

## DINÁMICA DE LAS INUNDACIONES EN LA CUENCA AMAZÓNICA BOLIVIANA

### FLOOD DYNAMICS IN THE BOLIVIAN AMAZON BASIN

Luc Bourrel<sup>1</sup>, Sophie Moreau<sup>2</sup> y Luis Phillips<sup>3</sup>

#### RESUMEN

La Amazonía Boliviana se caracteriza por una gran llanura central regularmente inundada más de 4 meses al año. La superficie afectada puede abarcar 100 000 a 150 000 km<sup>2</sup> según la variabilidad meteorológica inter-anual. Las inundaciones provocan generalmente pérdidas de muchas cabezas de ganado y afectan numerosas poblaciones. Sin embargo, la intensidad y la duración de la inundación condiciona directamente la diversidad biológica y la producción piscícola. En 1997, el IRD ha iniciado, con sus socios bolivianos de SENAMHI, ABTEMA y SEMENA un programa de investigaciones (BIOCAB: Biodiversidad acuática en la Cuenca Amazónica Boliviana) que incluye un estudio de la dinámica de las inundaciones en la llanura central del río Mamoré. El conocimiento hidrológico aportado permitirá entender el funcionamiento ecológico de esta zona y aprovechar, con un manejo sostenible, el producto de la inundación.

En época de lluvias, esta región presenta una persistente cobertura nubosa y amplias zonas de difícil acceso: por esta razón, el estudio hidrológico, utiliza la percepción remota radar (banda C con polarizaciones HH del satélite ERS, y VV de RADARSAT) para comprender la distribución espacio-temporal de las inundaciones.

Se presenta los primeros resultados obtenidos en los dos últimos años, en los alrededores de la ciudad de Trinidad. Los datos incluyen imágenes ascendientes ERS-SAR y RADARSAT-SAR en época seca e inundada, datos de terreno y de sobrevuelos adquiridos simultáneamente, y datos hidrometeorológicos (precipitaciones, temperaturas y niveles diarios de agua) obtenidos en la cuenca alta y en la llanura del río Mamoré. Después de la caracterización del ciclo hidrometeorológico anual de las inundaciones estudiadas, se presenta compuestas coloreadas y clasificación de imágenes ópticas Landsat TM para mapear las principales unidades de vegetación, e imágenes SAR-TM compuestas a color para evaluar las respectivas contribuciones de los datos radar en el mapeo de la extensión de las inundaciones.

**Palabras clave:** Inundaciones, Cuenca Amazónica, Bolivia, Radar, Mapeo

#### ABSTRACT

The Bolivian Amazon is characterized by a large floodplain which is flooded more than 4 months a year. The surface flooded annually fluctuates between 100 000 and 150 000 km<sup>2</sup>, depending on inter-annual meteorological variations. The floods often provoke loss of cattle and affect a high number of human settlements. On the other hand, the intensity and the duration of the floods condition directly biological diversity and fish production. In 1997, IRD together with bolivian institutes SENAMHI, ABTEMA and SEMENA set up a research programme (BIOCAB: Aquatic biodiversity in the Bolivian Amazon basin) that includes a study of the flood dynamics in the central floodplain of River Mamoré. The hydrological knowledge is supposed to increase insight in the ecological functioning of this area.

During the raining season, the study area presents a persistent cloud cover and the accesibility is reduced: for this reason, the hidrological study was carried out through radar remote sensing in order to understand the spatial and temporal flooding patterns. In this report the first results obtained in the surroundings of the town of Trinidad are presented. The data include images ERS-SAR and RADARSAT-SAR during the dry and during the flooding season, field and aerial data taken simultaneously, and hidro-meteorological data (precipitations, temperatures, daily water level) obtained in the high basin and in the floodplain of the River Mamoré. Besides the characterization of the hidro-meteorological annual flooding cycle, colored maps and classified satellite images Landsat TM showing the main vegetation units are presented, as well as images SAR-TM integrating the respective contributions of the radar data to the final map of the flooded area.

**Key words:** Floods, Amazon Basin, Bolivia, radar, mappings

1 IRD : Institut de Recherche pour le Développement, Casilla 9214, La Paz, Bolivia. - E-mail: bourrel@caoba.entelnet.bo

2 ABTEMA : Asociación Boliviana de Teledetección para el Medio Ambiente, Casilla 14248, La Paz, Bolivia. - E-mail: abtema@coord.rds.org.bo

3 SEMENA : Servicio al Mejoramiento de la Navegación Amazónica, Casilla 156, Trinidad, Beni, Bolivia.

## INTRODUCCIÓN

La Amazonía Boliviana se caracteriza por una gran llanura central regularmente inundada más de 4 meses al año. La superficie afectada puede abarcar 100 000 a 150 000 km<sup>2</sup> (ROCHE et al. 1988) según la variabilidad hidrometeorológica anual en la llanura y en las subcuencas andinas (cabeceras de los ríos Madre de Dios, Beni y Mamoré que alimentan al río Madeira).

Desde 1684, los misioneros han apuntado los eventos ocurridos en la zona inundable del Mamoré, en el Departamento del Beni. Durante nuestro siglo, los datos más notables en consideración de la extensión espacial y la duración de la inundación, fueron registrados en 1921, 1929, 1947, 1956, 1982, 1992 y 1993, lo que demuestra su frecuente e irregular existencia. Los eventos registrados para las últimas décadas están limitados a observaciones puntuales basadas sobre ciudades afectadas y algunos desbordamientos de los ríos. La extensión de las inundaciones, así como la magnitud geográfica de los daños son desconocidos, recalando así cuan necesario es el elaborar mapas de inundaciones.

Las inundaciones provocan generalmente pérdidas considerables de millares de cabezas de ganado, en particular en el Departamento del Beni donde se produce el 47% de bovinos de Bolivia. Además, afectan numerosas ciudades, pueblos y comunidades, siendo necesarias, en ciertos casos, medidas de evacuación. Sin embargo, la intensidad y la duración de la inundación anual condiciona directamente la producción biológica y piscícola aún poco explotada.

En el año 1997, el IRD (Institut de Recherche pour le Développement) ha empezado un gran programa de investigaciones (BIOCAB : Biodiversidad Acuática en la Cuenca Amazónica Boliviana). El propósito de este proyecto es desarrollar un conocimiento del funcionamiento ecológico de la zona central de inundación del río Mamoré, que permitirá a los actores de la gestión contrarrestar los efectos negativos y aprovechar, con un manejo sostenible, el producto de la inundación. Por eso, este gran programa incluye un componente específico para estudiar la dinámica de las inundaciones en la Amazonía Boliviana : esta fase se desarrolla con los socios bolivianos de SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), ABTEMA (Asociación Boliviana de Teledetección para el Medio Ambiente) y SEMENA (Servicio al Mejoramiento de la Navegación Amazónica) y se llama: "Dinámica de las zonas húmedas de la Amazonía Boliviana".

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

El clima de la Amazonía Boliviana es tropical, con una estación de lluvias concentrada entre Octubre y Marzo donde se encuentran también las temperaturas más altas.

