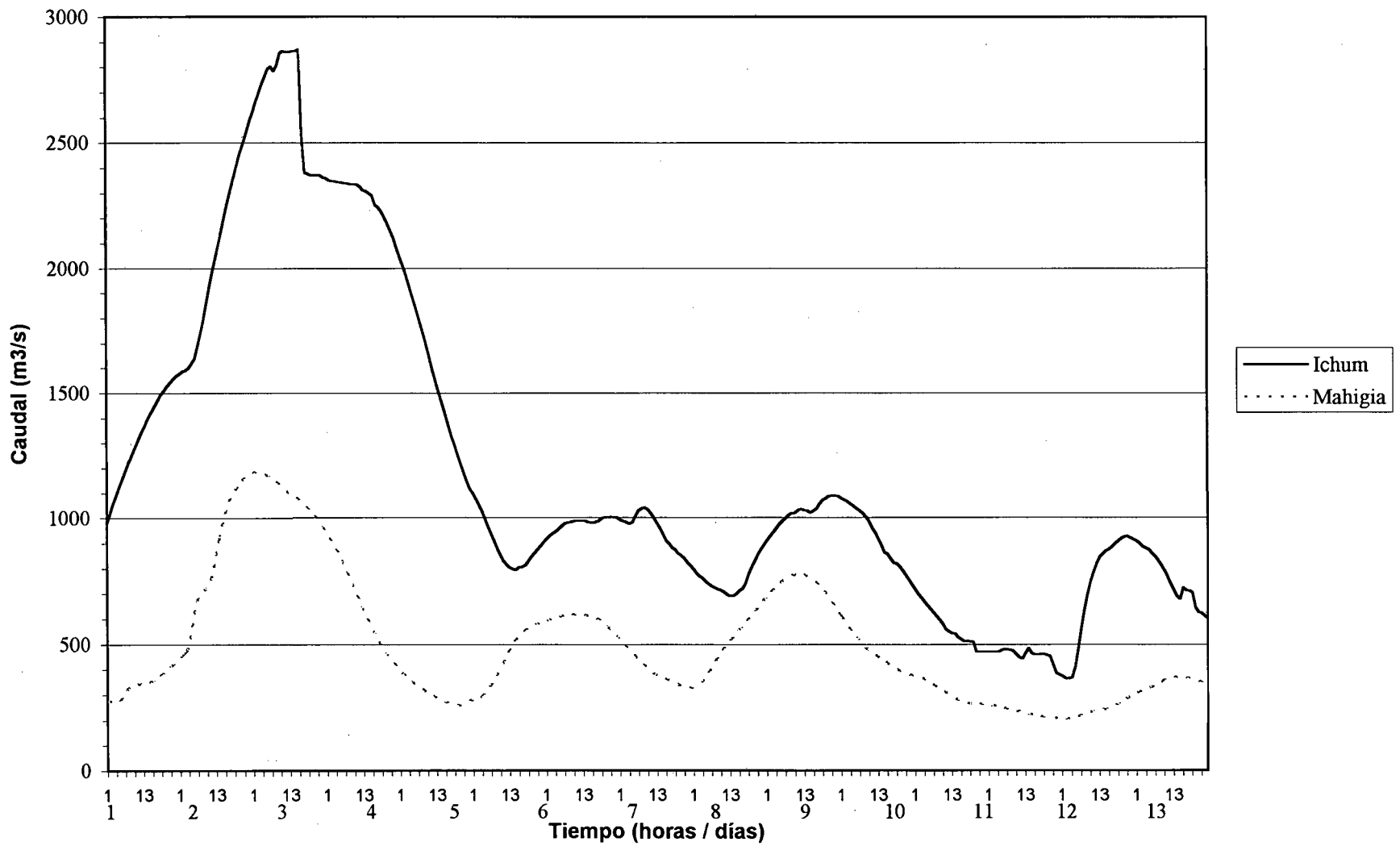
	Cauce / estación	Aportes sólidos		
		concentración (mg/l)	caudal (ton/día)	porcentaje
1	Marik en Guaina	15,0	62,08	2,42
2	Karum en Guaiaguatá	52,3	1710,34	66,64
3	Paragua en Ichum	19,1	525,93	20,49
4	Paragua en Karum	24,2	268,26	10,45

ANEXO 2: Hidrogramas de crecientes

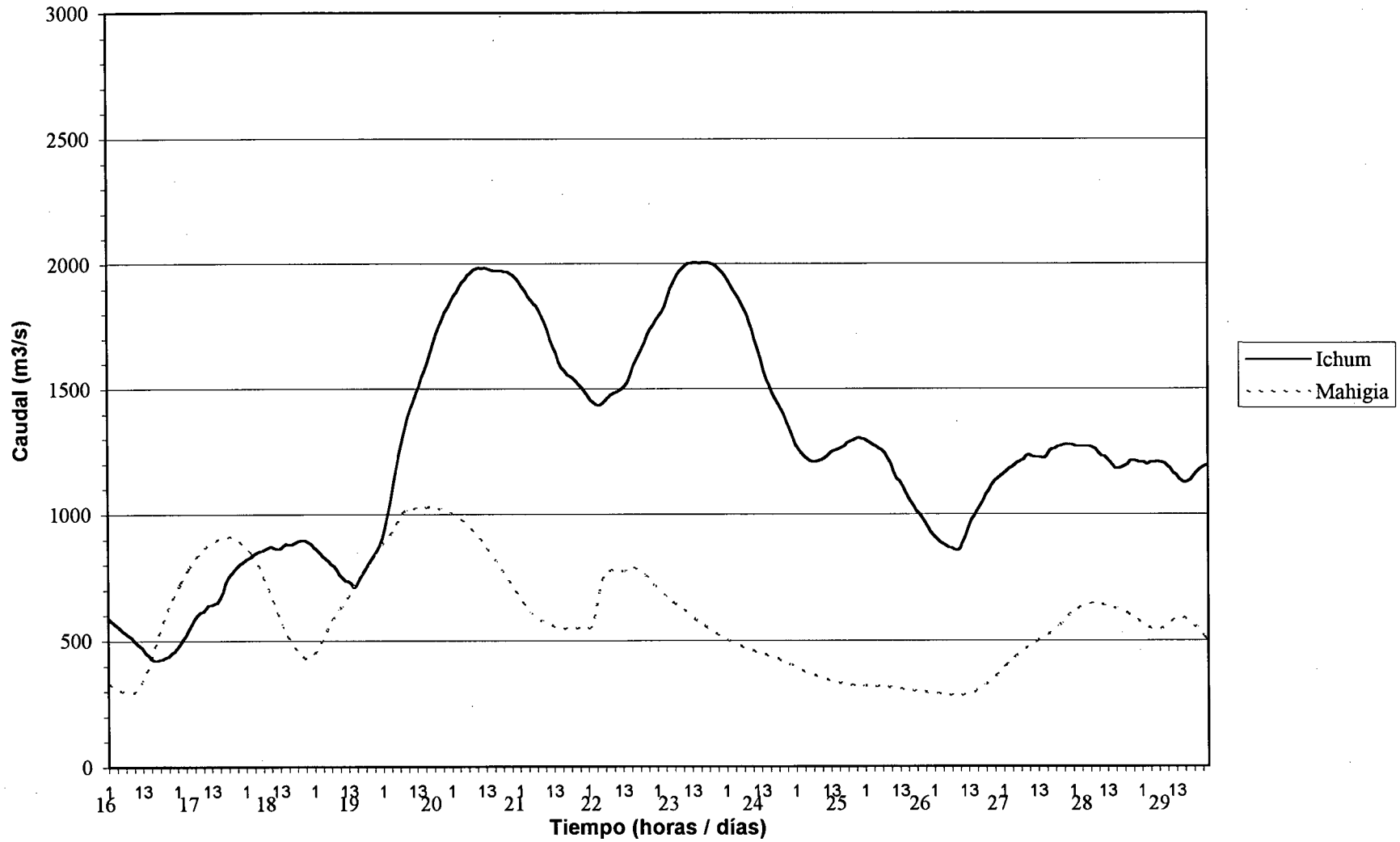
Confrontación de hidrogramas en el eje Mahigia-Ichum, Período del 16 al 30 de abril de 1998



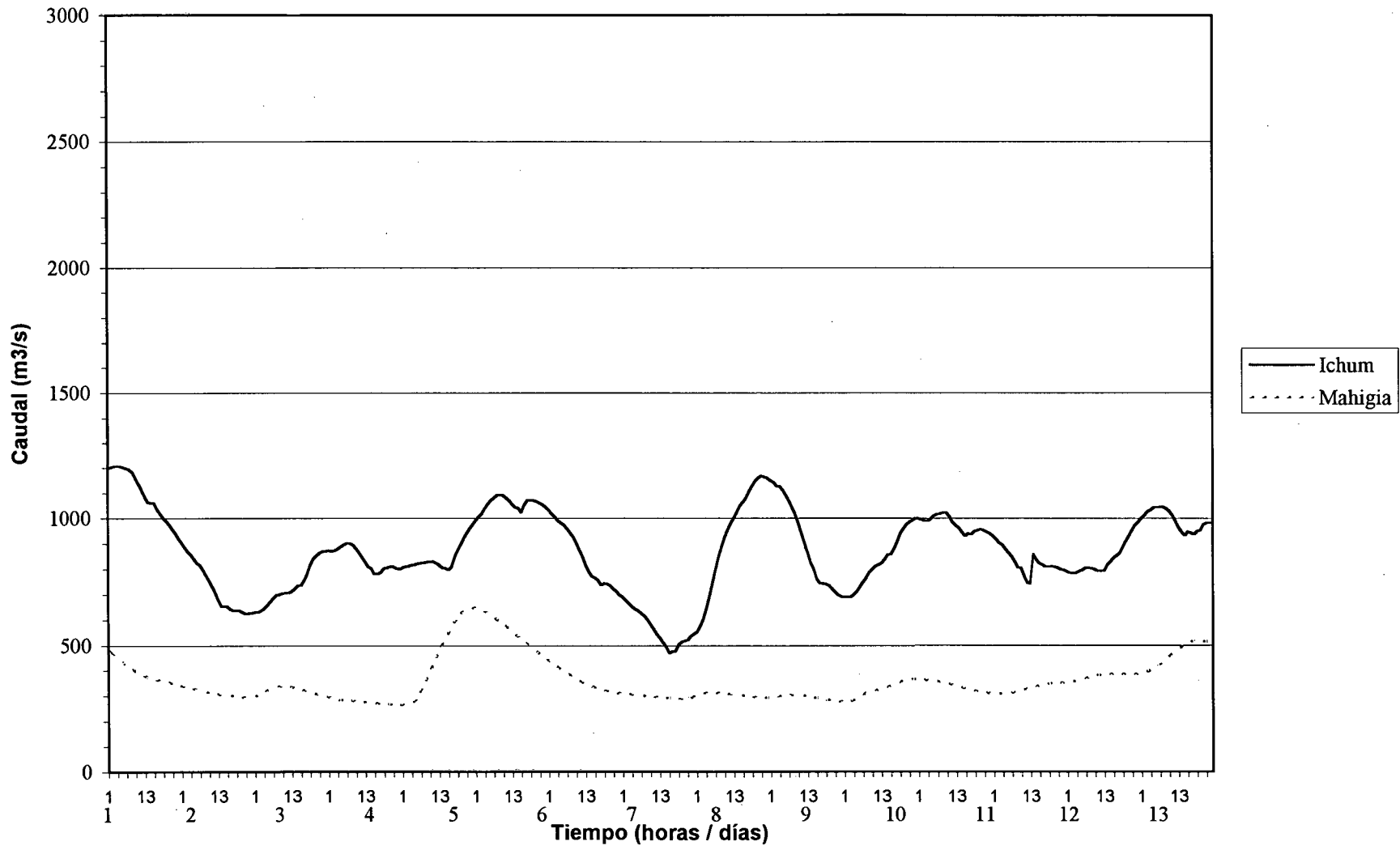
Confrontación de hidrogramas, eje Mahigia-Ichum, Período del 01 al 15 de mayo de 1998



