

Empleo de técnicas de percepción remota en modelos hidrológicos

Baldemar Méndez Antonio
Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

Se tratará brevemente el uso de las técnicas de Percepción Remota en la modelación hidrológica distribuida con fines de pronóstico de escurrimientos mediante dos ejemplos, uno utilizando radar meteorológico y otro mediante el uso de satélite meteorológico..

1. INTRODUCCIÓN

En hidrología es importante conocer la respuesta de la cuenca cuando se presenta una tormenta en cualquier punto de ella y la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación. Estimar la variabilidad espacial sólo es posible si se tiene una red de estaciones de medición en superficie con densidad suficiente para registrar ésta, por medio de radares meteorológicos que cubran la cuenca de análisis o por medio de técnicas de estimación de lluvia a partir de datos de satélite. Sin embargo, cada uno de estos instrumentos tiene sus ventajas y desventajas. Las estaciones de superficie, por ejemplo, dan la medida de la precipitación sobre el terreno, pero sólo registran datos puntuales. Los radares tienen una excelente resolución espacial para fines hidrológicos y se puede estimar la precipitación a partir de la reflectividad observada, pero en zonas montañosas la interferencia de su señal genera zonas ciegas para el radar.

La estimación de lluvia por medio de satélite es una excelente opción cuando se requiere de datos de precipitación en zonas donde la densidad de los pluviómetros sea deficiente o en donde la topografía interfiera la señal de los radares. Sin embargo, el pronóstico numérico para fines operativos requiere de la estimación cuantitativa de la lluvia y, por lo tanto, los modelos hidrológicos con este fin precisan de la validación de los datos estimados, ya sea a partir de satélite o de radar meteorológico. Es decir, tanto la estimación de lluvia por medio de radares meteorológicos como la de satélites requieren de la validación con datos de estaciones de superficie.

Un reto para los hidrólogos es utilizar los datos combinados de estaciones de superficie, de radar meteorológico y de satélite como un sistema integrado de Percepción Remota para medición de lluvia a tiempo real con el fin de resolver problemas que involucren grandes áreas y el análisis de sistemas hidrológicos en el mismo momento que estos ocurran. Estas aplicaciones tienden a maximizar la capacidad del sistema integrado para atacar problemas que no pueden resolverse por métodos convencionales, que sólo registran datos puntuales, tardan semanas o meses en estar disponibles y en la mayoría de los casos no son de fácil acceso. Como consecuencia, el conocimiento de los procesos hidrológicos involucrados se conocen, en el mejor de los casos, meses después de ocurridos. Precisamente, las características de los datos define el nivel de

procesamiento y análisis que se hará de los procesos, en este caso, hidrológico. Así, para datos puntuales en una cuenca con poca densidad de estaciones de superficie sólo cabe el análisis temporal de los procesos que ocurren dentro de la cuenca. En cambio, los datos que proporcionan instrumentos de Percepción Remota, los cuales tienen la capacidad para estimar la variabilidad espacial de la lluvia, permiten someter la cuenca a un análisis hidrológico tanto temporal como espacial. La ventaja de utilizar este tipo de técnicas es conocer la respuesta a tiempo real de la cuenca ante un evento, tomando en cuenta sus propiedades físicas, en cualquier punto de ella, una vez determinada la función de transferencia que la representa.

En este documento se presentan dos estudios de caso, los cuales muestran el empleo de radares y satélite meteorológicos en la modelación hidrológica. El primer caso es la utilización de una cuenca experimental en la Ciudad de México, donde se alimentó un modelo hidrológico con datos de lluvia estimados con datos de radar meteorológico. En el segundo caso se modeló hidrológicamente una cuenca del río Amazonas, en Brasil, a partir de datos de lluvia estimados con datos de satélite.

2. ESTUDIO DE CASO: MÉXICO

El empleo del radar meteorológico para la estimación cuantitativa de la precipitación ha tenido un gran desarrollo en poco más de medio siglo. Quizás la aportación más importante fue la de Marshall y Palmer (1948), quienes caracterizaron la distribución de tamaños de gotas como una función simple de la intensidad de la lluvia y obtuvieron una relación entre la reflectividad del radar Z (mm^6/m^3) y la intensidad de lluvia R (mm/h) (Atlas *et al.*, 1997). Estudios posteriores sobre la naturaleza de las precipitaciones demostraron que esta relación no es tan simple, debido a las variaciones de la distribución de tamaños de gotas de un sitio a otro y de una tormenta a otra (Atlas *et al.*, 1997), con la consiguiente dificultad de obtener una relación única entre R y Z .

2.1 Antecedentes

En México, existe el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT CT) que ha dado excelentes resultados, el cual redujo de un año a otro las pérdidas de vidas humanas, de más de mil (hasta dos mil decesos a veces), hasta menos de 10 por temporada de huracanes. Este sistema se basa en el seguimiento de las trayectorias de los huracanes y las probabilidades de que esas posibles trayectorias toquen el territorio mexicano (Fig. 2.1). Las trayectorias pueden vigilarse y establecer su monitoreo debido a que la relativa lentitud con que se desplazan estos huracanes. Es decir, se puede vigilar su trayectoria en periodo de días. Sin embargo, debido a la topografía de nuestro país, al entrar en contacto las ondas tropicales, nortes, etc. con ésta, se genera inestabilidad atmosférica que funciona como disparador de los mecanismos generadores de tormentas, provocando avenidas súbitas e inundaciones alimentados por sistemas convectivos, los cuales se forman, maduran y se precipitan en pocas horas, razón por la cual, el tiempo de vida de estos sistemas es corto y dificulta su monitoreo o vigilancia y pronóstico hidrológico; especialmente si no se cuenta con un sistema de recepción de datos a tiempo real. A pesar de los graves daños y pérdidas ocasionados por estos fenómenos extremos, no existe en México un Sistema de Alerta para sistemas convectivos que eviten pérdidas de vidas humanas y mitiguen daños materiales,

culturales e históricos en las poblaciones afectadas y en los sectores productivos e infraestructura de telecomunicaciones y transporte.