En el centro de la región del Beni, los promedios de precipitaciones anuales se distribuyen entre 1 600 y 2 000 mm al año, aumentando hacia el borde de los Andes y llegando a más de 5 000 mm sobre las cabeceras de los tributarios andinos del río Mamoré (ROCHE y FERNÁNDEZ 1990). En el centro del

Beni (en la ciudad de Trinidad, capital de la Amazonía Boliviana, departamento del Beni), las precipitaciones medias anuales son de 1 861 mm (1953-1997), la temperatura media anual es de 25.5 °C (1958-1998) y la evaporación mediana anual real de 1 467 mm (1958-1997).

El sistema fluvial Mamoré-Beni es una de las redes de agua más extensas de la cuenca hidrográfica amazónica: estos dos ríos que nacen en los Andes, son de aguas blancas, al contrario del río Itenez que nace en el Escudo brasileño y es llamado río de aguas claras (ROCHE y FERNÁNDEZ 1988).

El río Mamoré (3150 m<sup>3</sup>/s en Trinidad), con un caudal de 8 340 m<sup>3</sup>/s en Guayaramerín después de la confluencia con el río Itenez, se junta con el río Beni (8 920 m<sup>3</sup>/s en Cachuela Esperanza) y el río Madre de Dios para formar la parte superior del río Madeira, que es el principal afluente del río Amazonas. Con un caudal de 17 484 m<sup>3</sup>/s correspondiente a una cuenca de 903 500 km<sup>2</sup> en Villa Bella (23 % de la extensión total de la cuenca del río Amazonas y 15 % de su caudal), este sistema representa una de las cuencas más grandes del Mundo (GUYOT 1993).

Los niveles de agua más altos se alcanzan generalmente entre los meses de Enero y Marzo.

La zona global inundable está aproximadamente localizada entre los 12°00' S y 67°00' W, y 17°0' S 62°50' W, e incluye las partes amenazadas de las zonas inundables de los ríos Itenez, Mamoré y Beni de Este a Oeste.

Esta área ("los Llanos de Moxos", Fig.1) está principalmente cubierta por sabanas expuestas a inundaciones (que son las más extensas dentro de la cuenca Amazónica), rodeadas por selva tropical y donde se encuentran también bosques de galería distribuidos alrededor de los ríos.

En la zona del Beni (con una pendiente mediana débil de 10-5, a una media de 250 metros por encima del nivel del mar), la vegetación (estrechamente ligada al ciclo hidrológico y a la geomorfología) está compuesta de las siguientes formaciones vegetales más importantes (BECK 1984, HANAGARTH 1993):

- Sabanas con inundaciones estacionales y bien drenadas: Es la formación vegetal más representativa del área, conjuntamente con los diferentes tipos de bosques aluviales, también con inundaciones estacionales. Se caracterizan por su marcada hidrodinámica durante la estación lluviosa y por su eficiente drenaje relacionado con depresiones que se mantienen permanentemente inundadas, tales como los pantanos o curiches.
- Sabanas inundadas y pantanos: En este tipo de sabanas se incluye una vegetación pantanosa asociada con cuerpos de agua, ya sean permanentes o estacionales, tierras bajas o bajos y pantanos, así como sus zonas de transición:
  - a) Zonas bajas o bajos: Constituyen una gran formación de vegetación acuática muy importante, particularmente asociada con depresiones cercanas a bosques de galería,



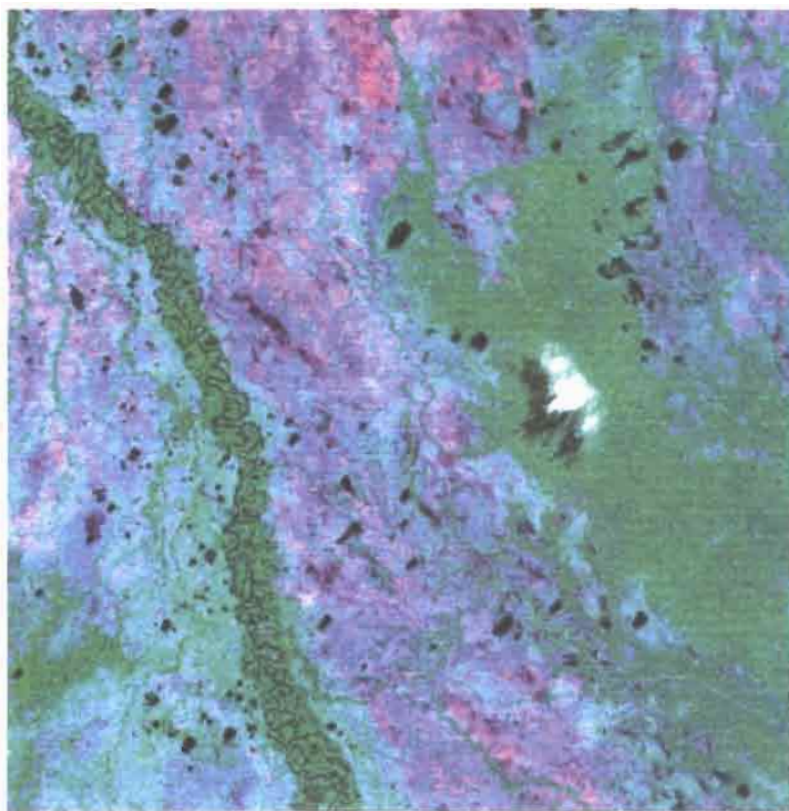


Figura 2: Compuesta coloreada (R5 VA B7) de la imagen LANDSAT TM del 15 de Agosto de 1997

con algunas palmeras o árboles aislados (hacia las islas de bosques más densos en morado).

## MÉTODOS

La dinámica de las inundaciones en la Amazonía Boliviana es poco conocida por lo que el objetivo general de este componente del proyecto, es comprender el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación del río Mamoré.

Por eso, los objetivos específicos de esta fase sobre la "Dinámica de las zonas húmedas de la Amazonía Boliviana" son :

- El seguimiento de la dinámica de las inundaciones a nivel de crecida,
- El estudio de la variabilidad espacio-temporal de las zonas inundadas en diferentes escalas (a nivel de la crecida anual y a nivel interanual).

Estudiar esta problemática necesita el enfoque conjunto de la hidrología y de la percepción remota (teledetección).

La teledetección es una herramienta que ayuda a la comprensión, identificación y caracterización del funcionamiento hidrológico de las zonas húmedas.

En época de lluvias, esta región presenta una persistente cobertura nubosa y zonas vastas de difícil acceso: por esta razón, este estudio hidrológico se basa primero en la utilización de la percepción remota radar que permite llegar a la distribución espacio-temporal de las inundaciones.

