



MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
Y COMUNICACIONES

GABINETE DEL VICEMINISTRO  
DE MINAS Y ENERGÍA

REPUBLIQUE FRANCAISE

MINISTERE DE L'ÉCONOMIE DES  
FINANCES ET DE L'INDUSTRIE

DIRECTION DES RELATIONS  
ECONOMIQUES EXTERIEURES

## Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico



Vista aérea del río Paraguay

## Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay

Congreso Paraguayo de Recursos Hídricos.  
31 Octubre al 02 de Noviembre  
Hernandarias - Paraguay

<p>© 2, rue André Bonin 69316 Lyon cedex 04</p>	<p>☎ (33) 4.72.00.69.69 E.Mail <a href="mailto:diee@cnr.tm.fr">diee@cnr.tm.fr</a></p>	<p>Fax (33) 4.72.10.66.62 Web <a href="http://www.cnr.tm.fr">http://www.cnr.tm.fr</a> Fecha : octubre de 2005</p>
---	---	---

## 1. INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones a través del Vice Ministerio de Minas y Energía realizó, con el apoyo del Gobierno de Francia, la instalación de un « Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico » (CMMAH) en el país, que permite la captura, transmisión vía satélite y el procesamiento de datos hidrológicos y agro meteorológicos.

La segunda parte del proyecto consiste en la elaboración de un modelo hidrodinámico del río Paraguay (entre Bahía Negra y la confluencia con el río Paraná), para realizar previsiones de nivel y simulaciones de crecida o de estiaje. El modelo hidráulico de propagación está asociado a modelos hidrológicos de previsiones de caudal en 5 de los principales afluentes del río Paraguay: los ríos Apa, Aquidaban, Ypane, Aguaray-Guazú y Jejuí.

Este documento, realizado para el Congreso Paraguayo de Recursos Hídricos de 2005, es una presentación sinóptica del modelo hidrodinámico del río Paraguay, desarrollado en el CMMAH por la Compagnie Nationale du Rhône (CNR).

## 2. MODELOS HIDROLÓGICOS DE LOS AFLUENTES

### 2.1. Objetivo

Los modelos hidrológicos permiten prever con 3 días de anticipación el caudal de los afluentes principales del río Paraguay (ríos Apa, Aquidaban, Ypane, Aguaray-Guazú y Jejui), conocidos los datos de nivel y de lluvia en tiempo real.



**Figura 1:** Cuencas de los afluentes modelizados (ríos Apa, Aquidaban, Ypane, Aguaray-Guazú y Jejui)

## 2.2. Características de los ríos modelizados

El cuadro siguiente resume las principales características de los afluentes del río Paraguay estudiados:

Río	Superficie de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Largura aprox. (km)	Estación fluviométrica del CMAAH	Superficie de la sub-cuenca modelizada (km <sup>2</sup> )
Apa	14 800	380	San Carlos	10 150
Aquidaban	10 860	250	Paso Barreto	8 400
Ypane	10 200	280	Belén	9 900
Aguaray-Guazú	6 360	220	Lima	4 600
Jejui	21 000 (incl. río Aguaray-Guazú)	260	General Resquin	11 660

**Cuadro 1:** Características de los afluentes del río Paraguay estudiados.

La sub-cuenca modelizada corresponde a la parte de la cuenca situada aguas arriba de la estación del CMAAH donde se mide el nivel del río.

Los modelos estadísticos permiten prever el caudal del río en la estación misma. Después, una corrección está aplicada para tomar en cuenta la contribución de la sub-cuenca situada aguas abajo de la estación de medida.

## 2.3. Tipo de modelos utilizados

Son modelos estadísticos de tipo regresiones múltiples.

Los datos en entrada de los modelos son, para cada uno de los afluentes:

- Los datos diarios de caudal los 7 o 9 días anteriores al día D de la previsión.
- Los datos diarios de lluvia esos mismos 7 o 9 días anteriores.