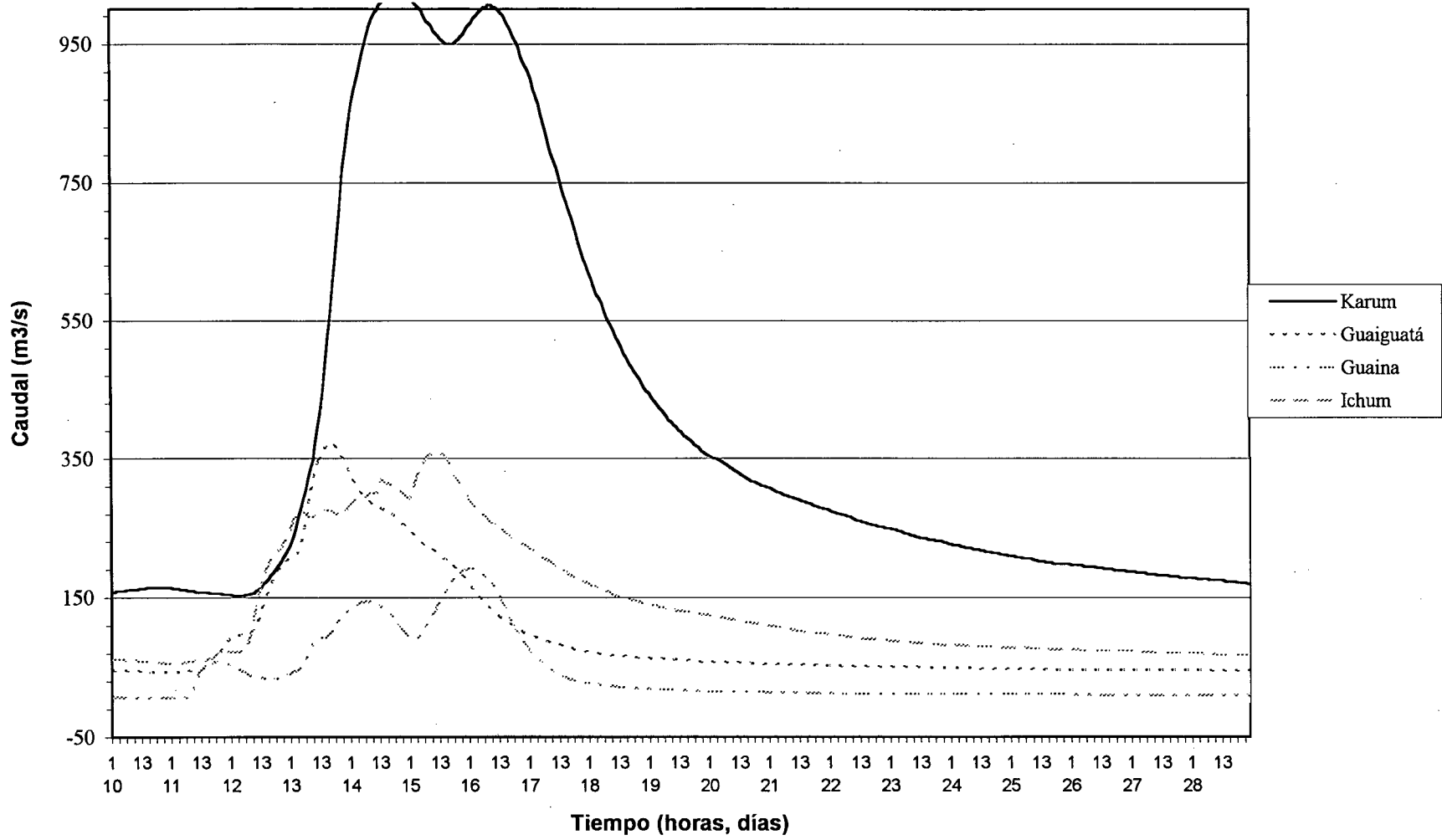
Confrontación de hidrogamas, eje Mahigia-Ichum, Período del 16 al 31 de mayo de 1998



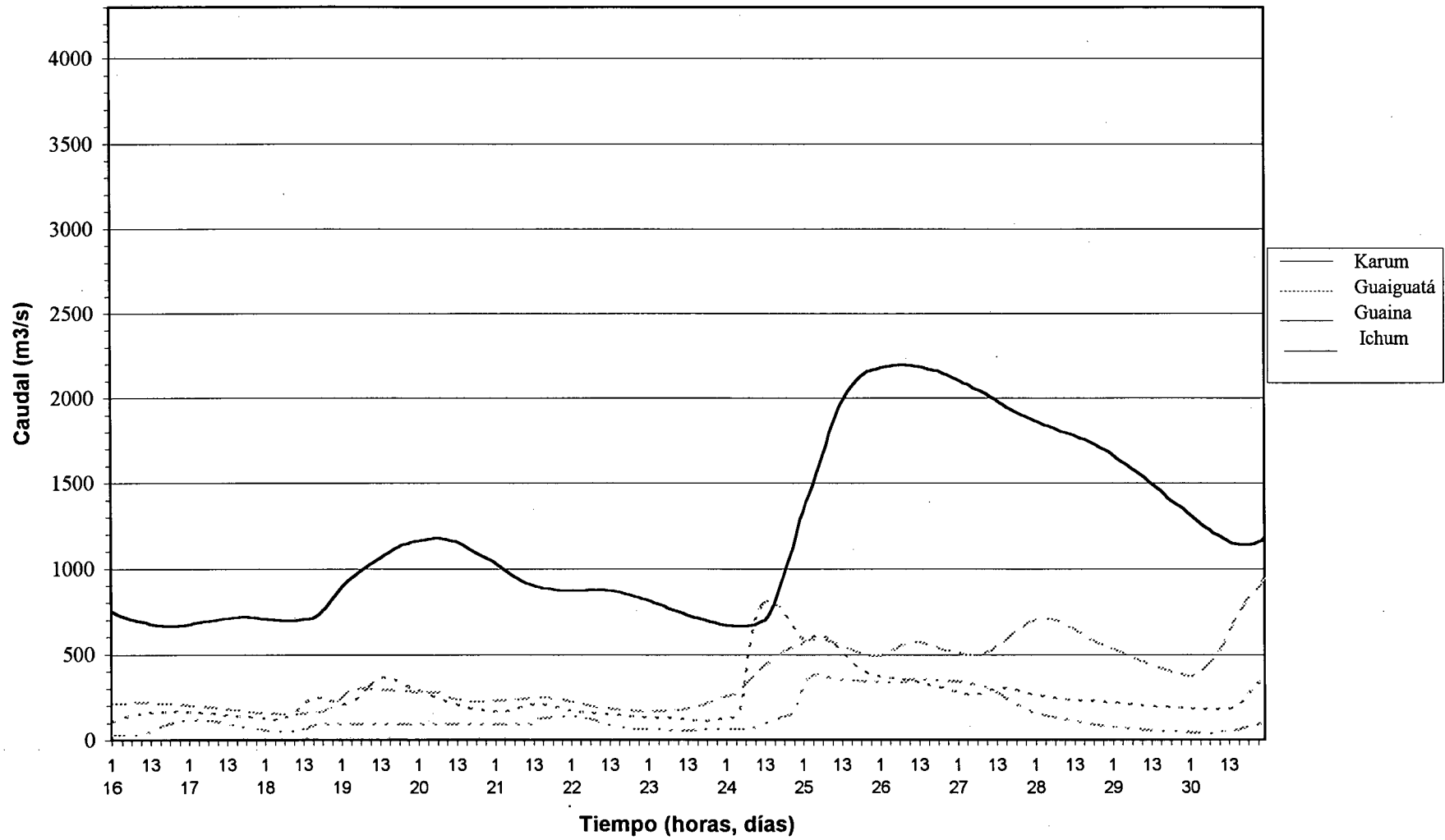
Confrontación de hidrogramas, eje Mahigia-Ichum, Período del 01 al 15 de junio de 1998



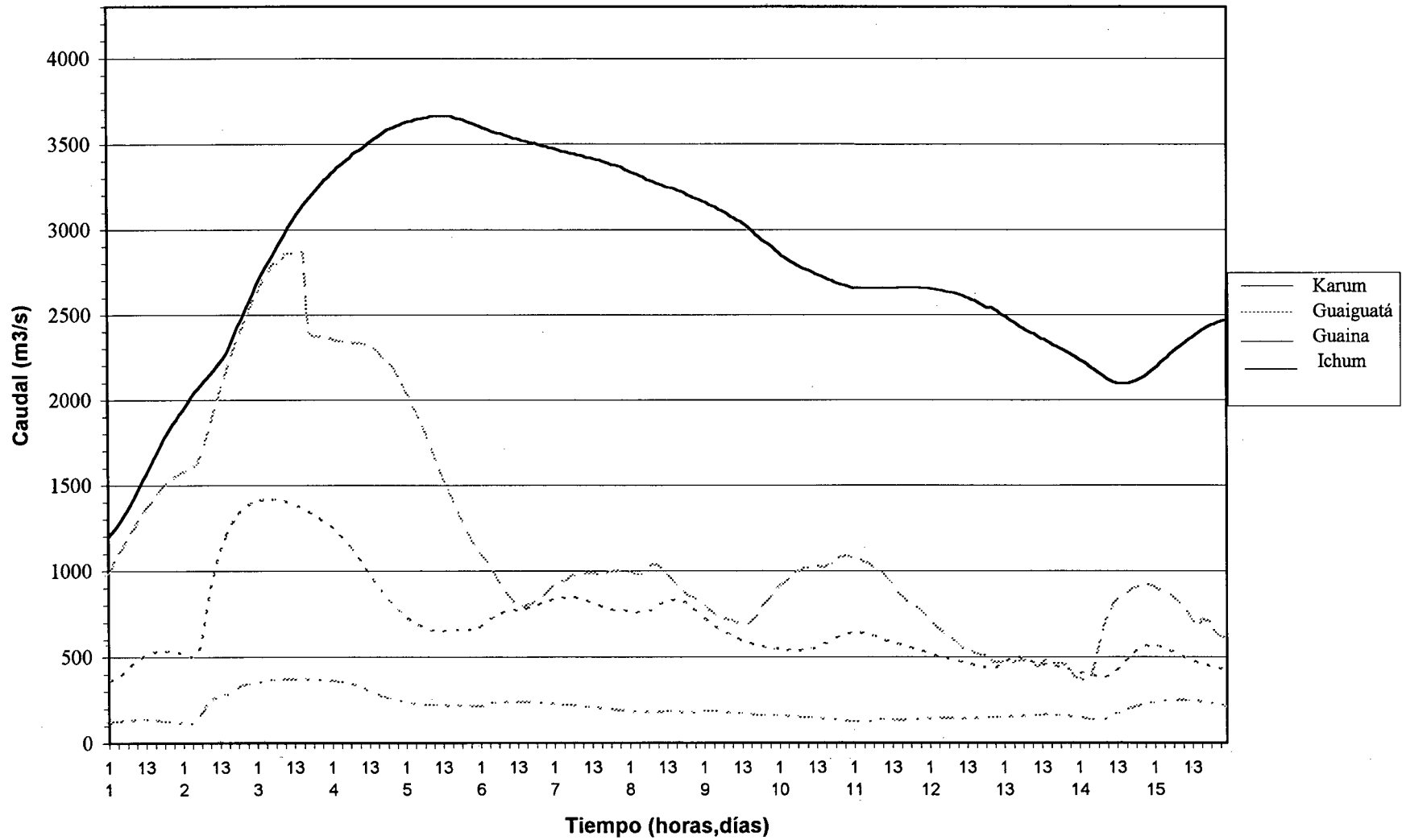
Confrontación de hidrogramas: (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 10 al 28 de febrero de 1998



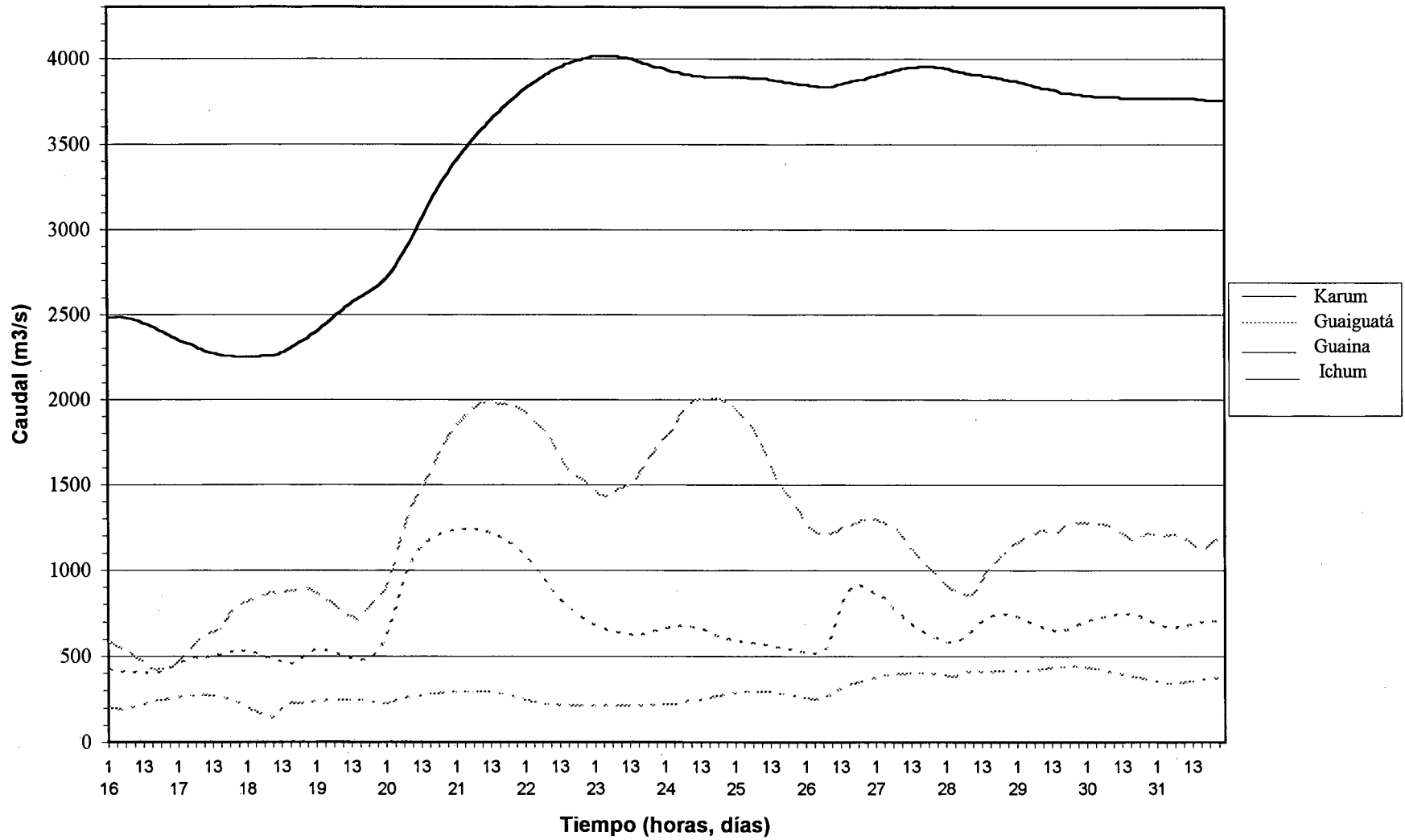
Confrontación de hidrogramas: (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 16 al 30 de abril de 1998