Para este fin se utilizan imágenes satelitarias radar (que permiten la observación a través de las nubes) con el apoyo de imágenes satelitarias clásicas:

- Las imágenes clásicas (tipo LANDSAT TM -185 km x 185 km alrededor de Trinidad, Fig. 1) se utilizan en época seca para identificar las grandes unidades naturales permanentes o temporales del paisaje (aguas, bosques de galería, sabanas, pantanos..).
- Las imágenes radar (tipo -SAR- en banda C y de polarizaciones HH y VV como ERS y RADARSAT -100 km x 100 km alrededor de Trinidad- y RADARSAT -500 km x 500 km sobre toda la llanura inundable, Fig. 1) se utilizan por sus observaciones en todo tiempo; y la posibilidad de distinguir el agua en la vegetación (en caso de capa vegetal baja). Esto para identificar las extensiones de las áreas afectadas por las inundaciones y abordar, con un enfoque multi-temporal, la dinámica de la inundación.

La conjugación de estos dos tipos de datos satelitales (clásicas y radar), de los datos meteorológicos (pluviometría, temperatura, evaporación) en la llanura y en el piedemonte andino, del conocimiento de los niveles de agua y de los caudales

entrando y saliendo de la llanura por el Mamoré, y finalmente de los niveles de agua en varios puntos de la llanura misma, deben permitir llegar al entendimiento del funcionamiento hidrológico de la llanura central del río Mamoré.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos entre 1997 y 1998 en la llanura de inundación del río Mamoré alrededor de la ciudad de Trinidad, con la utilización de la imagen Landsat TM de 1997 y de imágenes radar ascendientes ERS y RADARSAT correspondientes a las épocas seca e inundada, de datos de terreno y de sobrevuelos adquiridos en el mismo tiempo que las imágenes radar y también de datos hidrometeorológicos como precipitaciones, temperaturas y niveles diarios de agua (en los ríos y en la llanura) obtenidos en estaciones ubicadas en la parte alta (piedemonte) y en la parte baja (llanura) de la cuenca del río Mamoré.

### Hidrología

Este estudio se ha generado en base a algunos cuestionamientos, productos de trabajos anteriores. Se citan el

proyecto CORDEBENI/UTB/ORSTOM en el campo de los peces y de la biología pesquera (LAUZANNE et al. 1992) y el proyecto PHICAB por lo que concierne a la hidrología y la hidrogeoquímica (ROCHE et al. 1990, GUYOT 1993), que han permitido plantear algunas preguntas como: ¿Cuales son las superficies, direcciones preferenciales y cronología de la inundación anual en función al ciclo hidrológico?

La dinámica de las inundaciones en la llanura central del río Mamoré es poco conocida y las hipótesis sobre su funcionamiento hidrológico son las siguientes:

El establecimiento de la inundación en esta inmensa llanura se realiza con la conjugación de dos procesos (Fig.3):

- un proceso centrífugo, con la llegada de la onda de crecida del río Mamoré (QE) y de sus afluentes arriba (generada por las lluvias PA sobre la Cordillera de los Andes y su Piedemonte) y su difusión (aguas blancas) en el sistema de meandros muertos y de defluentes del Mamoré.
- un proceso centrípeto, con el desbordamiento de las napas freáticas de la llanura (alimentadas por las precipi-

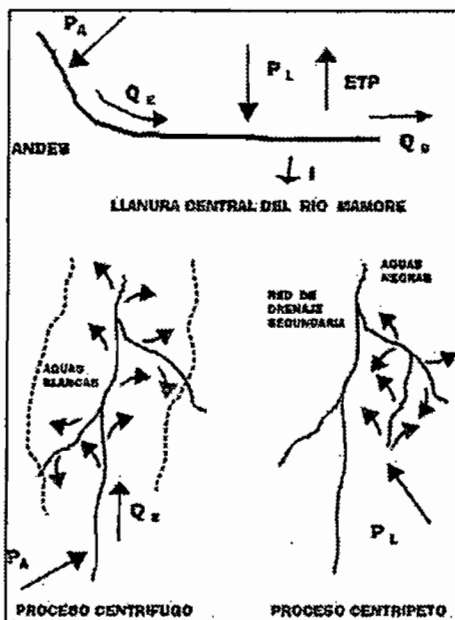


Figura 3: Esquema del funcionamiento hidrológico de la llanura del río Mamoré.

taciones locales PL) y del cual el drenaje (a través de una red de drenaje secundaria de estas aguas negras) hacia el sistema del Mamoré, es bloqueado por los niveles altos de las aguas en este río.

La comprensión de estos fenómenos propios a la dinámica de las inundaciones necesita el seguimiento de algunos parámetros hidrológicos en los ríos (niveles de agua, caudales en algunos puntos de la cuenca alta y baja, a la entrada de la llanura en el río Mamoré y sus afluentes de la parte andina

y caudales de salida [Qs] e hidrometeorológicos al nivel de la cuenca [datos pluviométricos en la llanura y en el piedemonte, niveles de agua en diferentes puntos dentro de la zona inundable, superficies afectadas e identificación de las áreas de acumulación y de drenaje de las aguas de inundación].

Para el seguimiento de los niveles de agua en los ríos, se tiene la estación hidrológica automática del SENAMHI en El Car-

men (sobre el río Grande), y los datos diarios de las cuatro estaciones limnimétricas de SEMENA (Puerto Villaroel sobre el río Ichilo; Puerto Varador sobre el río Mamoré; Puerto Almacén sobre el río Ibaré, cerca de Trinidad y Guayaramerín sobre el río Mamoré, a la salida de la llanura central de inundación).

Con relación a los datos pluviométricos y meteorológicos en general, se puede contar con una red de estaciones meteorológicas distribuida en toda la cuenca de la Amazonia Boliviana que pertenecen a AASANA y SENAMHI.

Para obtener datos de niveles de agua dentro de la llanura inundable, se tiene instalada, desde fines de 1997, una red de 12 reglas limnimétricas de control de inundaciones (ampliada por la adición de 3 reglas en Julio 1998), a través de la cual se obtienen medidas diarias (en caso de inundación) efectuadas por observadores y transmitidas a la ORSTOM a través de SEMENA.

La identificación de las superficies afectadas y la identificación de las áreas de acumulación y de drenaje de las aguas de inundación se hace por medio de un enfoque conjunto de las imágenes satelitales (teledetección radar) y de los niveles

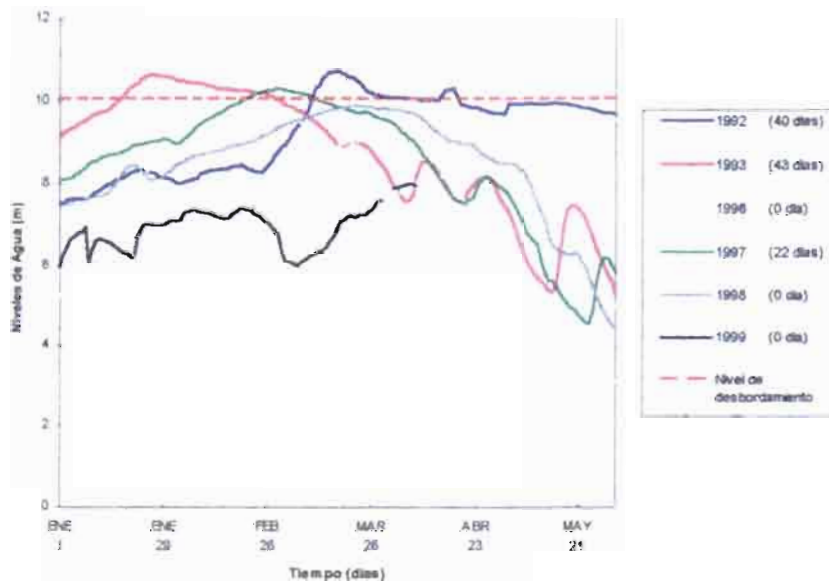
de agua registrados en algunos puntos dentro del área de la llanura inundable.