Fuente: CENAPRED

Fig 2.1. Estados afectados por los ciclones tropicales (Probabilidad de que se presente en un año)

Como un primer paso para la construcción de un Sistema de Alerta Temprana por Sistemas Convectivos, se obtuvo un modelo de pronóstico hidrológico, del tipo lluvia-escorrimento, alimentado con datos de radar meteorológico. El modelo permitirá conocer la respuesta de una cuenca a tiempo real en el momento que una tormenta se presente.

2.2 Descripción de la zona de estudio

Con el fin de comprobar la bondad del uso del radar meteorológico en modelos de pronóstico de escurrimiento se utilizó la cuenca experimental del río Mixcoac para obtener un modelo hidrológico alimentado con datos de lluvia estimados con el radar de cerro la Catedral. La subcuenca del río Mixcoac se encuentra dentro de la cuenca del Valle de México con un área de drenaje de 31.5 km² en la región poniente de la Ciudad de México (Fig. 2.2 izq). El radar del cerro Catedral se encuentra en el noreste de la ciudad de México, a 35 km de distancia (Fig. 2.2 der).

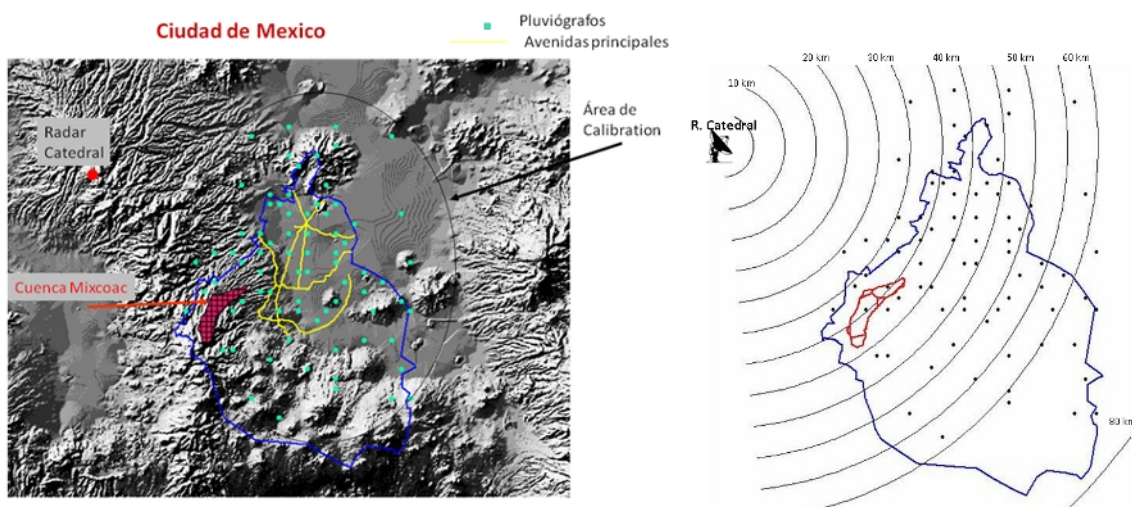


Fig. 2.2. Localización del radar del cerro Catedral y de la cuenca experimental

2.3 Validación de datos del radar

Aunque en México los radares meteorológicos no han sido empleados operativamente con fines hidrológicos, varios países han iniciado el uso de éste como una poderosa herramienta en el campo de la modelación distribuida. La adaptación de los datos del radar a la modelación hidrológica distribuida no ha sido fácil, ya que se requiere emplear técnicas poco utilizadas en el campo de la hidrológica tradicional. Por otra parte, la utilización de radares meteorológicos en modelos hidrológicos requiere necesariamente de la validación de sus datos, ya que el radar no mide directamente la lluvia y para su estimación se vale de la relación entre la reflectividad Z , medida a partir de la potencia recibida relacionada con la distribución de tamaños de gotas en el volumen de muestreo, y la intensidad de la lluvia R medida en los pluviógrafos. Sin embargo, este documento no intenta explicar la metodología de la calibración hidrológica de los radares meteorológicos, sino su empleo en la modelación hidrológica. Por lo tanto, se supondrá calibrado el radar y que los datos son válidos para el modelo hidrológico.

2.4 Modelo hidrológico

La ocurrencia de lluvias intensas sobre una zona causa el aumento de los escurrimientos en una red de corrientes. Este aumento, conocido como avenida, alcanza eventualmente grandes dimensiones, y provoca inundaciones, daños materiales en zonas aledañas a los ríos y, en ocasiones, la pérdida de vidas humanas. Para aplicar medidas de prevención o mitigación de los daños causados por las avenidas, es necesario conocer su magnitud, su evolución en el tiempo y probabilidad de ocurrencia.

Para entender la relación causal entre lluvia y escurrimiento, se han desarrollado modelos matemáticos que permiten obtener la respuesta de la cuenca (escurrimiento) al estímulo de una entrada (precipitación) al sistema (cuenca). Tales esquemas, conocidos como modelos lluvia-escurrimiento, se utilizan con fines de simulación o bien para hacer pronósticos en tiempo real de las avenidas durante las tormentas, a partir de la información de la precipitación que simultáneamente se está generando en la cuenca.

En un modelo hidrológico tradicional se considera que el escurrimiento se produce por la precipitación excedente. A este componente del gasto se le denomina escurrimiento directo o superficial, y a la porción del volumen de precipitación que la produce se le llama precipitación en exceso o efectiva. Mediante una función de transferencia, tal volumen se convierte en escurrimiento directo y, tras sumarle el gasto base, se obtiene el hidrograma de escurrimiento total. Un esquema como el anterior corresponde a los modelos hidrológicos de parámetros concentrados, los cuales utilizan promedios espaciales tanto de las características fisiográficas como de la precipitación en la cuenca. La modelación hidrológica distribuida, en cambio, considera la variabilidad espacial de las propiedades físicas y de la precipitación, al dividir la cuenca en microcuencas o celdas. Naturalmente, el desarrollo que ha tenido lugar en los campos de teledetección y sistemas de información geográfica ha facilitado el manejo de información espacialmente distribuida.

