

## **BALANCE HÍDRICO MICROREGIONAL DE BOLIVIA, PRIMEROS RESULTADOS**

**Jorge Molina Carpio, Eduardo Díaz Foronda, Edwin Condori**

**Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés**

**Área temática: Hidráulica e Hidrología**

### **Resumen**

Se presenta el alcance, metodología y primeros resultados del Balance Hídrico Microregional de Bolivia, proyecto cuyo objetivo central es determinar la oferta de agua por cuencas y subcuencas y proporcionar así información básica para la planificación de los recursos hídricos del país. El estudio incluye un análisis a nivel mensual de las principales variables hidrológicas sobre un periodo mayor a 20 años, así como una base de datos geográficos. Se presentan resultados para las dos cuencas más húmedas del país, la del río Ichilo-Mamoré y del río Beni en su parte andina. En ambas existe un fuerte efecto orográfico sobre la precipitación (topoclimas), por lo que se recurrió a técnicas de análisis de datos y a información generada en otras áreas del conocimiento para evaluar espacialmente los tres términos principales del balance.

### **Antecedentes y objetivos**

El Balance Hídrico Superficial de Bolivia (Roche et al, 1992) es el único documento de alcance nacional que, en base a valores medios anuales, brinda información sobre la oferta de agua superficial por cuencas, en base al análisis de los tres términos principales del balance: precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial. Este proyecto fue el primer balance hídrico que abarcó todo el territorio boliviano. Se consideraron ocho grandes cuencas hidrográficas y datos del periodo 1968-82.

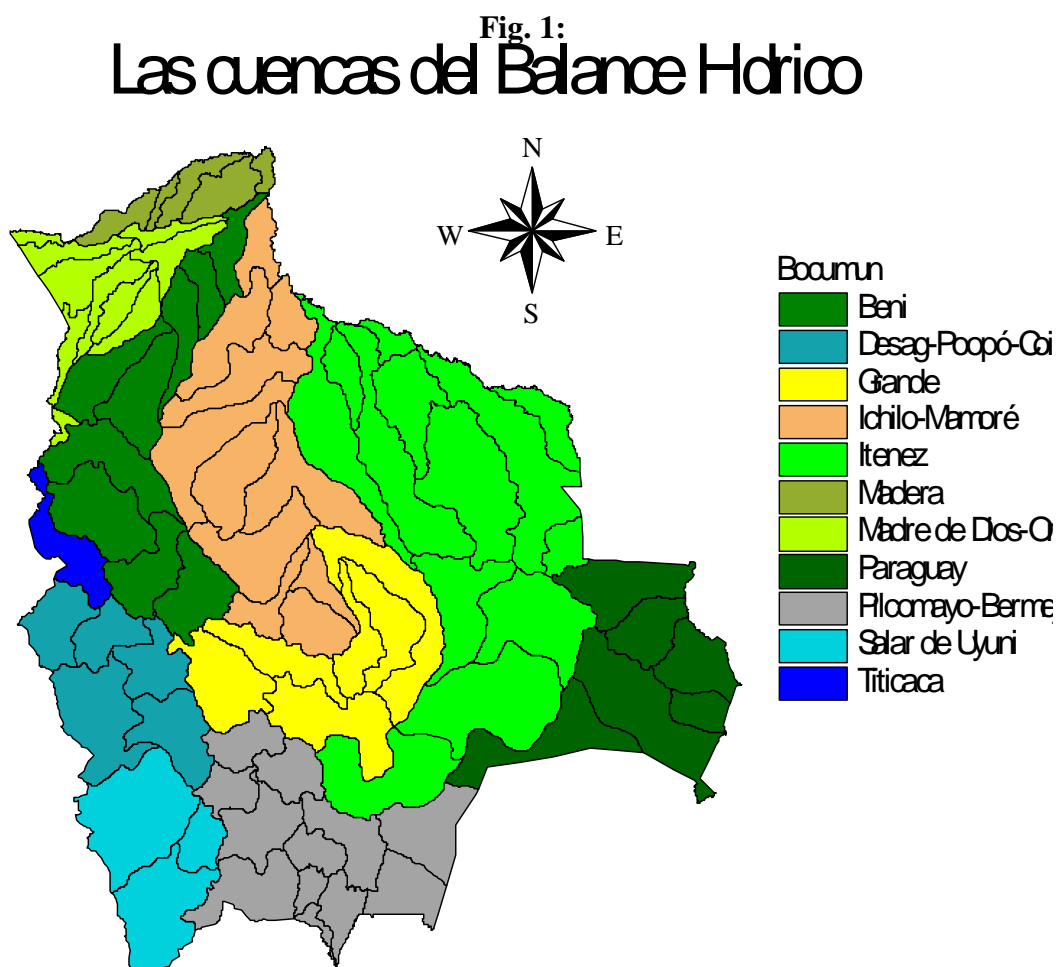
El Balance Hídrico de 1992 es un documento de referencia importante cuando se desean considerar variables hidrológicas a nivel de macrocuencas, por lo que ha sido y es utilizado en estudios relacionados a la planificación de los recursos hídricos del país. Sin embargo es insuficiente para la gestión, aprovechamiento y asignación de derechos de agua, que exigen un mayor conocimiento de la variación temporal y espacial de la oferta. Para estos fines, se requiere un análisis de las variables hidrológicas a nivel mensual como mínimo, una discretización espacial en subcuencas de menor extensión y en lo posible, series de datos más largas.