Las figuras 4, 5 y 6 ilustran la conjugación de los dos procesos que generan las inundaciones.

La figura 4 ilustra el proceso centrífugo: se muestran los limnigramas en Puerto Varador (sobre el río Mamoré, cerca de Trinidad) entre 1992-1993 (las últimas grandes inundaciones que han afectado todo el Beni) y entre 1996 y 1999 (los últimos cuatro años de los cuales se tienen datos dentro del proyecto).

Se puede ver (Fig. 4: estadísticas de los desbordamientos) por ejemplo, que por las grandes inundaciones de 1992 y 1993, las aguas del río Mamoré han desbordado durante 40 días en 1992 (entre el 10 de Marzo y el 18 de Abril) con un máximo el 17 de Marzo de 10.72 m (es decir 69 cm arriba del nivel del terreno natural, el cual se encuentra a 10.03 m), y durante 43 días en 1993 (entre el 18 de Enero y el 1 de Marzo) con un máximo el 26 de Enero de 10.61 m (es decir 58 cm arriba del nivel del terreno natural).

Durante la inundación de 1997, que se ha estudiado durante el proyecto y de la cual se tienen datos de teledetección, el río Mamoré ha desbordado durante 22 días (entre el 19 de



AÑO	1992	1993	1996	1997	1998	1999
Máxima (m)	10.72	10.61	9.54	10.29	9.88	8.01
Fecha	17 de Marzo	26 de Enero	23 de Febrero	1 de Marzo	20 de Marzo	6 de Abril
Número de días de desbordamiento	40	43	0	22	0	0
Periodo	10/3-18/4	18/1-1/3		19/2-12/3		

Figura 4. Limnigramas y estadística de los abordamientos del río Mamoré en Puerto Varador (Trinidad) en 1992, 1993 y de 1996 a 1999.

Febrero y el 12 de Marzo) con un máximo el primero de Marzo de 10.29 m (26 cm arriba del nivel del terreno natural): es decir, en duración de desbordamiento, la mitad de las inundaciones de 1992 y 1993 y, respecto a la máxima, 43 cm y 32 cm respectivamente menos que las máximas de 1992 y 1993.

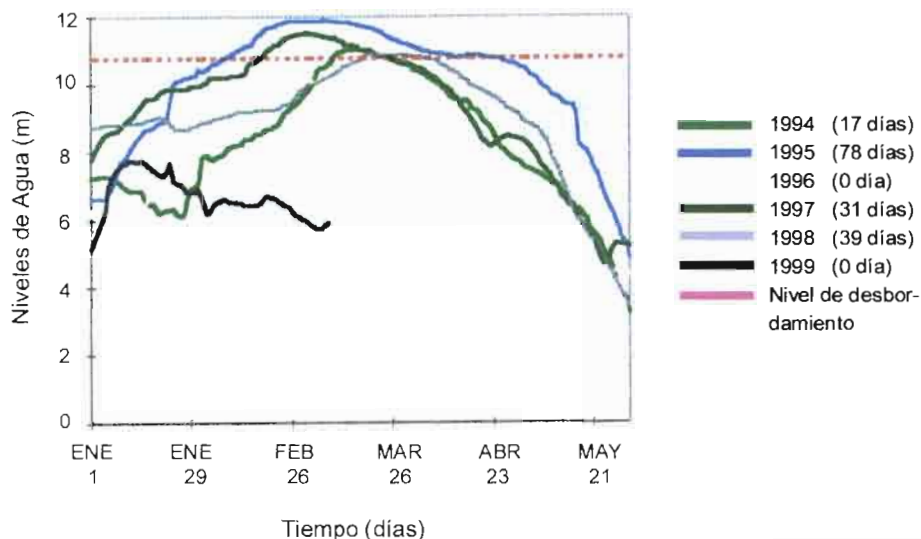
Por fin, se ve que en los años 1996, 1998 y 1999, no ocurrió ninguna inundación causada por el río Mamoré en Trinidad.

Así, se puede ver, sobre estos seis años, la gran variabilidad temporal de este proceso centrífugo, es decir de la ocurrencia

de las inundaciones que vienen del río Mamoré (teniendo su origen en las lluvias sobre Los Andes) sobre la llanura central del Beni.

La figura 5 ilustra el proceso centrípeto : se muestran los limnigramas (sobre el río Ibaré, cerca de Trinidad) entre 1994 y 1999. Lamentablemente, para esta estación, no se tienen los datos históricos en 1992-1993 correspondientes a las últimas grandes inundaciones en el Beni.

Para los últimos cuatro años, se puede ver (Fig. 5: estadísticas de los desbordamientos), por ejemplo, que en 1997, el río



AÑO	1992	1993	1996	1997	1998	1999
Máxima (m)	11.03	11.90	10.13	11.51	10.98	7.75
Fecha	16 de Marzo	7 de Marzo	27 de Febrero	2 de Marzo	20 de Marzo	13 de Enero
Número de días de desbordamiento	17	78	0	39	31	0
Período	10/3-26/3	7/2-25/4		17/2-26/3	18/3-7/4	

Fig. 5: Limnigramas y estadísticas de los desbordamientos del río Ibaré en Puerto Almacén (Trinidad) en 1992-1993 y de 1996 a 1999

Ibaré ha desbordado durante 39 días (entre el 17 de Febrero y el 26 de Marzo) con un máximo de 10.51 m el 2 de Marzo (es decir 23 cm por encima del nivel del terreno natural, que se encuentra a 10.74 m). En 1998, el río Ibaré ha desbordado durante 21 días (entre el 18 de Marzo y el 7 de Abril) con un máximo de 10.89 m el 20 de Marzo (15 cm por encima del nivel del terreno natural).

Se ve también que, en los años 1996 y 1999, ninguna inundación fue causada por el río Ibaré en Puerto Almacén.

Así, se puede ver en base a estos cuatro últimos años, la gran variabilidad temporal de este proceso centrípeto, es decir de ocurrencia de las inundaciones que vienen de los ríos endógenos de la llanura del Beni (teniendo su origen con las lluvias sobre la llanura misma).