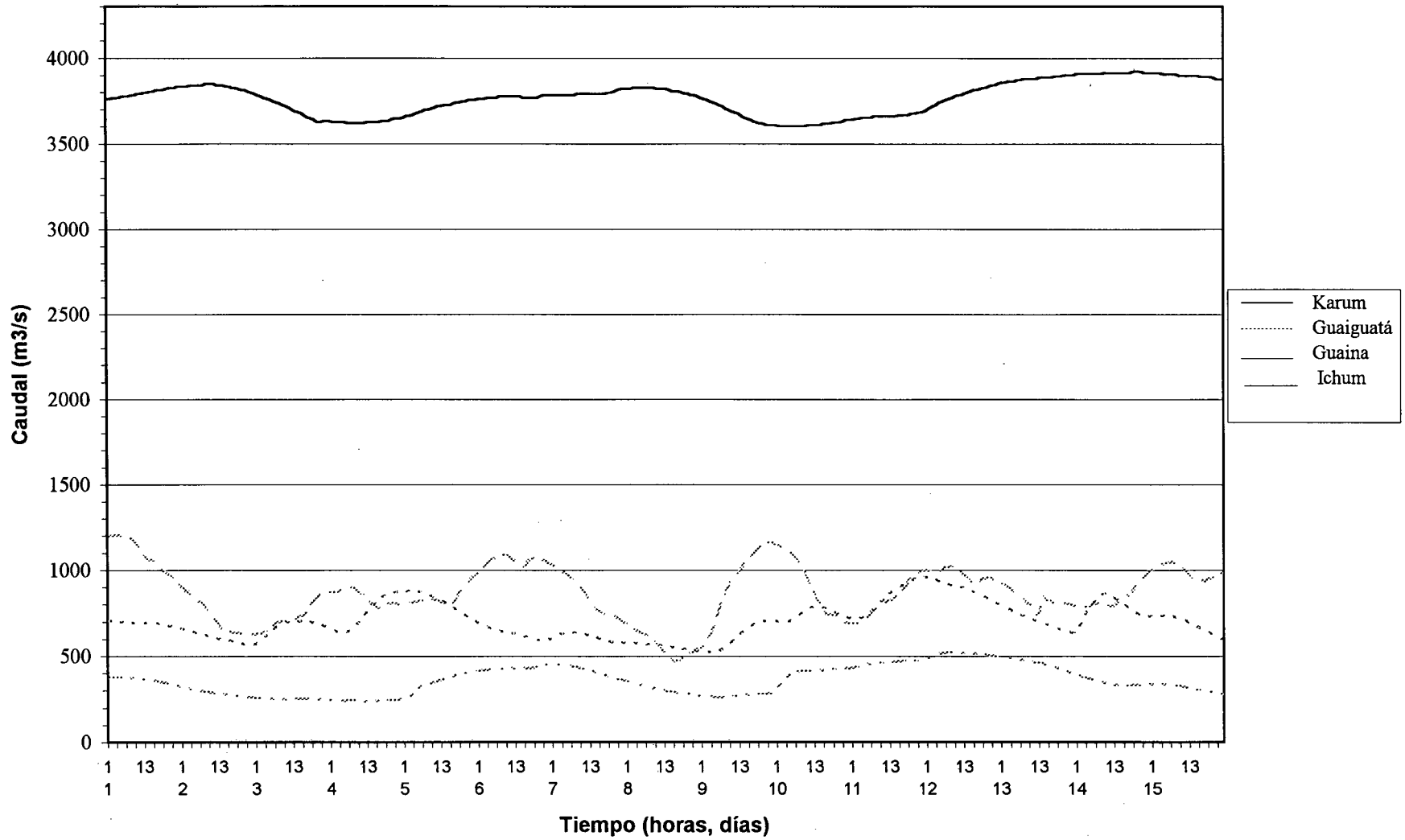
Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 01 al 15 de mayo de 1998



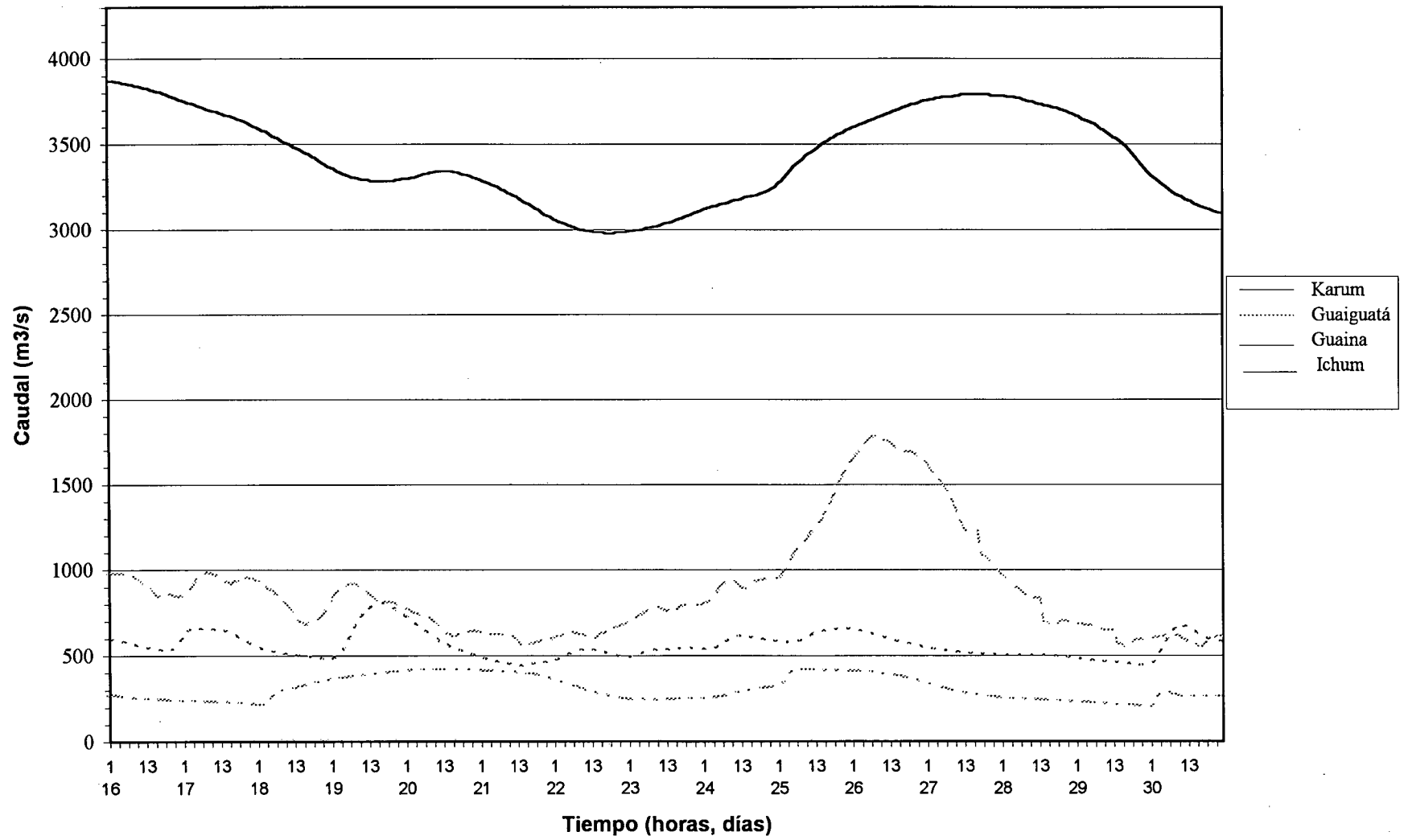
Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 16 al 31 de mayo de 1998



Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 01 al 15 de junio de 1998

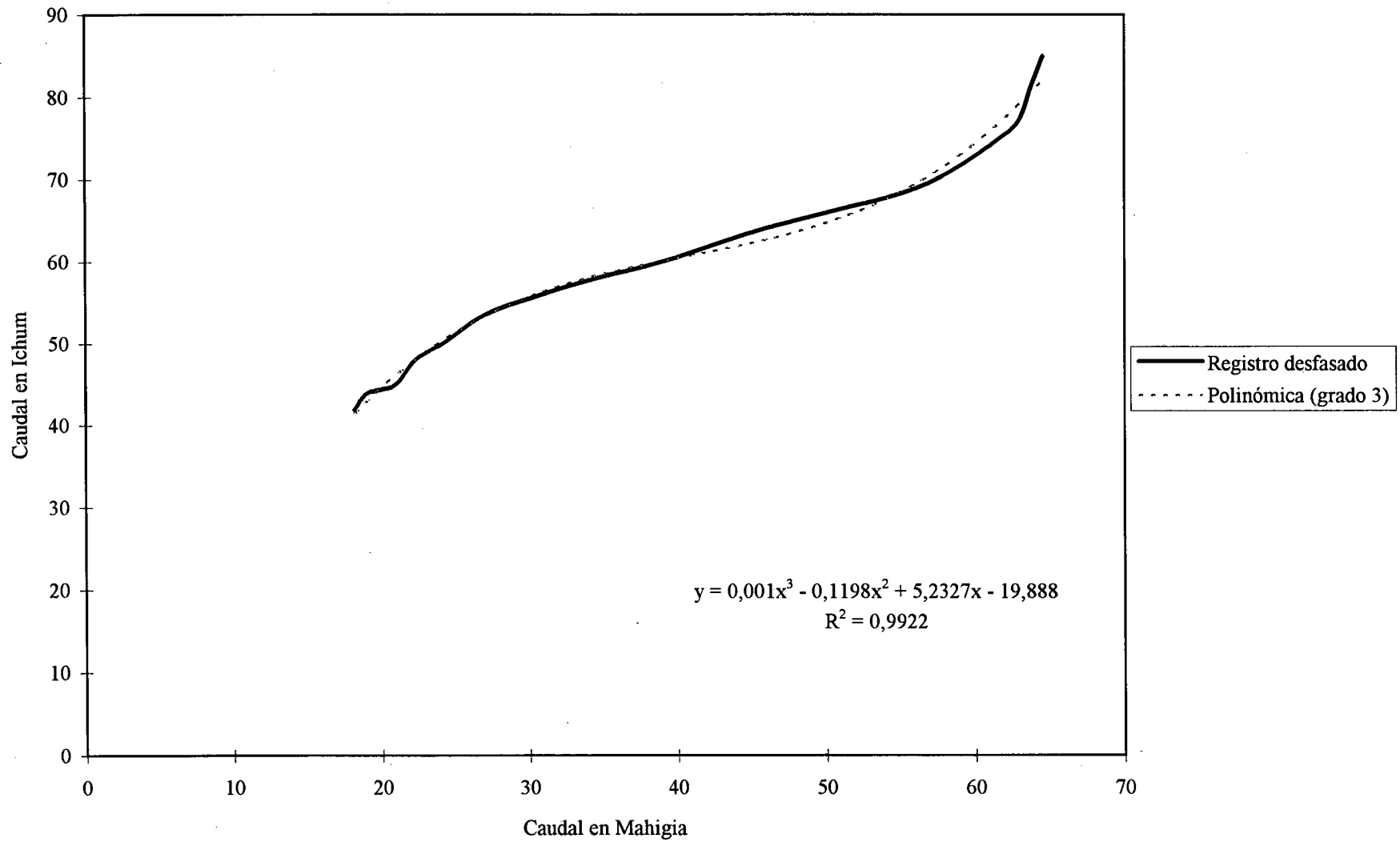


Confrontación (Guaina, Guaiguatá, Ichum)-Karum, Período del 16 al 30 de junio de 1998