2.4.1 Modelos distribuidos

Si un modelo es agregado o no depende de si la cuenca está subdividida. Si el modelo es distribuido debe subdividir la cuenca en elementos computacionales más pequeños. Este fenómeno frecuentemente da lugar a modelos agregados a nivel de subcuencas, los cuales intentan representar las condiciones y variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos de la cuenca. De esta manera, cualquier modelo agregado puede convertirse en un modelo semi-distribuido (Vieux, 2001). Las desventajas asociadas con los modelos agregados por subcuencas incluyen:

- a) El modelo ignora o promedia las variaciones de las propiedades de las subcuencas
- b) El manejo de modelos agregados mediante subcuencas puede resultar engorroso para manejar los datos para un gran número de subcuencas.

Las características del terreno, de su cobertura, del suelo y de los cauces varían a lo largo y a lo ancho de la cuenca. Un modelo distribuido permite considerar los rasgos dominantes en las propiedades de cada una de las unidades areales en que se divide la cuenca; también permite el análisis de los distintos elementos que influyen en la respuesta hidrológica y que pueden ser modificados por la intervención humana en la cuenca o en parte de ella. Este es el caso de la modificación de la vegetación y del uso del suelo. Con una calibración adecuada, el modelo distribuido permite obtener una aproximación cuantitativa de la modificación de la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación extrema, a causa de estas intervenciones.

El modelo distribuido puede también obtener simultáneamente los caudales en diferentes puntos de la cuenca. En estos casos, el modelo puede servir para una mejor evaluación del riesgo pues permite conocer el estado del sistema en cualquier punto de la red de drenaje.

Es importante que el modelo permita obtener buenos resultados sin que se requiera una excesiva cantidad de parámetros. Desde el punto de vista operativo, el modelo debe ser sencillo y ágil para disminuir los tiempos de ejecución. Debe tenerse en cuenta, además, que en la búsqueda de sencillez, el modelo no pierda su representatividad. La sencillez y la agilidad de la operación del modelo son claves en el caso de utilizar el modelo para pronóstico. Si el modelo se gasta en su operación gran parte del tiempo considerado como ventana de pronóstico, deja muy poco tiempo para las decisiones y las acciones que mitigan los efectos de la avenida (Vélez, 2001).

Para la representación de los procesos hidrológicos en la cuenca, la mayoría de los modelos hidrológicos distribuidos se componen de dos submodelos conceptuales, uno de producción de escurrimiento y el otro de traslado o de tránsito. El primer modelo representa las distintas componentes que generan el escurrimiento y el segundo el viaje del escurrimiento que se va agregando aguas abajo en la red de drenaje, hasta llegar a la salida de la cuenca.

2.4.2 Hidrograma Unitario Distribuido

El método hidrológico empleado en la modelación hidrológica de la cuenca de estudio se basa precisamente en las dos componentes mencionadas antes: un hidrograma de

transferencia y un almacenamiento lineal. Esto se ve representado por medio de isócronas o curvas de igual tiempo de viaje a la salida de la cuenca a partir de las cuales se determina el histograma Tiempo-Área (Fig. 2.3). El método se conoce también como método de Clark (Fig. 2.4). El modelo conceptual de este método para modelos distribuidos se muestra en la figura 2.5.

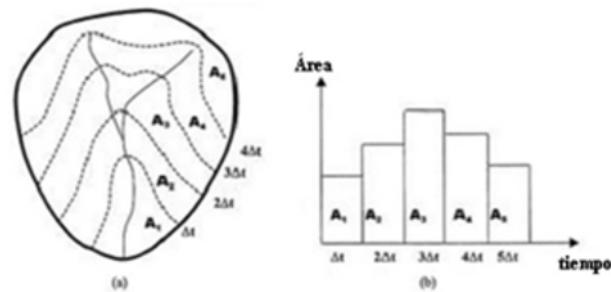


Fig. 2.3. Isócronas (a) e histograma Tiempo-Área (b) para una cuenca (Fuente: Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrone technique. Saghafian B., Julien P. Rajaie H, 2002)

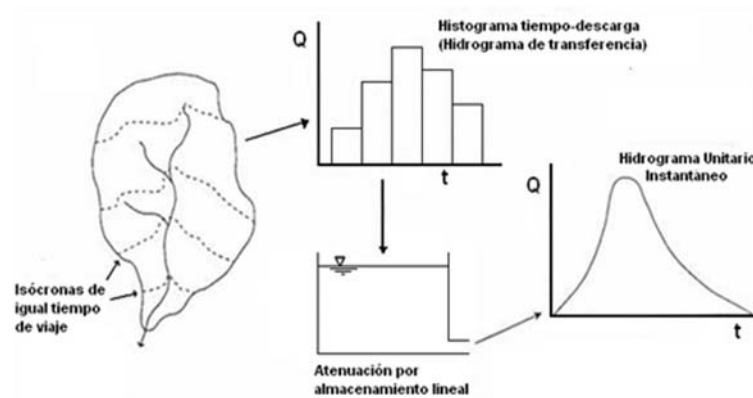


Fig. 2.4. Modelo Conceptual del Método de Clark para parámetros concentrados (Fuente: Evolution of Clark's Unit Graphs Method to Spatially Distributed Runoff; Kull D. W. and Feldman A. D., 1998)



Fig. 2.5. Modelo de escurrimiento directo conceptual ModClark para parámetros distribuidos (Fuente: Evolution of Clark's Unit Graphs Method to Spatially Distributed Runoff; Kull D. W. and Feldman A. D., 1998)

Este tipo de hidrograma unitario se puede interpretar como el resultado de la combinación de un proceso de traslación pura, seguido por un almacenamiento lineal. De acuerdo con

este esquema, el tiempo de viaje real de una partícula de agua es el tiempo dado por el diagrama tiempo-área más el tiempo de retención del embalse lineal (Vélez, 2001).