ESTACIÓN	AFLUENTE	Datos y periodos disponibles		
		ANNP	CMAAH	ANA
San Carlos	Apa	<del>1971-2002</del>	2000 - 2002	1971 - 2002
Belen	Ypane	1975-1990	2000 - 2003	<del>1971-2002</del>
Cruce ruta 3	Jejui	1978-2001	<del>2000 - 2003</del>	<del>1971-2002</del>
GI Resquin		<del>1975-1990</del>	2000 - 2004	<del>1971-2002</del>
Paso Barreto	Aquidaban	1977-2004	2000 - 2002	<del>1971-2002</del>
Santa Rosa	Aguaray	1974-2003	<del>2000 - 2003</del>	<del>1971-2002</del>
Lima		<del>1978-2001</del>	2000 - 2004	<del>1971-2002</del>

**Cuadro 2:** Datos de nivel utilizados.

Pluviómetros		Datos diarios de lluvia
DINAC	Concepción	1959-2005
	Pedro Juan Caballero	1959-2005
	Puerto Casado	1947-2005
	San Pedro	1995-2005
	San Estanislao	1975-2005
CMAAH	Concepción	2000-2005
	Pedro Juan Caballero	2000-2005
	Puerto La Esperanza	2000-2005
	San Pablo	2000-2005
	M'butuy	2000-2005

**Cuadro 3:** Datos de lluvia.

Fue calculada para cada afluente, con varios años de crónicas históricas de caudal y de lluvia, la ecuación de tipo regresión múltiple más significativa estadísticamente. Esa ecuación fue después validada sobre otras series de datos y integrada en los modelos de previsión de caudal.

En cada de las 5 estaciones fluviométricas del CMAAH sobre esos afluentes, una curva de transformación permite asociar un caudal a la medición de nivel. Esas curvas fueron estimadas desde aforos de caudal y datos batimétricos y topográficos a lo largo de los afluentes.

#### **2.4. Modelos de propagación asociados**

Modelos de propagación fueron construidos, en cada afluente, desde la estación del CMAAH hasta la confluencia con el río Paraguay.

Como sólo disponemos de perfiles transversales al nivel de la estación CMAAH, los modelos fueron construidos con las hipótesis siguientes:

- Los perfiles transversales son todos iguales a lo largo del río, y corresponden a lo medido al nivel de la estación CMAAH.
- Entre dos perfiles a lo largo del río, solo se aplica una translación vertical de una distancia calculada utilizando la pendiente promedio del río entre la estación CMAAH y la desembocadura del río.

Así, el río modelizado corresponde a un canal de pendiente y de sección constantes, de largura igual a la largura del río aguas abajo de la estación CMAAH, y de pendiente igual a la pendiente promedio en ese mismo tramo.

Esos modelos, aunque gruesos, permiten tomar en cuenta el desfase y la amortización debida a la propagación de la onda de crecida entre el punto de medición (estación CMAAH) y la confluencia con el río Paraguay.

Podrán ser completados y mejorados en el futuro por levantamientos batimétricos y topográficos.

### **3. MODELO HIDRODINÁMICO DEL RÍO PARAGUAY**

#### **3.1. Objetivo**

El modelo hidrodinámico del río Paraguay permite hacer previsiones de nivel y simulaciones de estiaje y de crecida en su tramo situado entre el río Apa y Asunción. Será completado en el futuro por levantamientos batimétricos en sus partes binacionales para que sea funcional desde Bahía Negra hasta la confluencia con el río Paraná.

#### **3.2. Tipo de modelo**

El modelo de propagación utilizado es el software “CRUE”, desarrollado y utilizado por la CNR desde hace más de 25 años, y modernizado regularmente por la empresa. Dicho software simula el comportamiento hidráulico de un río o de un sistema de canales ramificados o reticulados, y está basado en la integración numérica de las ecuaciones de Barré de Saint-Venant aplicadas a lo largo de los tramos definidos por perfiles transversales, que permiten una mejor representación física del tramo por modelizar. El método numérico empleado es deducido de los estudios de Pressmann, que conducen a un esquema de integración semi-implícita.

Gracias a las numerosas posibilidades de los módulos de modelización de las corrientes en ríos y canales, el software CRUE se adapta de manera particular a los estudios hidráulicos de ríos y a los aprovechamientos de sus usos múltiples:

- regímenes permanentes o transitorios,
- situaciones complejas: redes reticuladas, zonas reservadas, leyes hidráulicas múltiples, condiciones de límites variados...
- impresión de tablas y gráficas, etc.

#### **3.3. Modelización del lecho menor**

El lecho menor de un río es el lecho donde el río corre en periodo normal. En general, las extremidades del lecho menor corresponden a la parte más alta de los taludes de las orillas del río.

Los perfiles transversales utilizados para modelizar el lecho menor del río Paraguay fueron medidos por la contraparte paraguaya del proyecto. Cubren la casi totalidad del tramo del río Paraguay entre la confluencia del río Apa arriba y la ciudad de Asunción abajo, pero con una densidad relativamente débil: un perfil cada 10 kilómetros en promedio. La batimetría tendrá que ser completada en el futuro para mejorar el modelo.