Tomando en cuenta lo anterior y con el objetivo adicional de mejorar sustancialmente el conocimiento del régimen hidrológico de las cuencas de Bolivia, se propuso llevar a cabo el Balance Hídrico Microregional, proyecto que es ejecutado actualmente por el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la UMSA, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Francia). En su momento el proyecto contó con información o apoyo de la Autoridad Binacional del lago Titicaca (ALT) y Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN).

La capacidad técnica de realizar un proyecto de esas características se ha visto reforzada por los avances registrados en la última década en las herramientas y paquetes informáticos para

la evaluación y tratamiento de la información hidrometeorológica y cartográfica, que cubren desde el análisis estadístico hasta el uso de modelos matemáticos para simular y extender los datos disponibles, y también por las mejoras en computadoras y equipos. Al presente se ha concluido preliminarmente con el Balance Hídrico de tres de las diez grandes cuencas en que se subdividió el país: la cuenca del lago Titicaca, la cuenca del río Ichilo-Mamoré y la cuenca andina del río Beni. Este artículo presenta los resultados obtenidos en las dos últimas.

### Alcance y metodología



El país se ha dividido en 10 grandes cuencas que se muestran en la figura 1. Para cada una de ellas se espera obtener los siguientes resultados:

- Base de datos meteorológicos con series mensuales completas de las principales variables climatológicas (precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, etc).
- Base de datos hidrológicos con series de caudales mensuales de al menos 20 años de duración.
- Base de datos geográficos que incluya toda la cartografía temática, la ubicación de estaciones de medición y resultados, a escala 1:250,000.

- Modelo precipitación-escorrentía calibrado y validado, que permita la extensión de las series de caudales en subcuencas con periodos cortos o incompletos
- Mapas temáticos digitales e impresos que muestren gráficamente los resultados principales: isolíneas de variables climáticas, mapas de coeficientes de escorrentía y caudales específicos, etc.
- Publicaciones con los resultados por cuencas y subcuencas, así como un documento síntesis para toda Bolivia.

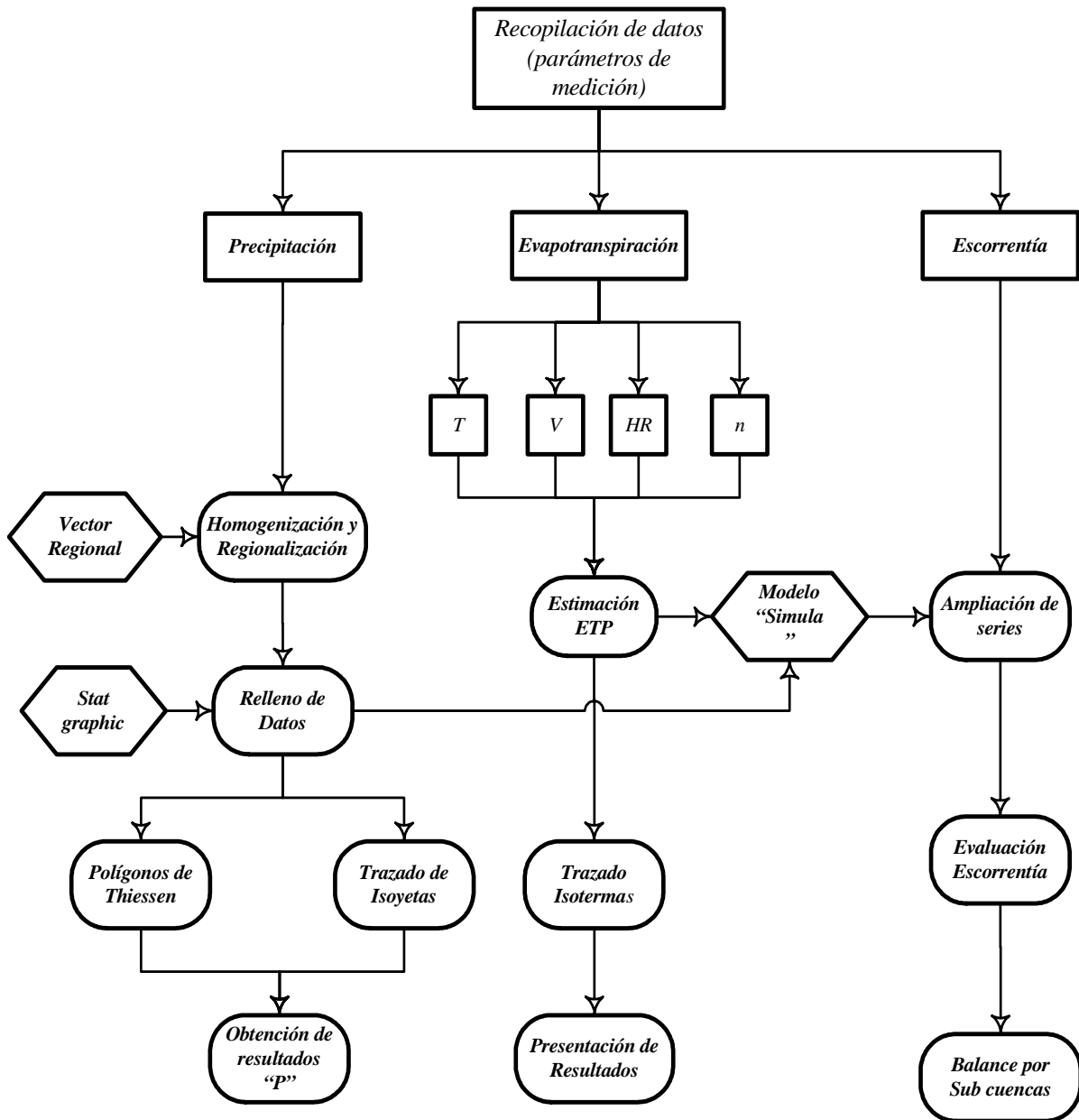
La figura 2 sintetiza, a través de un esquema, los pasos principales y secuencia metodológica que se utilizan para los balances hídricos de cuenca. Un aspecto central es el uso de un modelo de precipitación-escorrentía, que es indispensable porque el paso mensual del balance obliga a considerar un almacenamiento temporal del agua en el suelo y el acuífero. Se usó el modelo SIMULA, creado por el Departamento de Estudios Hidrológicos del MOPU de España. La versión original en Fortran fue llevada a Visual Basic por Espejo (2002).