Este método requiere de la estimación de tres parámetros para la determinación del hidrograma de la cuenca: el tiempo de concentración t_c (ec. 3.13), un coeficiente de atenuación por almacenamiento R y un histograma tiempo-área. En la literatura existen varias ecuaciones para el cálculo del tiempo de concentración t_c , la ecuación empleada para realizar este estudio fue la de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (3.13)$$

donde

- t_c tiempo de concentración (horas):
- L longitud del cauce principal (m.)
- S pendiente media de la cuenca (m/m)

El coeficiente de atenuación por almacenamiento R es el segundo parámetro de este método y es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural. El coeficiente R se estima a partir de un hidrograma observado; representa la razón entre el volumen bajo el hidrograma después del segundo punto de inflexión (curva de recesión) y el valor del gasto en este punto. La ecuación con la cual se estima este coeficiente es entonces (HEC, 1982).

$$R = \frac{\int_{PI}^{\infty} Q(t)}{Q_{PI}} \quad (3.14)$$

El tercer parámetro, el histograma tiempo-área, representa el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en la salida de la cuenca en un tiempo dado. Esta área se obtiene al construir el mapa de isócronas mediante la determinación de la distancia de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca. Lo anterior se calcula ya sea estimando el tiempo de escurrimiento en las laderas y el de la corriente principal o simplemente suponiendo una velocidad de viaje constante.

2.5. Modelo hidrológico de la cuenca

El mapa de la cuenca con sus corrientes y demás parámetros contiene las coordenadas de referencia y los elementos hidrológicos que sirven de apoyo para el tránsito del escurrimiento en la modelación. La creación de esta base de datos hidrológica requiere la selección de un sistema de coordenadas que conserve la alineación de las propiedades espaciales como el área, la forma y las distancias en la cuenca. Desde una perspectiva hidrológica, donde el terreno y la precipitación son importantes, un sistema adecuado de coordenadas debe conservar el área.

El archivo de parámetros en forma de malla representa las celdas como subcuencas para la modelación distribuida. Estas celdas se obtienen interceptando la malla con la cuenca empleando la malla de celdas cuadradas de 1 km por lado del radar meteorológico, con el propósito de que el tamaño de las celdas de los parámetros hidrológicos sea igual al de la

mallas de precipitación. De esta forma, se estima la longitud de corriente y pendiente en cada celda para formar una base de datos que contiene su tiempo de viaje hasta la salida y sus áreas para crear las isócronas que requiere el método para el traslado del escurrimiento.

El método empleado para la obtención del escurrimiento es el del Número de Curva (NC) la modelación distribuida requiere entonces incluir como entrada una malla con el NC de cada una de las celdas. Para obtener esta malla se usan los mapas de uso y tipo de suelo de la zona de estudio clasificando su grado de permeabilidad en Muy Alta, Buena, Media y Baja (Tabla 2.1) con base en la Tabla 2.2, se interceptan con la malla (Fig. 2.6) y se determina el NC mediante la ecuación

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

Donde CN es el Número de Curva determinado a partir del uso y tipo de suelo, según el criterio de *Soil Conservation Service* de los E.U y los valores de P y P_e se expresan en cm. Este método es quizás, el más utilizado en hidrología debido a su sencillez y fácil manejo y a que el parámetro CN (número de curva) es fácil de obtener (se encuentra definidos por medio de tablas para distintos usos de suelo, vegetación y condiciones de humedad antecedente).

El principal interés hidrológico en los mapas de suelos es la modelación de la infiltración como una función de las propiedades del suelo para así capturar su variabilidad espacial.

Tabla 2.1. Atributos de los tipos hidrológicos del suelo

Permeabilidad	Grupo Hidrológico
Muy Alta	A
Buena	B
Media	C
Baja	D

Tabla 2 Cobertura de suelo (Fuente: Manual de diseño de obras civiles, CFE. A.1.4. Pérdidas. 1980)

COBERTURA	Pendiente del terreno en %	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
Sin cultivo	---	77	86	91	94
Cultivo en surcos					
Surco recto	> 1	72	81	88	91
Surco recto	< 1	67	78	85	89
Contorneo	> 1	70	79	84	88
Contorneo	< 1	65	75	82	86
Terrazas	> 1	66	74	70	82
Terrazas	< 1	62	71	78	81
Cereales					
Surco recto	> 1	65	76	84	88
Surco recto	< 1	63	75	83	87
Contorneo	> 1	63	74	82	85
Contorneo	< 1	61	73	81	84

Terrazas	> 1	61	72	79	82
Terrazas	< 1	59	70	78	81
Praderas con rotación					
Surco recto	> 1	66	77	85	89
Surco recto	< 1	58	72	81	85
Contorneo	> 1	64	75	83	85
Contorneo	< 1	55	69	78	83
Terrazas	> 1	63	73	80	83
Terrazas	< 1	51	67	76	80
Pastizal					
-----	> 1	68	79	86	89
-----	< 1	39	61	74	80
Contorneo	> 1	47	67	81	88
Contorneo	< 1	6	35	70	79
Pradera permanente		30	58	71	78
Bosques					
Muy ralo	----	56	75	86	91
Ralo	----	46	68	78	84
Normal	----	36	60	70	77
Denso	----	26	52	62	69
Muy denso	----	15	44	54	61
Caminos					
Terracería	----	72	82	87	89
Superficie dura	----	74	84	90	92