Finalmente se puede ver que en 1996 y en 1999, la llanura central no ha tenido ni la influencia del proceso centrípeto ni la del centrífugo; en 1998 se ha tenido sólo el efecto del proceso centrípeto y por fin en 1997, ha tenido lugar la influencia de los dos procesos juntos con una inundación proveniente del río Mamoré presentando un poder (en amplitud y duración) equi-valente a la mitad de cada una de las grandes inundaciones de 1992 y de 1993.

Como se ha visto, en 1998 se tenía sólo el proceso centrípeto: la figura 6 presenta dos ejemplos de evolución de los niveles de aguas de inundación en 1998 (con las precipitaciones en el lugar lo más cerca de cada escala) dentro de la llanura del Beni, sobre dos reglas bajo la influencia de dos ríos endógenos a la llanura (el río Tijamuchi y el río Ibaré).

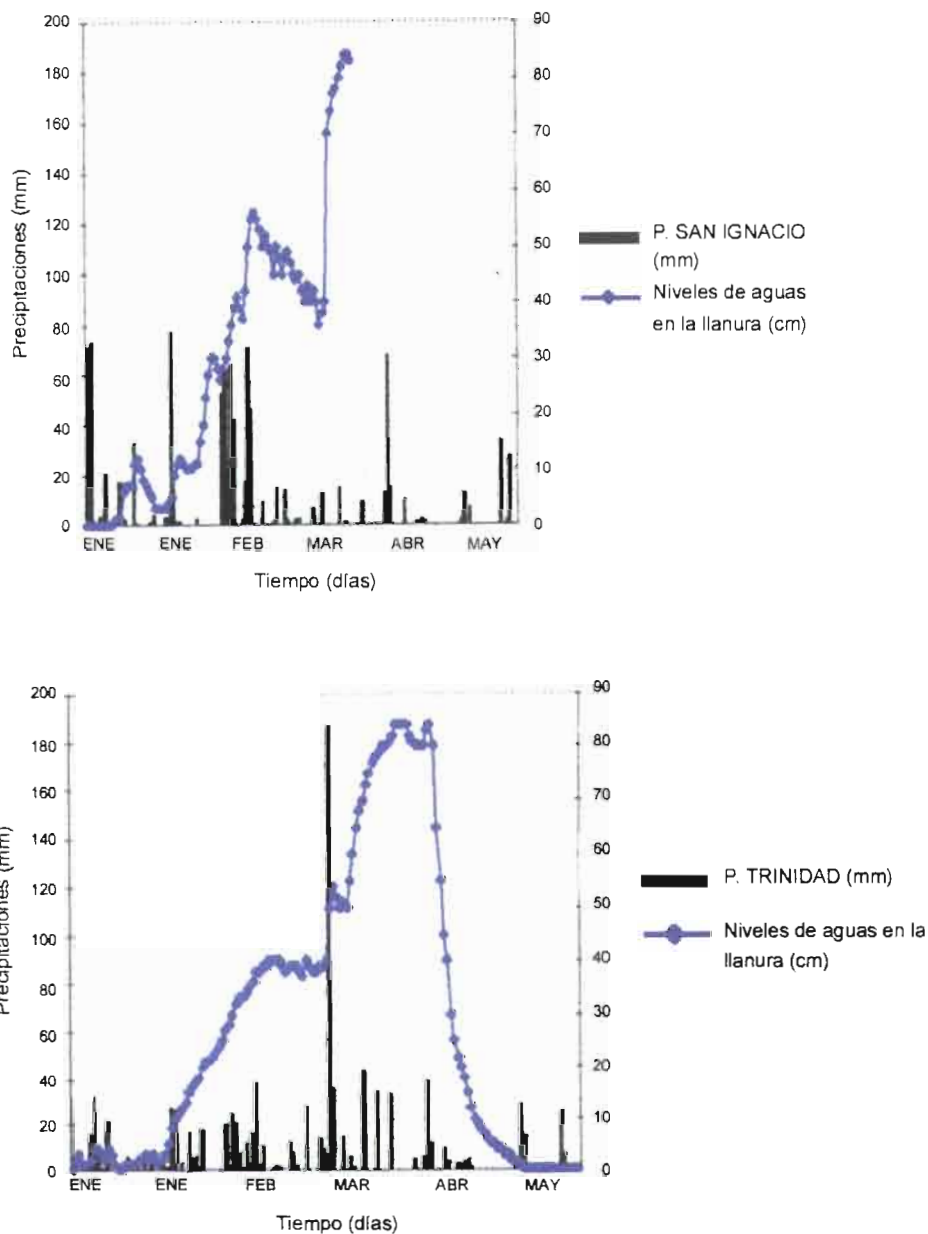


Figura 6. Ejemplos de evolución de los niveles de aguas de inundación en 1998 a dentro de la llanura del Beni.

Así, se puede ver (Fig. 6) un comportamiento similar de los niveles de agua en las dos escalas: primero, una repuesta de estos niveles subiendo a causa de las precipitaciones locales y después la llegada de las aguas (negras) provenientes del desbordamiento del río cercano (máximo de 84 cm en la escala cerca del río Tijamuchi el 1 de Abril, en 1997 el máximo era de 1.40 m; y máximo de 80 cm en la escala cerca del río Ibaré el 4 de Abril, en 1992 el máximo era de 1.50 m).

Finalmente se puede decir que, según el ciclo hidrometeorológico anual que afecta la cuenca alta y baja del río Mamoré, el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación puede ser bastante diferente: así como se ha visto con estos ejemplos entre 1992 y 1999, se puede encontrar el proceso centrípeto solo en 1998, el proceso centrífugo

predominante en 1997 y una conjugación de ambos también en 1997 que genera las más grandes inundaciones del Beni (el mismo que ha generado las dos últimas en 1992 y 1993) o ninguno de los dos procesos como en 1996 y 1999.

### Teledetección

El objetivo principal de las investigaciones sobre este enfoque por teledetección, es evaluar las potencialidades de los datos radar (microondas) en banda C con polarizaciones HH (ERS) y VV (RADARSAT) para la identificación de las zonas inundadas de la Amazonía Boliviana.

Puesto que el área de investigación debe ser contenida dentro de las vistas de las imágenes satelitales (Fig.1) teniendo



que abarcar importantes concentraciones poblacionales, así como la presencia de infraestructuras de trabajo de terreno, ella ha sido localizada alrededor de Trinidad, en el corazón de las sabanas del Beni.

Para tratar e interpretar estas imágenes, es necesario obtener datos hidrológicos, realizar campañas de campo y sobrevuelos para hacer medidas (como ser niveles de agua de la llanura, posicionamiento con GPS de los límites de inundación dentro de los diferentes tipos de vegetación) al mismo tiempo de la toma de la imagen satelital.

Para mapear la extensión de las inundaciones, se utilizan métodos como Compuestas Coloreadas y Clasificaciones de imágenes satelitarias Landsat TM, y algunas radar-Landsat TM Compuestas Coloreadas (como transformaciones RGB-IHS, y diferencias entre imágenes RADARSAT y/o ERS de las épocas seca, húmeda e inundada).