SIMULA es un modelo agregado, de paso mensual y donde cada parámetro tiene un significado físico, lo que teóricamente permite aplicarlo sin recurrir a la calibración. Los datos de entrada son las series mensuales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP), caudales observados (para calibración y validación) y número de días de lluvia tipo por mes. Se requiere de cuatro parámetros físicos de cuenca: la capacidad de almacenamiento del suelo, capacidad de infiltración, coeficiente de excedencia para precipitación efectiva y la constante de recesión del acuífero. Valores iniciales para los dos primeros se obtienen de mapas temáticos de suelo, cobertura vegetal y uso actual de la tierra, que posteriormente pueden ser ajustados mediante calibración. Los otros dos deben obtenerse mediante calibración en cuencas con datos medidos de caudal. El modelo puede usarse sin calibrar, adoptando valores consistentes y razonables de los cuatro parámetros, lo que requiere de experiencia y conocimiento por parte del usuario.

El modelo asume que la evaporación se produce solamente del suelo, que incluye tanto el almacenamiento superficial como la capacidad de campo de la zona de raíces. El acuífero es considerado como un embalse lineal. Los resultados que se obtienen con el modelo son series mensuales de caudal total, caudal subterráneo, evapotranspiración real ETR, almacenamiento de agua en el suelo y recarga subterránea. El modelo no considera el tránsito del agua (flow routing) en el cauce, en la zona subsuperficial o en la llanura de inundación. Si el tiempo de flujo de un río es mayor a quince días, debería recurrirse a un modelo hidrodinámico o un método aproximado que permita considerar ese “retraso” en los cálculos.

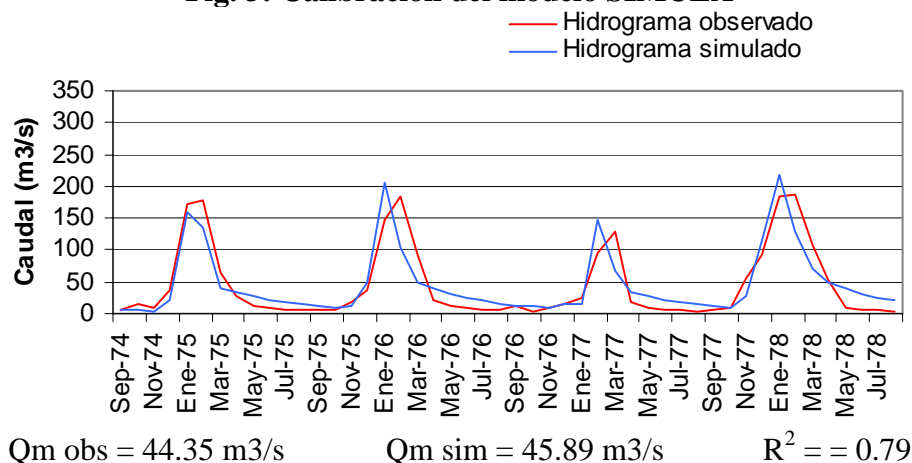
Para la homogeneización y regionalización de los registros de precipitación se utilizó el método del vector regional. Estos registros fueron completados y rellenados mediante un programa estadístico. Posteriormente se realizó una evaluación espacial de la precipitación, obteniéndose las series mensuales por cuencas y subcuencas que requiere el modelo como datos de entrada. La evapotranspiración potencial se calculó para cada estación mediante la ecuación de Penman y a nivel de cuenca mediante polígonos de Thiessen. Las series de caudal fueron proporcionadas por el ALT para la cuenca del Titicaca y por el SENAMHI para las cuencas Ichilo-Mamoré y Beni-Andes. El análisis y ajuste de los datos hidrométricos de estas dos últimas fue realizado por Vauchel (2004).