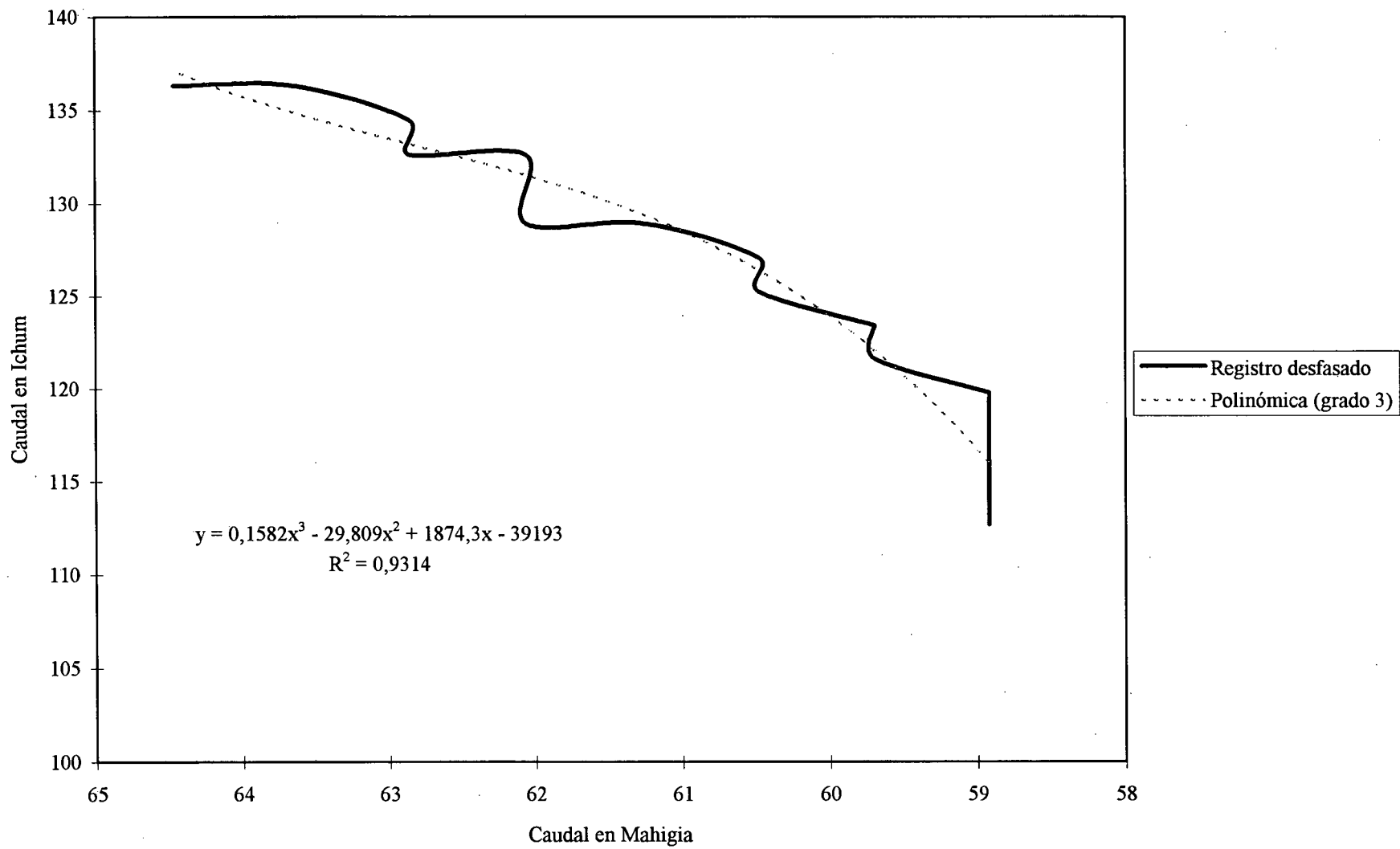


ANEXO 3: Curvas de regresiones de ajuste

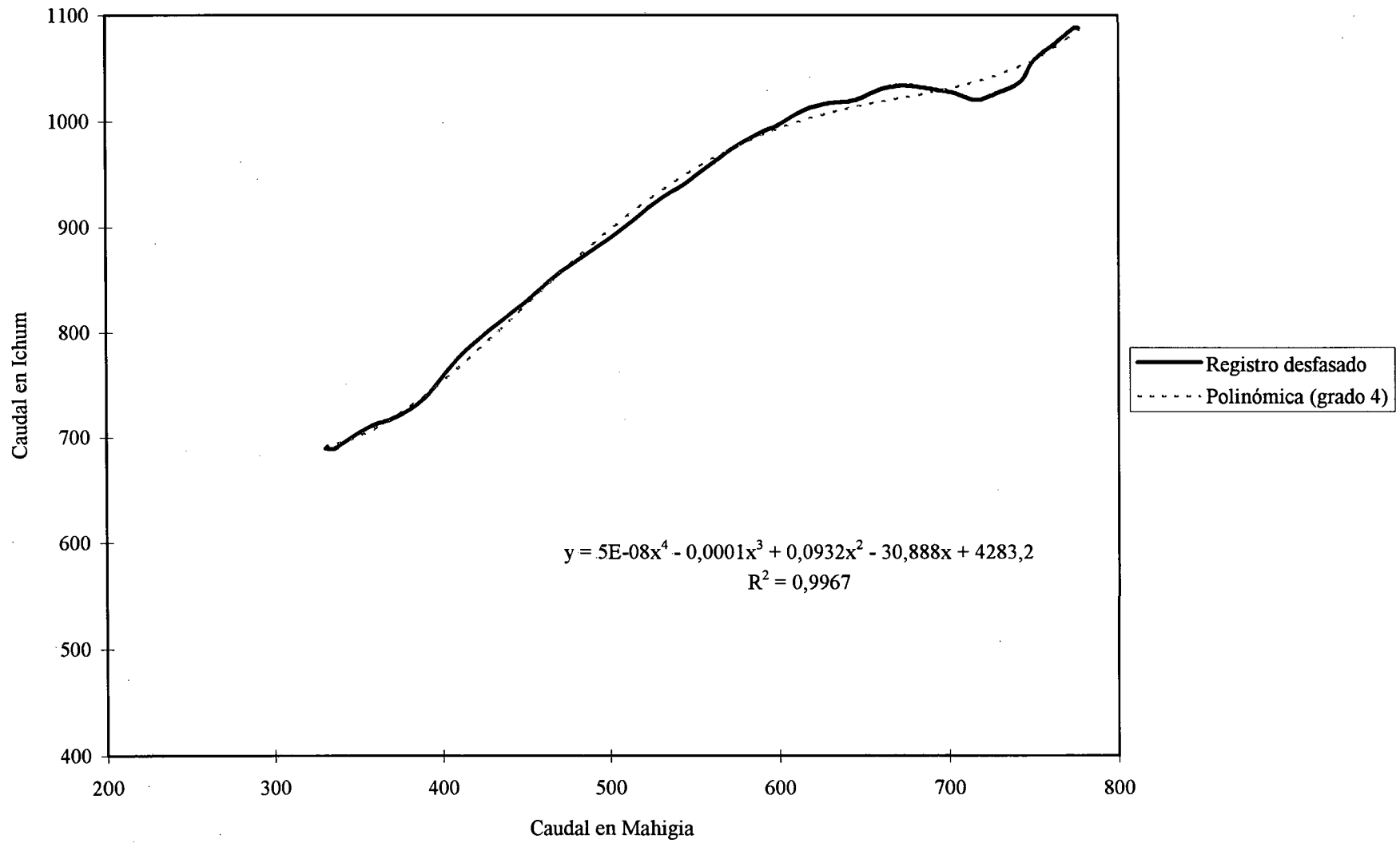
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 04-04-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



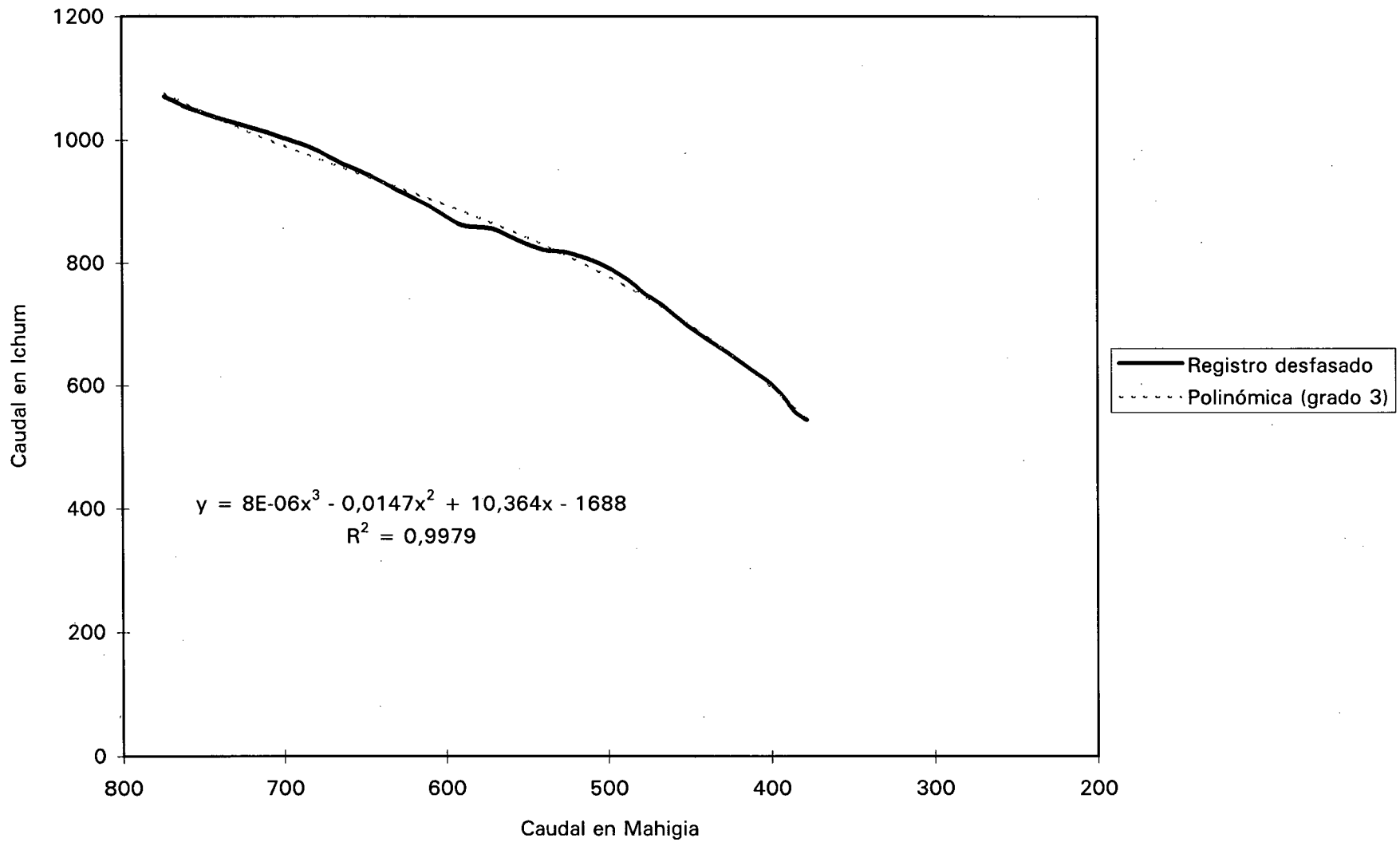
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 04-04-98, rama descendente.
Desfase: 25 h