En este sentido, se presentan algunos resultados obtenidos en el marco de estas investigaciones que fueron realizadas sobre la base de una imagen Landsat TM de 1997 en época seca, de una imagen Radarsat (polarización HH) y de tres imágenes ERS (polarización VV) cubriendo las temporadas secas, lluviosas y de inundación, de dos sobrevuelos en Abril 1996 (a principio de la época seca) y Marzo 1997 (época de inundación).

Las imágenes analizadas fueron las siguientes:

- 1 imagen clásica Landsat TM del 15 de Agosto de 1997 en época seca (185x185 km con una resolución de 30 x 30 m): 3 bandas, TM 4 (PIR : Próximo Infra Rojo), TM 5 y TM 7 (Infra Rojo Medio) para distinguir la vegetación y la humedad de los suelos.
- 1 imagen radar ScanSAR Wide 2 del satélite RADARSAT (500 x 500 km con una resolución de 50 x 50 m) del 19 de Marzo de 1997 (época de inundación), para tener una vista más amplia de las extensiones de las inundaciones a nivel regional.
- 1 imagen radar Standard ascendiente del satélite RADARSAT (100 x 100 km con una resolución de 12.5 x 12.5 m): S6 Asc. (41-46°) del 5 de Abril de 1997, para tener imágenes más precisas de las inundaciones alrededor de Trinidad.
- 3 imágenes radar ascendientes SAR-PRI del satélite ERS 2 (100 x 100 km con una resolución de 12.5 x 12.5 m): Asc. (19.5-26.5°) del 10 de Febrero de 1996 (época húmeda), del 17 de Noviembre de 1996 (fin de época seca) y del 6 de Abril de 1997 (época de inundación), para tener también imágenes más precisas de las inundaciones alrededor de Trinidad.

Conviene indicar que previamente, para una optimización del mapeo de las inundaciones con el radar, es necesario identificar y distinguir, utilizando los datos ópticos, las principales unidades (vegetación) naturales permanentes o temporales

del paisaje que influyen la repuesta de la señal del radar (retrodifusión).

Así, varias compuestas coloreadas y clasificaciones han sido creadas con las 3 bandas TM 4, 5 y 7 de la imagen Landsat TM del 15 de Agosto de 1997; los mejores resultados fueron obtenidos con la compuesta color RGB-547 (estos ya han sido presentados en la figura 2, en el párrafo que trata de la vegetación).

Como se ha dicho antes en la metodología general, el radar da la posibilidad de distinguir el agua en la vegetación (en caso de una capa vegetal baja como sabanas): esto es debido a que la retrodifusión de la señal radar está influenciada por los dos parámetros principales que son la rugosidad y la humedad (ENGMAN 1990) del blanco observado (cuerpos de agua, vegetación, suelo, etc.).

En este sentido, se representan tres ejemplos de los resultados obtenidos utilizando datos radar (radar con una sola fecha, con tres fechas y radar asociado con datos ópticos) ilustrando esta capacidad de identificación de las extensiones de las áreas afectadas por las inundaciones (BADJI y DAUTREBANDE 1995, KUX et al. 1995) y abordamos también, con el enfoque multi-temporal (LOINTIER et al. 1993, DESNOS et al. 1966), el aspecto de la dinámica de la inundación.

Primero, se presentan (Fig. 8) los resultados obtenidos con la imagen radar ScanSAR Wide 2 del satélite RADARSAT (500 x 500 km con una resolución de 50 x 50 m) del 19 de Marzo de 1997, para tener una vista amplia de las extensiones de las inundaciones a nivel regional.

Sobre los 500 x 500 km cubiertos por esta imagen, se puede ver toda la llanura del Beni con el río Mamoré (en el centro de la imagen) como eje fluvial central, limitada en el rincón Sudoeste por una parte de la cordillera (región de Cochabamba), en el rincón Nordeste por el río Beni y en el rincón Noroeste por el río Itenez.

Relacionando esta fecha con los datos hidrológicos obtenidos en Puerto Varador (punto de desbordamiento del río Mamoré lo más cerca -10 km- de Trinidad), se puede decir que el 19 de Marzo presenta la extensión más amplia de la inundación en la región de Trinidad porque, como se ha visto en las estadísticas de los desbordamientos, la inundación se ha desarrollado durante 22 días entre el 19 de Febrero y el 12 de Marzo.

Así, se pueden ver en la figura 7, los límites de la inundación a esta fecha (delineados sobre la imagen), representando una superficie total afectada de aproximadamente 35 000 km<sup>2</sup> entre Camiaco y Puerto Siles (es decir sobre una distancia de 250 km a lo largo del eje del río Mamoré) incluyendo las áreas de influencia de los ríos principales que son de Este a Oeste, el Ibaré (aguas negras), el Mamoré (aguas blancas), el Tijamuchi (aguas blancas), el Aperé, el Rapulo y el Yacuma. Se puede notar también que la mayor parte de la inundación se ubica del lado izquierdo del río Mamoré donde se encuentran más tierras bajas y una red fluvial más importante que por el lado derecho, donde se puede notar además que no