**Fig. 2: Esquema metodológico - Balance Hídrico de cuenca**



La figura 3 muestra el proceso de calibración para un río con 4 años de registros de caudal. Existe una buena aproximación entre caudales medios observados y simulados y el coeficiente de correlación es suficientemente alto. Sin embargo, se observa un cierto desfase en los caudales máximos: el hidrograma simulado precede en el tiempo al hidrograma observado. Esto se debe a que el modelo no considera el tránsito de flujo, como se mencionó anteriormente.

**Fig. 3: Calibración del modelo SIMULA**



**Resultados**

**Las cuencas de los ríos Beni e Ichilo-Mamoré**

Se presentan los resultados obtenidos para la cuencas de los ríos Ichilo-Mamoré y Beni en su parte andina. La ubicación y límites geográficos de ambas cuencas se muestran en la figura 4. En el caso del Mamoré no se incluyó las cuencas de los ríos Grande e Iténez, grandes afluentes cuyo balance hídrico se realizará por separado (ver figura 1). La superficie drenada por el Ichilo-Mamoré es de 127700 km<sup>2</sup> y por el río Beni hasta el Angosto del Bala es de 69600 km<sup>2</sup>.

La figura 4 muestra además el relieve de ambas cuencas. La cuenca andina del río Beni tiene una topografía accidentada, con altitudes que varían de 6500 a 200 msnm. La Cordillera Real forma la mayor parte del límite sudoccidental de la cuenca. El valle del río La Paz, que también es afluente del río Beni, queda a sotavento, lo que explica su aridez, ya que las masas de aire húmedo provenientes de la Amazonía generalmente no pueden superar la barrera formada por los imponentes picos de esa Cordillera (“efecto de barrera orográfica o sombra de lluvia”), que además se encuentran a 200 km de distancia de la llanura amazónica situada al noreste. Es claro que la orografía juega un rol decisivo en el clima e hidrología de la cuenca del río Beni.

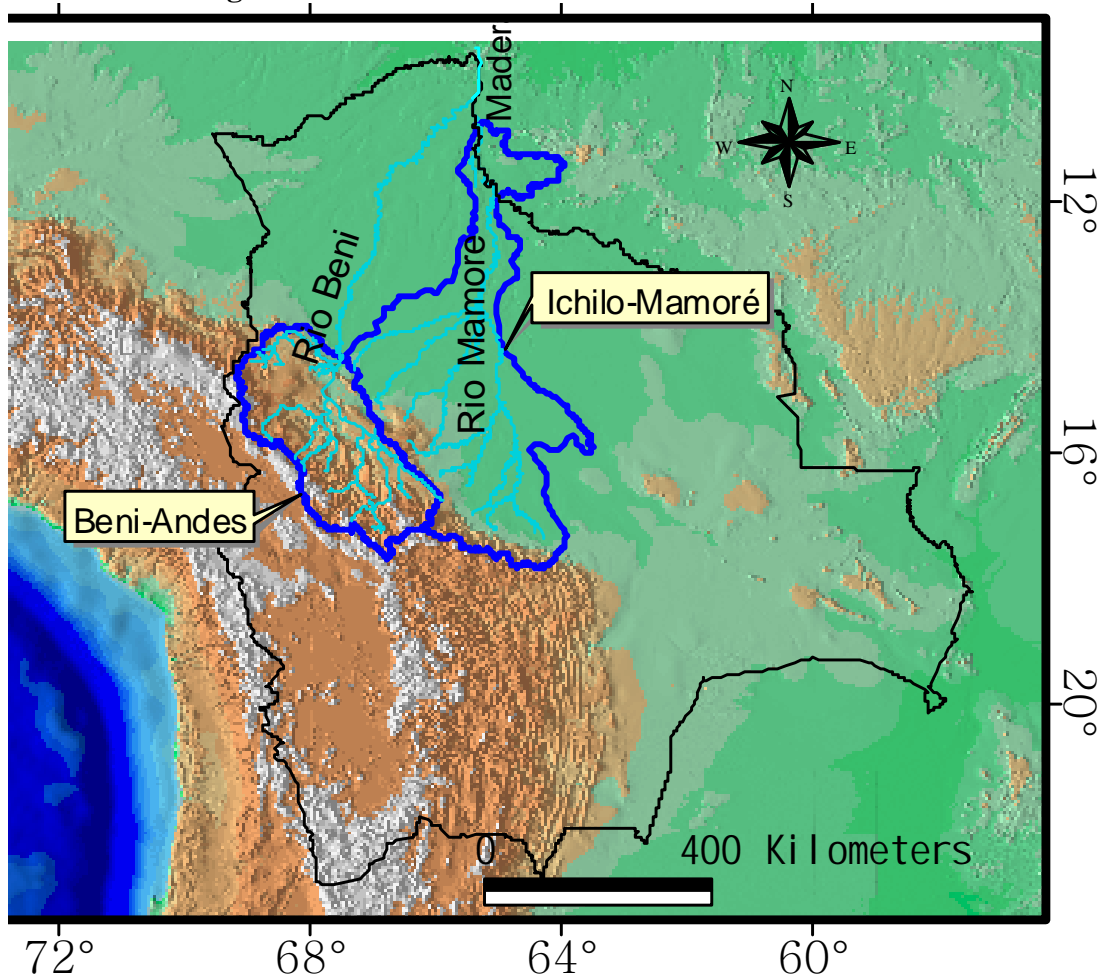
El límite sur de la cuenca Ichilo-Mamoré se halla constituido por la cordillera del Tunari y sus estribaciones orientales que llegan hasta el parque Amboró. Esta cordillera es de altitud considerablemente menor a la Cordillera Real (4600 msnm como máximo), pero las cumbres se encuentran a menos de 50 km de la planicie amazónica (ver figura 4). El límite occidental de la cuenca del Mamoré está formado por una serie de serranías que la separan de la cuenca del río Beni, serranías que en casi toda su longitud tienen altitudes máximas inferiores a 2000 msnm. La mayor parte de la cuenca del Mamoré está ocupada por una llanura de inundación de 100,000 km<sup>2</sup>, una de las más grandes del mundo.