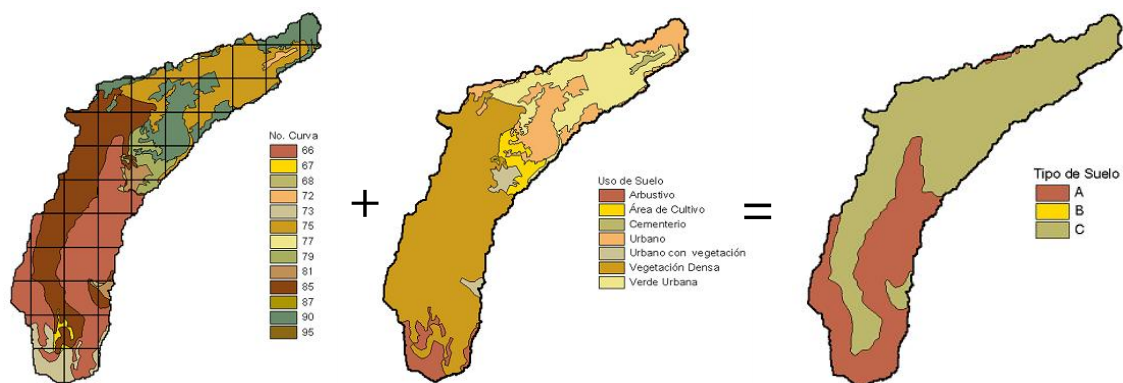


Fig. 2.6. Mapa de Uso de Suelo + Tipo de Suelo = Mapa de Número de Curva

2.6. Calibración del modelo

El método de Clark modificado emplea un Histograma Tiempo-Área (HTA) construido con las subáreas definidas entre isócronas consecutivas, desde la salida de la cuenca hasta la parte más elevada y el intervalo de tiempo es el tiempo de viaje entre dos isócronas adyacentes. Este HTA constituye la base de la transferencia de la lluvia en escurrimiento y puede determinarse a partir de la ecuación de convolución (Saghafian, et. al., 2002).

$$Q_j = \sum_{k=1}^j E_k A_{j-k+1}$$

donde j es el número de intervalos de tiempo; Q es el gasto a la salida de la cuenca; E es la intensidad de lluvia en exceso y A es el área delimitada entre isócronas. Con estos métodos se calibra el modelo hidrológico hasta que el hidrograma resultante de la estimación sea comparable al hidrograma observado de las tormentas seleccionadas (Fig. 2.7 y 2.8). Los parámetros obtenidos para las dos tormentas (Tabla 2.3) muestran buena coincidencia entre datos estimados y observados, suficiente para validar el modelo hidrológico distribuido para la cuenca analizada.

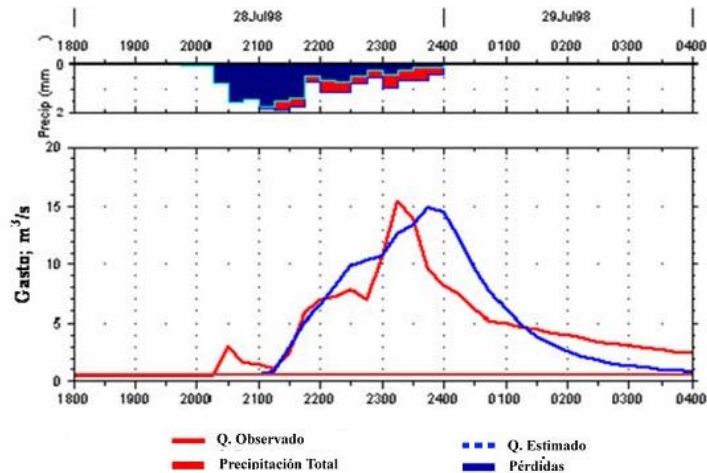


Fig. 2.7. Hidrograma de salida para la tormenta del 28 de julio de 1998, utilizando la ecuación de calibración

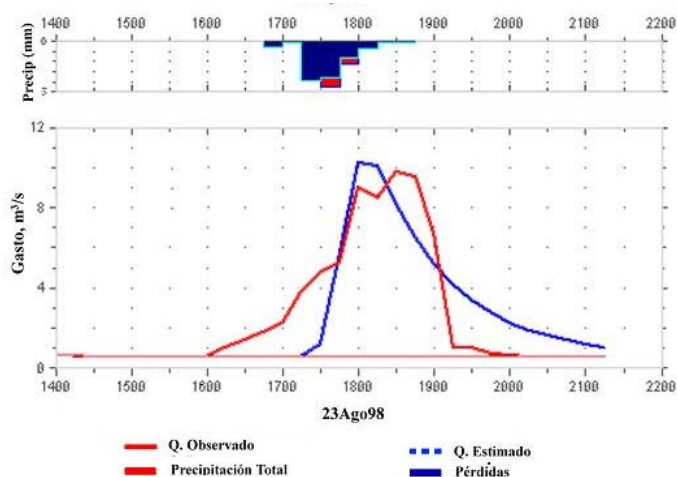


Fig. 2.8. Hidrograma de salida para la tormenta del 23 de agosto de 1998, utilizando la ecuación de calibración

Tabla 2.3. Parámetros resultantes para cada una de las tormentas

FECHA	PARÁMETROS DEL MODELO DE CUENCA						
	Razón de infiltración Inicial	Factor de Escala de Retención Potencial	t_c	Coefficiente de Almacenamiento	Qbase inicial	Constante de Recesión	Umbral del Qbase
28JULIO98	0.6	0.125	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1
23AGO98	0.6	0.41	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1

2.6. Análisis de resultados y conclusiones

El mayor sentido físico de los modelos distribuidos permite considerar la variabilidad espacio temporal de las tormentas y la variabilidad espacial de las características del suelo de la cuenca, simulando con ello un hidrograma más acorde con la realidad. Además, como la respuesta de la cuenca no es lineal, el modelo distribuido permite hacer una integración más precisa de la misma