Todavía no fue realizada la batimetría de los tramos arriba del río Apa, y entre Asunción y el río Paraná. Por consiguiente, esos dos tramos de río no están integrados en el modelo hidrodinámico funcional actual.

En el tramo “funcional” del modelo, entre el río Apa y Asunción, un trabajo de crítica de los datos fue efectuado antes de integrar los perfiles transversales en el modelo. Particularmente, la modelización correcta de las islas del río necesitó el análisis de fotos satélites así que la adición de perfiles transversales ficticios. La calibración del río Paraguay, medidas durante las campañas de batimetría.

### **3.4. Modelización del lecho mayor**

El lecho mayor de un río es una zona fuera de agua en periodo normal, que se inunda en periodo de crecida. En general, esa zona se extiende desde la parte más alta de los taludes de las orillas hasta las primeras alturas que costean el río. Por experiencia, la amplitud de enmargado entre un derrame normal y una crecida muy fuerte puede alcanzar 10 metros de altura. El lecho mayor es a menudo recubierto de vegetación (bosque, matorrales, culturas), de infraestructuras (rutas, zonas industriales...) y de viviendas. La modelización debe tomar en cuenta esas distintas coberturas que frenan el derrame de manera más o menos importante.

En el lecho mayor, el modelizador tiene que distinguir el lecho activo (zona donde el agua corre de arriba hacia abajo) del lecho de almacenamiento (donde el agua solo llena una zona durante la crecida, que se vacía en decrecida). El límite entre esas dos zonas es estimada por el modelizador, tomando en consideración una visita de terreno y su experiencia.

En el caso del río Paraguay, el lecho mayor puede alcanzar 80 km de anchura. En general, la topografía necesaria a la construcción del modelo geométrico de un lecho mayor es elaborada desde perfiles transversales medidos a partir de mapas 1/25000, 1/5000 y de una campaña de topografía de terreno. En nuestro caso, la superficie del lecho mayor es tan extendida que el CMMAH prefirió que el modelo sea construido desde levantamientos fotogramétricos a la escala 1/50000. Esos datos son en formato informático. Para trabajar sobre una superficie tan grande, CNR decidió construir una base de datos topográficos bajo forma informática y un Modelo Numérico de Terreno (MNT).

Las características geométricas del modelo del lecho mayor fueron obtenidas desde ese MNT: perfiles transversales del lecho mayor, celdas de inundación. Las celdas de inundación son aéreas inundables en las cuales no circula el agua. Sirven para modelizar las zonas de almacenamiento que se pueden difícilmente representar con el lecho de almacenamiento de los perfiles del lecho mayor.

En práctica, celdas de inundación fueron utilizadas para tomar en cuenta los valles estrechos de los afluentes del río Paraguay.

### **3.5. Condiciones Límites**

Para el modelo funcional (del río Apa a Asunción), las condiciones límites son las siguientes:

- El caudal del río Paraguay en la confluencia con el río Apa.
- El caudal del río Apa en la estación fluviométrica de San Carlos.
- El caudal del río Aquidaban en la estación fluviométrica de Paso Barreto.
- El caudal del río Ypane en la estación fluviométrica de Belén.
- El caudal del río Aguaray-Guazú en la estación fluviométrica de Lima.
- El caudal del río Jejui en la estación fluviométrica de General Resquin
- El nivel del río Paraguay en el puerto de Asunción

Esas condiciones límites pueden ser permanentes o transitorias.