**Los componentes del balance: precipitación y evapotranspiración**

En la región la mayor parte de la precipitación cae durante el verano austral, entre diciembre y marzo, coincidiendo con la inflexión hacia el sur de la Zona Intertropical de Convergencia

(ZITC). Lo esencial del vapor precipitable se origina en el Atlántico, que es reciclado ampliamente por evapotranspiración en la Amazonía y transportado por los vientos alisios del este/noreste. Estos vientos se desvían a lo largo de los Andes siguiendo la dirección sureste de la cadena montañosa. Al mismo tiempo se observa al sur y sobre el Altiplano la formación de un centro de alta presión (“alta de Bolivia”) en la troposfera superior. Durante el invierno este anticiclón desaparece y la ZCIT se mueve hacia el norte, lo que coincide con una menor disponibilidad de agua en la atmósfera. Como consecuencia de este comportamiento estacional y espacial, el vector medio anual de flujo de vapor de agua al pie de Los Andes tiene sentido sur/sureste, o lo que es lo mismo, las masas de aire húmedo ingresan a la región por el norte/noroeste (Zeng, 1999).

**Fig. 4: Las cuencas de los ríos Beni e Ichilo-Mamoré**



Existe una fuerte influencia orográfica en toda la cuenca del río Beni hasta Rurrenabaque y en la parte sur y oeste de la cuenca Ichilo-Mamoré. En la parte andina el relieve, muy complejo, de los valles andinos húmedos (Yungas) y secos, influye decisivamente sobre la circulación del viento, radiación solar y en particular, en la precipitación, con grandes variaciones en distancias cortas.

Para la evaluación de la precipitación se usaron 64 estaciones pluviométricas en la cuenca del Ichilo-Mamoré y 102 en la cuenca del río Beni. Una parte estaban situadas fuera de los límites de cuenca y fueron utilizadas como estaciones de apoyo. La densidad de la red es muy variable: algunas de las subcuencas más grandes y que aportan más agua tienen muy pocas

estaciones. Este es el caso de las subcuencas de los ríos Tuichi, Quiquibey, Santa Elena y Cotacajes en la cuenca del río Beni y las subcuencas de los ríos Ichilo, Isiboro-Sécure, Rápulo, Apere y Yacuma en la cuenca del Mamoré.

Para obtener valores mensuales de precipitación por subcuenca, se utilizó inicialmente polígonos de Thiessen. Posteriormente y por la baja densidad de la red pluviométrica se usaron los resultados del balance hídrico para corregir las estimaciones iniciales, tal como se muestra en la tabla 2 para la subcuenca del río Coroico, donde el factor de corrección fue de 1.67. En casi todos los casos ese valor fue igual o superior a 1, lo que indica que la ubicación actual de las estaciones pluviométricas lleva a una subestimación de la precipitación en el área de estudio, si se usan los métodos tradicionales de cálculo espacial de ese parámetro. El uso de un factor de corrección constante en el tiempo conlleva el supuesto de que todas las estaciones de una subcuenca tienen el mismo comportamiento regional.