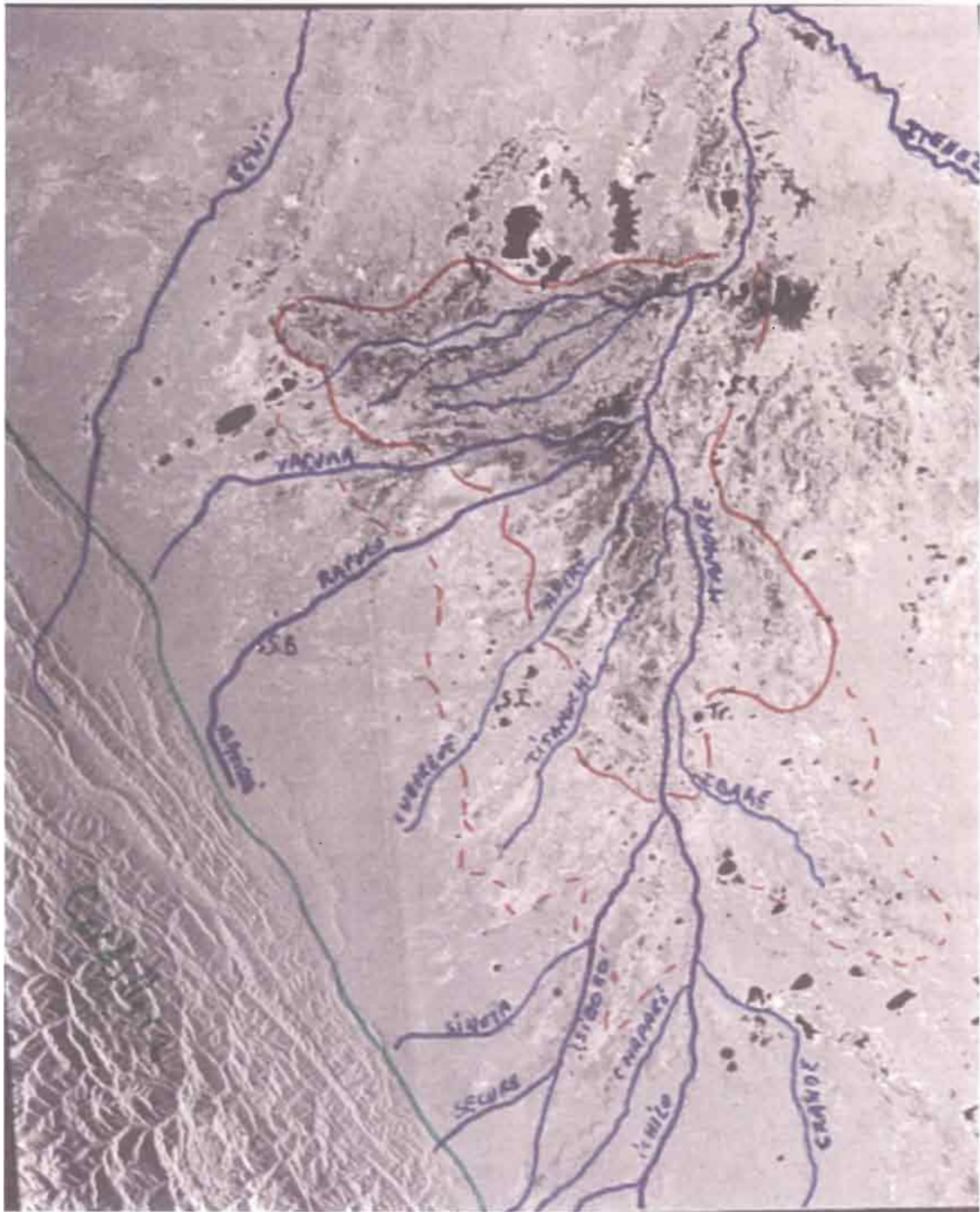


Figura7. Imagen RADARSAT (radar SCW) especializando la inundación de 1997 a la fecha del 9 de Marzo

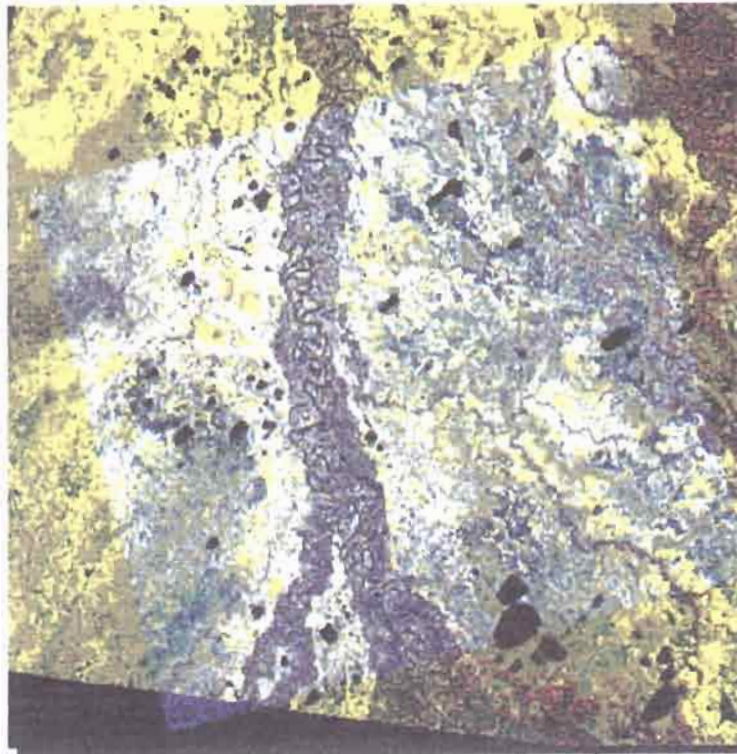


Figura 8: Integración de la imagen LANDSAT TM con la imagen radar RADARSAT del 5 de Abril de 1997

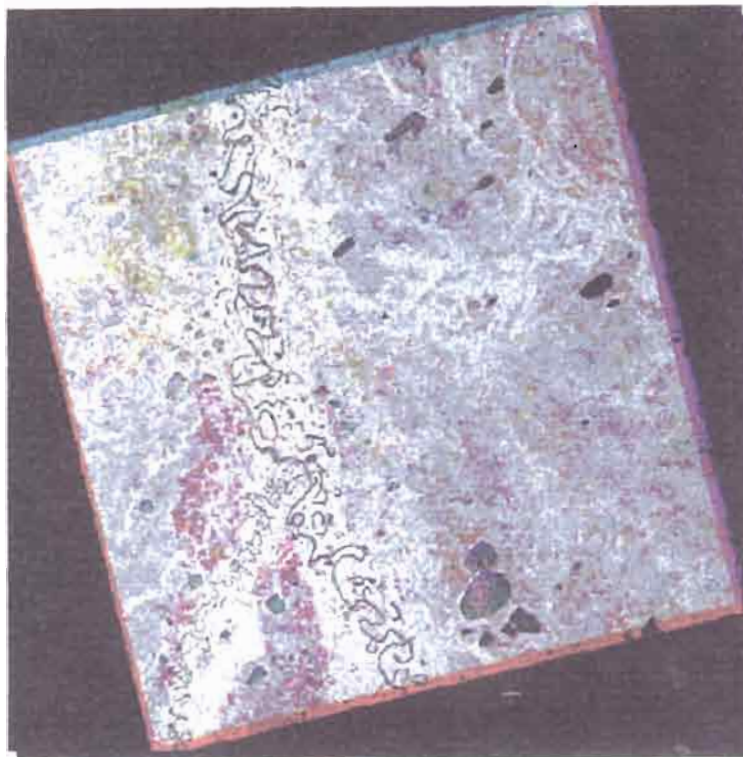


Figura 9. Imagen multi-temporal asociando las imágenes radar ERS del 10 de Febrero y del 17 de Noviembre de 1996 y del 6 de abril de 1997.

tenía, a esta fecha, ninguna inundación proveniente del río Itenez.

Después de esta vista a nivel regional de la inundación de 1997 y, a fin de obtener una especialización con más detalles cerca de Trinidad, de las extensiones de la inundación de 1997, se han realizado dos tipos de tratamientos de datos sobre las imágenes clásicas y radar ya citadas. El primero (Fig. 8), asocia la imagen Landsat TM (15 de Agosto de 1997) con la imagen radar RADARSAT del 5 de Abril de 1997 (integración multitemporal radar-TM, usando una transformación RGB (Red-Green-Blue) a IHS (Intensity-Hue-Saturation). El segundo (Fig. 9), asocia (compuesta coloreada multitemporal ERS de tipo RGB) las tres imágenes radar ERS del 10 de Febrero de 1996 (época húmeda), del 17 de Noviembre de 1996 (fin de época seca) y del 6 de Abril de 1997 (época de inundación, 2 semanas después de la imagen de la inundación global del 19 de Marzo).