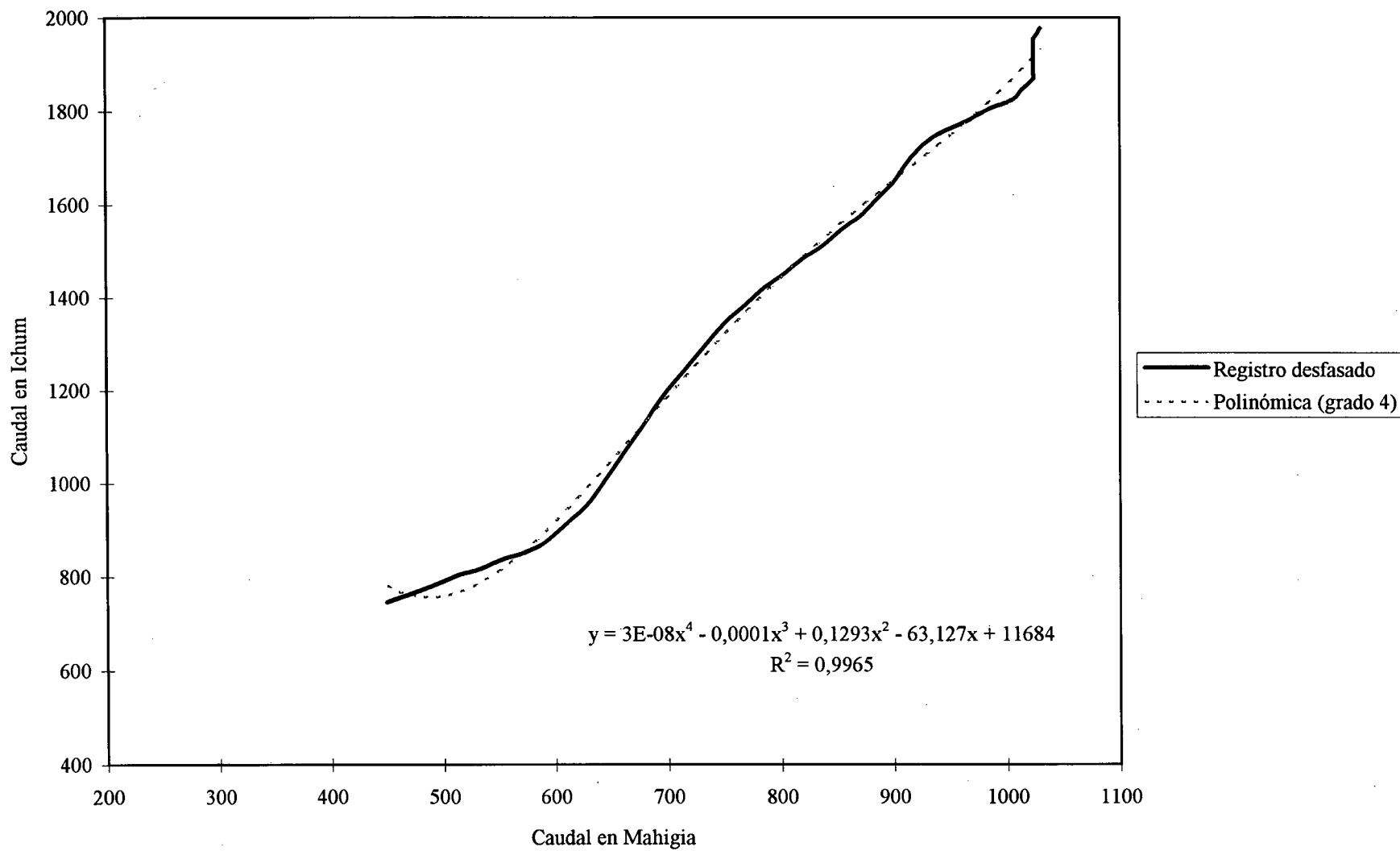
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 09-05-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



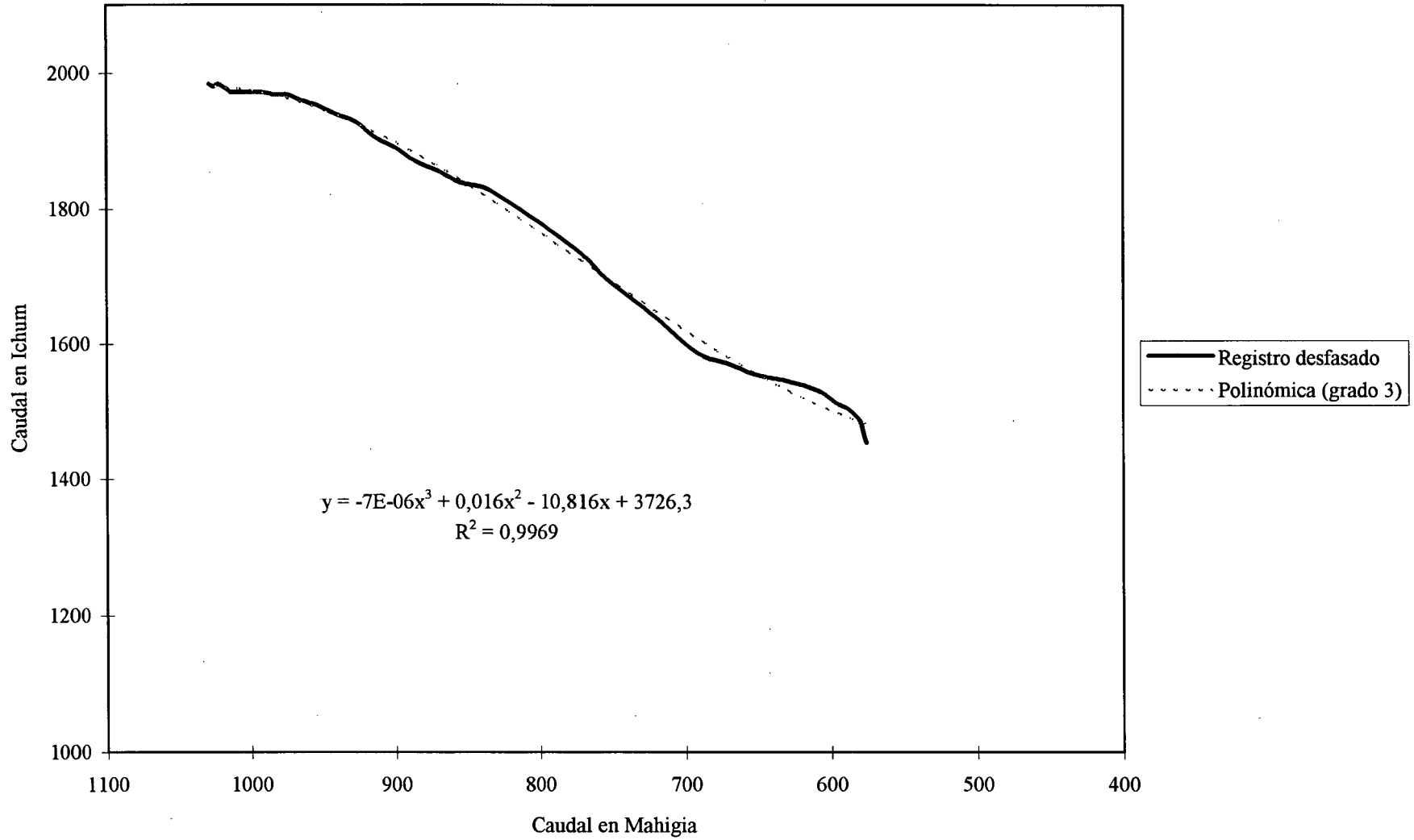
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 09-05-98, rama descendente.
Desfase: 13 h



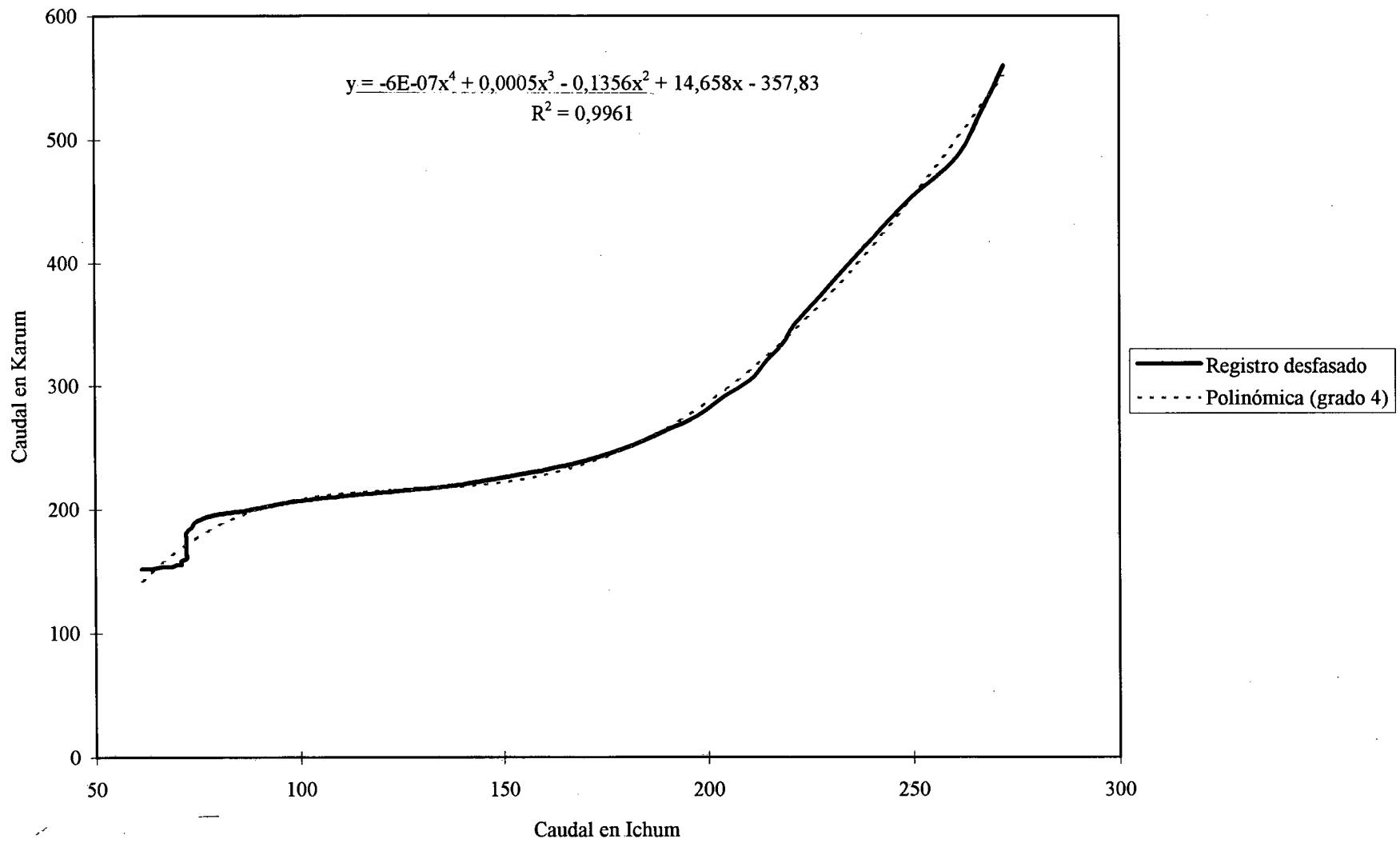
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 19-05-98, rama ascendente.
Desfase: 16 h



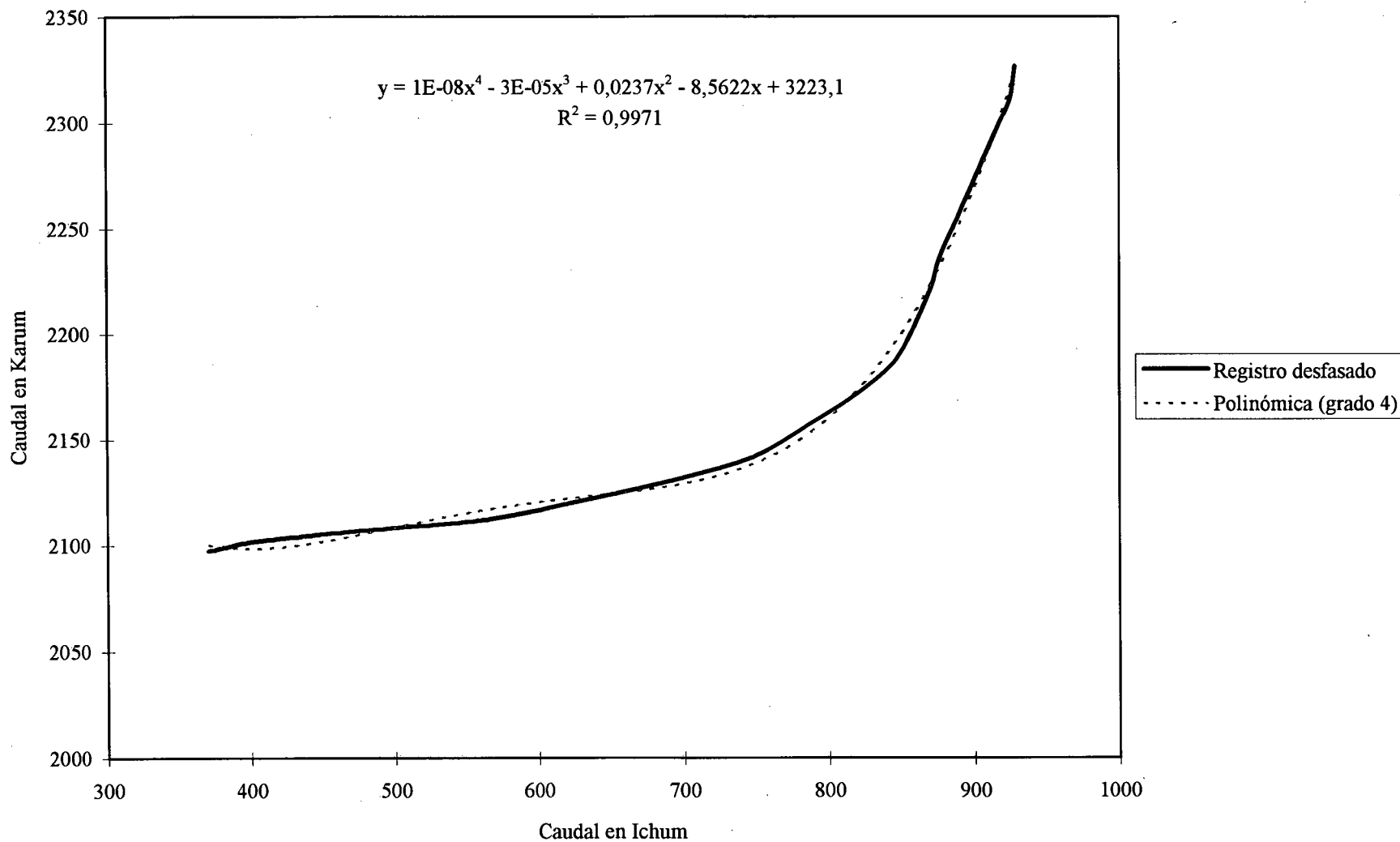
Tramo Mahigia-Ichum: Correlación para creciente del 19-05-98, rama descendente.
Desfase: 16 h