**Tabla 2: Estimación de la precipitación media en la cuenca del río Coroico**

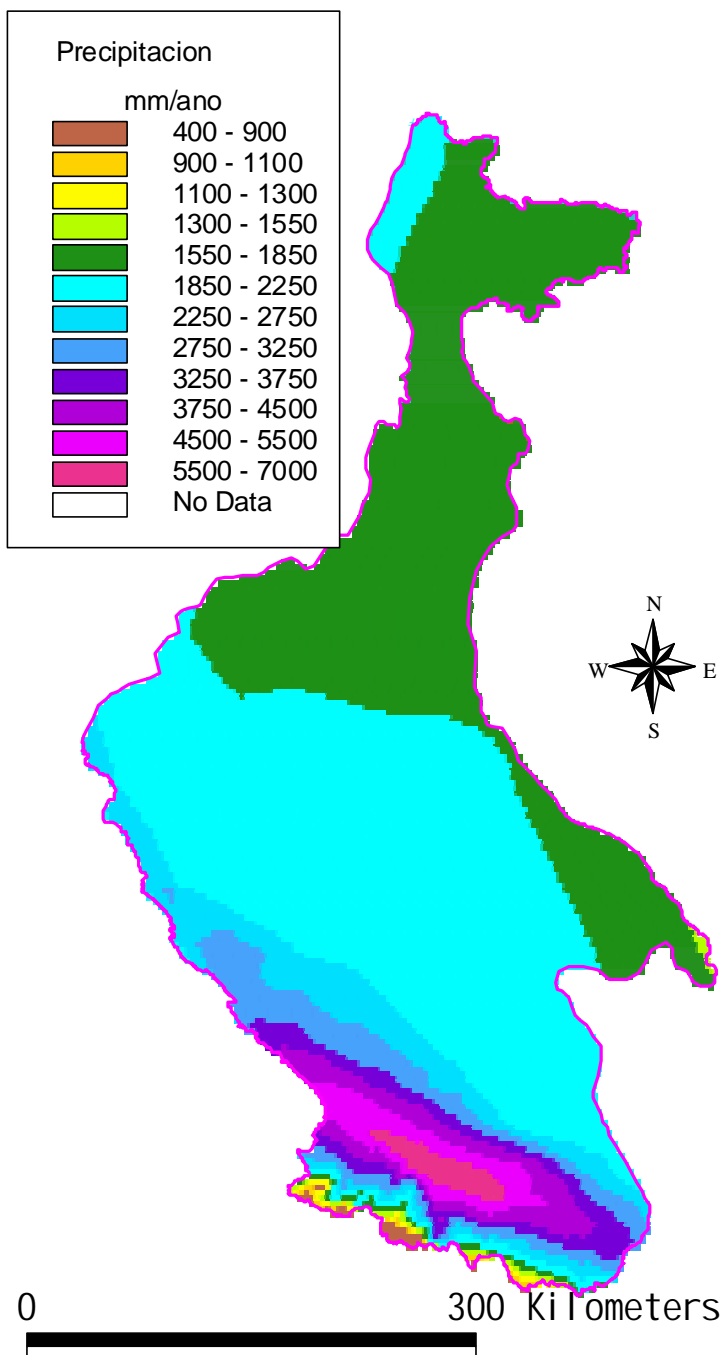
CUENCA	Area km <sup>2</sup>	Precip. (mm)	ETR (mm)	Escorr (mm)	OBSERV
Rio Coroico en Santa Rita de Bs.Aires	4557	2606	1041	1549	FC=1.67
		1560			Thiessen

Si bien los métodos anteriores permiten estimar la precipitación media para una cuenca, la baja densidad de estaciones de medición y la compleja topografía dificultan la evaluación de la distribución espacial de la precipitación al interior de cada cuenca y por consiguiente, la elaboración de mapas de isoyetas que representen adecuadamente esa distribución. Para el presente estudio se recurrió a las siguientes herramientas y fuentes:

- El modelo digital de elevación (el MDE) construido en base a las cartas IGM 1:250,000, que forma parte del Sistema de Información Geográfico del proyecto. El MDE no solo proporciona altitudes, sino una idea completa del relieve (pendientes, orientación, exposición), lo que es muy importante en regiones donde la topografía juega un rol decisivo en el clima (topoclimas).
- Cartografía reciente (Mueller et al, 2002) que asocia la vegetación de los Yungas y Cordillera oriental con la humedad y precipitación.

La experiencia y conocimiento del hidrólogo juegan un rol decisivo en el trazado de mapas de precipitación y en el uso de las herramientas mencionadas. Los mapas de precipitación, sean de isoyetas o mallas (grid), deben cumplir el criterio de que la precipitación media sobre un área determinada (cuenca o subcuenca) sea igual a la que resulta del balance hídrico. La figura 5 muestra el mapa de precipitación media anual obtenido para la cuenca del Mamoré. Una comparación con la figura 4 evidencia que el núcleo o zona de precipitación máxima se encuentra al pie de la cordillera, entre los 250 y 500 msnm. Esta zona corresponde al Chapare, donde se tienen registros de hasta 7000 mm/año, los más altos de todo el país. La orografía es el factor clave para que se produzcan ese máximo. En esta región, el flujo de vapor precipitable proveniente de la llanura amazónica se ve obligado a una ascensión brusca por la fuerte pendiente de la cordillera (hasta 4500 m en menos de 50 km), con la consiguiente condensación a relativamente baja altitud. La precipitación disminuye hacia el sur con el incremento de altitud, así como en dirección a la llanura amazónica al norte.

**Fig. 5: Precipitación anual en la cuenca Ichilo-Mamoré, 1970-93**



La distribución espacial de la precipitación es más compleja en la cuenca del río Beni, debido a una orografía también más compleja. Junto a los valles que quedan en “sombra de lluvia” y reciben bajas precipitaciones, como los de los ríos La Paz, Charazani o Cotacajes, existen varios núcleos de alta precipitación. Se destacan: a) la cuenca del río Santa Elena, próxima al Chapare; b) las cuencas de los ríos Tipuani, Challana, parte alta de la cuenca del río Coroico y media y baja del Mapiri; c) la serranía de Bella Vista, que forma la divisoria de las cuencas de los ríos Coroico y Alto Beni; d) Las serranías que limitan por el norte y este la parte baja y media de las cuencas Tuichi y Quiquibey. En todos estos lugares, la precipitación llega a superar los 2500 mm/año.