Así, se puede ver en la figura 8 (sobre la ventana donde se han sobrepuesto las informaciones de rugosidad y de humedad de la imagen radar del 5 de Abril de 1997 con las informaciones de vegetación debidas a la imagen TM), las principales unidades de vegetación y sus relaciones con las aguas de inundación en el área de estudio: en negro, los cuerpos de agua como ríos, lagunas naturales o artificiales; en morado, la selva tropical rodeando las sabanas y el bosque de galería bordeando los ríos y, en tonos de amarillo las sabanas dentro de las cuales se ven las zonas más húmedas (en azul) a la fecha del 5 de Abril de 1997 (es decir las áreas afectadas por las aguas del río Mamoré -3 semanas después del desbordamiento en Puerto Varador- o por las aguas de los ríos endógenos -río Tijamuchi y río Ibaré por los principales-).

El último ejemplo presentado en la figura 9 (imagen multitemporal producida solo con datos radar del satélite ERS) permite poner en evidencia los cambios (en término de relaciones de las sabanas con las aguas) ocurridos según las épocas. La imagen del 10 de Febrero de 1996 (época húmeda) fue asociada al canal Verde, la del 17 de Noviembre de 1996 (final de época seca) al canal Rojo y la del 6 de Abril de 1997 (época de inundación) al canal Azul.

Así, se puede ver en blanco, la ciudad de Trinidad (sin ningún cambio entre las tres fechas); en negro, los cuerpos de agua como los ríos, las lagunas naturales o artificiales; en tonos de gris (que significan pocos cambios en el tiempo), la selva tropical rodeando las sabanas y el bosque de galería bordeando los ríos (en este medio, hubo inundación y debería parecer en Azul pero se queda en gris porque no se puede ver el agua debajo de los árboles con el radar banda C); y por fin, en tonos que van de rojo a azul hacia morado, respectivamente, las sabanas con aguas (zonas húmedas) en fin de época seca (noviembre), las sabanas afectadas solo por la inundación a la fecha del 5 de Abril de 1997 (es decir un día después de la imagen RADARSAT de la figura 8), y las zonas húmedas afectadas además por esta inundación.

## CONCLUSIONES

La Amazonía Boliviana se caracteriza por una gran llanura central regularmente inundada más de 4 meses al año.

La superficie afectada puede abarcar 100 000 a 150 000 km<sup>2</sup> según la variabilidad hidrometeorológica anual en las subcuencas andinas (cabeceras de los ríos Madre de Dios, Beni y Mamoré que alimentan el río Madeira) y en la llanura.

La dinámica de la inundación en la Amazonía Boliviana es poco conocida, por lo que el objetivo general del programa del IRD, iniciado desde 1997 y llamado "Dinámica de las zonas húmedas de la Amazonía Boliviana", es comprender el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación del río Mamoré.

Se ha puesto como hipótesis que el establecimiento de la inundación en esta inmensa llanura se hace con la conjugación de dos procesos: un proceso centrífugo (con la llegada de la onda de crecida del río Mamoré generada por las lluvias sobre la Cordillera de los Andes y su Piedemonte) y un proceso centrípeto (con el desbordamiento de las napas freáticas de la llanura alimentadas por las precipitaciones locales).

Estudiar esta problemática necesita el enfoque conjunto de la hidrología y de la percepción remota (teledetección).

Los resultados del enfoque hidrológico presentados en este artículo averiguan estas hipótesis y muestran que, según el ciclo hidrometeorológico anual que afecta la cuenca alta y baja del río Mamoré, el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación presenta una gran variabilidad: así, como se ha ilustrado con ejemplos tomados entre 1992 y 1999, se puede encontrar el proceso centrípeto solo (como en 1998), el proceso centrífugo predominante (como en 1997) y una conjugación de ambos (como en 1997) que genera las más grandes inundaciones del Beni (como lo han sido las dos últimas en 1992 y 1993) o ninguno de los dos procesos como en 1996 y 1999.

Los resultados del enfoque por teledetección presentados en este artículo (obtenidos con imágenes entre 1996 y 1997), han permitido averiguar las potencialidades de los datos radar (microondas) en banda C con polarizaciones HH (ERS) y VV (RADARSAT) con el objetivo específico de la identificación de las zonas húmedas e inundadas de la Amazonía Boliviana (completando así las informaciones obtenidas sobre la vegetación con los datos Landsat TM).

Finalmente, se indica que los próximos trabajos de este proyecto, se desarrollarán entre 1999 y 2000 con el objeto de ampliar el conocimiento actual, incluyendo dos años más de observaciones al nivel hidrometeorológico y de la teledetección.

## BIBLIOGRAFÍA

- BADJI, M. y S. DAUTREBANDE. 1995. Characterization of flood inundated areas and delineation of poor internal drainage soil using ERS 1 SAR imaging. Proceedings of the First ERS thematic working group on Flood Monitoring, ESA/ESRIN, Frascati, Italy.
- BECK, S.G. 1984. Comunidades vegetales de las sabanas inundadas en el NE de Bolivia. *Phytocoenologia* 12:321-350.
- DESNOS, Y.L., Th. MAYER y A.M. SARDAR. 1996. Multitemporal ERS-1 SAR images of the Brahmaputra flood plains in Northern Bangladesh. *Earth Observation Quarterly*, ESA. 51:6-10.
- ENGMAN, E.T. 1990. Progress in microwave remote sensing of soil moisture. *Canadian J. of Remote Sensing* 16 (3):6-14
- GUYOT, J.L. 1993. *Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie Bolivienne.*- Ed. ORSTOM, Paris, France. 261 p.
- HANAGARTH, W. 1993. *Acerca de la geoecología de las sabanas del Béni en el Noreste de Bolivia.* Ed. Instituto de Ecología, La Paz, Bolivia, 186 p.
- KUX, H.J.H., F.J. AHERN y R.W. PIETSCH. 1995. Evaluation of radar remote sensing for natural resource management in the tropical rainforests of Acre State, Brazil. *Canadian J. of Remote Sensing* 21(4):430-440.
- LAUZANNE, L., G. LOUBENS y B. LE GUENNEC. 1992. Les milieux aquatiques de la région de Trinidad (Béni, Amazonie bolivienne). *Rev. Hydrobiol. Trop.* 25 (1):3-21.
- LOINTIER, M., J.P. RUDANT, D. SABATIER y M.T. PROST. 1993. Contribution of ERS-1 SAR data to hydrologic approach in tropical area: example in French Guiana. Proc. Second ERS-1 Symposium, Hamburg, Germany, ESA Ed. SP-361. pp 1267-1272.
- ROCHE, M.A., C. FERNANDEZ et al. 1990. Balance hídrico superficial de Bolivia. Ed. ORSTOM-UNESCO, ATLAS PHICAB. 29 p.
- ROCHE, M.A. y C.F. FERNANDEZ. 1988. Water resources, salinity and salt yields of rivers in the Bolivian Amazon. *Journ. Hydrol.* 101:305.