En la Tabla 2.3, la razón de infiltración inicial y el factor de escala de retención potencial están influidos por la humedad antecedente en el suelo, el tiempo de concentración t_c y el coeficiente de almacenamiento influyen sobre la forma del hidrograma y el Gasto base inicial, la Constante de recesión y el Umbral del gasto base afectan el flujo base. Para el caso de las dos tormentas seleccionadas, los parámetros de infiltración muestran que, para la tormenta del 28 de julio, la infiltración es menor que en el caso de la tormenta del 23 de agosto. Así, de los siete parámetros que intervienen en la calibración del modelo seis permanecen constantes y sólo uno es variable; el referido a la humedad antecedente. Este es un problema aún no resuelto por los hidrólogos siempre que se lleva a cabo la modelación por evento; mas puede minimizarse modelando la respuesta de la cuenca en forma continua. A pesar de esto, el modelo muestra gran sencillez operativa y resultados confiables para su empleo en la toma de decisiones en zona de alto riesgo y requiere de pocos parámetros para su calibración. Adicionalmente, el tiempo de simulación es menor a la ventana de pronóstico, dejando tiempo para la toma de decisiones.

3. ESTUDIO DE CASO: BRASIL

En la modelación hidrológica, el uso de la tecnología de satélite para la estimación de lluvia significa ahorros importantes por su gran cobertura y porque se emplean satélites ya existentes y con disponibilidad de datos. Utilizando datos de satélite en la estimación de la precipitación y datos de estaciones de superficie para su validación se puede cubrir grandes cuencas con la resolución necesaria para alimentar modelos hidrológicos con costos menores.

Con el objetivo de obtener el modelo hidrológico operativo para la cuenca del río Purús, a partir de datos de lluvia generados con el producto de estimación de lluvias por satélite llamado Hidroestimador, se validaron sus datos antes de alimentar al modelo hidrológico.

3.1 Descripción de la zona de estudio

El río Purús se localiza en la Amazona Brasileña (Fig. 3.1) y tiene un área aproximada de 375 000 Km². El río Purús es muy sinuoso y el último gran afluente de la margen derecha del río Solimões. El río Purús (Fig. 3.2) nace en la montañas del Arco Fitzcarrald, situado en la floresta baja Peruana en los Estados de Ucayali e Madre de Dios. El río Purús entra a Brasil por el estado de Acre, por el municipio de Manuel Urbano y al estado de Amazonas por el municipio de Boca de Acre donde recibe las aguas del río Acre; continúa por el estado de Amazonas hasta desaguar en el río Solimões. Su curso se caracteriza por su forma meándrica y por el agua rica en sedimentos andinos, clasificado como río de agua blanca. El río Purús es una sub-cuenca del río Amazonas, pero para propósitos de análisis, se le llamará cuenca del río Purús de aquí en adelante.



Fig. 3.1 Cuenca del Amazonas y subcuenca del río Purús.



Fig. 3.2 Río Purús y tributarios

Un factor importante para definir los parámetros de una cuenca en la modelación hidrológica distribuida es la topografía, pues tiene implicaciones importantes a la hora de seleccionar el modelo hidrológico más adecuado para modelar la cuenca, como se verá más adelante (Fig. 3.3). Cuando un río tiene un lecho muy plano, estos suelen ser meándricos (Fig. 3.4).



Fig. 3.3 Vista aérea de la topografía predominante en la cuenca del río Purús

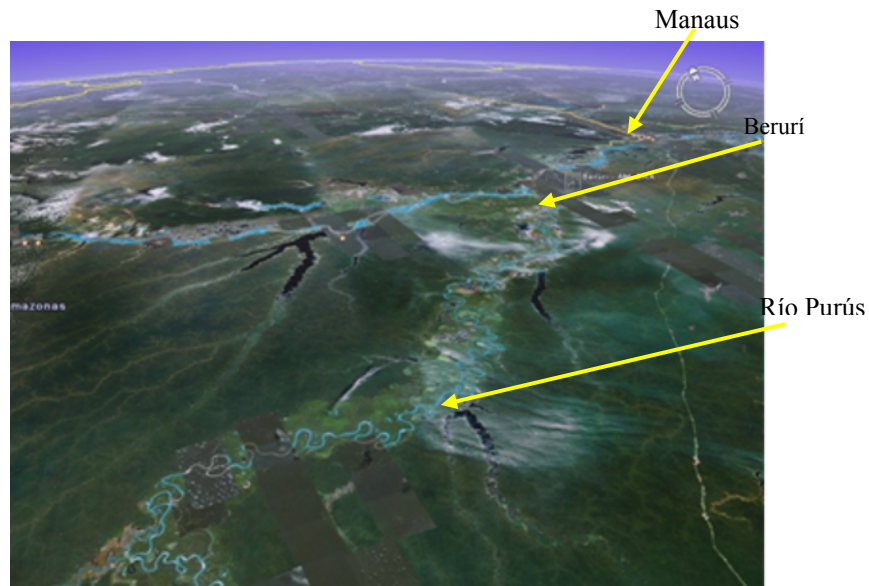


Fig. 3.4 Curso del río Purús (Fuente: Google Earth)

3.2 Descripción de la zona de estudio

A pesar de que el Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) opera una buena red de estaciones automáticas de superficie (PCD) y de que éstas son muy útiles para el estudio de las condiciones hidrológicas actuales y futuras de la cuenca, debido a que el periodo de funcionamiento de esta red es relativamente corta y que, para el análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Purús interesan los datos históricos y que las estaciones que tienen los registros más antiguos son los de la Agencia Nacional de Aguas; por tanto, fue esta última la red que se empleó en este análisis (Fig. 3.5).

Sin embargo, antes de alimentar a un modelo hidrológico con el Hidroestimador, se validaron los datos de lluvia generados por este producto por medio de una calibración hidrológica y de esta manera, pasar de la estimación cualitativa de la precipitación, a la cuantitativa. Para conseguir este objetivo, se utilizaron datos de precipitación media estimados con datos de las estaciones de superficie y del Hidroestimador (Fig. 3.6).