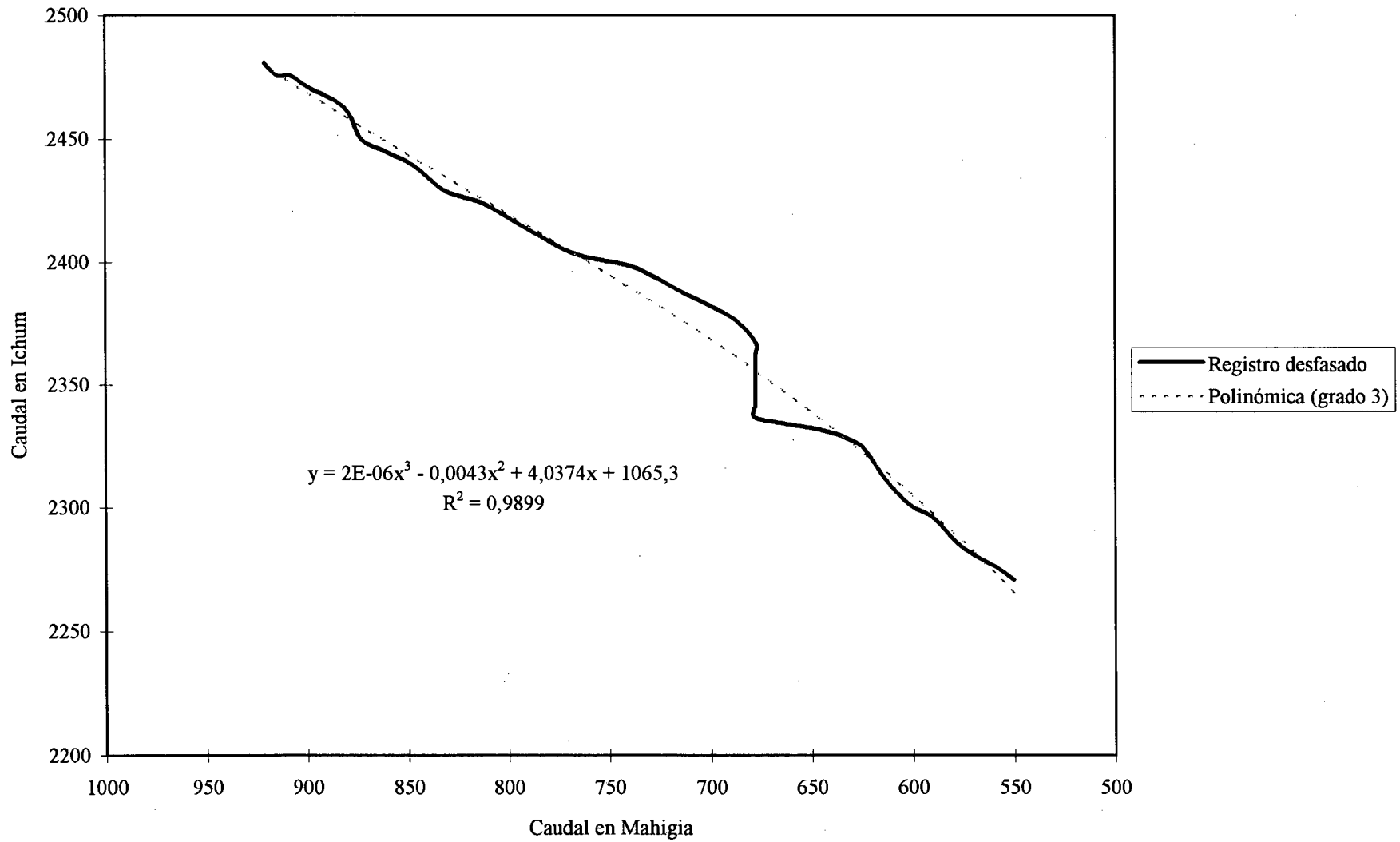
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 11-02-98, rama ascendente.
Desfase: 13 h



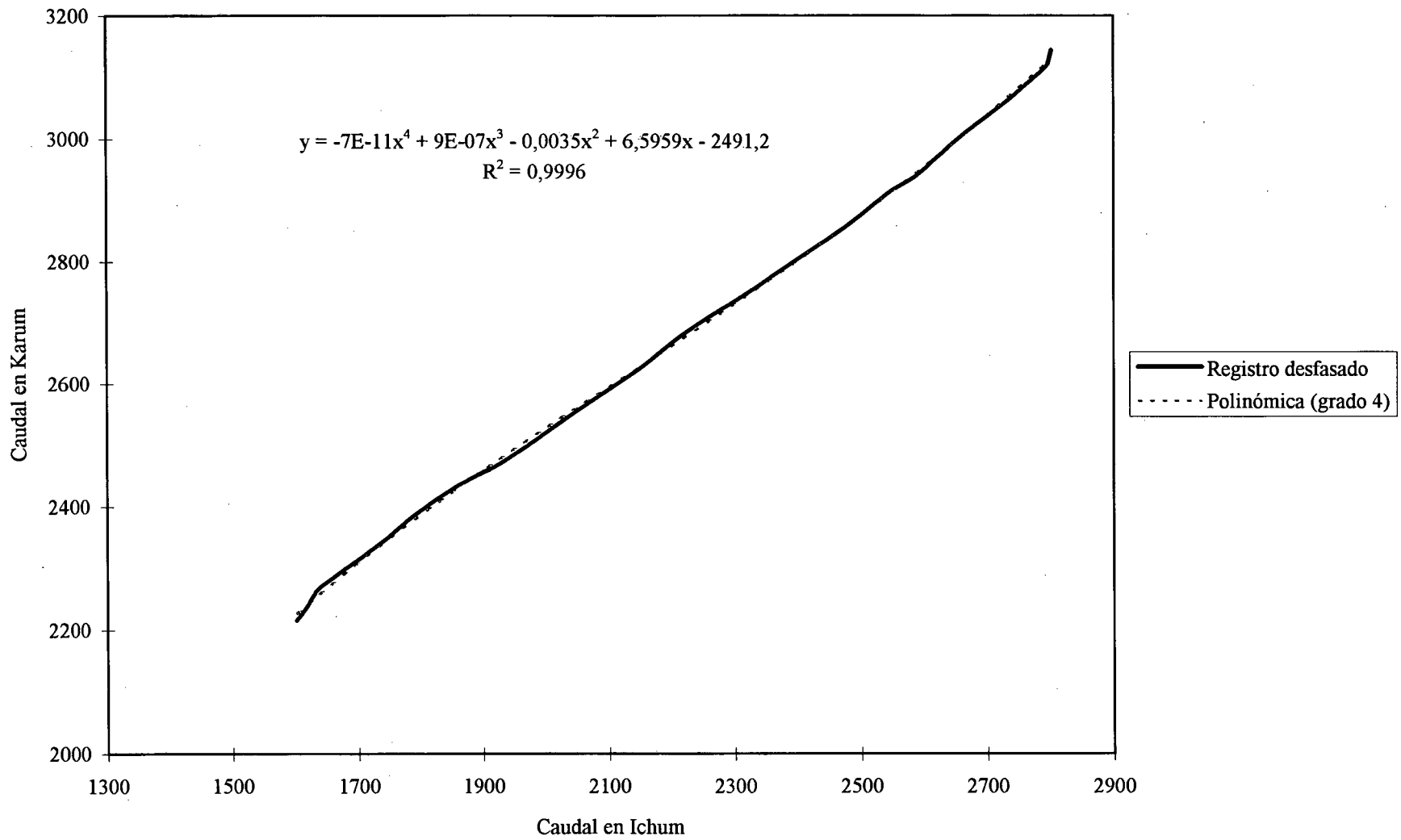
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



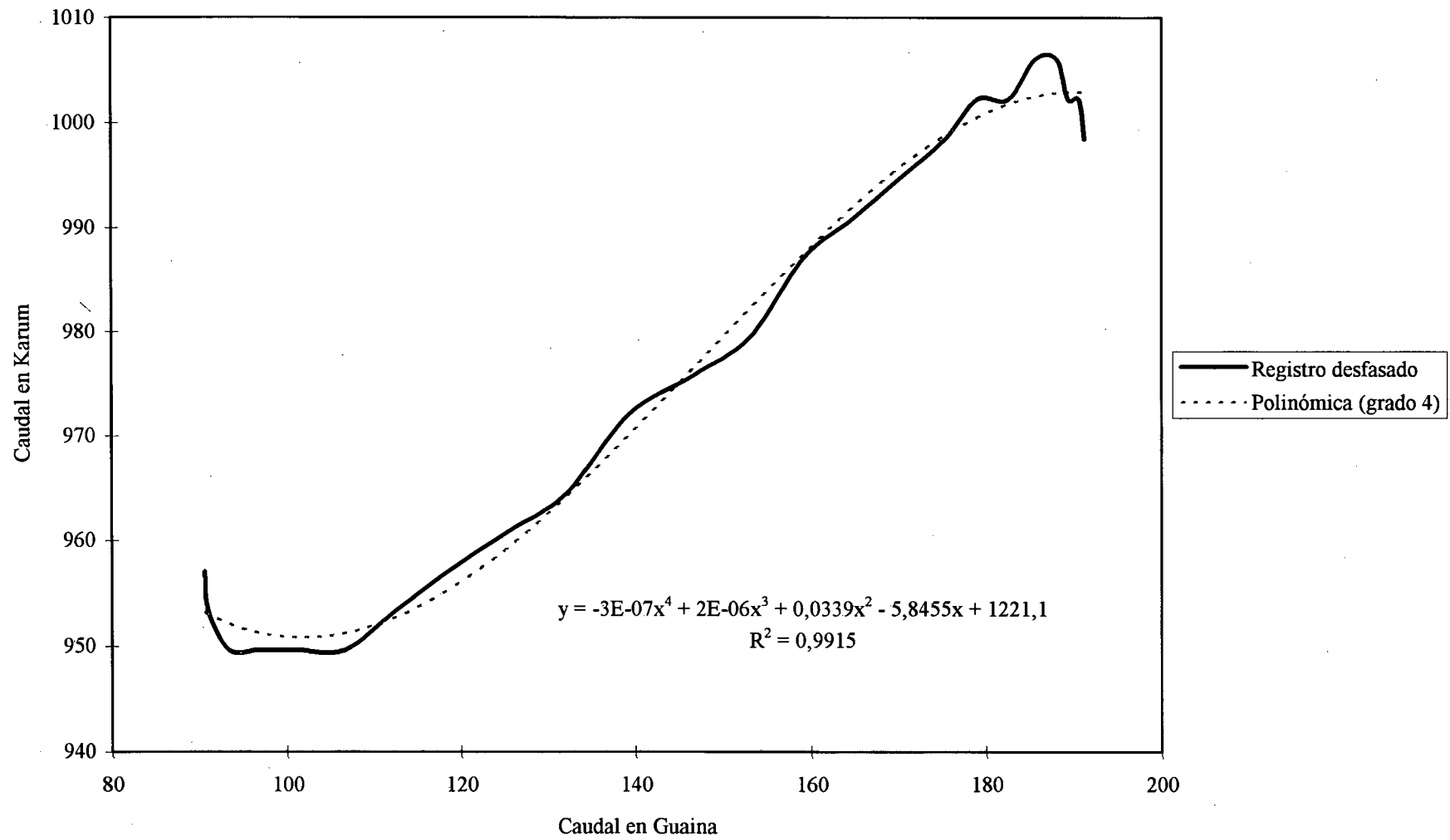
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama descendente.
Desfase: 32 h