La evapotranspiración potencial (ETP), calculada mediante la ecuación de Penman, dio un rango de valores que oscilan entre 700 y 1800 mm/año, según la estación. Los valores más bajos corresponden a estaciones situadas en la cordillera, en zonas con presencia frecuente de niebla orográfica y alta humedad relativa. En la cuenca del Mamoré, los valores más altos de ETP se dan en la llanura al norte (zona verde en la figura 5), donde se producen temperaturas medias entre 26 y 27° C, las más altas del país.

**Escorrentía y balance por cuencas**

Las tablas 3 y 4 muestran los resultados del balance hídrico anual para las principales subcuencas de los ríos Beni-Andes e Ichilo-Mamoré, respectivamente. Las líneas en negrilla representan los valores correspondientes a las subcuencas más grandes, que incluyen varias de las anteriores.

**Tabla 3: Balance hídrico anual de la cuenca andina del río Beni, síntesis 1976-98**

Río/Subcuenca	Area km <sup>2</sup>	Precip. (mm)	ETR (mm)	Escorr (mm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	CE %
Choqueyapu en Achachicala	127	618	378	255	1.0	41
Atén en Angosto Esperanza	3896	2032	865	1164	130.7	57
Mapiri en Angosto Quercano	10785	2078	855	1211	414.5	58
La Paz en Cajetillas	6480	728	428	312	64.5	43
Irpavi en Chicani	146	1090	763	340	1.6	31
Chorocona	248	1631	616	1037	8.3	64
Cotacajes	6157	875	457	394	77.0	45
Entre Cuenca Angosto Inicua Cotacajes	23319	1505	825	678	498.2	45
Entre Cuenca Nube	5046	2760	1065	1675	268.0	61
<b>Entre Cuenca Angosto del Bala</b>	<b>17950</b>	<b>1724</b>	<b>914</b>	<b>805</b>	<b>447.0</b>	<b>47</b>
Miguillas en Humapalca	412	1586	605	987	12.8	62
Unduavi en Sirupaya	248	2347	920	1424	11.2	61
Coroico en Santa Rita de Bs Aires	4557	2606	1041	1549	223.6	59
Tamampaya en Villa Barrientos	1451	2304	933	1379	62.9	60
<b>Kaka en Nube</b>	<b>20389</b>	<b>2365</b>	<b>948</b>	<b>1401</b>	<b>906.0</b>	<b>59</b>
<b>Alto Beni en Inicua</b>	<b>31250</b>	<b>1381</b>	<b>748</b>	<b>631</b>	<b>625.5</b>	<b>46</b>
<b>Beni en Angosto del Bala</b>	<b>69590</b>	<b>1758</b>	<b>848</b>	<b>896</b>	<b>1978.6</b>	<b>51</b>

**Tabla 4: Balance hídrico anual de la cuenca del río Ichilo-Mamoré, síntesis 1970-93**

Río/Subcuenca	Área km <sup>2</sup>	P mm	ETR mm	Escorr mm	Caudal m <sup>3</sup> /s	CE %
Palmar Pampa	339	3580	873	2696	29.0	75
Espiritu Santo en Icona	2340	2502	706	1791	136.1	72
Sehuencas en Ivirizu	409	1280	561	709	9.2	55
Ichilo en Pto Villaroel	7481	3473	1118	2347	564.3	68
Chapare/Chimoré	16964	2768	1005	1760	956.5	64
<b>Mamoré en Muyurina</b>	<b>27565</b>	<b>2946</b>	<b>1002</b>	<b>1964</b>	<b>1714.7</b>	<b>67</b>
<b>Isiboro/Securé</b>	<b>20115</b>	<b>3052</b>	<b>1056</b>	<b>2016</b>	<b>1286.4</b>	<b>66</b>
Mamoré en Pto Varador	47680	2991	1025	1986	3001.5	66
<b>Rapulo-P.Siles</b>	<b>74984</b>	<b>1917</b>	<b>1096</b>	<b>823</b>	<b>1982.8</b>	<b>43</b>
Mamoré en Pto Siles	122664	2330	1069	1273	4988.2	55
Área confluencia	4079	1591	869	731	94.6	46
<b>Mamoré conf. Iténez</b>	<b>126743</b>	<b>2307</b>	<b>1063</b>	<b>1240</b>	<b>5078.7</b>	<b>54</b>

Fuente: Elaboración propia

ETR=Evapotranspiración real, Escorr=Lámina de escurrimiento, CE=coeficiente de escorrentía

La tabla 5 compara los resultados a nivel anual obtenidos en el presente Balance, con los obtenidos en el Balance Hídrico de 1992 (Roche et al), para dos cuencas representativas. Se

observan diferencias significativas para el área y los parámetros del balance. La diferencia de áreas se explica por el hecho de que las cuencas del Balance de 1992 se delimitaron en mapas de escala 1:1,000,000, por lo que es lógico esperar menos precisión que el trabajo con cartas escala 1:250,000 del presente balance. El considerable incremento en la escorrentía se debe también a la mejor información de campo y al análisis crítico más cuidadoso de las estaciones hidrométricas. El aumento en la estimación de ETR tiene como principal causa el uso de la ecuación de Penman para estimar ETP en el presente Balance, frente al uso de la ecuación de Thornwaite en el anterior. El aumento en la estimación de la precipitación se debe al cálculo más elaborado de este parámetro, descrito anteriormente. Es consecuencia indirecta del incremento en las láminas de escorrentía y ETR. El efecto de que los periodos de análisis de los Balances no sean iguales tuvo un efecto menor. Un análisis preliminar de las series en las estaciones pluviométricas de registro más largo mostró que la precipitación media del periodo 1976-98 en la cuenca del río Beni fue ligeramente inferior a la del periodo 1968-82 usando en el primer Balance. Ocurre lo opuesto para el periodo 1970-93 en la cuenca del río Mamoré.