Fig. 3.5 Estaciones con mayores registros históricos de lluvia en la cuenca del río Purús.

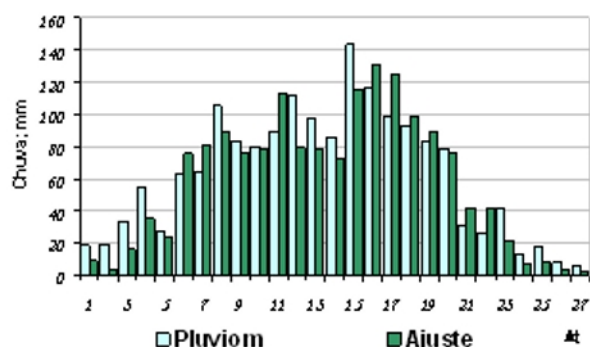


Fig. 3.6 Hietogramas de precipitación media con pluviógrafos e Hidroestimador ajustado

3.3. Modelo hidrológico de la cuenca

Para la calibración del modelo hidrológico se utilizaron cinco tormentas y se empleó la sexta para validar el modelo obtenido para la cuenca. El método utilizado fue el del Hidrograma Unitario Instantáneo; de esta manera se determinó la función de transferencia que representa al sistema-cuenca y convierte las entradas-lluvias en salidas-escurrimientos (Fig. 3.7).

Tabla 3.1. Tormentas seleccionadas

	LLuvias		Gastos	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Tormenta 1	3/7/1983	1/7/1984	4/12/1983	2/12/1984
Tormenta 2	14/7/1996	27/7/1997	20/10/1996	19/10/1997
Tormenta 3	27/7/1997	12/7/1998	30/11/1997	18/10/1998
Tormenta 4	26/7/1998	8/8/1999	15/11/1998	28/11/1999
Tormenta 5	8/8/1999	23/7/2000	12/12/1999	10/12/2000
Tormenta 6	23/7/2000	19/8/2001	10/12/2000	11/11/2001
Hidroestimador	31/7/2004	31/7/2005	5/12/2004	4/12/2005



Fig. 3.7 Hidrograma Unitario de la cuenca del río Purús

3.4 Definición de la razón de infiltración en la cuenca

Para la determinación del modelo hidrológico operativo de pronóstico de escurrimientos, se requiere, una vez obtenida la función de transferencia que representa la respuesta de la cuenca ante un estímulo-precipitación, definir el coeficiente de infiltración para la cuenca del río Purús.

La razón de infiltración para cada tormenta es variable y es el parámetro que introduce mayor incertidumbre al modelo de pronóstico hidrológico ya que la respuesta de la cuenca depende de las condiciones de humedad del suelo en el instante en que se presenta un evento de precipitación. Para definir este parámetro con fines operativos se consideraron las condiciones más desfavorables. Es decir, suponer un suelo húmedo con una intensidad de infiltración pequeña, lo que supone un mayor escurrimiento. El método empleado fue el del índice de infiltración .

Con este fin se estimaron los coeficientes de infiltración para cada tormenta y se tomó como coeficiente de infiltración de diseño el menor para el sistema de pronóstico operativo y se definió como constante. Es decir,

$$\phi_{cte} = 19.84 \approx 20 \text{ mm/15d}$$

3.5. Validación del modelo de pronóstico hidrológico

Para la validación del modelo de pronóstico hidrológico para la cuenca del río Purús se estimó entonces los escurrimientos a la salida de la cuenca y compararon con los observados (Fig. 3.8), empleando la función de transferencia de la cuenca del río Purús (Fig. 3.7) y su coeficiente de infiltración. La infiltración define las precipitaciones efectivas que alimentan al modelo para pronosticar los escurrimientos.

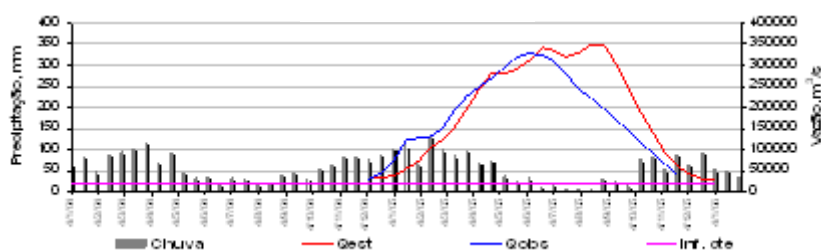


Fig. 3.8 Escurrimiento observado y pronosticado en la cuenca del río Purús

El modelo obtenido en este estudio simula la respuesta de la cuenca en su salida ante un evento de precipitación en la salida de la cuenca. Por lo tanto, los resultados del pronóstico sólo son válidos a la salida de la cuenca.

Una vez validado el modelo hidrológico, en el futuro será alimentado con datos del Hidroestimador ajustado para fines operativos.

3.6 Modelo hidrológico operativo

Una vez validado los datos estimados de lluvia del Hidroestimador y la intensidad de infiltración conocidas para la cuenca del río Purús, fácilmente se puede programar que los datos del Hidroestimador alimenten al modelo de pronóstico de escurrimiento de forma operativa y así conocer la respuesta de la cuenca a tiempo real ante cualquier evento.

En el caso del modelo hidrológico operativo para la cuenca del río Purús se obtuvo un programa de cómputo que genera, a tiempo real:

- 1) Mapa de lluvias (ajustada) en la cuenca del río Purús
- 2) Hietograma de precipitación media diaria ajustada; en mm

3) Hidrograma de pronóstico diario de escurrimientos; en m³/s

Estos productos pueden verse en el sitio web

<http://paraguay.cptec.inpe.br:8080/purus/>

Los productos anteriores se actualizan cada 24 horas.

3.7 Conclusiones y recomendaciones

En hidrología, se requiere no sólo de la estimación cualitativa de la precipitación, sino también de la cuantitativa para obtener pronósticos de inundaciones confiables. En este sentido, en este estudio se obtuvo una calibración hidrológica del Hidroestimador, validado primero con observaciones de estaciones de superficie y luego con el modelo de pronóstico de escurrimientos para la cuenca del río Purús.