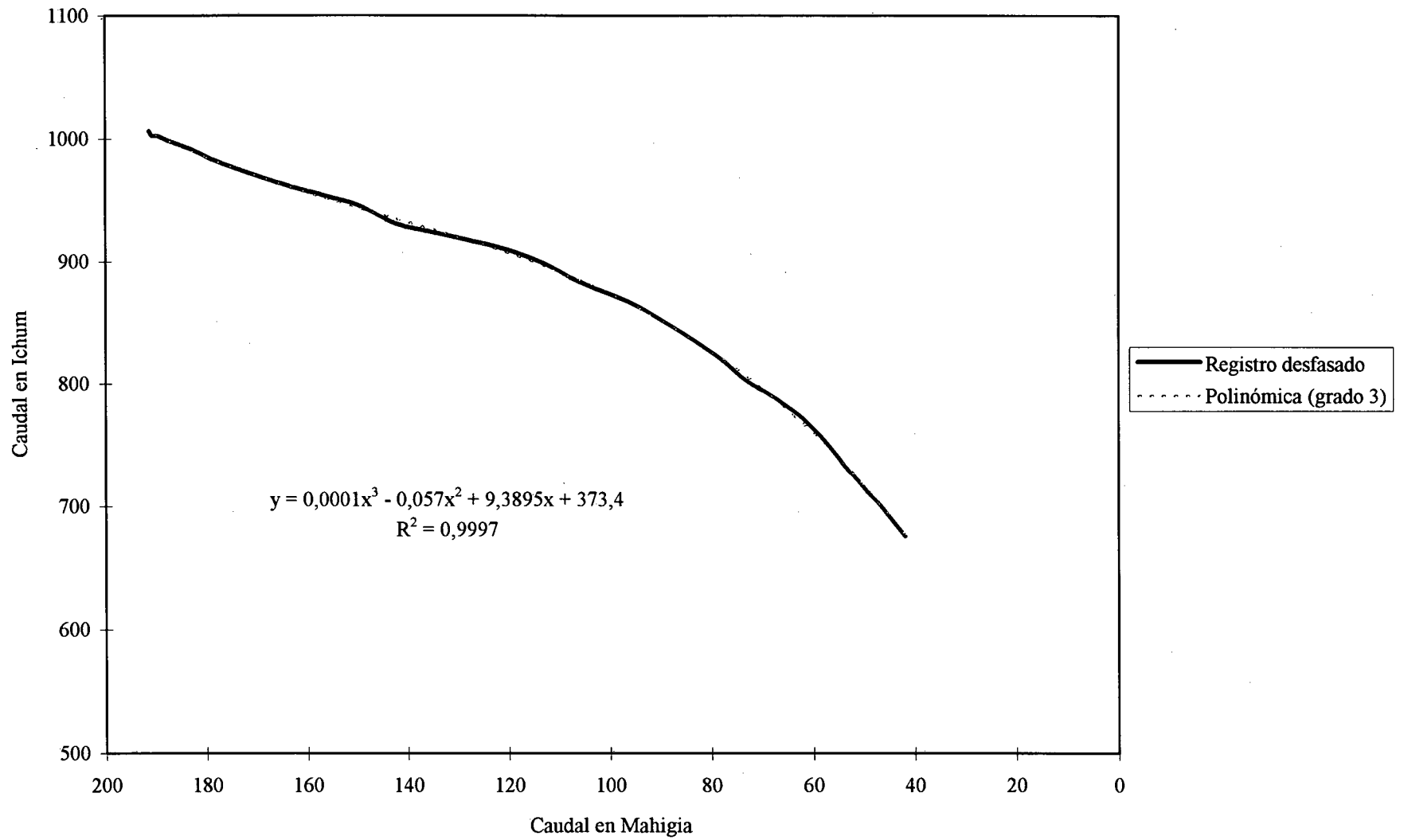
Tramo Ichum-Karum: Correlación para creciente del 02-05-98, rama ascendente.
Desfase: 9 h



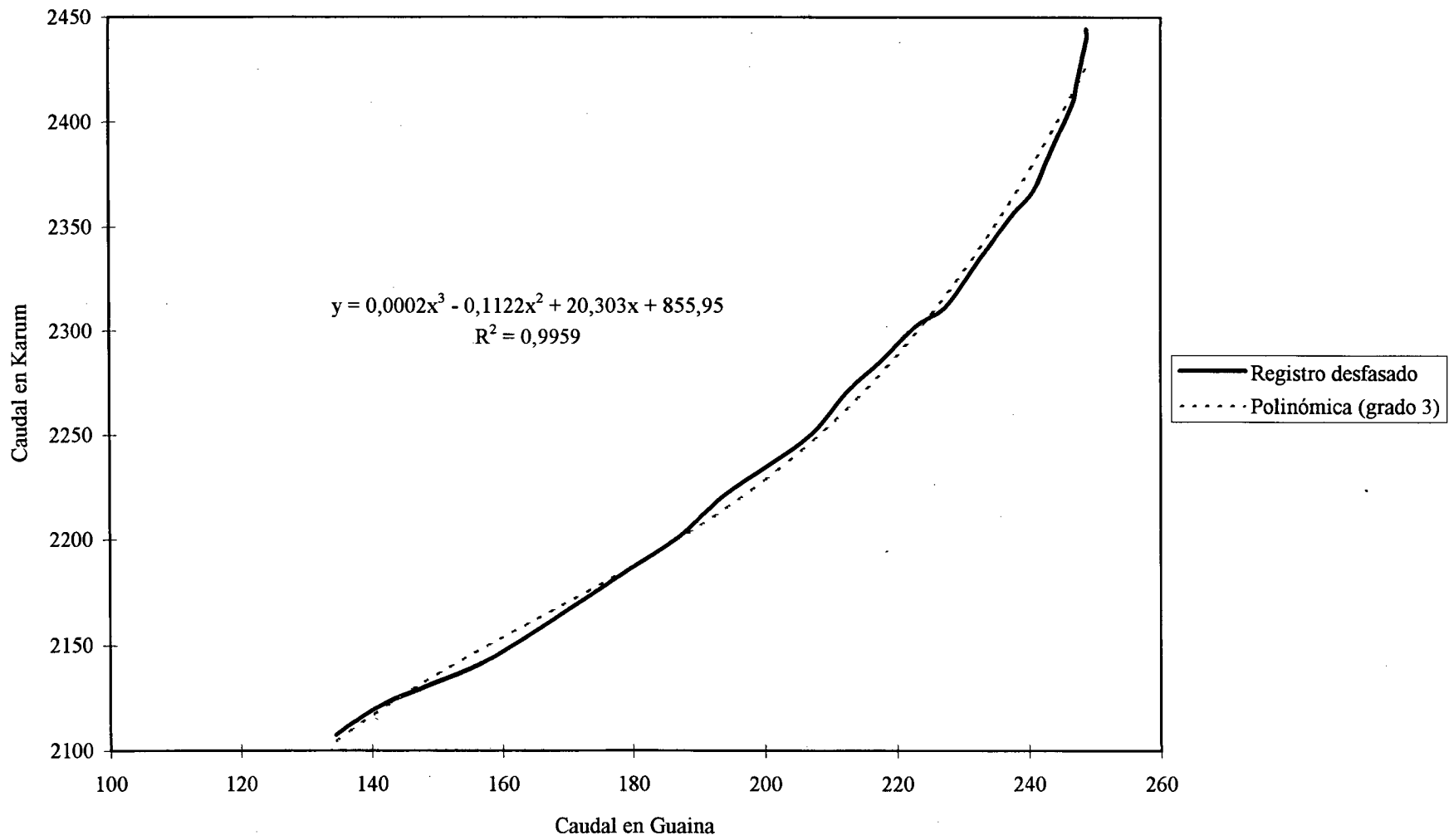
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciete del 15-02-98, rama ascendente.
Desfase: 12 h



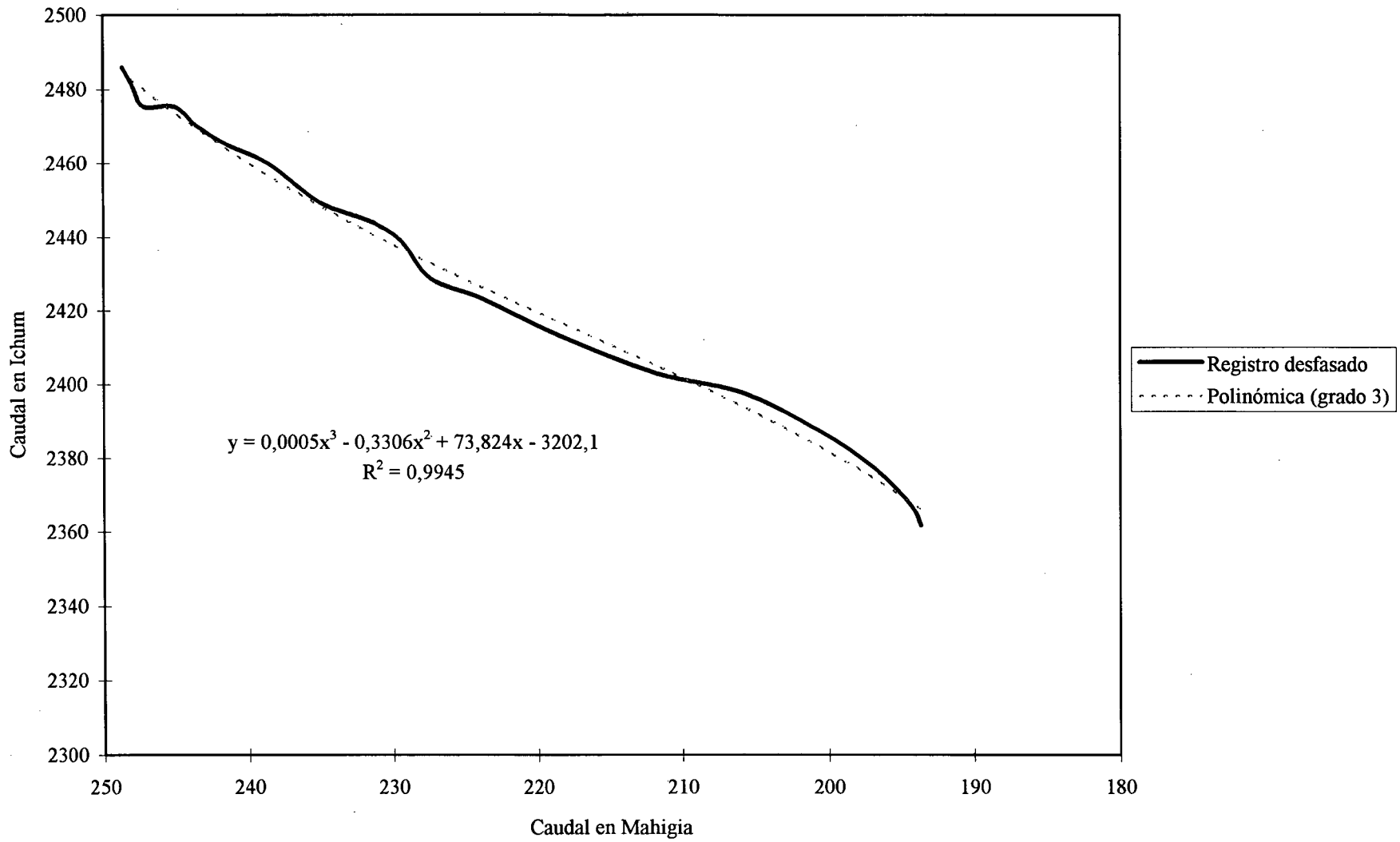
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 15-02-98, rama descendente.
Desfase: 10 h



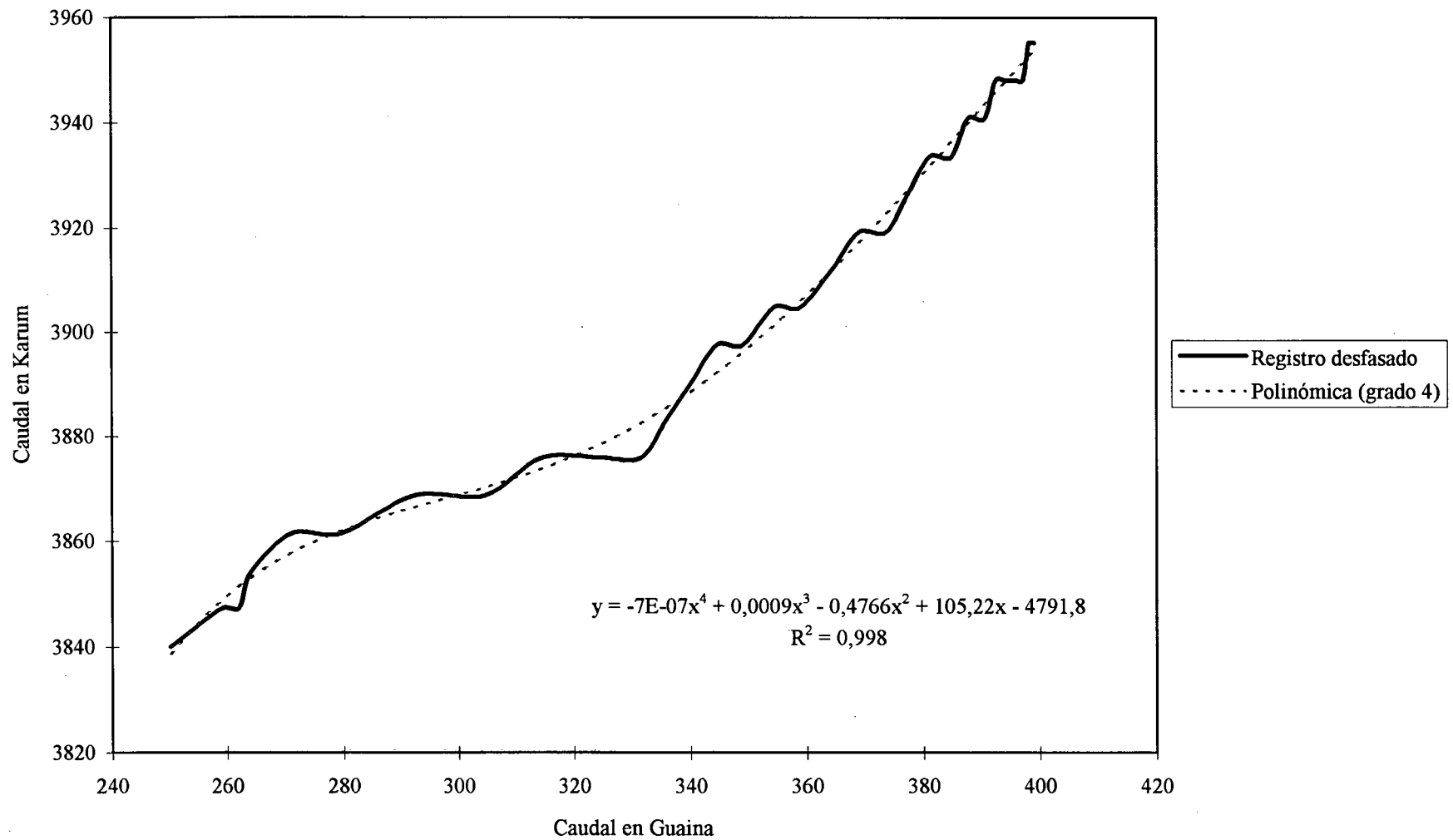
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama ascendente.
Desfase: 11 h