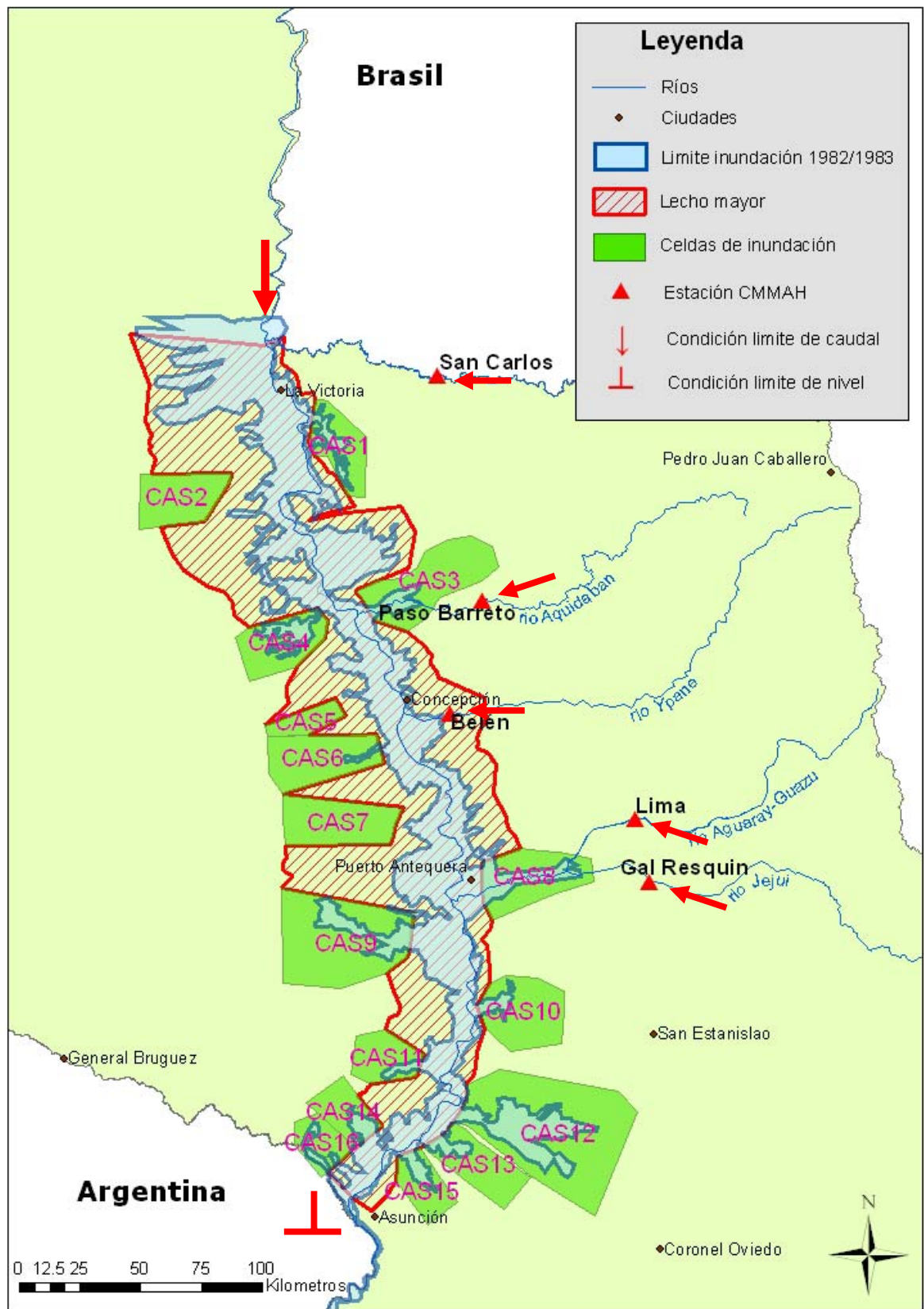


Figura 2: Arquitectura del modelo hidrodinámico



## 4. CONCLUSIÓN

El modelo hidrodinámico del río Paraguay, suministrado por la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) al CMMAH (Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico), dependiente del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, va a permitir simular el comportamiento del río Paraguay en condición de estiaje como en crecida.

A partir del conocimiento del caudal de un río, el modelo permite calcular el nivel de este río en toda su largura. Ese conocimiento es útil para:

- Averiguar las condiciones de navegabilidad del río en periodo de estiaje (cálculo de la profundidad y de las velocidades del derrame) y simular posibles adaptaciones para mejorar la navegación (dragados, supresión de pasos críticos). El modelo matemático necesario para esos estudios necesita una muy buena definición del lecho menor del río. Por eso, una densidad mínima de perfiles es imprescindible en cada paso crítico conocido. Nuestro modelo tendrá que ser completado por nuevos levantamientos batimétricos para cumplir correctamente esa función.
- Propagar un hidrógrama de crecida a lo largo de un tramo de río y prever los caudales aguas abajo de ese tramo. Esa propagación permite estimar los tiempos de traspaso y la amortiguación de la crecida (si no hay contribución intermediaria).
- Definir el nivel de una crecida importante o muy importante a lo largo de un río y adaptar las infraestructuras y las viviendas (creación de obras de descarga para un nuevo terraplén cortando una zona inundable, elección de una altura mínima para la construcción de una vivienda, determinación de los niveles de diques de protección...)

Además, conectado a la red de medidas de nivel de agua y de precipitaciones del CMMAH, y asociado a los modelos hidrológicos de los afluentes principales, Este modelo podrá ser utilizado en tiempo real para anticipar las variaciones de nivel del río en sus distintos tramos.