El análisis presentado en este estudio se realizó con datos históricos de escurrimientos, sin embargo, el acceso a estos datos, por la zona en que se localiza la cuenca, es de muy difícil acceso. Para subsanar esta dificultad es recomendable instalar una estación hidrométrica que pueda transmitir datos a una terminal de recolección de datos. De esta manera, se podrá mantener la vigilancia sobre el modelo y la respuesta real de la cuenca con el fin de implementar algún mecanismo de autocalibración del modelo.

Por las condiciones fisiográficas de la cuenca del río Purús, se determinó un modelo que considera a la infiltración constante, eligiendo el coeficiente de infiltración más desfavorable para el diseño del modelo hidrológico operativo. Es decir, una infiltración menor supone una condición del suelo húmedo y, por consiguiente, mayor escurrimiento. Una vez validada la estimación cuantitativa de la lluvia, además de la infiltración de diseño, es fácil implementar un modelo hidrológico operativo, pues sólo se necesita alimentar con datos de lluvias a tiempo real al modelo hidrológico obtenido, lo cual hace el Hidroestimador. El resultado es conocer la respuesta de la cuenca en el instante que una tormenta se precipita sobre ella, es decir, el pronóstico de los escurrimientos operativo. Los resultados pueden mejorar si se considera la infiltración a partir de la modelación continua.

El uso de estas técnicas para investigación y estudios de los sistemas naturales y sus procesos ha llevado a desarrollar nuevos métodos para procesar, analizar e interpretar los datos proporcionados por Percepción Remota como parte de un sistema operativo de monitoreo, el cual se caracteriza por pre-procesar y analizar los datos recibidos remotamente para entregar un producto ya "interpretado". Los encargados de operar los sistemas de monitoreo, de vigilancia de la atmósfera y los responsables de las tomas de decisiones tiene en este tipo de productos, una herramienta muy útil que los ayuda a implementar las medidas necesarias de protección a las comunidades al conocer los procesos hidrometeorológicos que se están desarrollando sobre una cuenca en el mismo momento que estos ocurren.

El tiempo de respuesta de la cuenca del río Purús ante un evento de precipitación es de tres a cuatro meses, esto se debe a las dimensiones de la cuenca y, gran parte de este retraso, a la topografía tan plana de la cuenca, por lo que el tiempo empleado fue de 15 días. Es claro que no se puede considerar una cuenca tan grande para la utilización de un modelo hidrológico considerado para cuencas más pequeñas. Sin embargo, el objetivo principal de este estudio es la implementación de un modelo hidrológico operativo y, debido a la escasez de datos para emplear uno mejor, se utilizó este modelo para conseguir el objetivo buscado. Es necesario aclarar que el pronóstico de los

escurrimientos es válido sólo para la salida de la cuenca, donde se estimó la respuesta de la cuenca.

Adicionalmente, la información de lluvias históricas permite conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca (Fig. 3.9), donde se puede ver los meses de secas y de lluvia, así como la distribución espacial anual (Fig. 3.10).

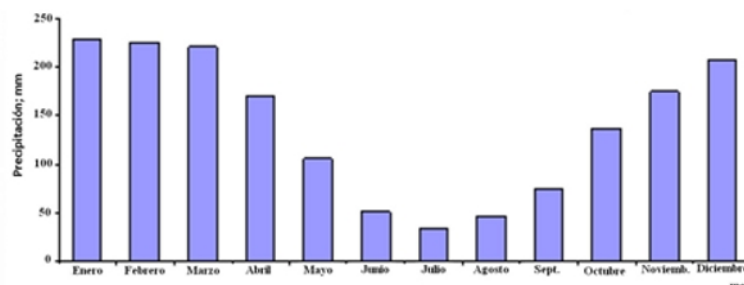


Fig. 3.9 Precipitación media mensual en el periodo 1983-2005.

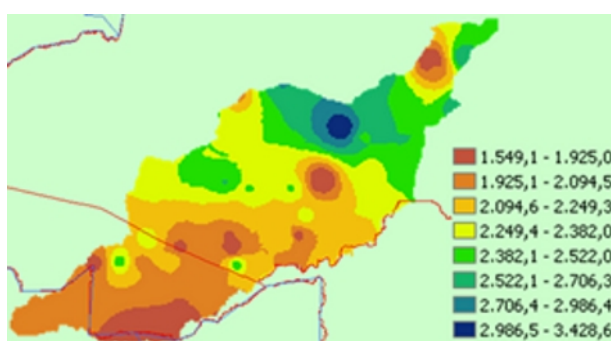


Fig. 3.10 Distribución espacial de la precipitación anual en la cuenca del río Purús.

BIBLIOGRAFÍA

Atlas D., Rosenfeld D., Jameson A., 1997. *Evolution of Radar Measurements: Steps and Mis-Steps*. Weather Radar Technology for Water Resources Management, pp. 3-67

HEC, 1982: Hydrologic Engineering Center: *HEC-1 Training document No.15*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, USA. (citado por Nurünnisa Usul and Musa Yilmaz, sin referencia)

J.S. Marshall and W.M. Palmer, *The distribution of raindrops with size Journal of Meteorology*, Vol. 5 (1948), pp. 165-166

Kull D. W. and Feldman A. D., 1998. *Evolution of Clark's Unit Graphs Method to Spatially Distributed Runoff*. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 9-19, January

Saghafian B., Julien P. Rajaie H, 2002. *Runoff Hydrograph Simulation Based on Time Variable Isochrone Technique*. Journal of Hydrology, 261, 193-203

Vélez, J., 2001. *Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulación de Crecidas*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 266 pp.

Vieux, E. B., 2001. *Distributed Hydrologic Model Using GIS*, Kluwer Academic Publisher, Vol. 38, Water Science and Technology Library