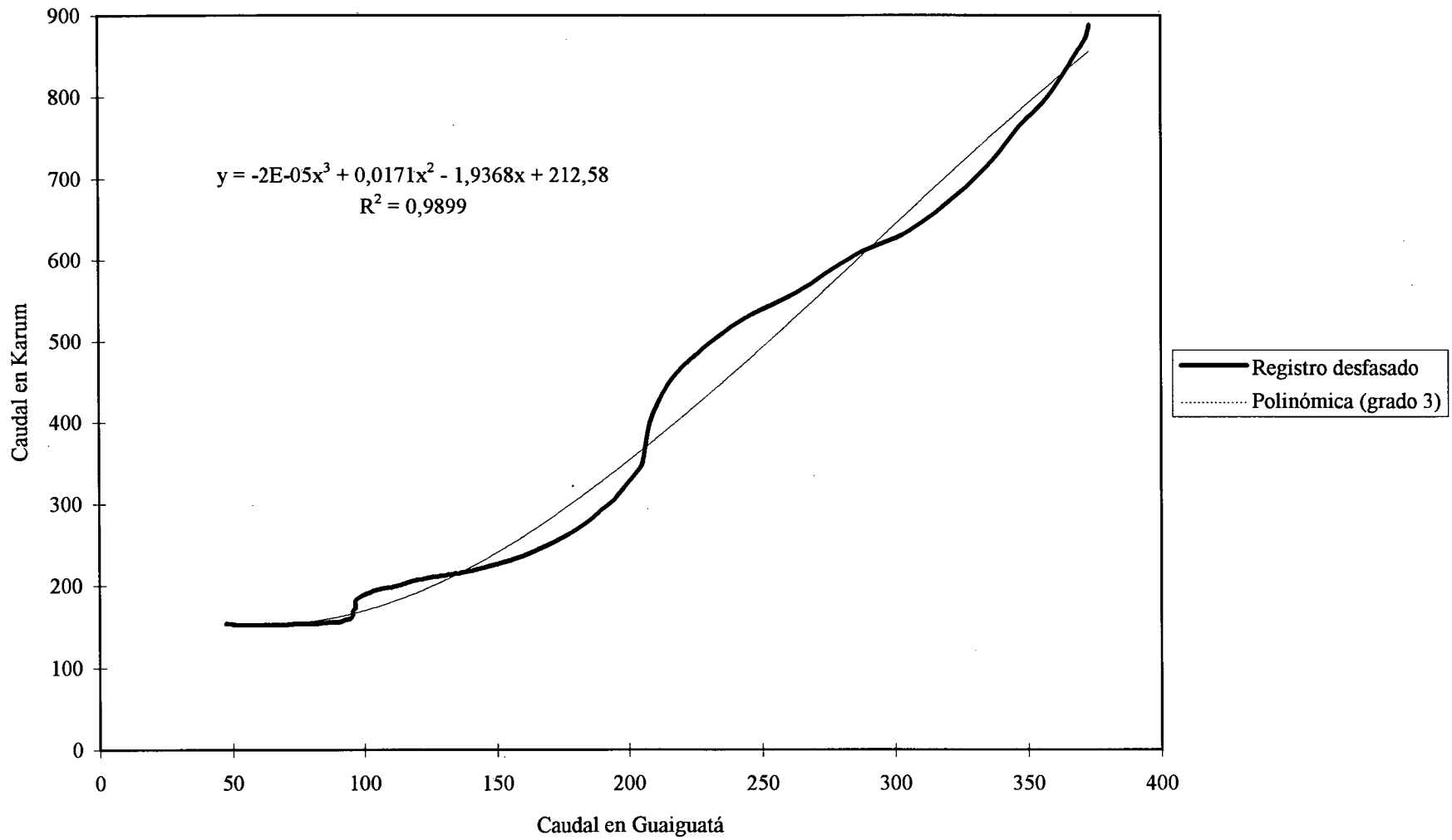
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama descendente.
Desfase: 20 h



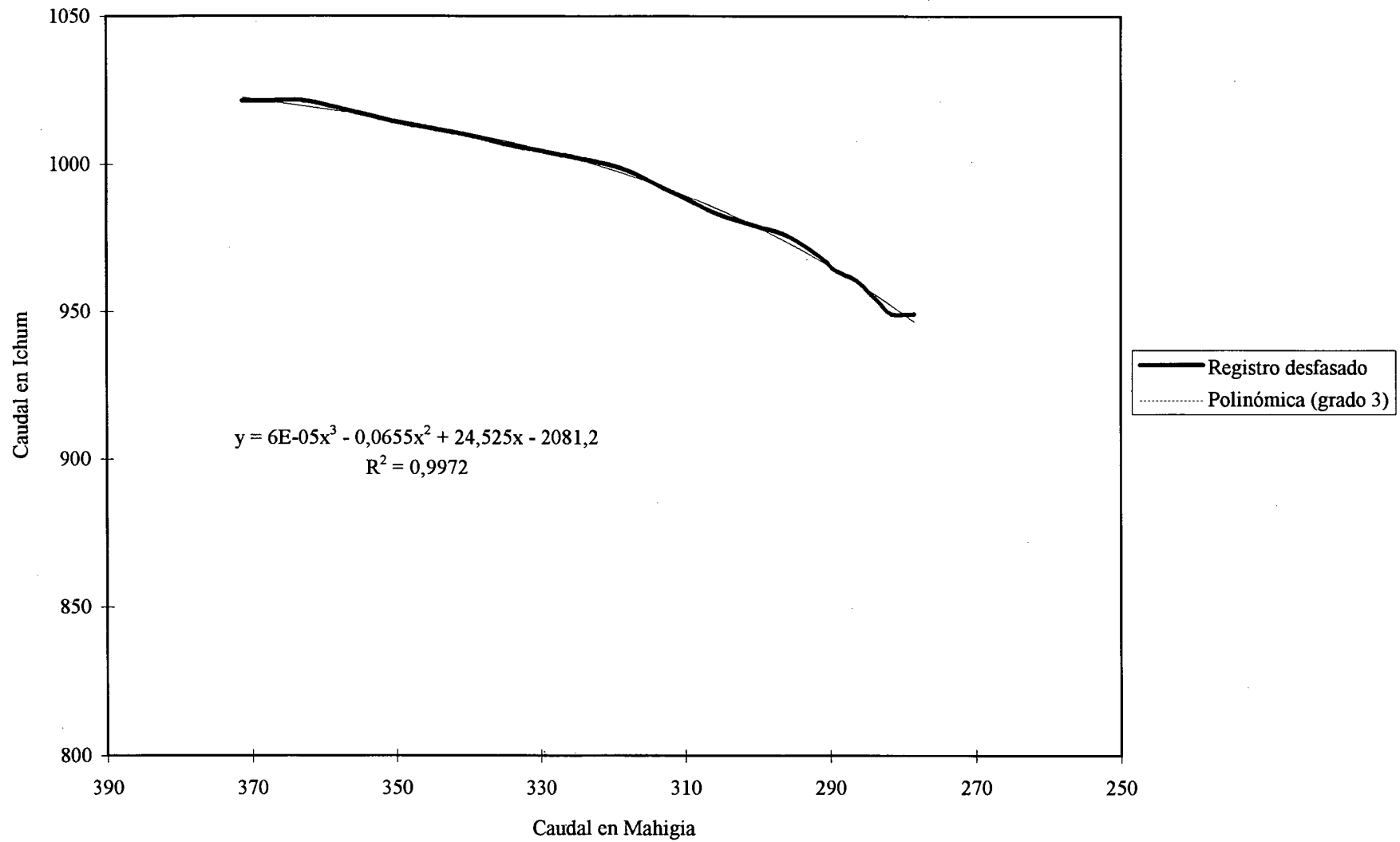
Tramo Guaina-Karum: Correlación para creciente del 26-05-98, rama ascendente
Desfase: 6 h



Tramo Guaiguatá-Karum: Correlación para creciente del 11-02-98, rama ascendente.
Desfase: 10 h

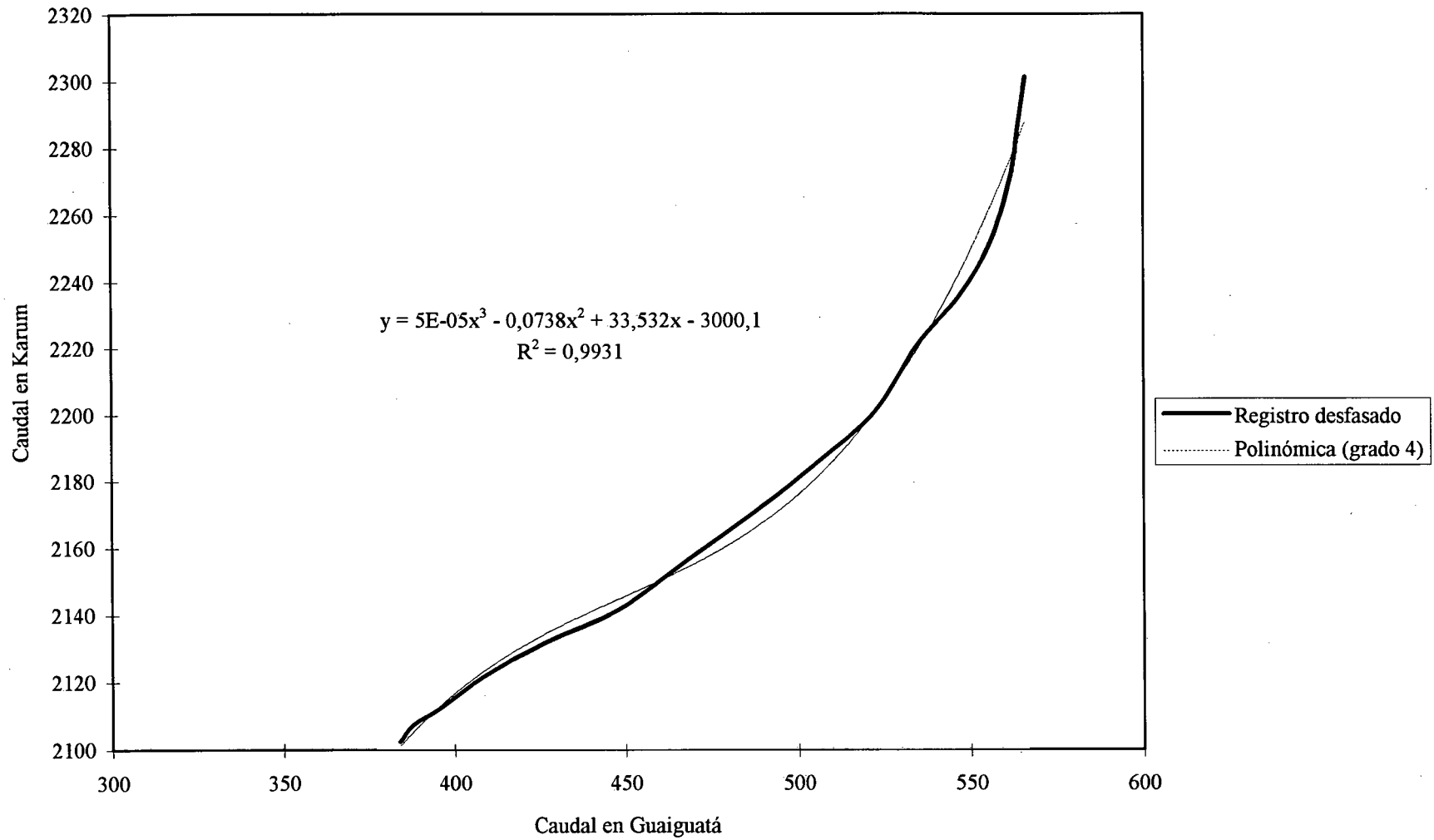


Tramo Guaiguatá-Karum: Correlación para creciente del 11-02-98, rama descendente.
Desfase: 27 h



Tramo Guaguatá-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama ascendente.

Desfase: 8 h



Tramo Guaiguatá-Karum: Correlación para creciente del 14-05-98, rama descendente.
Desfase: 29 h