**Tabla 5: Comparación de resultados del Balance Hídrico**

CUENCA	Area km2	Precip. (mm)	ETR (mm)	Escorr (mm)	Caudal (m3/s)	OBSERV
Rio Coroico en Santa Rita de Bs.Aires	4557	2606	1041	1549	224	1976-98
	4660	1886	817	1069	158	BH(1992)
Rio Beni en Angosto del Bala	69590	1758	848	896	1978	1976-98
	67540	1615	808	807	1726	BH(1992)

La tabla 6 muestra resultados medios mensuales para dos subcuencas ejemplo que pertenecen a la cuenca del Mamoré. Como en ambos casos la precipitación media supere a la ETP todos los meses del año, la ETP debería ser igual a la ETR. El hecho de que no sea así es resultado indirecto de la modelación: se trabajó con series de datos de varios años de duración, donde existen varios meses en que la precipitación fue inferior a la ETP, en los que faltó agua para la evaporación.

**Tabla 6: Balance hídrico medio mensual en dos cuencas ejemplo**

Ichilo en Puerto Villaroel

Area (Km<sup>2</sup>) 7481

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
P (mm)	156	232	306	413	486	462	404	264	280	187	132	152	3473
ETR (mm)	86	98	109	112	110	110	101	88	79	63	75	87	1118
Q (m <sup>3</sup> /s)	250	365	517	790	997	977	852	551	572	396	254	252	564
Q (mm)	87	126	179	274	346	339	295	191	198	137	88	87	2347

Chapare/Chimoré

Area (Km<sup>2</sup>) 16964

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
P (mm)	113	170	278	373	446	364	329	178	180	123	92	122	2768
ETR (mm)	80	93	101	108	97	98	89	85	63	55	63	75	1005
Q (m <sup>3</sup> /s)	433	556	983	1478	1964	1607	1446	744	767	576	437	487	957
Q (mm)	66	85	150	226	300	246	221	114	117	88	67	74	1754
ETP (mm)	91	108	117	113	97	98	89	85	63	55	63	79	1057

ente: Elaboración propia

Fu

## **Conclusiones**

La hipótesis de partida de que se puede determinar la oferta de agua a nivel mensual mediante el balance hídrico de cuenca, ha sido confirmada por los resultados obtenidos en el proyecto. En varios casos en que el número de estaciones de medición en una cuenca era insuficiente, el balance hídrico ha permitido además la evaluación indirecta de la precipitación, al responder a la interrogante de qué cantidad de lluvia se requiere para que se produzca una determinada escorrentía a la salida de una cuenca. Para la cuenca del río Beni, los datos presentados sugieren que las estaciones están ubicadas de tal manera que no representan la pluviometría media en la cuenca, por lo que la aplicación de métodos tradicionales de evaluación espacial de este parámetro lleva a su subestimación.

Ante las deficiencias de la red meteorológica, el uso de información cartográfica (mapas temáticos, modelo digital de elevación) y de teledetección demostró ser de gran utilidad, decisivo en varios casos. Todo esto valida la decisión inicial de implementar un Sistema de Información Geográfico, que además ha tenido otras muchas aplicaciones prácticas, como la delimitación de cuencas y la generación de nuevos mapas hidrológicos y de isolíneas.

La decisión de implementar y validar un modelo matemático de balance hídrico se ha visto plenamente justificada al haberse cumplido el objetivo inicial de completar y ampliar las series de caudales. Pero se observan otras ventajas y potencialidades, entre ellas una visión más integral y completa del funcionamiento hidrológico de una cuenca y de la influencia que tienen las características físicas sobre ese funcionamiento.

La heterogeneidad del clima y la hidrología en el área de estudio evidencia tanto la complejidad de la circulación atmosférica regional, como la influencia de una orografía aún más compleja. Bajo estas condiciones, una red hidrometeorológica suficientemente densa y bien diseñada es indispensable y, como se ha demostrado en países vecinos, es una inversión que tiene un retorno garantizado.

## **Referencias**

- Espejo, J.L. 2002. WinSimula, modelo concentrado de balance hídrico, Manual del usuario. La Paz. 8 p.
- Mueller, R., Beck, S., Lara, R. 2002. Vegetación potencial de los bosques de Yungas en Bolivia, basada en datos climáticos. Ecología en Bolivia, Vol. 37 (2), pp. 5-14.
- Roche, M.A. et al. 1992. Balance Hídrico Superficial de Bolivia. Publicación PHICAB, La Paz, 28 p.
- Zeng, N. 1999. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrological cycle. Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. D8, pp.9097-9106.

## **Índice**

Resumen

Antecedentes y objetivos

Alcance y metodología

Resultados

    Las cuencas de los ríos Beni e Ichilo-Mamoré

    Los componentes del balance: precipitación y evapotranspiración

    Escorrentía y balance por cuencas

Conclusiones

Referencias